

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ АСТРОНОМИИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

На правах рукописи

УДК 524.523

Сергеева Анна Ивановна

**Наблюдения и моделирование молекулярного состава окрестностей
молодых массивных звезд**

01.03.02 — астрофизика и звёздная астрономия

**Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук**

Научный руководитель

д.ф.-м.н. Д.З. Вибе

Москва – 2025

Оглавление

Введение	4
 Глава 1. Анализ наблюдений линейных молекул вокруг областей ионизованного водорода S255 и S257	 14
1.1 Введение	14
1.2 Объект исследования: области ионизованного водорода S255 и S257 и молекулярное облако между ними.	16
1.3 Наблюдательные данные	19
1.4 Расчёт лучевых концентраций и обилия молекул	20
1.4.1 Сверхтонкое расщепление молекулы этинила C_2H .	24
1.4.2 Оптически толстое излучение HCN	24
1.4.3 Вращательные диаграммы для CH_3CCH	27
1.5 Доля дейтерия	31
1.6 Анализ наблюдений	31
1.7 Обсуждение результатов	56
1.8 Заключение по Главе 1	59
1.9 Положения, выносимые на защиту по результатам первой главы	60
 Глава 2. Моделирование окрестностей областей HII S255-S257	 62
2.1 Введение	62
2.2 Химическая модель	62
2.3 Астрохимическое моделирование этинила C_2H вокруг областей S255 и S257	67

2.4	Реакции с возбужденным молекулярным водородом в химической модели областей S255–S257	70
2.4.1	Населенности уровней молекулы водорода в объектах S255-S257	70
2.4.2	Результаты химического моделирования	74
2.5	Обсуждение	78
2.6	Заключение по Главе 2	80
2.7	Положения, выносимые на защиту по результатам второй главы	81
	Заключение	82
	Литература	84

Введение

Одной из актуальных проблем в астрофизике на сегодняшний день является понимание процесса звездообразования, в частности образования массивных звезд. Этот вопрос так и остается не изученным до конца. Из-за сложностей в части создания моделей, которые будут наилучшим образом описывать физические условия и воспроизводить химические процессы в областях звездообразования.

Как известно, звезды образуются в плотных холодных молекулярных облаках под действием гравитационных сил. Звезды начинают свое формирование с фрагментации, которая возникает из-за гравитационной неустойчивости по отношению к малым линейным возмущениям плотности, превышающим длину волны Джинса [1]:

$$\lambda_J \approx \frac{c_s}{\sqrt{\frac{\pi}{G\rho_0}}}, \quad (0.1)$$

Звездообразование начинается в молекулярных облаках под воздействием процессов, стимулирующих гравитационное сжатие облаков. К таким процессам относят: ударные волны от вспышек сверхновых звезд; фронты ионизации; волны плотности в галактиках; столкновения облаков; звездный ветер [2].

Межзвездная среда является одной из главных составляющей галактик и состоит из нескольких компонентов. Основной составляющей межзвездной среды является межзвездный газ, который на 90 % состоит из атомов водорода, равномерно перемешанных с межзвездной пылью, которая составляет 1 % от массы межзвездного вещества. Также к компонентам межзвездной среды относят космические лучи, межзвездные магнитные

поля [2]. Межзвездная среда имеет сложную структуру и находится в различных физических состояниях: зоны ионизованного водорода (зоны HII), корональный газ, облака нейтрального водорода (зоны HI), молекулярные облака, глобулы, гигантские молекулярные облака (ГМО), мазеры.

ГМО представляют собой плотные холодные ($10\text{ K} - 20\text{ K}$) облака молекулярного водорода больших размеров ($\approx 40\text{ пк}$) и массы (более $10^5 M_{\odot}$) [1]. Молекулярные облака меньшей массы образуют плотные глобулы (например, Конская Голова или Угольный Мешок) с массами несколько сотен $M_{\odot}$. В некоторых из этих глобул обнаружены признаки звездообразования. Также известно, что молекулярные облака отражают свойства галактики, в которой они находятся. Так, например, для изучения вопросов звездообразования в других галактиках необходимо проводить наблюдения плотного газа, индикаторами которого являются молекулы HCN и HCO^+ [3]. Также авторы [3] упоминают гипотезу о том, что локальные сверхплотности газа в молекулярных облаках, а не определённый порог плотности, являются основным фактором для формирования звёзд.

В молекулярных облаках межзвездный газ находится в большей части в молекулярном состоянии. Молекулярные облака имеют разнообразный молекулярный состав. На сегодняшний день обнаружено более 300 различных молекул [4]. Обнаружены простые двухатомные и трёхатомные нейтральные молекулы, молекулярные радикалы и ионы, а также сложные молекулы, которые состоят из десяти и более атомов, включают в себя соединения с длинными ненасыщенными цепочками атомов углерода, а также насыщенные органические соединения, которые можно считать отправной точкой для возможной предбиологической химии. Химические реакции, описывающие пути образования и разрушения различных соединений, сильно зависят от физической эволюции процессов звездообразования, таких как изменения плотности, температуры и интенсивности излучения [5].

Также остаются открытыми вопрос образования малоатомных углеводородов, к которым относится молекула этинила C_2H и вопрос обнаружения такого элемента как сера (S) в молекулярных облаках. Авторы в работе [6] рассматривают предположение, что полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) могут являться скрытым резервуаром серы. Также разрушение ПАУ под действием УФ-излучения может быть источником образования C_2H [7] в областях фотодиссоциации (ФДО) некоторых объектов. Поэтому в качестве задач для исследования этих вопросов рассматривается обработка наблюдательных данных и их использование при проведении астрохимического моделирования для определения физических параметров, кинематики, структуры и химических процессов в объекте исследования.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, двух глав и заключения. Число страниц в диссертации 91, рисунков 33, таблиц 5. Список литературы содержит 69 наименований.

Во **Введении** представлен краткий обзор предмета исследования и содержания диссертационной работы. Описаны актуальность диссертационной работы, её цели и задачи, новизна полученных результатов, а также их научная и практическая значимость. Дана информация об апробации результатов, научных публикациях по итогам исследований и вкладе автора в работу.

В **Главе 1** представлены результаты наблюдения линейных молекул в направлении на объект исследования и проведен анализ наблюдательных данных. Получены значения лучевых концентраций и обилий обнаруженных линейных молекул.

В разделе 1.1 обозначен актуальный вопрос содержания малоатомных углеводородов в различных ФДО. В разделе 1.2 описывается объект

исследования. В разделе 1.3 описаны физические условия, в которых были проведены наблюдения, а также значения параметров телескопа во время проведения наблюдений. Также описаны позиции, в направлении на которые были проведены наблюдения. Далее проведен расчет лучевых концентраций и содержаний обнаруженных линейных молекул (раздел 1.4) с использованием различных методов, учитывающих особенности излучения молекул (подразделы 1.4.1, 1.4.2 и 1.4.3). Определена доля дейтерия (в разделе 1.5), и проведен анализ полученных молекулярных спектров (раздел 1.6).

В разделе 1.8 перечислены основные итоги обработки молекулярных спектров и расчета содержания этих молекул в исследуемом объекте.

В **Главе 2** представлены результаты астрохимического моделирования линейных молекул вкрух областей НII и в молекулярном облаке между ними.

В разделе 2.1 описана актуальность изучения химического состава областей звездообразования, а также проблемы исследования химических процессов в молекулярных облаках. В разделе 2.2 описывается используемая астрохимическая модель, а также физические условия в молекулярном облаке между областями ионизованного водорода S255–S257 и параметры моделирования. Раздел 2.3 посвящен результатам моделирования этинила C_2H : предварительный подбор параметров моделей, определение согласия модельных и наблюдаемых лучевых концентраций. Также в разделе 2.4 обсуждается влияние реакций с молекулой водорода в возбужденном состоянии на содержание этинила. В подразделе 2.4.1 проведена оценка населенности уровней молекулы водорода в объектах S255-S257, и показано, что вклад возбужденных вращательных состояний существенен при значениях $G = 100, 1000$. В подразделе 2.4.2 показаны результаты астрохимического моделирования этинила с учетом реакций с возбужденной молекулой водорода. В разделе 2.5 обсуждаются результаты проведенного астрохими-

ческого моделирования. Раздел 2.6 посвящен итогам проведенного моделирования.

В **Заключении** представлены основные результаты диссертационной работы. Даны рекомендации для дальнейшего развития темы диссертации.

Цели диссертационной работы

1. Наблюдения и моделирование молекулярного состава окрестностей молодых массивных звезд.
2. Выявление химических процессов, влияющих на состав молекулярных облаков, а также на содержание предбиологических молекул.

Задачи

1. Обработка наблюдательных данных линий излучения линейных молекул.
2. Определение лучевой концентрации и относительных содержаний линейных молекул в направлении на области ионизованного водорода Sh2-255 – Sh2-257 (далее S255-S257) и молекулярное облако между ними.
3. Анализ структуры областей ионизованного водорода S255-S257 и молекулярного облака между ними.
4. Проведение астрохимического моделирования с целью получения результатов, близких к наблюдательным данным по содержанию линейных молекул в газовой фазе.

Научная новизна

1. В данной диссертационной работе впервые оценены лучевые концентрации и обилия молекул C_2H , HCN , OCS , HCS^+ , $HN^{13}C$, $HC^{18}O^+$, ^{34}SO , DCO^+ , CS , $C^{34}S$, DCN , $HNCO$, CH_3CCH в направлении на области ионизованного водорода S255-S257 и молекулярное облако между ними.
2. Впервые оценена доля дейтерия в молекулах DCN и DCO^+ в направлении на молекулярное облако между областями HII S255-S257.
3. Впервые проведено астрохимическое моделирование этинила C_2H для областей ионизованного водорода S255-S257 и их окрестностей.
4. Показано, что реакции с молекулярным водородом в возбужденном состоянии могут оказывать влияние на относительное содержание этинила в ФДО областей S255-S257.

Научная и практическая значимость

Разработана методика анализа наблюдений областей взаимодействия молекулярных облаков с массивными молодыми звездами.

Результаты представляют интерес для специалистов в области изучения межзвездной среды и процессов звездообразования.

Методология и методы исследования

Для обработки наблюдательных данных использовался программный пакет CLASS/GILDAS. При расчете лучевых концентраций молекул использовались методики расчета переноса излучения, метод вращательных диаграмм и метод расчета сверхтонкой структуры расщепления, а также процедура hfs для анализа отношений интенсивностей между линиями мультиплета.

Задачи численного моделирования решались при помощи астрохимического кода Presta [8].

Достоверность представленных результатов

Достоверность полученных в работе лучевых концентраций и обилий молекул подтверждается общепринятыми методами обработки и исследований молекулярных спектров, а также используемыми в расчетах общепринятыми молекулярными данными из каталогов CDMS и JPL.

Достоверность представленных в работе результатов моделирования подтверждается сравнением с наблюдательными данными.

Также достоверность полученных результатов подтверждается их успешным представлением на научных конференциях и семинарах.

Результаты опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Личный вклад автора

Автор лично участвовал в постановке задач, обработке наблюдательных данных, определении физических параметров объекта исследования, определении лучевых концентраций и обилий молекул C_2H , HCN , OCS , HCS^+ , $HN^{13}C$, $HC^{18}O^+$, ^{34}SO , DCO^+ , CS , $C^{34}S$, DCN , $HNCO$, CH_3CCH , написании модуля кода, проводил расчёты и обрабатывал результаты численных экспериментов, совместно с соавторами участвовал в обсуждении результатов и формулировке выводов.

В частности, автором:

1. Обработаны спектры молекул C_2H , HCN , OCS , HCS^+ , $HN^{13}C$, $HC^{18}O^+$, ^{34}SO , DCO^+ , CS , $C^{34}S$, DCN , $HNCO$, CH_3CCH с помощью программного пакета CLASS/GILDAS.

2. Рассчитаны лучевые концентрации и обилия молекул C_2H , HCN , OCS , HCS^+ , $HN^{13}C$, $HC^{18}O^+$, ^{34}SO , DCO^+ , CS , $C^{34}S$, DCN , $HNCO$, CH_3CCH .
3. Проведено астрохимическое моделирование кодом Presta молекулярного состава исследуемого объекта.
4. Проведена оценка влияния возбужденного состояния молекулы водорода H_2 на содержание этинила C_2H .
5. Детально исследован широкий диапазон параметров в моделировании химического состава областей звездообразования кодом Presta, среди них определены оптимальные.
6. Дано описание ключевых химических процессов, влияющих на молекулярный состав исследуемого объекта и содержание этих молекул.
7. Написан основной текст работ [A1], [A2] и [B1].

Положения, выносимые на защиту

- Показано, что наибольшее значение лучевых концентраций молекул достигается в направлении на центр молекулярного облака, далее оно уменьшается плавно в обе стороны к ионизирующим звездам. Показано, что наибольшее обилие молекул (кроме этинила C_2H) достигается в направлении на центр молекулярного облака, т. е. в молекулярном газе. Значения обилия этинила, напротив, минимальны в направлении на центр молекулярного облака (60×10^{-10}), а в направлениях на ионизирующие звезды становятся больше примерно в два раза, что говорит о том, что этинил также активно образуется в ФДО.
- При помощи анализа формы профилей линий показано, что в молекулярной обложке присутствует несколько кинематических компонент,

которые разделяются на луче зрения по мере приближения к ионизирующим звездам. Такими компонентами могут быть передняя и задняя стенки областей НII. Обнаружение таких молекул как C_2H , HCN и CS в направлении на области НII говорит о наличии также молекулярного газа и областей ФДО в передней и задней стенках этих областей.

- При помощи астрохимического моделирования этинила вокруг областей S255 и S257 показано, что при варьировании таких параметров модели, как средняя интенсивность УФ-излучения, возраст молекулярного облака, температура газа и пыли можно получить соответствие с наблюдаемыми значениями лучевых концентраций этинила в пределах порядка величины.
- Показано, что при высоком поле излучения и при небольших значениях $A_V \leq 1$ учет реакций с молекулами водорода, находящимися в возбужденном состоянии, приводит к существенному (как минимум на порядок величины) увеличению модельного содержания этинила.

Апробация

Результаты диссертации были представлены на конференциях и семинарах в качестве устных докладов:

1. Конференция молодых учёных ИНАСАН (ИНАСАН, Москва, 05 ноября 2020). Доклад "Этинил вокруг областей НII S255 и S257";
2. Научный совет Общей физики и астрономии РАН, секция 4: "Межзвездная среда и Звездообразование". Семинар по межзвёздной среде. Доклад "Межзвездные молекулы вокруг областей НII S255 и S257" (онлайн, 31 марта 2021);

3. Симпозиум IAU Symposium 362 (онлайн, 8–12 ноября 2021). "Linear molecules around the HII regions Sh2-255 and Sh2-257";
4. Конференция молодых учёных ИНАСАН (ИНАСАН, Москва, 15 ноября 2022) Доклад "Реакции с возбужденным молекулярным водородом в химической модели областей S255-S257".

Публикации по теме диссертации

Основные результаты работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях, из них 2 — в журналах, рекомендованных ВАК.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

- [A1] **Buslaeva A. I.**, *Kirsanova M. S.*, *Punanova A. F.* Ethynyl Around the HII Regions S255 and S257 // *Astronomy Reports*. — 2021. — V. 65. — No. 6. — Pp. 488-497.
- [A2] *Looveren G. Van*, *Kochina O. V.*, *Wiebe D. S.*, **Buslaeva A. I.** DR21(OH) SUB-CORES: Inferring an Evolutionary Status Using the Prestaline Tool // *Astronomy Letters*. — 2022. — V. 48. — No. 9. — Pp. 517-529.

Другие публикации автора по теме диссертации

- [B1] **Buslaeva A. I.**, *Wiebe D. S.* Reactions with excited molecular hydrogen in the chemical model of S255–S257 regions // *INASAN Science Reports*. — 2023. — V. 8. — No. 1. — Pp. 8-15.

Глава 1. Анализ наблюдений линейных молекул вокруг областей ионизованного водорода S255 и S257

1.1. Введение

Данная глава посвящена анализу молекулярного состава и оценке параметров, таких как температура, плотность газа и обилие молекул, межзвёздного вещества вокруг областей ионизованного водорода S255 и S257 и в молекулярном облаке между ними из комплекса звёздообразования S254-S258.

Вопрос образования малоатомных углеводородов, к которым относится молекула этинила C_2H , остается открытым. На данный момент известно два пути образования малоатомных углеводородов в молекулярных облаках - это восходящая ветвь и нисходящая ветвь. Так называемая восходящая ветвь (bottom-up) межзвездной химии требует протекания реакций на поверхности межзвездных пылинок, служащих зачастую катализатором реакций. На периферии областей НII, в фотодиссоциационных областях (ФДО), где физические и химические процессы в межзвездном веществе обуславливаются поглощением ультрафиолетового излучения с энергией меньше потенциала ионизации водорода (УФ, от 4 до 13.6 эВ), происходит обратный процесс – разрушение длинных углеродных цепочек, так называемая нисходящая ветвь межзвездной химии (top-down, [10, 11]). Важно отметить, что основные звенья – молекулы и радикалы – в восходящей и нисходящей ветвях межзвездной химии разные [9]. В то время как начальные стадии восходящей ветви достаточно хорошо изучены (например, цепочка образования метанола из молекулы CO на пыли, [12]), отправная точка нисходящей ветви и ее основные звенья неизвестны, кроме подтвер-

жденного образования фуллеренов [13] как продукта фотодиссоциации полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). Считается, однако, что нисходящая ветвь тесно связана с воздействием УФ-излучения на ПАУ, углеводородные пылинки и длинные углеродные цепочки, образованные в атмосферах красных гигантов [14–16].

Разрушение ПАУ под действием УФ-излучения [17, 18] может стать причиной интересных особенностей молекулярного состава газа в ФДО. Например, в работе [14] было обнаружено высокое содержание малоатомных углеводородов C_2H , $c-C_3H_2$, C_4H в направлении на освещенный край туманности Конская Голова. Авторы не смогли объяснить образование углеводородов при $A_V = 0.1$ с использованием модели ФДО и высказали предположение об образовании малоатомных углеводородов в результате фоторазрушения ПАУ. В более поздней работе [19] была предпринята еще одна попытка моделирования углеводородов в Конской Голове с учетом пребывания газа и пыли в ФДО на стадии темного облака перед началом облучения ультрафиолетом звезды σ Ориона. Этим авторам удалось объяснить распределение обилия молекул везде, кроме освещенного края Конской Головы. В работе [15] сообщается об избытке содержания ионов $l-C_3H^+$ в направлении на освещенный край Конской Головы по сравнению с результатами астрохимического моделирования.

Интересно, что Конская Голова остается единственной ФДО, где обилие малоатомных углеводородов не было объяснено существующими астрохимическими моделями. В ФДО Барьер Ориона (Orion Bar PDR), вблизи туманности Ориона, высокое обилие малоатомных углеводородов было объяснено с помощью высокотемпературных химических реакций с участием возбужденных молекул водорода [20, 21]. В работе [22] так же не было обнаружено расхождений между наблюдаемыми обилиями C_2H и результатами астрохимического моделирования в ФДО М8. В теоретической работе [7] было показано, что в результате фоторазрушения ПАУ происхо-

дит эффективное образование C_2H из молекул ацетилена (C_2H_2) в Барьере Ориона, а в Конской Голове этот процесс практически незначим по сравнению с газофазными цепочками образования C_2H , берущими начало от ионизованного углерода C^+ . Данные экспериментов относительно эффективности образования ацетилена в результате фоторазрушения ПАУ противоречивы, некоторые авторы считают, что продуктами фоторазрушения ПАУ являются атомы C , H , а также молекулы H_2 , см., например, [23–25].

На снимках, полученных в инфракрасном диапазоне космическими телескопами, области НII выглядят кольцевыми туманностями – проекциями сферических оболочек либо кольцевых структур на картинную плоскость [26, 27]. Хотя на сегодняшний день каталогизировано нескольких тысяч инфракрасных кольцевых туманностей, вокруг областей НII [28, 29] хорошо изученных ФДО не больше десяти. Налицо недостаток статистических данных об особенностях распределения частиц ПАУ по размерам и о содержании углеводородов в ФДО. Причем для сравнения с результатами теоретического моделирования необходимы прежде всего профили обилия молекул, построенные от источника ионизации вглубь молекулярного облака.

1.2. Объект исследования: области ионизованного водорода S255 и S257 и молекулярное облако между ними.

Комплекс S254-S258 (см. рисунок 1.1) является массивным комплексом звездообразования и занимает на небесной сфере область размером $25' \times 20'$ ([34]). Комплекс расположен на расстоянии примерно 1.78 кпк от Солнца ([31]).

Впервые данный комплекс был описан Шарплессом в 1959 г ([30]) как группа пяти областей ионизованного водорода (далее - НII).

В дальнейшем были идентифицированы ионизирующие звёзды четырёх областей S254-S257. Все они относятся к звездам главной последова-

тельности и спектральному классу В, кроме звезды области S254 – у нее спектральный класс – О.

Ионизирующие звезды исследуемых областей HII S255 и S257 LS 19 (S255) и HD 253327 (S257) имеют спектральные классы B0V ([32]) и B0.5V ([33]), соответственно.

Физический размер каждой из областей HII составляет около 1.3 пк. Области HII S255 и S257 расположены в одной плоскости. Между областями S255 и S257 расположено большое молекулярное облако ([33], [40]).

Большая часть исследований комплекса была сосредоточена на молодом массивном скоплении S255-2, расположенном между областями HII S255 и S257.

Примерно в 1' к северу от этого скопления находится дальний ИК-источник, обнаруженный в 1984, который называется S255N. Этот источник также связан с индикаторами звездообразования массивных звезд.

В работе [34] авторы описали структуру данного объекта по данным наблюдений на телескопе *Spitzer* и оценили возраст ионизирующих звезд областей S255 и S257 как $1,5 \times 10^6$ лет и $1,6 \times 10^6$ лет.

На рисунке 1.1 справа показано пространственное распределение всех источников звездообразования (с ИК избытком). Источники, принадлежащие к данному комплексу, показаны черными и красными точками.

Изолированные источники показаны черными знаками плюс.

Области HII показаны красным цветом. Новые скопления помечены синим цветом.

Видно большое количество молодых звездных объектов между областями S255 и S257, т. е. окрестности этих областей являются областями активного звездообразования [34] – [37].

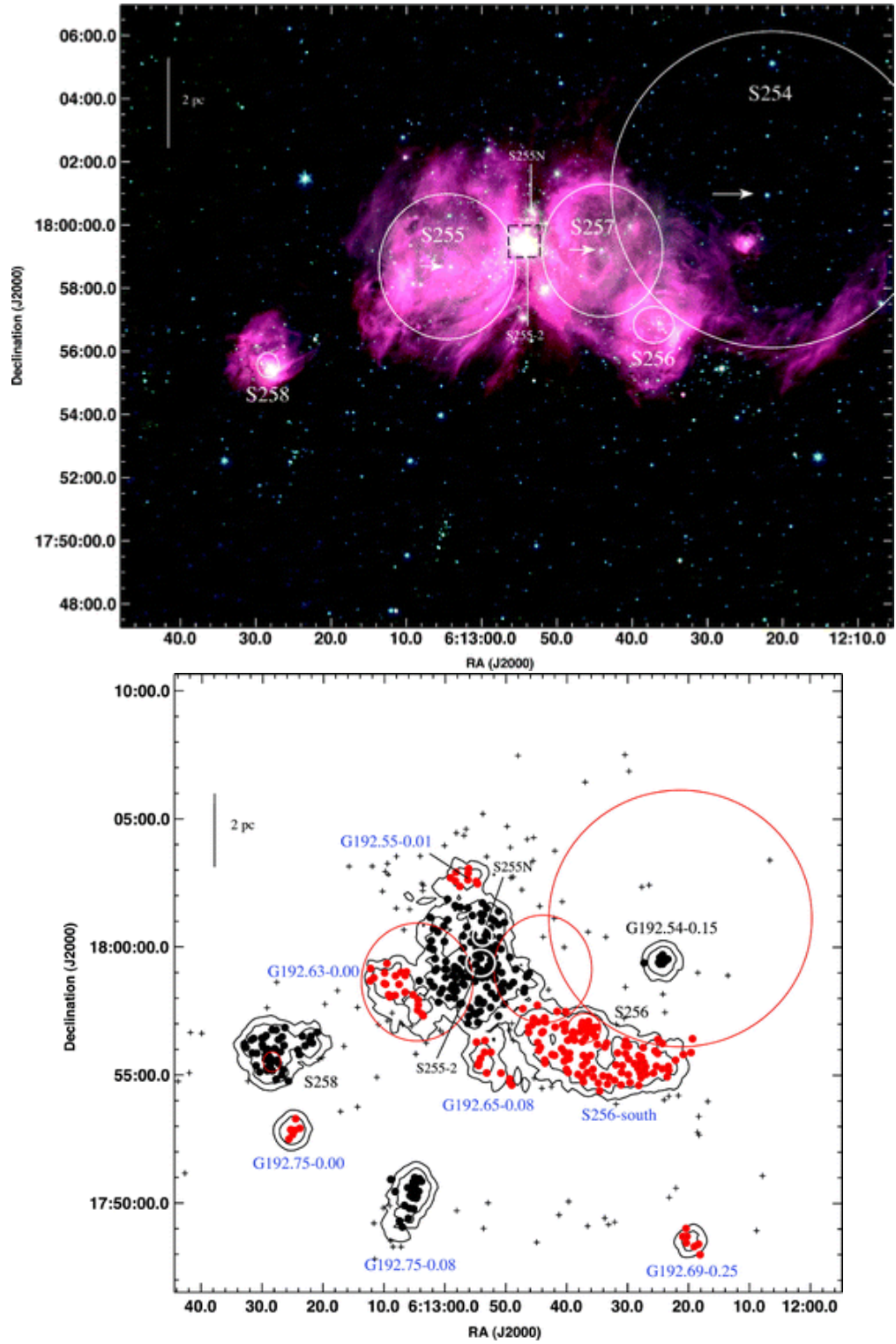


Рис. 1.1. Комплекс звездообразования S254-S258 [34].

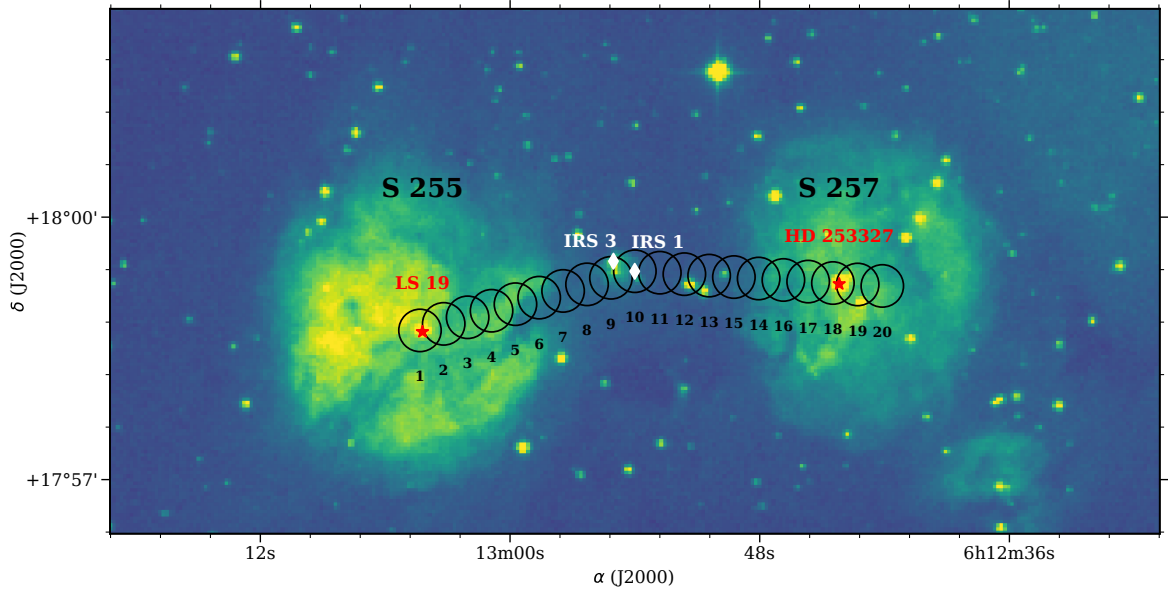


Рис. 1.2. Оптическое изображение областей HII S255 и S257 из обзора DSS, фильтр POSS2 Red. Позиции, в которых проводились наблюдения, показаны пустыми кружками, размер которых соответствует диаграмме направленности телескопа на частоте 87 ГГц (28"). Ионизирующие звезды областей HII показаны красными символами. Белыми символами показаны ИК-источники S255 IRS1 и S255 IRS3.

1.3. Наблюдательные данные

Наблюдения были проведены Кирсановой М. С. 19–21 августа 2018 г. на телескопе IRAM 30 m с помощью приемника EMIR 090 и спектрографа FTS 50 в режиме полной мощности.

В режиме частотной модуляции было проверено, что в OFF-позиции (J2000 $\alpha=06^h12^m54.0^s$, $\delta=18^\circ09'23.0''$) отсутствует излучение интересующих линий.

Наблюдения проводились точно вдоль прямых, соединяющих инфракрасный источник S255 IRS1, который находится в молекулярном облаке между областями HII (J2000 $\alpha=06^h12^m54^s$, $\delta=17^\circ59'23''$) с ионизирующими звездами каждой из областей HII: LS 19 (J2000 $\alpha=06^h13^m04.2^s$, $\delta=17^\circ58'41.5''$, и HD 253327 (J2000 $\alpha=06^h12^m44.2^s$, $\delta=17^\circ59'14.3''$) см. рисунок 1.2.

Размер диаграммы направленности на частоте 87.4 ГГц составил $28''$, наблюдения проводились вдоль направлений, соединяющих S255 IRS 3 и ионизирующие звезды, с шагом $14''$.

Спектральное разрешение составило 50 кГц, что на частоте 87.4 ГГц соответствует 0.17 км/с. Наблюдения проводились в удовлетворительных погодных условиях, количество осаждаемого водяного пара $\text{pwv}=7\text{--}13$ мм.

Шумовая температура системы была на уровне 100 К. Шкала интенсивности была переведена в единицы температуры основного лепестка диаграммы направленности (T_{mb}) с учетом эффективности антенны $F_{\text{eff}} = 0.95$, $B_{\text{eff}} = 0.81$

Время накопления сигнала в каждой точке было 7.7^m , что позволило достичь чувствительности 0.05 К в единицах T_{mb} .

В результате проведенных наблюдений были получены линии молекул C_2H , HCN , OCS , HCS^+ , HN^{13}C , HC^{18}O^+ , ^{34}SO , DCO^+ , CS , C^{34}S , DCN , HNCO , CH_3CCH , параметры переходов которых представлены в таблице 1.1.

Обработка и анализ спектров (учет эффективности антенны, вычитание базовой линии, аппроксимация профилей функцией Гаусса) была проведена с помощью пакета CLASS/GILDAS

1.4. Расчёт лучевых концентраций и обилия молекул

Для того, чтобы определить обилие молекул, мы использовали данные о лучевой концентрации вещества, выраженной в числе молекул водорода на луче зрения (N_{H_2}) [38] и температуре пыли (T_{dust}), полученной в результате обработки данных с телескопа *Herschel* в проекте Hi-GAL [39].

Для определения лучевой концентрации молекул было принято предположение об ЛТР. При условии оптически тонкого излучения в линиях справедливо выражение (1.1). Кроме того, было использовано условие Релея – Джинса $h\nu \ll kT$, которое удовлетворяется при наблюде-

Таблица 1.1. Параметры переходов молекул в соответствии с каталогами CDMS и JPL (для молекулы HN^{13}C).

Молекула	Переход	Частота [МГц]	E_u/k [K]	g_u	S_{ul}	A_{ul} 10^{-5} [1/c]
C_2H	$1_{3/2,1} - 0_{1/2,1}$	87284.156	4.2	3	0.17	
	$1_{3/2,2} - 0_{1/2,1}$	87316.925	4.2	5	1.66	
	$1_{3/2,1} - 0_{1/2,0}$	87328.624	4.2	3	0.83	
	$1_{1/2,1} - 0_{1/2,1}$	87402.004	4.2	3	0.83	
	$1_{1/2,0} - 0_{1/2,1}$	87407.165	4.2	1	0.33	
	$1_{1/2,1} - 0_{1/2,0}$	87446.512	4.2	3	0.17	
HCN	$1_1 - 0_1$	88630.4156	4.25	3	1	2.416
	$1_2 - 0_1$	88631.8475	4.25	5	1.667	2.416
	$1_0 - 0_1$	88633.9357	4.25	1	0.333	2.416
OCS	$7 - 6$	85139.1032	16.34	15	7	0.171
HCS^+	$2 - 1$	85347.89	6.14	5	2	1.110
HN^{13}C	$1 - 0$	87090.85	4.18	3	1	1.867
HC^{18}O^+	$1 - 0$	85162.2231	4.09	3	1	3.645
^{34}SO	$2 - 1$	84410.69	19.23	5	1.5	0.495
DCO^+	$2 - 1$	144077.289	10.37	5	6.2	65.919
CS	$2 - 1$	97980.9533	7.05	5	2	1.674
C^{34}S	$3 - 2$	144617.1007	13.88	7	3	5.744
DCN	$2 - 1$	144828.0015	10.42	15	6	0.127
HNCO	$2 - 1$	87925.237	10.55	9	3.891	0.878
CH_3CCH	$5_3 - 4_3$	85442.6012	77.34	44	4.258	0.039
	$5_2 - 4_2$	85450.7663	41.21	22	2.794	0.052
	$5_1 - 4_1$	85455.6667	19.53	22	3.194	0.059
	$5_0 - 4_0$	85457.3003	12.30	22	3.327	0.062
CH_3CCH	$6_3 - 5_3$	102530.3476	82.26	52	5.988	0.079
	$6_2 - 5_2$	102540.1446	46.13	26	3.548	0.098
	$6_1 - 5_1$	102546.0242	24.45	26	3.881	0.105
	$6_0 - 5_0$	102547.9844	17.23	26	3.992	0.110

ниях молекулярных облаков на 3 мм. Температура фонового излучения ($T_{\text{bg}} = 2.73 \text{ K}$) не учитывалась, так как её значение пренебрежимо мало.

Таким образом, лучевая концентрация для оптически тонкого случая определяется следующим образом (см. напр. [41]):

$$N_{\text{tot}}^{\text{thin}} = \frac{8 \pi \nu_{\text{ul}}^2 k Q}{A_{\text{ul}} h c^3 g_u f} \exp\left(\frac{E_u}{k T_{\text{ex}}}\right) W, \quad (1.1)$$

где ν_{ul} – частота перехода $u \rightarrow l$, [Гц]; A_{ul} – коэффициент Эйнштейна для спонтанного излучения, [1/с]; g_u – статистический вес верхнего уровня; Q – статистическая сумма; E_u – энергия верхнего уровня, [эрг]; k – постоянная Больцмана, [эрг/К]; h – постоянная Планка, [эрг · с]; c – скорость света, [см/с]; T_{ex} – температура возбуждения верхнего уровня данного перехода, [К]; W – интегральная интенсивность спектральной линии, [К · см/с]; f – коэффициент заполнения диаграммы направленности телескопа.

Для расчета лучевой концентрации в случае оптически толстого излучения используется формула 1.2 (см. [41]):

$$N_{\text{tot}} = N_{\text{tot}}^{\text{thin}} \frac{\tau}{1 - \exp^{-\tau}}, \quad (1.2)$$

где $N_{\text{tot}}^{\text{thin}}$ – лучевая концентрация, рассчитанная для оптически тонкого излучения, [1/см²]; τ – оптическая толщина линии излучения [1/см].

Все параметры формулы (1.1), за исключением произведения

$$Q \exp(E_u/(k T_{\text{ex}})) W,$$

определяются только типом перехода и строением молекулы.

Величина Q зависит от температуры возбуждения T_{ex} , а W определяется из наблюдений.

Для каждой наблюдавшейся позиции для молекул C_2H и HCN было рассчитано Q , исходя из принятого значения T_{ex} по формуле для линейных молекул:

$$Q = \frac{k T_{\text{ex}}}{h B_0} + \frac{1}{3}, \quad (1.3)$$

где B_0 – вращательная постоянная молекулы, $[1/\text{с}]$.

Значения для частоты перехода ν_{ul} , коэффициента Эйнштейна A_{ul} , статистического веса уровня g_{u} , статистической суммы Q (кроме молекул C_2H и HCN) и энергии верхнего уровня E_{u}/k были взяты из каталога CDMS (см. табл. 1.1). Для молекулы HN^{13}C эти параметры мы брали из каталога JPL.

В качестве температуры возбуждения T_{ex} в расчетах использовалась температура пыли T_{dust} . Для этого на карте распределения температуры пыли были выбраны области диаметром $28''$, центры которых соответствуют позициям, в которых проводились наблюдения (см. рисунок 1.2), и проведено усреднение температуры пыли по размеру позиции. В качестве ошибок определения T_{ex} (и N_{H_2} , см. ниже) были использованы среднеквадратичные отклонения от среднего значения. О возможном несоответствии температуры пыли и температуры возбуждения будет сказано далее.

Интегральная интенсивность спектральных линий молекул W определялась из наблюдений, как интеграл яркостной температуры T_{mb} по скорости в ходе анализа спектров излучения с помощью программы CLASS. Полученные значения показаны в табл. 1.4.

Обилие молекул (x) определялось относительно лучевой концентрации ядер водорода на луче зрения по формуле (1.4).

$$x = \frac{N}{2N_{\text{H}_2}}, \quad (1.4)$$

где $N = N_{\text{tot}}^{\text{thin}}$ для оптически тонкого излучения; $N = N_{\text{tot}}$ для оптически толстого излучения.

1.4.1. Сверхтонкое расщепление молекулы этинила C_2H

Излучение молекулы этинила C_2H представлено переходом $1 \rightarrow 0$ на частоте ~ 87 МГц со сверхтонким расщеплением на шесть компонент (см. рисунок 1.7).

Перед тем как определять лучевую концентрацию этинила, было проверено, что соотношение между яркостными температурами сверхтонких компонент соответствует оптически тонкому излучению. Для этого было рассчитано отношение наиболее ярких компонент на частоте 87328.624 МГц к 87316.925 МГц, значение которого получилось в пределах 0.48–0.52 в наблюдаемых позициях, что близко к теоретическому 0.50.

Анализ отношения интенсивностей между линиями мультиплета с помощью процедуры *hfs* (она предполагает равенство ширин всех линий в мультиплете) в пакете CLASS показал, что процедура аппроксимации не сходится. Вероятно, это происходит из-за несимметричных профилей линий.

Расчет лучевой концентрации этинила проводился по формуле 1.1 с учетом средневзвешенной частоты перехода, и значения силы перехода $S_{ul} = 1$. Значение статистической суммы Q рассчитывалось по формуле 1.3 для линейных молекул.

1.4.2. Оптически толстое излучение HCN

Излучение молекулы HCN представлено переходом $1 \rightarrow 0$ со сверхтонким расщеплением на три компоненты (см. табл. 1.1). Спектр излучения молекулы HCN в направлении на центр молекулярного облака (в позиции 10) показан на рисунке 1.3. Оптическая толщина излучения была определена по отношению интенсивностей пика T_{peak} двух компонент с помощью процедуры *hfs* программного пакета CLASS, т.е. по отношению интенсивности главной компоненты на частоте $\nu = 88631.8475$ МГц к интенсивности

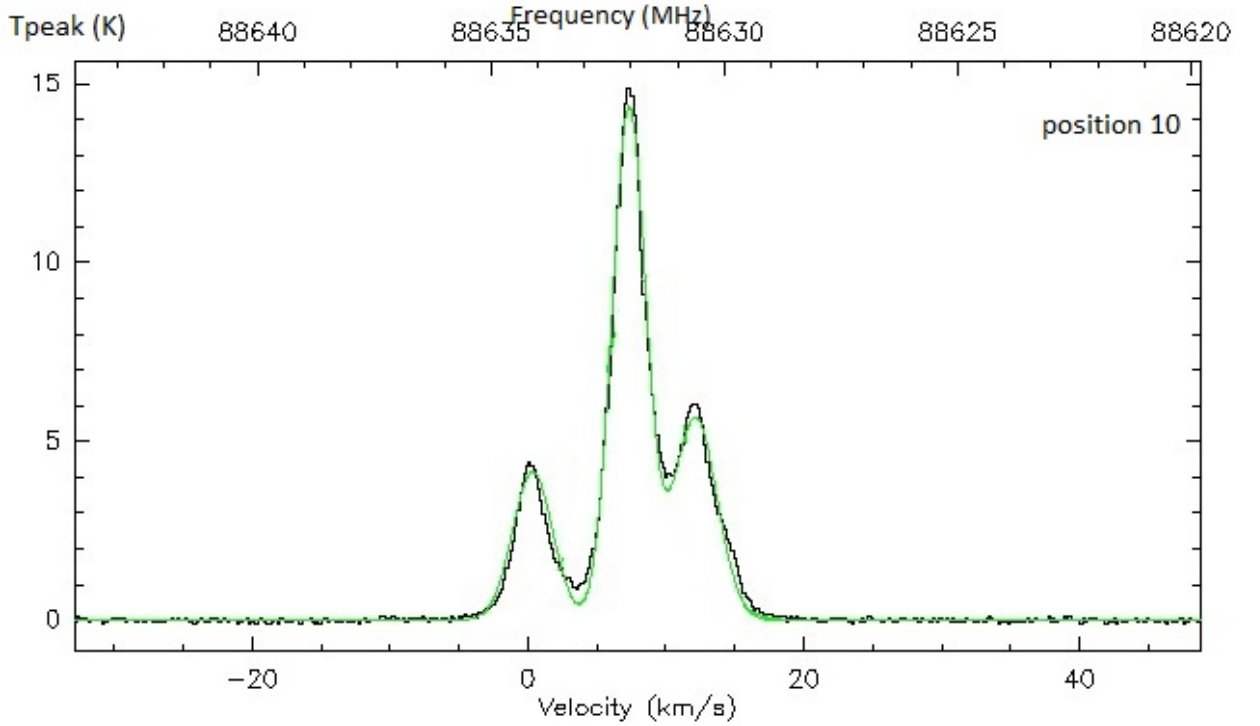


Рис. 1.3. Спектр излучения молекулы HCN при переходе $1 \rightarrow 0$ в шкале температуры основного лепестка для позиции 10.

компоненты на частоте $\nu = 88633.9357$ МГц (формула 1.5).

$$\frac{1 - \exp^{-\frac{\tau}{s}}}{1 - \exp^{-\tau}} = \frac{T_{\text{peak1}}}{T_{\text{peak2}}}, \quad (1.5)$$

где τ - оптическая толщина излучения молекулы; s - лабораторное значение отношения интенсивностей сверхтонких компонент (для молекулы HCN $s = 5$); T_{peak1} - интенсивность пика главной компоненты на частоте $\nu = 88631.8475$ МГц; T_{peak2} - интенсивность пика компоненты на частоте $\nu = 88633.9357$ МГц.

В результате расчета в позициях 9 - 13 и позиции 15 получились значения τ в пределах от 0,5 до 1,3, а в позициях 1 - 8, 14 и 17 - $\tau \approx 0,25$, что говорит о том, что излучение HCN оптически толстое. Это учитывалось в дальнейшем при расчете лучевой концентрации HCN (см. формулу 1.2). В позициях 6, 18 - 20 излучение HCN оптически тонкое.

Температура возбуждения молекулы HCN T_{exHCN} рассчитывалась по

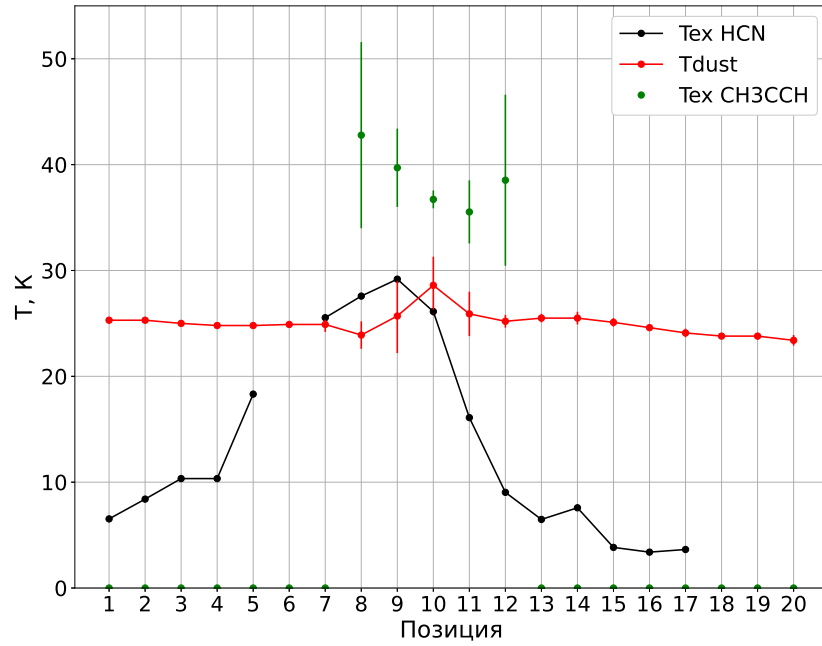


Рис. 1.4. Значения температуры пыли (красный цвет), температуры возбуждения молекулы HCN (черный цвет) и температуры возбуждения молекулы CH_3CCN (зеленый цвет) в исследуемых позициях.

формуле 1.6 (см. таблицу 1.2) и показана на рисунке 1.4.

Для молекулы HCN значение статистической суммы Q рассчитывалось по формуле 1.3 для линейных молекул, а частота перехода ν_{ul} $1 \rightarrow 0$ была получена с учетом силы линии каждой сверхтонкой компоненты, см. таблицу 1.1. При этом сила перехода каждой сверхтонкой компоненты была пересчитана из условия $S_{ul} = 1$, так как расчёт лучевой концентрации проводился по интегральной интенсивности всего мультиплета.

$$T_{\text{exHCN}} = T_{\text{bg}} + \frac{T_{\text{peak2}}}{1 - \exp^{-\tau}} \quad (1.6)$$

Для сравнения был проведен расчет лучевой концентрации HCN для двух вариантов значений температуры возбуждения: вариант 1 - расчетная температура возбуждения T_{exHCN} , рассчитанная по формуле 1.6; вариант 2 - расчетная температура пыли T_{dust} . Полученные результаты представлены

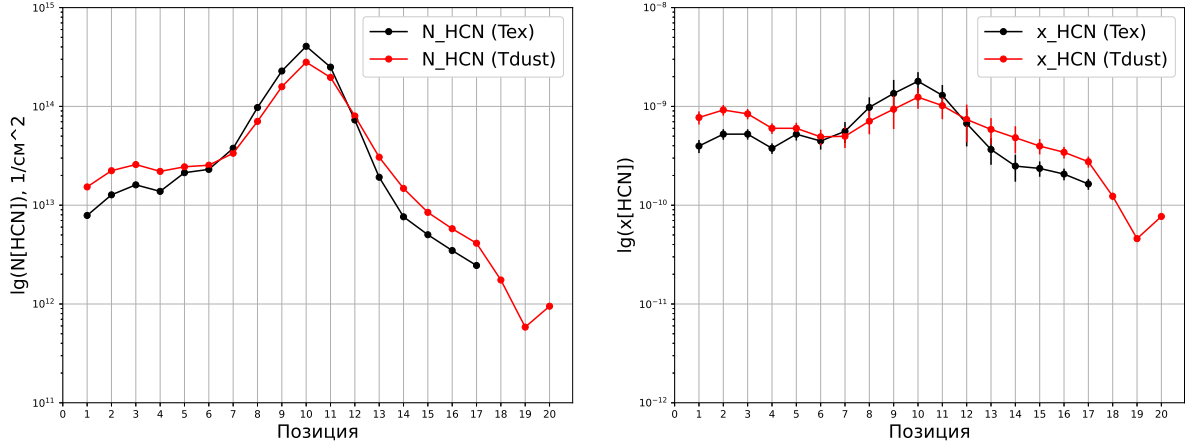


Рис. 1.5. Лучевая концентрация молекул HCN (на левой панели) и обилие (на правой панели), рассчитанные для температуры возбуждения T_{ex} и температуры пыли T_{dust} .

на рисунке 1.5.

Как видно из рисунка 1.5 полученные значения лучевой концентрации и обилия сопоставимы, что говорит о допустимой возможности использования температуры пыли для расчета лучевых концентраций молекул.

1.4.3. Вращательные диаграммы для CH_3CSH

Метод вращательных диаграмм позволяет определить так называемую вращательную температуру (она же температура возбуждения), описывающую значения населенностей вращательных уровней молекулы в условиях ЛТР.

Кроме того, возможно определить также и лучевую концентрацию этих молекул при условии, что линии оптически тонкие. Излучение молекулы CH_3CSH представлено переходом $5 \rightarrow 4$ на частоте ~ 85 МГц и переходом $6 \rightarrow 5$ на частоте ~ 102 МГц. Параметры переходов представлены в таблице 1.1.

Для каждого из наблюдавшихся переходов населенность на верхнем уровне и определяется следующим образом (формула 1.7):

$$\ln \frac{N_u}{g_u} = \ln N - \ln Q - \frac{E_u}{k T_{rot}}, \quad (1.7)$$

где N_u - лучевая концентрация молекул на верхнем уровне, $[\text{см}^{-2}]$; N - полная лучевая концентрация молекул, $[\text{см}^{-2}]$; T_{rot} - вращательная температура, $[\text{K}]$.

Отношение N_u/g_u в оптически тонком случае определяется интегральной интенсивностью излучения молекулы:

$$\frac{N_u}{g_u} = \frac{8 \pi k}{h c^3} \frac{\nu_{ul}^2}{A_{ul} g_u} \frac{1}{f} W. \quad (1.8)$$

С использованием двух этих уравнений на диаграмму наносится серия точек, а функция, проходящая вблизи этих точек, в приближении ЛТР будет аппроксимироваться линейным уравнением, из коэффициентов которого можно определить вращательную температуру (температуру возбуждения) и лучевую концентрацию.

Функция была аппроксимирована на диаграмме уравнением $y = ax + b$, откуда вращательная температура и лучевая концентрация определяются выражениями $T_{rot} = -1/a$, $N = \exp(b + \ln Q(T_{rot}))$ соответственно.

При построении вращательных диаграмм CH_3CSH для серии линий переходов $5 \rightarrow 4$ на частоте ~ 85 МГц и $6 \rightarrow 5$ на частоте ~ 102 МГц параметры переходов g_u , $Q(T_{rot})$, E_u/k , A_{ul} , ν_{ul} были взяты из каталога CDMS, см. таблицу 1.1. Интегральные интенсивности линий W взяты из наблюдений и представлены в таблице 1.4.

Полученные вращательные диаграммы представлены на рисунке 1.6. Вращательная температура уровней CH_3CSH , рассчитанная с помощью построенных диаграмм, представлена в таблице 1.2.

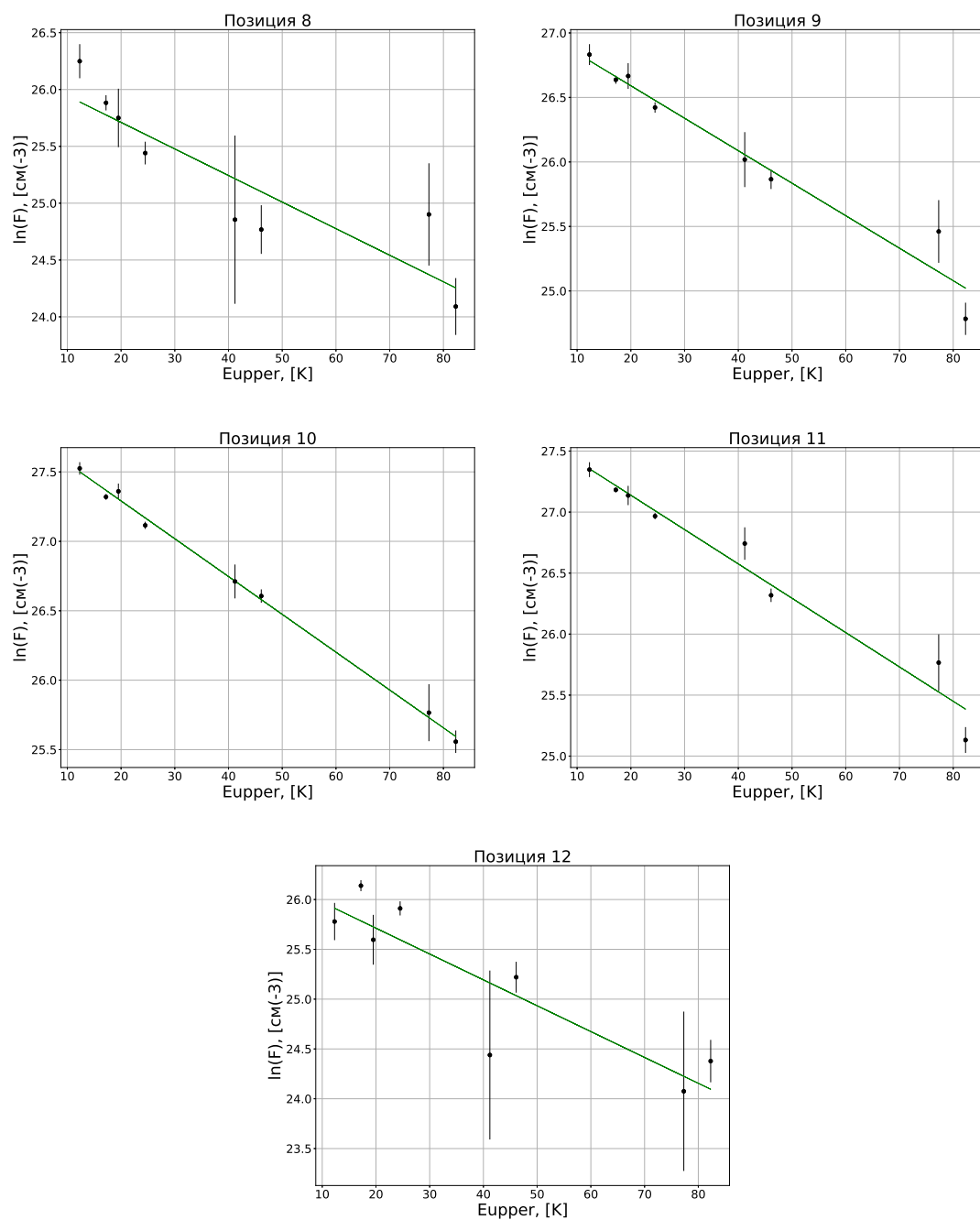


Рис. 1.6. Вращательные диаграммы молекулы CH_3CSN , построенные для переходов $5 \rightarrow 4$ на частоте ~ 85 МГц и $6 \rightarrow 5$ на частоте ~ 102 МГц.

Таблица 1.2.

Позиция	$T_{\text{dust,}}$ [K]	$T_{\text{exHCN,}}$ [K]	$T_{\text{exCH}_3\text{CCH}}$ [K]
1	25.3 ± 0.3	6.53 ± 0.05	-
2	25.3 ± 0.2	8.40 ± 0.07	-
3	25.0 ± 0.2	10.34 ± 0.09	-
4	24.8 ± 0.1	10.34 ± 0.11	-
5	24.8 ± 0.2	18.32 ± 0.14	-
6	24.9 ± 0.2	-	-
7	24.9 ± 0.7	25.54 ± 0.07	-
8	23.9 ± 1.3	27.58 ± 0.17	42.78 ± 8.79
9	25.7 ± 3.5	29.18 ± 0.26	39.70 ± 3.70
10	28.6 ± 2.7	26.12 ± 0.36	36.72 ± 0.84
11	25.9 ± 2.1	16.10 ± 0.22	35.53 ± 2.98
12	25.2 ± 0.6	9.04 ± 0.13	38.53 ± 8.08
13	25.5 ± 0.4	6.48 ± 0.09	-
14	25.5 ± 0.6	7.58 ± 0.05	-
15	25.1 ± 0.4	3.84 ± 0.07	-
16	24.6 ± 0.2	3.39 ± 0.05	-
17	24.1 ± 0.4	3.64 ± 0.03	-
18	23.8 ± 0.2	-	-
19	23.8 ± 0.3	-	-
20	23.4 ± 0.5	-	-

Таблица 1.3. Значения доли дейтерия, рассчитанные по отношению лучевых концентраций молекул DCN и HCN, DCO⁺ и HC¹⁸O⁺.

Позиция	$N_{\text{DCN}} / N_{\text{HCN}}, 10^{-3}$	$N_{\text{DCO}^+} / N_{\text{HC}^{18}\text{O}^+}, 10^{-3}$
8	6.63	-
9	11.20	-
10	19.53	1.01
11	18.62	-
12	6.93	-

1.5. Доля дейтерия

Среди обнаруженных молекул есть молекулы DCO⁺ и DCN, содержащие дейтерий.

Это позволяет рассчитать долю дейтерия по отношению лучевых концентраций молекул DCO⁺ и HC¹⁸O⁺; DCN и HCN, учитывая при этом отношение изотопов кислорода для данного объекта, значение которого составляет 557 [42].

Полученные значения доли дейтерия представлены в таблице 1.3.

1.6. Анализ наблюдений

По результатам наблюдений в двадцати исследуемых позициях на спектрах обнаружены линии излучения молекул C₂H, HCN, OCS, HCS⁺, HN¹³C, HC¹⁸O⁺, ³⁴SO, DCO⁺, CS, C³⁴S, DCN, HNCО, CH₃CCH.

Спектры молекул в позициях, в которых они обнаружены, представлены на рисунках 1.8 - 1.19.

Как было отмечено во введении, молекула этинила C₂H представляет особый интерес в качестве инструмента для понимания молекулярного состава газа областей звездообразования. Спектр всей сверхтонкой структуры C₂H в позиции 10 показан на рисунке 1.7, а четыре наиболее яркие сверхтонкие компоненты во всех позициях – на рисунке 1.8. Наиболее яркие линии обнаружены в позициях 8–12, в направлении на молекулярное обла-

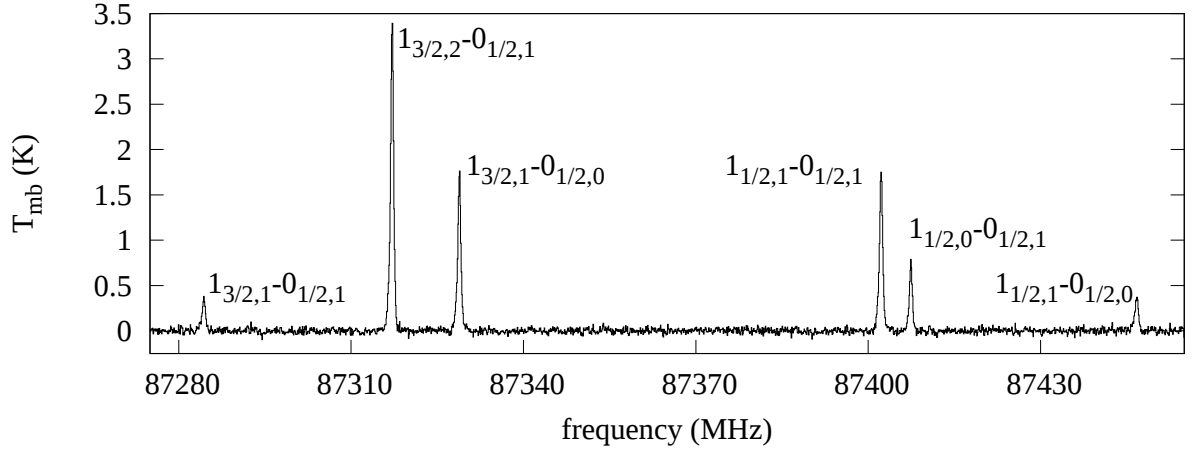


Рис. 1.7. Спектр излучения молекулы C_2H при переходе $1 \rightarrow 0$ в шкале температуры основного лепестка для позиции 10.

ко. В направлении на ионизирующую звезду LS 19 в S255 сверхтонкие компоненты на частотах $\nu = 87284.156$ МГц и $\nu = 87446.512$ МГц определяются слабо (позиция 1), в направлении на HD 253327 (позиция 18) видны лишь наиболее яркие компоненты сверхтонкой структуры. Параметры линий излучения этинила приведены в таблице 1.1. Профили линий асимметричны, отличаются от Гауссовых большей интенсивностью с красной стороны (см., например, спектры в позициях 2–4 и 13 вблизи направлений на ионизирующие звезды), наблюдаются и плоские профили линий (например, позиции 3 и 14). Формы профилей сверхтонких компонент могут быть разными в одной и той же позиции. В центральных позициях 8–12 профили линий симметричны. Ширина линий в направлениях вблизи ионизирующих звезд ($\Delta v = 3.5 \pm 0.17$ км/с в позиции 1; $\Delta v = 5.12 \pm 0.71$ км/с в позиции 18) в 1.5–2 раза выше, чем ширина линий в направлении на молекулярное облако ($\Delta v = 2.37 \pm 0.17$ км/с в позиции 10). Видно, что пик линии в направлении на молекулярное облако ($v = 7.31$ км/с) приходится на провал между пиками в направлениях на ионизирующие звезды (например в позициях 2, 3, 5, 14, 17 и 18, пики на скоростях ≈ 5.5 и 8.2 км/с). Расстояние между пиками в позициях, где профили двухпиковые, равно примерно 1–1.5 км/с. Такая разница в скоростях соответствует характерной скорости расшире-

ния сферически-симметричных областей НII, см. например [43], [44].

Излучение молекул CS и HCN обнаружено практически во всех исследуемых позициях (1–17) (см рисунки 1.16, 1.17 и ??). Линии CS симметричные и яркие в направлении на молекулярное облако, имеют Гауссов профиль. В позициях 5–7 и в позициях 13–17 линии слабые и имеют два пика. В позициях 9–11 у основания имеется небольшое крыло с красной стороны. Полученные спектры излучения молекулы HCN имеют сверхтонкую структуру с расщеплением на три компоненты и разрешаются во всех обнаруженных позициях. В направлении на молекулярное облако (в позициях 7–12) компоненты симметричны, имеют Гауссов профиль. А вблизи направлений на ионизирующие звезды (в позициях 1–6 и 13–17) линии асимметричны, имеют большую интенсивность с красной стороны, и пики слабых компонент раздваиваются, также как линии излучения молекулы этинилла.

Все это указывает на присутствие нескольких кинематических компонент на луче зрения вблизи ионизирующих звезд. По-видимому, это передняя и задняя молекулярные стенки областей НII, которые вносят вклад в образование бленды близких по скорости компонент. Примеры диаграмм позиция–скорость для расширяющихся оболочек вокруг комплексов звездообразования с несколькими областями НII могут быть найдены в работах [45], [46]. Несмотря на количественную разницу между характерными скоростями расширения комплексов звездообразования и областями НII вокруг одиночных звезд, качественная картина одинакова, см. также [47].

Спектры молекул ^{34}SO , HC^{18}O^+ и DCO^+ обнаружены только в позиции 10, т. е. в направлении на центр молекулярного облака (см. рисунок 1.9). Все они имеют неровный Гауссов профиль и очень слабые: интенсивность пика T_{peak} не превышает значения 0.12 К. Линия ^{34}SO очень широкая ($\Delta v = 4.0 \pm 0.7$ км/с) и имеет плоский профиль, пик скорости приходится на значение $v = 6.79$ км/с, что на 0.5 км/с отличается от пи-

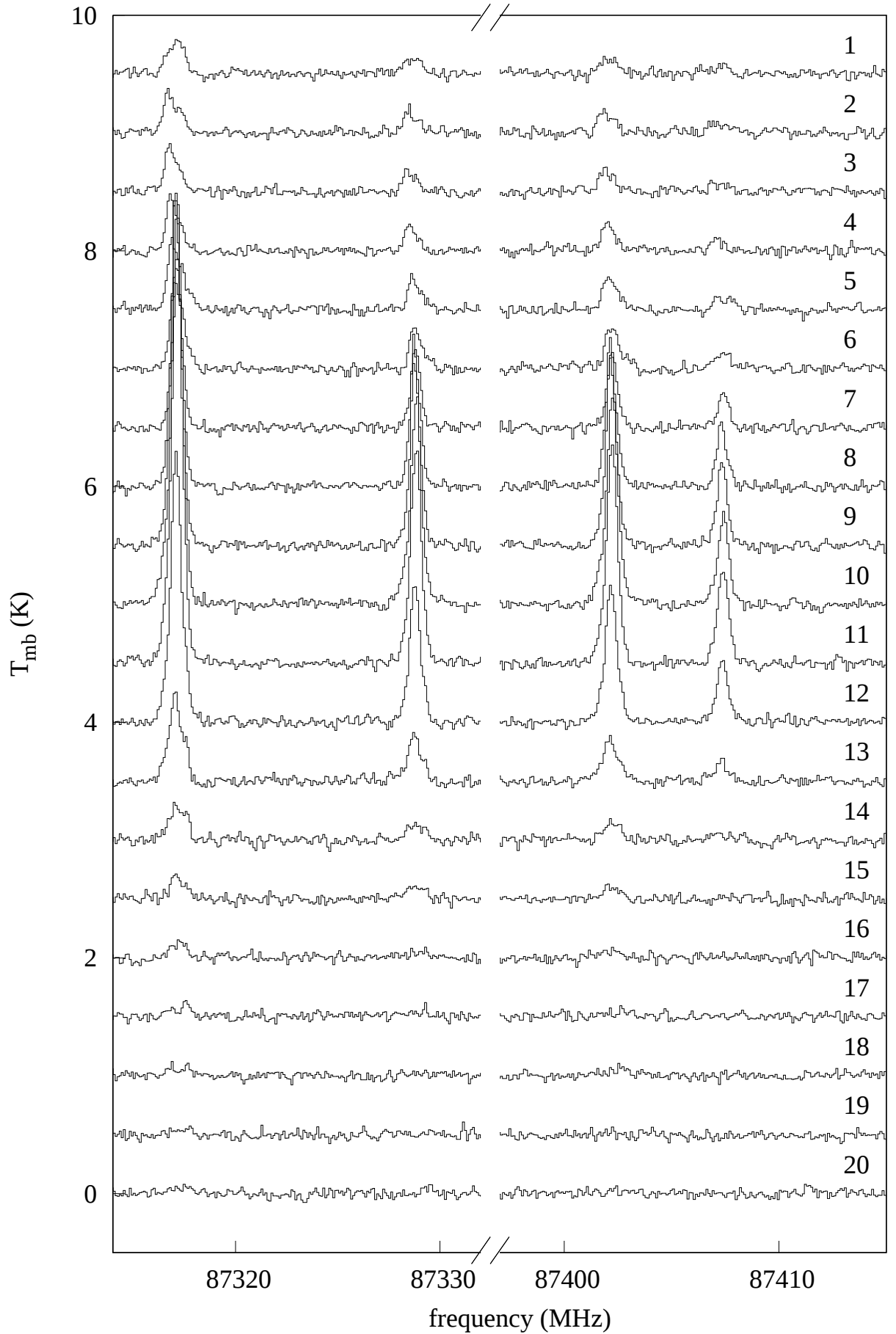


Рис. 1.8. Спектры излучения молекулы C_2H в четырех наиболее ярких компонентах сверхтонкой структуры перехода $1 \rightarrow 0$ в шкале температуры основного лепестка. Цифрами показаны позиции, соответствующие рисунку 1.2.

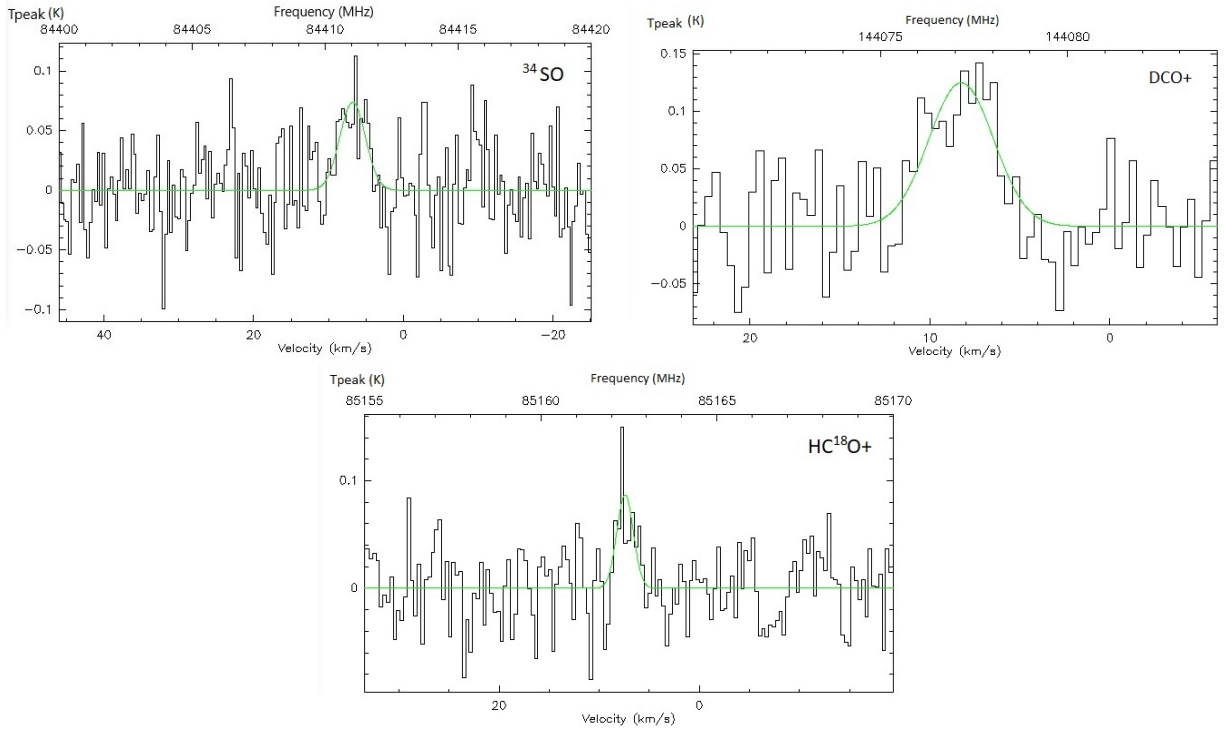


Рис. 1.9. Спектры излучения молекул ^{34}SO , HC^{18}O^+ и DCO^+ , обнаруженных только в позиции 10.

ка скорости этинила в центральной позиции. Также пик скорости линии DCO^+ приходится на значение $v = 8.15$ км/с, что на ≈ 1 км/с больше пика скорости этинила в центральной позиции.

Излучение молекул DCN , DCO^+ , HNCO имеет сверхтонкое расщепление на исследуемых частотах, но линии в полученных спектрах не разрешаются, чем может быть объяснена ширина линий излучения HNCO (например, $\Delta v = 3.72 \pm 0.53$ км/с в позиции 9), DCO^+ ($\Delta v = 4.24 \pm 0.54$ км/с в позиции 10) и DCN (например, $\Delta v = 5.13 \pm 0.23$ км/с в позиции 11). В спектрах молекулы HNCO видны пики сверхтонких компонент, например, в позиции 9.

В позициях 8–12 (в направлении на молекулярное облако) обнаружено излучение молекул HCS^+ , HN^{13}C , C^{34}S , DCN , HNCO , CH_3CCH , а в позициях 9–11 – молекулы OCS . Все линии, за исключением линий, на ширину которых влияет неразрешаемые сверхтонкие компоненты, имеют Гауссов профиль. Линии C^{34}S в позициях 9–12 яркие, но в позициях 10 и 11

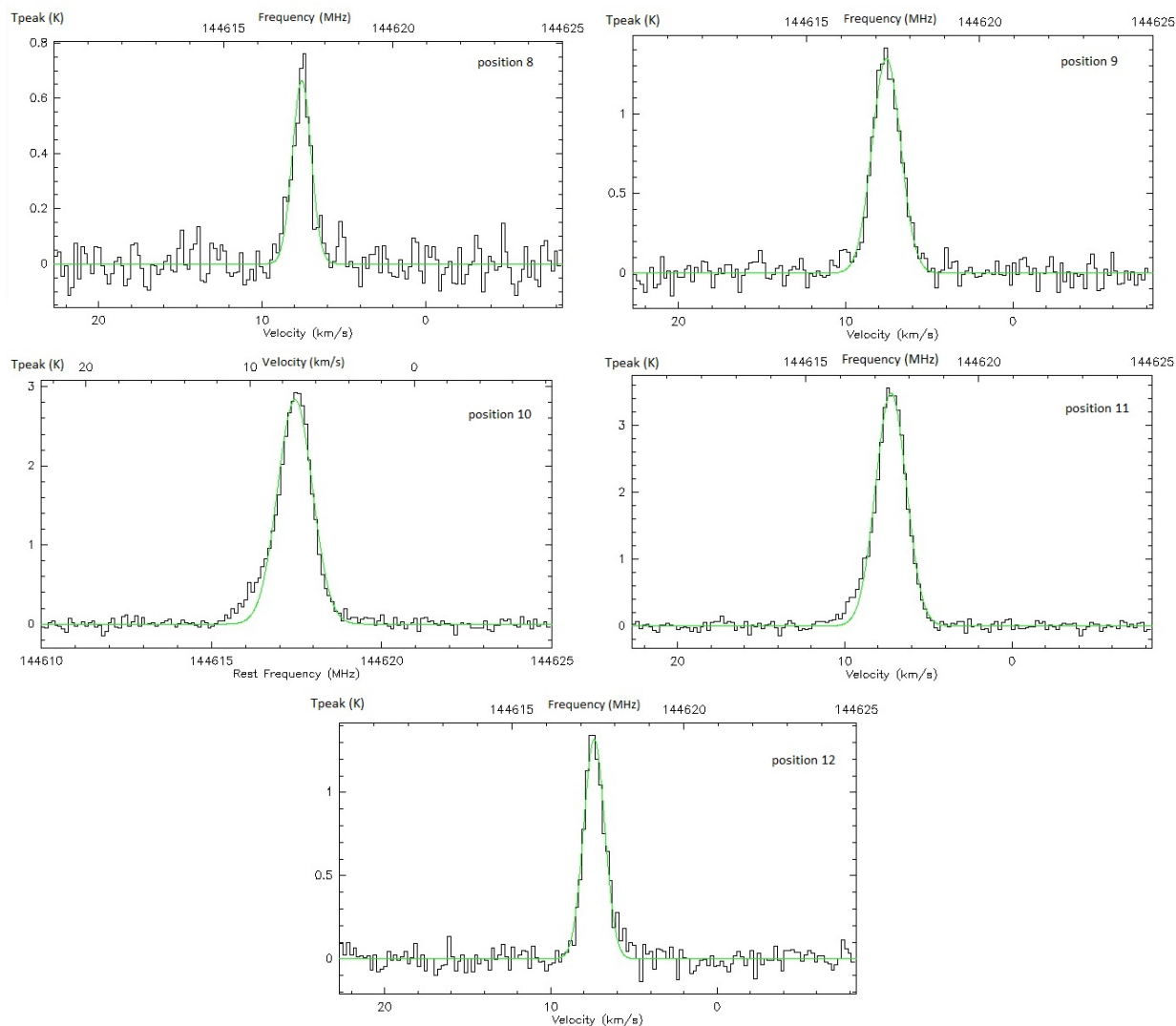


Рис. 1.10. Спектры излучения молекулы C^{34}S , обнаруженные в позициях 8–12.

асимметричны у основания - имеют крылья с красной стороны (см. рисунок 1.10). Линия HCS^+ в позиции 8 имеет смещение пика интенсивности в красную сторону, а в остальных позициях имеет ровный Гауссов профиль. Излучение молекулы CH_3CSN представлено переходами $5 \rightarrow 4$ на частоте ~ 85 МГц и $6 \rightarrow 5$ на частоте ~ 102 МГц. Полученные спектры в позициях 8–12 представлены на рисунках 1.18 и 1.19 и представляют собой переходы вращательных уровней молекулы. Все линии переходов имеют Гауссов профиль. На частоте ~ 85 МГц в позициях 8 и 12 определяются только самые яркие линии перехода $5_0 - 4_0$ и то очень слабо.

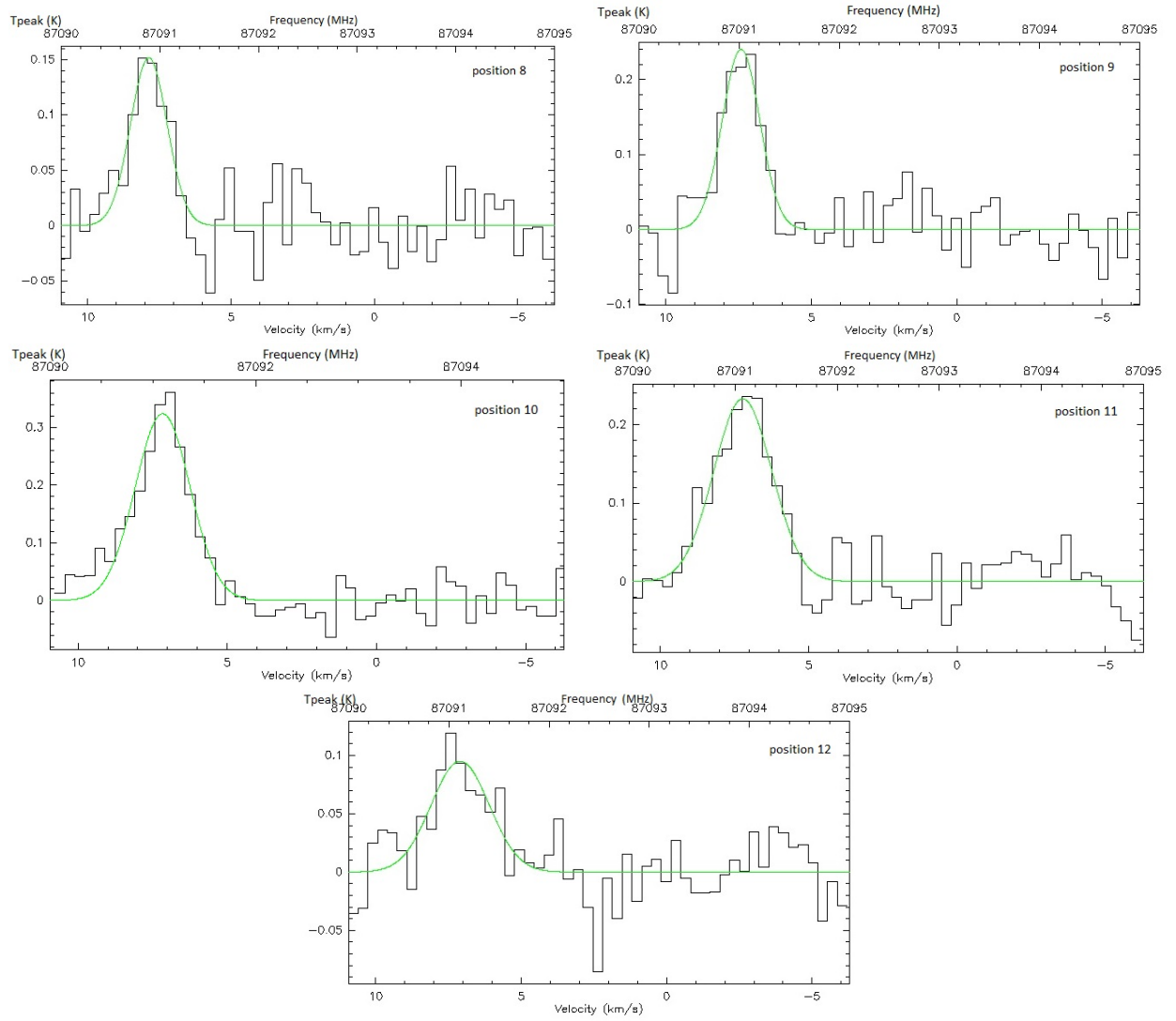


Рис. 1.11. Спектры излучения молекулы HN^{13}C , обнаруженные в позициях 8–12.

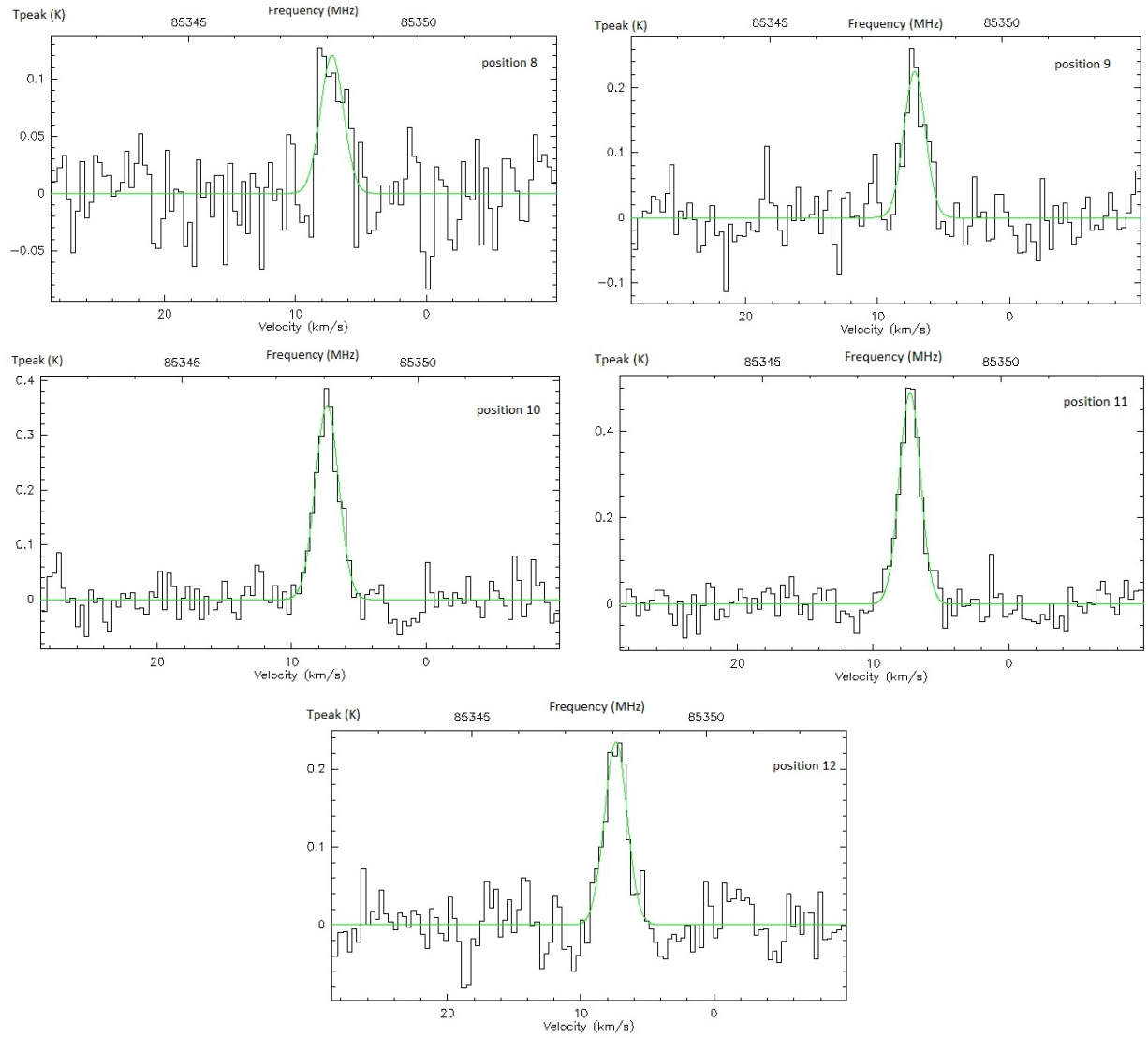


Рис. 1.12. Спектры излучения молекулы HCS^+ , обнаруженные в позициях 8–12.

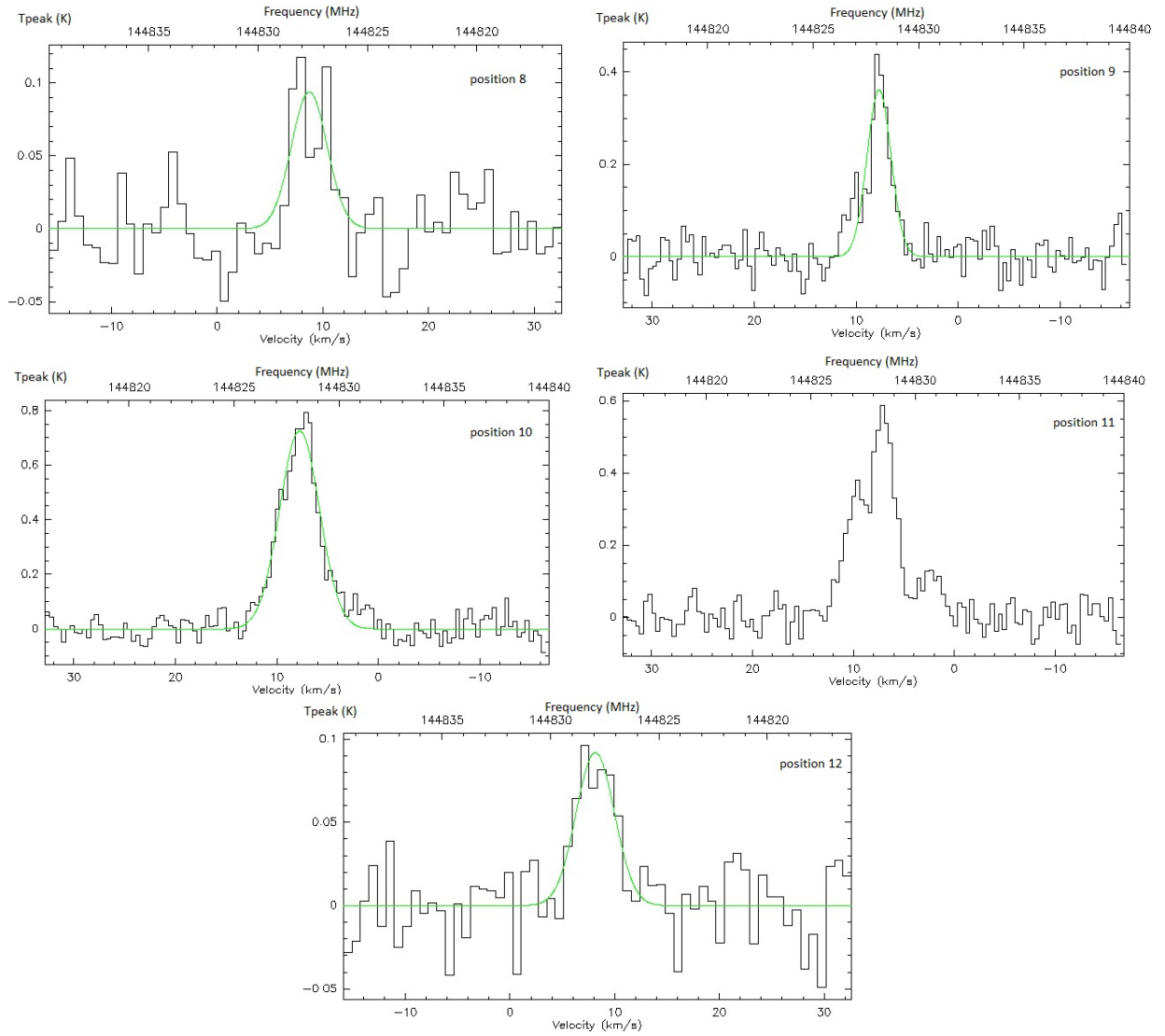


Рис. 1.13. Спектры излучения молекулы DCN, обнаруженные в позициях 8–12.

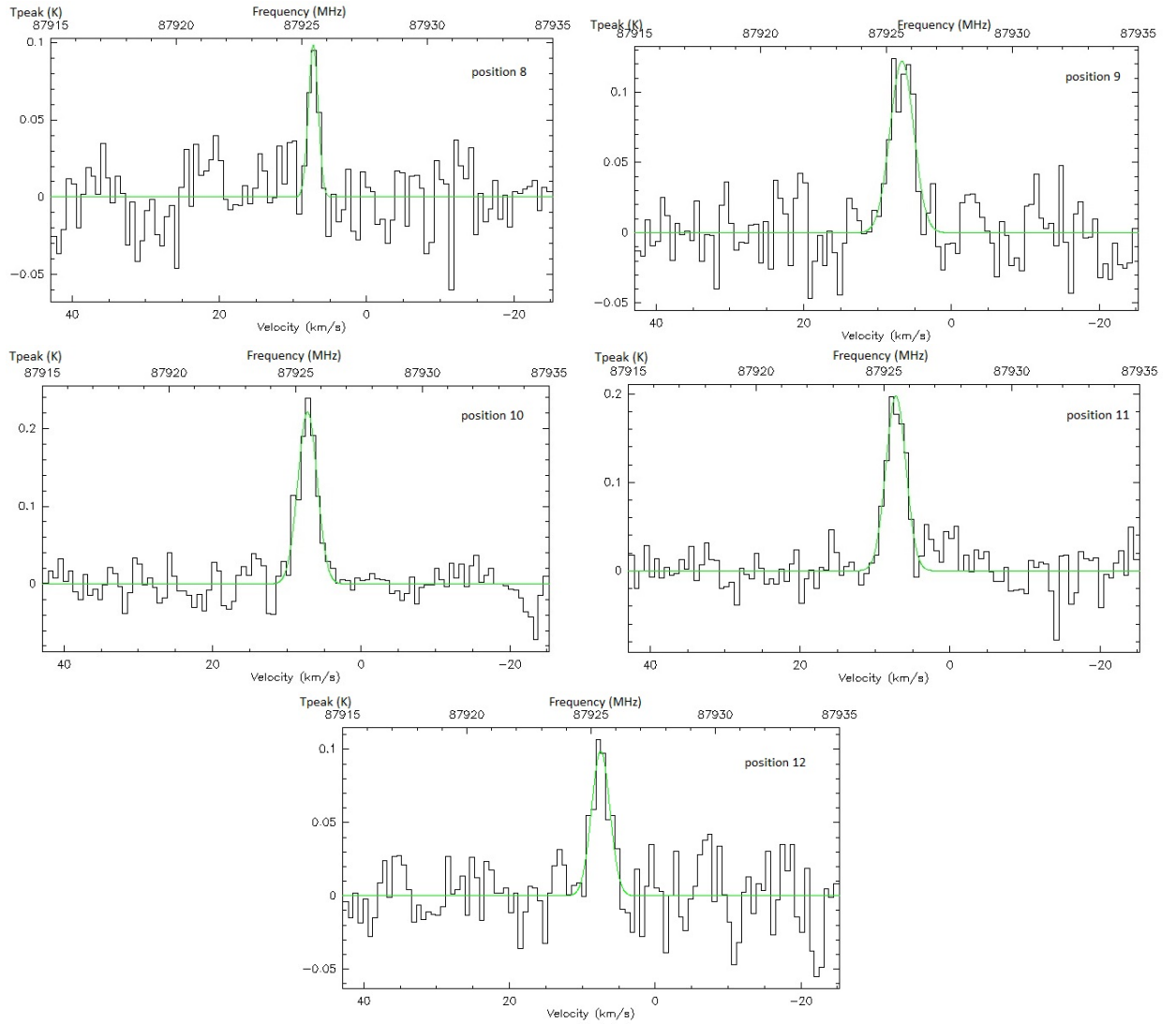


Рис. 1.14. Спектры излучения молекулы HNCO, обнаруженные в позициях 8–12.

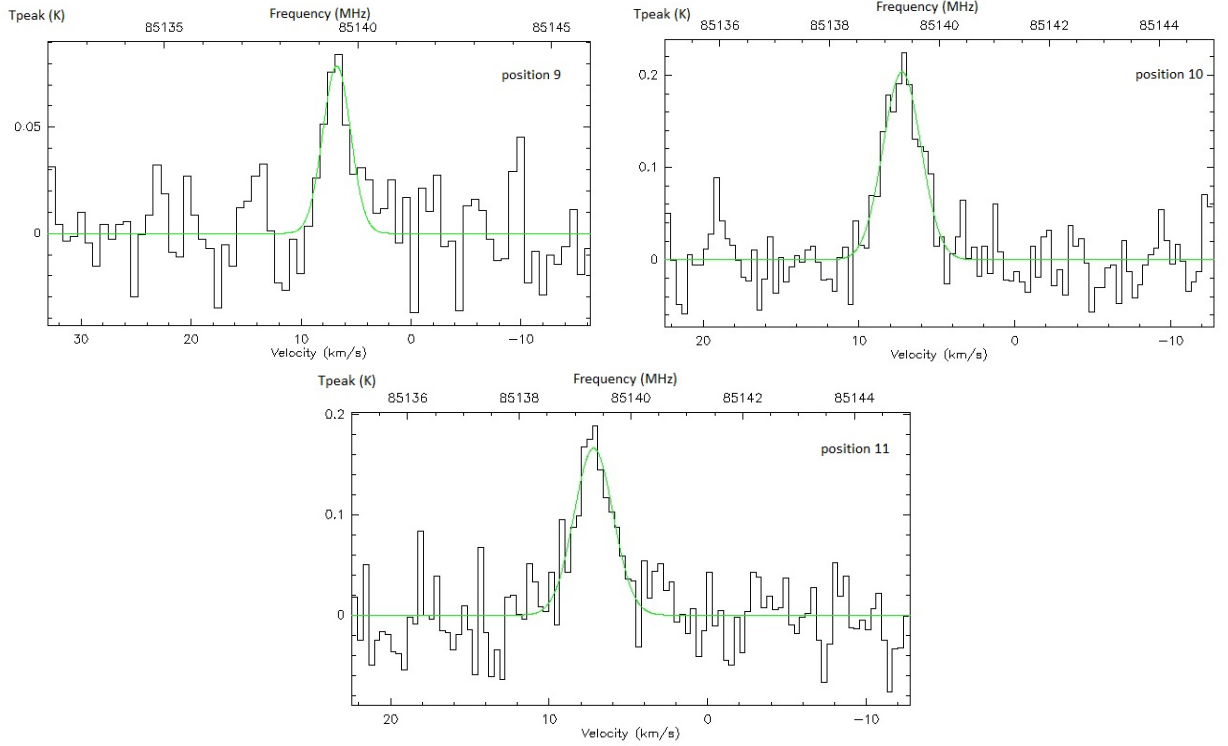


Рис. 1.15. Спектры излучения молекулы OCS, обнаруженные в позициях 8–12.

Как было отмечено выше, в качестве температуры возбуждения T_{ex} взято значение T_{dust} в исследованных позициях для расчета лучевых концентраций и обилия всех молекул, кроме CH_3CSH . Значения T_{ex} приведены в таблице 1.2 и показаны на рисунке 1.4. Видно, что температура возбуждения достигает максимального значения $T_{\text{ex}} = (28.6 \pm 2.7)$ K в центральной позиции 10 (направление на S255 IRS 1 в молекулярном облаке) и уменьшается максимально на ≈ 5 K в направлениях на ионизирующие звезды. Для молекулы CH_3CSH методом вращательных диаграмм была получена температура возбуждения, радиальный профиль которой также представлен на рисунке 1.4. Значения температуры возбуждения для CH_3CSH получились в среднем на 10–15 K больше, чем значения температуры пыли T_{dust} . С учетом неопределенностей оценок температур можно сказать, что для CH_3CSH ЛТР выполняется. Величина N_{H_2} имеет максимум в направлении на S255 IRS 1. Радиальные профили T_{ex} и N_{H_2} показаны на рисунке 1.20.

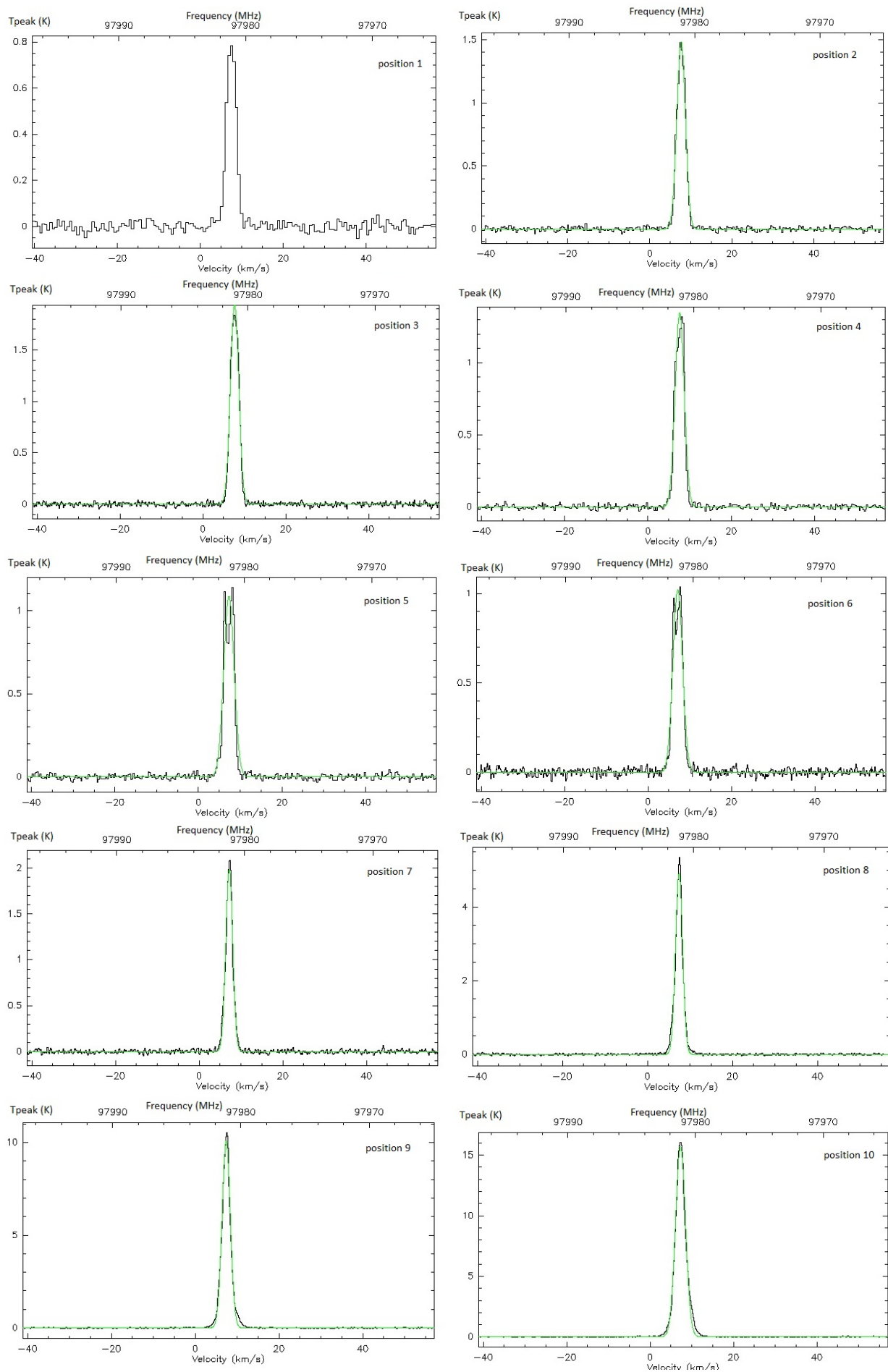


Рис. 1.16. Спектры излучения молекулы CS, обнаруженные в позициях 1–10.

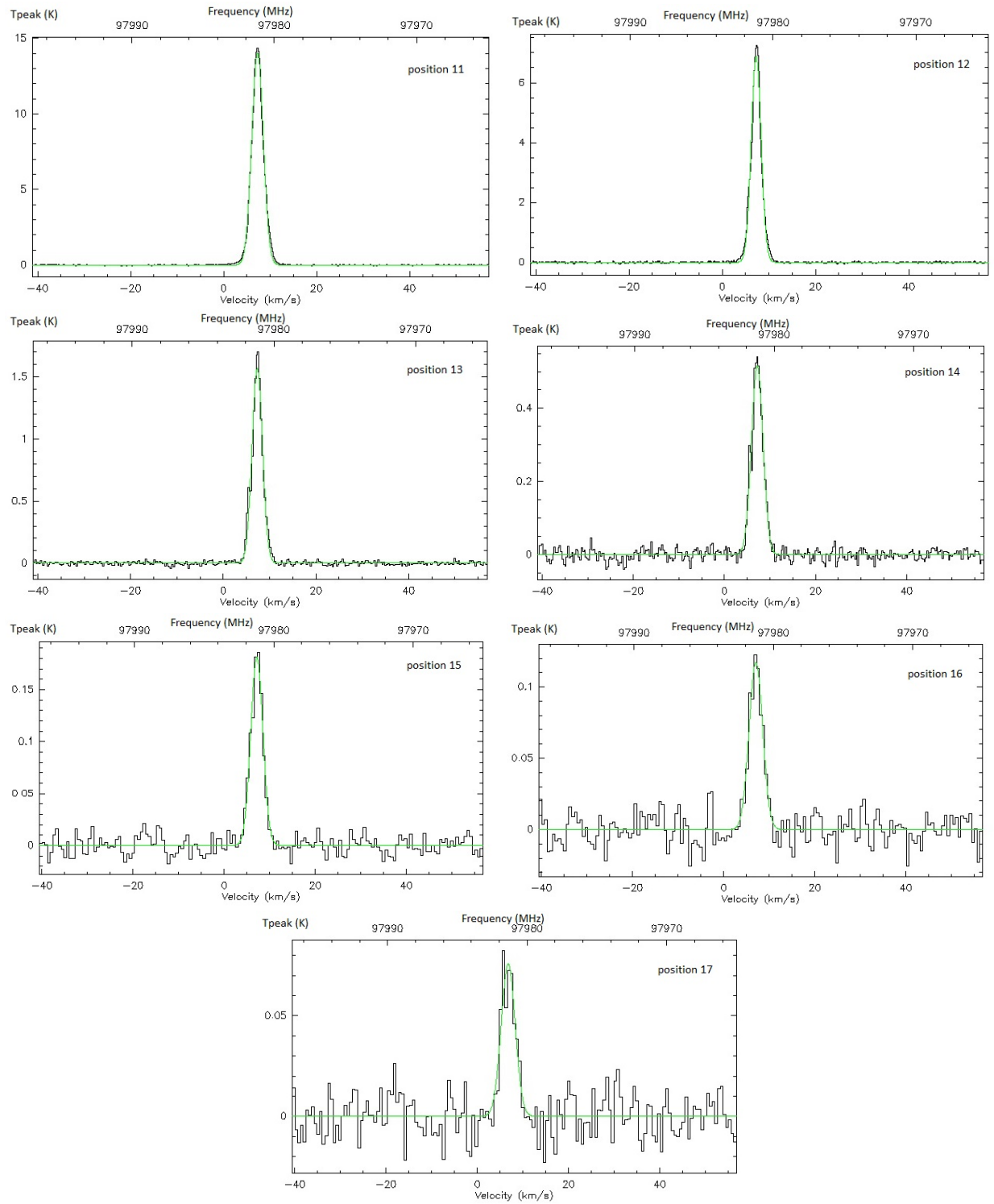


Рис. 1.17. Спектры излучения молекулы CS, обнаруженные в позициях 11–17.

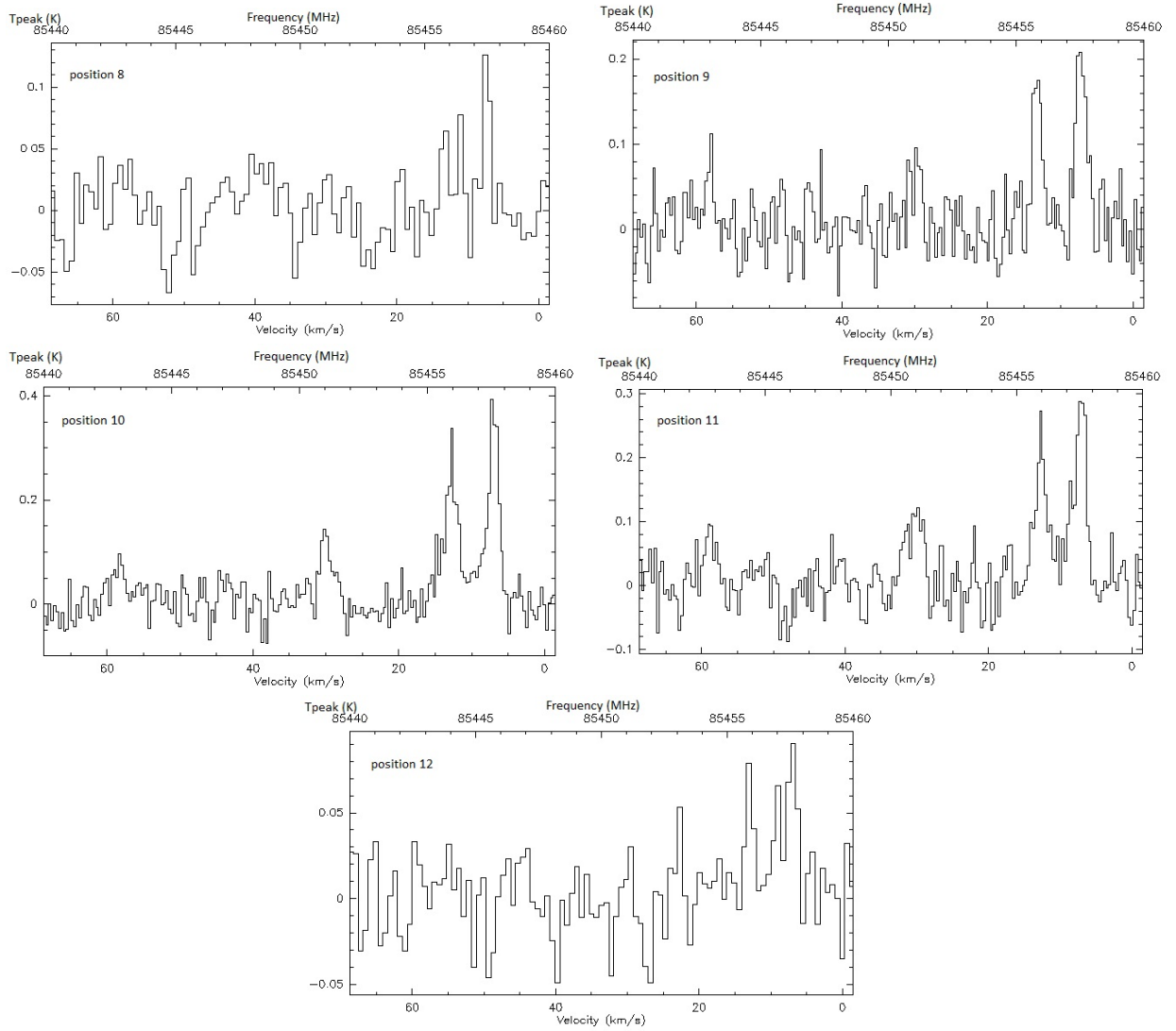


Рис. 1.18. Спектры излучения молекулы CH_3CSN перехода $5 \rightarrow 4$ на частоте ~ 85 МГц, обнаруженные в позициях 8–12.

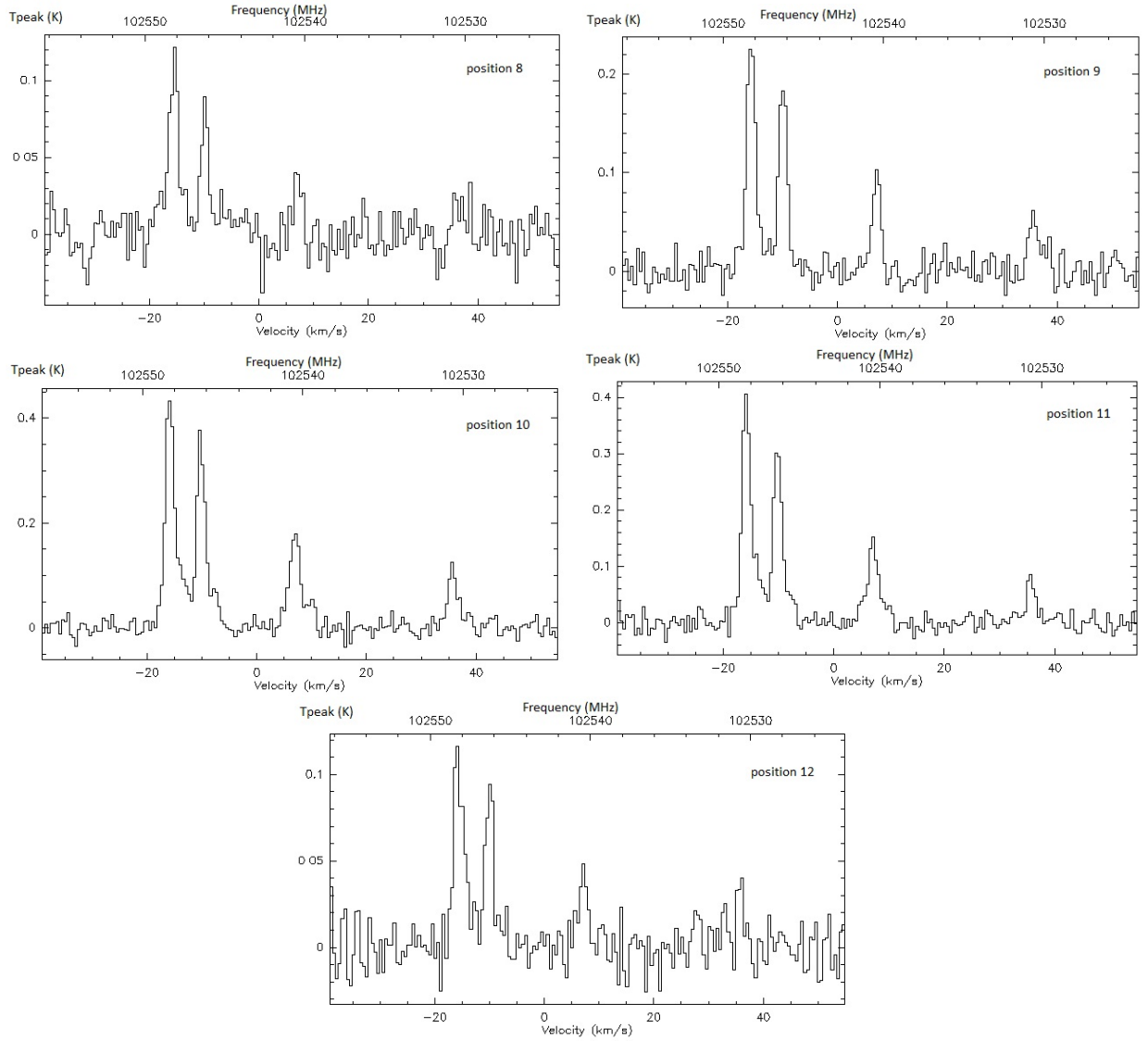


Рис. 1.19. Спектры излучения молекулы CH_3CSN перехода $6 \rightarrow 5$ на частоте ~ 102 МГц, обнаруженные в позициях 8–12.

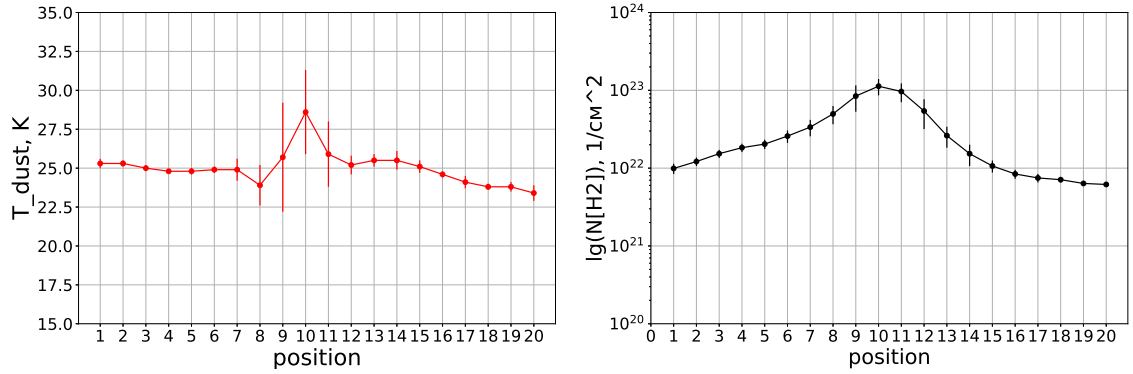


Рис. 1.20. Профили физических параметров: на левой панели - температура пыли, она же T_{ex} ; на правой панели - лучевая концентрация N_{H_2} .

Они имеют похожий вид с максимумом в позиции 10 и плавным уменьшением в стороны обеих ионизирующих звезд. То, что N_{H_2} не уменьшается до нуля в позициях 1 и 18, говорит о наличии нейтрального газа в направлениях на ионизирующие звезды, что согласуется со сделанными выше выводами о передней и задней стенках областей НII.

Значения полученных лучевых концентрации и обилий молекул приведены в таблице 1.4 и показаны на рисунках 1.22 и 1.21. Радиальный профиль таких молекул как C_2H и HCN имеет такую же форму, как и N_{H_2} . Максимум лучевой концентрации каждой из молекул достигается в позиции 10 и плавно снижается в стороны ионизирующих звезд, причем в сторону ионизирующей звезды HD 253327 значения лучевых концентраций снижаются сильнее.

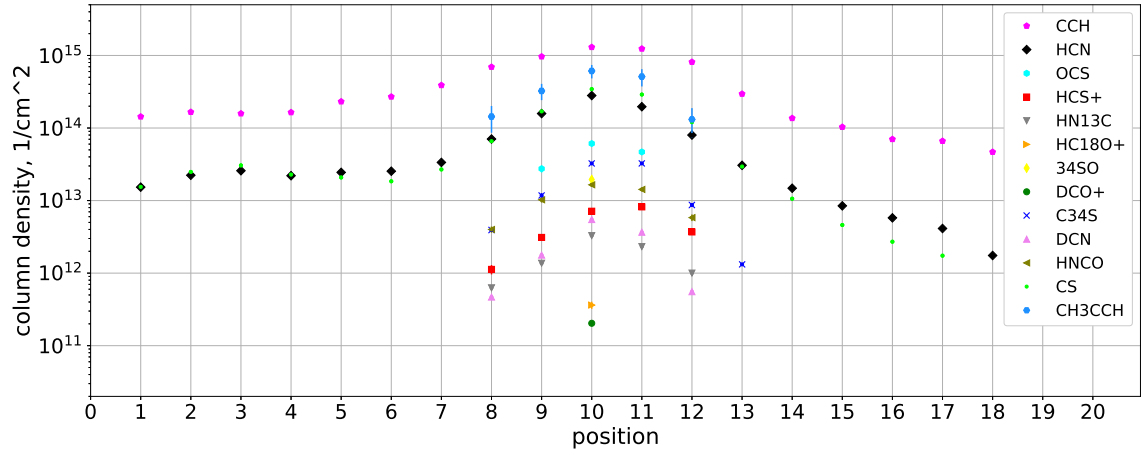


Рис. 1.21. Профили лучевых концентраций молекул, обнаруженные в позициях 1–20.

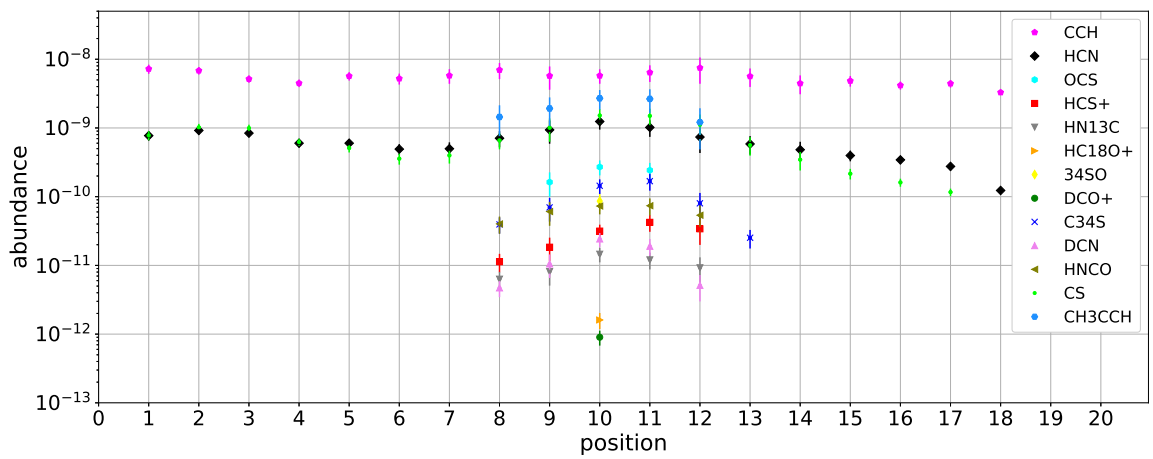


Рис. 1.22. Профили обилий молекул, обнаруженные в позициях 1–20.

Таблица 1.4: Результаты расчета лучевой концентрации и обилия молекул. Интегральная интенсивность определена для всех компонент. Параметры, отмеченные звездочкой (*), определены для наиболее яркой компоненты для молекул, излучение которых обнаружено как расщепление на несколько компонент.

Поз.	v^* ,	Δv^* ,	T_{peak}^* ,	W ,	N ,	x ,
	[км/с]	[км/с]	[K]	[K км/с]	$10^{11} [1/\text{см}^2]$	10^{-10}
C ₂ H (1-0) $\nu \approx 87$ МГц						
1	7.59 ± 0.17	3.43 ± 0.17	0.33	2.98 ± 0.36	1434.65 ± 17.63	72.38 ± 10.96
2	8.24 ± 0.17	3.08 ± 0.17	0.36	3.45 ± 0.39	1660.92 ± 18.50	68.32 ± 8.44
3	8.24 ± 0.17	2.90 ± 0.17	0.42	3.32 ± 0.38	1583.06 ± 18.31	51.62 ± 6.20
4	8.06 ± 0.17	2.63 ± 0.17	0.50	3.47 ± 0.33	1643.86 ± 18.11	44.85 ± 5.51
5	7.59 ± 0.17	3.07 ± 0.17	0.62	4.89 ± 0.50	2316.56 ± 22.11	56.83 ± 7.84
6	7.28 ± 0.17	2.73 ± 0.17	0.81	5.68 ± 0.51	2699.59 ± 23.66	52.31 ± 9.49
7	7.30 ± 0.17	2.09 ± 0.74	1.49	8.18 ± 0.65	3887.79 ± 33.68	57.75 ± 13.81
8	7.47 ± 0.17	2.12 ± 0.17	2.63	15.09 ± 1.16	6945.30 ± 76.14	69.81 ± 18.39
9	7.45 ± 0.17	2.19 ± 0.17	3.29	19.80 ± 0.99	9654.04 ± 220.14	57.23 ± 21.23
10	7.31 ± 0.17	2.37 ± 0.17	3.66	24.46 ± 1.85	13019.02 ± 189.05	57.63 ± 13.67
11	7.32 ± 0.17	2.33 ± 0.17	3.86	25.23 ± 1.81	12378.74 ± 171.08	64.14 ± 17.43
12	7.46 ± 0.17	2.41 ± 0.17	2.45	16.95 ± 1.26	8133.97 ± 52.20	75.00 ± 31.04

Таблица 1.4: Результаты расчета лучевой концентрации и обилия молекул. Интегральная интенсивность определена для всех компонент. Параметры, отмеченные звездочкой (*), определены для наиболее яркой компоненты для молекул, излучение которых обнаружено как расщепление на несколько компонент.

Поз.	v^* ,	Δv^* ,	T_{peak}^* ,	W ,	N ,	x ,
	[км/с]	[км/с]	[K]	[K км/с]	$10^{11} [1/\text{см}^2]$	10^{-10}
13	7.55 ± 0.17	3.02 ± 0.17	0.77	6.09 ± 0.52	2955.34 ± 25.96	56.44 ± 16.94
14	7.21 ± 0.17	3.47 ± 0.17	0.33	2.82 ± 0.37	1366.24 ± 17.83	44.55 ± 13.59
15	7.25 ± 0.17	3.33 ± 0.19	0.21	2.16 ± 0.32	1033.20 ± 14.67	48.47 ± 8.53
16	7.14 ± 0.17	3.77 ± 0.34	0.16	1.49 ± 0.43	701.32 ± 11.85	41.67 ± 5.60
17	6.52 ± 0.23	4.27 ± 0.58	0.10	1.43 ± 0.43	662.09 ± 11.78	44.26 ± 5.59
18	6.50 ± 0.29	5.12 ± 0.71	0.07	1.02 ± 0.30	467.58 ± 9.69	32.90 ± 2.69
19	6.57 ± 0.50	4.12 ± 1.01	0.06	0.24 ± 0.25	110.02 ± 4.61	8.65 ± 0.62
20	5.93 ± 0.31	4.11 ± 0.72	0.06	0.44 ± 0.22	199.00 ± 6.40	16.12 ± 0.71
CS (2-1) $\nu = 97980.9533 \text{ МГц}$						
1	7.49 ± 0.02	2.72 ± 0.05	0.83	2.40 ± 0.01	154.34 ± 0.82	7.79 ± 1.18
2	7.65 ± 0.01	2.45 ± 0.01	1.49	3.86 ± 0.01	248.23 ± 0.84	10.21 ± 1.26
3	7.68 ± 0.01	2.37 ± 0.01	1.94	4.79 ± 0.01	305.46 ± 0.94	9.96 ± 1.19
4	7.62 ± 0.01	2.55 ± 0.01	1.35	3.59 ± 0.01	227.65 ± 0.69	6.21 ± 0.76

Таблица 1.4: Результаты расчета лучевой концентрации и обилия молекул. Интегральная интенсивность определена для всех компонент. Параметры, отмеченные звездочкой (*), определены для наиболее яркой компоненты для молекул, излучение которых обнаружено как расщепление на несколько компонент.

Поз.	v^* ,	Δv^* ,	T_{peak}^* ,	W ,	N ,	x ,
	[км/с]	[км/с]	[K]	[K км/с]	10^{11} [1/см ²]	10^{-10}
5	7.31 ± 0.01	2.90 ± 0.02	1.09	3.28 ± 0.01	207.99 ± 0.79	5.10 ± 0.70
6	7.15 ± 0.01	2.72 ± 0.02	1.02	2.90 ± 0.01	184.42 ± 0.76	3.57 ± 0.65
7	7.21 ± 0.01	1.94 ± 0.01	1.98	4.22 ± 0.01	268.36 ± 2.23	3.99 ± 0.95
8	7.46 ± 0.01	1.95 ± 0.01	4.92	10.67 ± 0.03	659.46 ± 10.74	6.63 ± 1.75
9	7.41 ± 0.01	2.31 ± 0.01	10.07	26.00 ± 0.05	1690.74 ± 63.25	10.02 ± 3.73
10	7.31 ± 0.01	2.82 ± 0.01	15.70	48.89 ± 0.07	3435.75 ± 80.11	15.21 ± 3.62
11	7.31 ± 0.01	2.91 ± 0.01	14.02	44.25 ± 0.06	2893.43 ± 63.98	15.00 ± 4.08
12	7.31 ± 0.01	2.48 ± 0.01	6.89	18.78 ± 0.03	1204.36 ± 8.25	11.10 ± 4.60
13	7.35 ± 0.01	2.66 ± 0.02	1.57	4.57 ± 0.01	295.54 ± 1.44	5.64 ± 1.69
14	7.21 ± 0.02	2.98 ± 0.04	0.52	1.64 ± 0.01	106.06 ± 0.95	3.46 ± 1.05
15	7.18 ± 0.05	3.14 ± 0.11	0.22	0.72 ± 0.01	46.04 ± 0.21	2.16 ± 0.38
16	7.08 ± 0.09	3.50 ± 0.20	0.12	0.43 ± 0.01	27.11 ± 0.06	1.61 ± 0.21
17	6.77 ± 0.13	3.60 ± 0.28	0.08	0.28 ± 0.01	17.41 ± 0.08	1.16 ± 0.15

Таблица 1.4: Результаты расчета лучевой концентрации и обилия молекул. Интегральная интенсивность определена для всех компонент. Параметры, отмеченные звездочкой (*), определены для наиболее яркой компоненты для молекул, излучение которых обнаружено как расщепление на несколько компонент.

Поз.	v^* ,	Δv^* ,	T_{peak}^* ,	W ,	N ,	x ,
	[км/с]	[км/с]	[K]	[K км/с]	10^{11} [1/см ²]	10^{-10}
C ³⁴ S (3-2) $\nu = 144617.1007$ МГц						
8	7.56 ± 0.03	1.35 ± 0.09	0.66	1.04 ± 0.01	39.29 ± 1.30	0.39 ± 0.10
9	7.56 ± 0.02	2.00 ± 0.05	1.35	3.02 ± 0.06	117.66 ± 8.74	0.70 ± 0.26
10	7.26 ± 0.01	2.50 ± 0.03	2.84	7.93 ± 0.03	324.98 ± 15.11	1.43 ± 0.35
11	7.23 ± 0.01	2.15 ± 0.02	3.49	8.32 ± 0.05	325.27 ± 14.29	1.69 ± 0.46
12	7.39 ± 0.02	1.48 ± 0.04	1.32	2.25 ± 0.02	86.91 ± 1.38	0.80 ± 0.33
13	7.30 ± 0.11	1.71 ± 0.27	0.17	0.34 ± 0.01	13.20 ± 0.40	0.25 ± 0.08
³⁴ SO (2-1) $\nu = 84410.69$ МГц						
10	6.79 ± 0.40	4.00 ± 0.70	0.07	0.26 ± 0.03	194.81 ± 25.00	0.85 ± 0.23
HC ¹⁸ O ⁺ (1-0) $\nu = 85162.2231$ МГц						
10	7.41 ± 0.25	1.94 ± 0.50	0.09	0.17 ± 0.02	3.63 ± 0.41	0.02 ± 0.01
HN ¹³ C (1-0) $\nu = 87090.85$ МГц						
8	7.87 ± 0.10	1.50 ± 0.20	0.15	0.17 ± 0.01	6.27 ± 0.52	0.06 ± 0.02

Таблица 1.4: Результаты расчета лучевой концентрации и обилия молекул. Интегральная интенсивность определена для всех компонент. Параметры, отмеченные звездочкой (*), определены для наиболее яркой компоненты для молекул, излучение которых обнаружено как расщепление на несколько компонент.

Поз.	v^* ,	Δv^* ,	T_{peak}^* ,	W ,	N ,	x ,
	[км/с]	[км/с]	[K]	[K км/с]	$10^{11} [1/\text{см}^2]$	10^{-10}
9	7.40 ± 0.07	1.53 ± 0.17	0.24	0.35 ± 0.02	13.69 ± 0.73	0.08 ± 0.03
10	7.14 ± 0.06	2.00 ± 0.17	0.32	0.77 ± 0.02	32.88 ± 0.97	0.15 ± 0.03
11	7.20 ± 0.09	2.29 ± 0.19	0.23	0.59 ± 0.02	23.22 ± 0.88	0.12 ± 0.03
12	7.10 ± 0.18	2.35 ± 0.50	0.10	0.26 ± 0.02	10.01 ± 0.66	0.09 ± 0.04
HCS ⁺ (2-1) $\nu = 85347.89 \text{ МГц}$						
8	7.22 ± 0.16	2.07 ± 0.29	0.12	0.13 ± 0.02	11.26 ± 1.65	0.11 ± 0.03
9	7.19 ± 0.09	1.92 ± 0.21	0.23	0.34 ± 0.02	31.07 ± 1.93	0.18 ± 0.07
10	7.37 ± 0.05	2.05 ± 0.12	0.35	0.72 ± 0.02	71.37 ± 2.38	0.32 ± 0.08
11	7.29 ± 0.04	1.84 ± 0.10	0.49	0.89 ± 0.02	81.81 ± 2.28	0.42 ± 0.12
12	7.37 ± 0.07	2.00 ± 0.18	0.23	0.41 ± 0.02	36.92 ± 1.72	0.34 ± 0.14
OCS (7-6) $\nu = 85139.1032 \text{ МГц}$						
9	6.78 ± 0.27	2.89 ± 0.67	0.08	0.30 ± 0.02	274.52 ± 30.00	1.63 ± 0.63
10	7.24 ± 0.10	2.85 ± 0.25	0.20	0.64 ± 0.02	610.81 ± 38.08	2.70 ± 0.66

Таблица 1.4: Результаты расчета лучевой концентрации и обилия молекул. Интегральная интенсивность определена для всех компонент. Параметры, отмеченные звездочкой (*), определены для наиболее яркой компоненты для молекул, излучение которых обнаружено как расщепление на несколько компонент.

Поз.	v^* ,	Δv^* ,	T_{peak}^* ,	W ,	N ,	x ,
	[км/с]	[км/с]	[K]	[K км/с]	$10^{11} [1/\text{см}^2]$	10^{-10}
11	7.19 ± 0.14	2.90 ± 0.40	0.17	0.51 ± 0.02	468.00 ± 30.17	2.43 ± 0.68
DCN (2-1) $\nu = 144828.0015 \text{ МГц}$						
8	8.72 ± 0.31	3.98 ± 0.53	0.09	0.33 ± 0.01	4.68 ± 0.18	0.05 ± 0.01
9	7.74 ± 0.08	2.77 ± 0.27	0.36	1.19 ± 0.02	17.71 ± 1.02	0.11 ± 0.04
10	7.75 ± 0.05	24.60 ± 0.14	0.73	3.48 ± 0.04	54.73 ± 1.99	0.24 ± 0.06
11	7.72 ± 0.09	5.13 ± 0.23	0.48	2.47 ± 0.02	36.62 ± 1.23	0.19 ± 0.05
12	8.15 ± 0.30	4.31 ± 0.66	0.09	0.38 ± 0.01	5.55 ± 0.16	0.05 ± 0.02
DCO ⁺ (2-1) $\nu = 144077.289 \text{ МГц}$						
10	8.15 ± 0.30	4.24 ± 0.54	0.12	0.61 ± 0.03	2.04 ± 0.13	0.010 ± 0.002
HNCО (4-3) $\nu = 87925.237 \text{ МГц}$						
8	7.26 ± 0.15	1.56 ± 0.30	0.10	0.21 ± 0.02	39.95 ± 3.92	0.40 ± 0.11
9	6.70 ± 0.20	3.72 ± 0.43	0.12	0.50 ± 0.03	102.43 ± 8.40	0.60 ± 0.23
10	7.21 ± 0.09	2.96 ± 0.23	0.23	0.72 ± 0.03	164.93 ± 8.96	0.73 ± 0.18

Таблица 1.4: Результаты расчета лучевой концентрации и обилия молекул. Интегральная интенсивность определена для всех компонент. Параметры, отмеченные звездочкой (*), определены для наиболее яркой компоненты для молекул, излучение которых обнаружено как расщепление на несколько компонент.

Поз.	v^* ,	Δv^* ,	T_{peak}^* ,	W ,	N ,	x ,
	[км/с]	[км/с]	[K]	[K км/с]	10^{11} [1/см ²]	10^{-10}
11	7.21 ± 0.11	3.09 ± 0.24	0.20	0.69 ± 0.03	142.48 ± 7.78	0.74 ± 0.20
12	7.47 ± 0.20	2.91 ± 0.45	0.10	0.29 ± 0.03	58.22 ± 6.05	0.54 ± 0.23
HCN (1-0)						
1	7.33 ± 0.02	2.83 ± 0.05	0.95	5.00 ± 0.04	153.11 ± 1.26	7.72 ± 1.17
2	7.76 ± 0.01	2.95 ± 0.03	1.47	7.31 ± 0.04	223.54 ± 1.26	9.20 ± 1.13
3	7.79 ± 0.33	2.71 ± 0.33	1.80	8.50 ± 0.03	257.81 ± 0.98	8.41 ± 1.01
4	7.78 ± 0.01	2.43 ± 0.02	1.73	7.30 ± 0.03	220.00 ± 0.92	6.00 ± 0.74
5	7.58 ± 0.01	2.81 ± 0.01	1.67	8.12 ± 0.03	244.71 ± 0.97	6.00 ± 0.83
6	7.24 ± 0.01	2.70 ± 0.02	1.82	8.35 ± 0.03	253.96 ± 0.97	4.92 ± 0.89
7	7.14 ± 0.01	2.14 ± 0.02	3.00	11.15 ± 0.03	335.59 ± 1.85	4.98 ± 1.19
8	7.40 ± 0.01	2.14 ± 0.01	6.45	24.07 ± 0.03	705.21 ± 6.88	7.09 ± 1.87
9	7.40 ± 0.17	2.41 ± 0.17	11.36	50.90 ± 0.03	1581.61 ± 35.63	9.38 ± 3.48
10	7.33 ± 0.17	2.89 ± 0.17	14.3	82.8 ± 0.04	2802.41 ± 39.34	12.41 ± 2.94

Таблица 1.4: Результаты расчета лучевой концентрации и обилия молекул. Интегральная интенсивность определена для всех компонент. Параметры, отмеченные звездочкой (*), определены для наиболее яркой компоненты для молекул, излучение которых обнаружено как расщепление на несколько компонент.

Поз.	v^* ,	Δv^* ,	T_{peak}^* ,	W ,	N ,	x ,
	[км/с]	[км/с]	[K]	[K км/с]	10^{11} [1/см ²]	10^{-10}
11	7.37 ± 0.01	3.21 ± 0.01	9.95	63.03 ± 0.04	1966.03 ± 26.19	10.19 ± 2.77
12	7.35 ± 0.33	2.95 ± 0.33	4.6	26.23 ± 0.04	799.76 ± 3.44	7.37 ± 3.05
13	7.22 ± 0.02	3.06 ± 0.04	1.69	9.94 ± 0.04	306.32 ± 1.47	5.85 ± 1.76
14	7.09 ± 0.03	3.07 ± 0.06	0.87	4.76 ± 0.04	147.92 ± 1.36	4.82 ± 1.47
15	7.07 ± 0.33	3.30 ± 0.33	0.50	2.78 ± 0.04	84.59 ± 1.24	3.97 ± 0.70
16	6.27 ± 0.21	3.95 ± 0.60	0.20	1.93 ± 0.04	57.79 ± 1.20	3.43 ± 0.46
17	5.42 ± 0.05	1.22 ± 0.12	0.25	1.39 ± 0.04	41.24 ± 1.18	2.76 ± 0.35
18	5.47 ± 0.30	1.22 ± 0.24	0.15	0.60 ± 0.04	17.50 ± 0.58	1.23 ± 0.11
CH ₃ CCH (5-4) $\nu \approx 85$ МГц						
8	7.33 ± 0.11	1.00 ± 0.35	0.15	0.51 ± 0.04	1436.51 ± 575.74	14.44 ± 6.92
9	7.14 ± 0.08	1.77 ± 0.19	0.21	1.08 ± 0.04	3241.69 ± 818.49	19.22 ± 8.61
10	7.00 ± 0.05	1.73 ± 0.13	0.37	2.07 ± 0.04	6111.80 ± 1283.31	27.06 ± 8.56
11	7.25 ± 0.09	2.16 ± 0.23	0.27	1.80 ± 0.04	5105.99 ± 1365.65	26.46 ± 10.08

Таблица 1.4: Результаты расчета лучевой концентрации и обилия молекул. Интегральная интенсивность определена для всех компонент. Параметры, отмеченные звездочкой (*), определены для наиболее яркой компоненты для молекул, излучение которых обнаружено как расщепление на несколько компонент.

Поз.	v^* ,	Δv^* ,	T_{peak}^* ,	W ,	N ,	x ,
	[км/с]	[км/с]	[K]	[K км/с]	10^{11} [1/см ²]	10^{-10}
12	7.61 ± 0.34	3.53 ± 0.86	0.07	0.34 ± 0.03	1312.70 ± 567.50	12.10 ± 7.24
CH ₃ CCH (6-5) $\nu \approx 102$ МГц						
8	7.58 ± 0.11	1.83 ± 0.28	0.23	0.35 ± 0.02	$0.54 \cdot 10^{13} \pm 38.26 \cdot 10^{10}$	0.55 ± 0.15
9	7.70 ± 0.20	2.00 ± 0.40	0.14	0.28 ± 0.02	$0.47 \cdot 10^{13} \pm 55.17 \cdot 10^{10}$	0.28 ± 0.11
10	7.73 ± 0.31	3.22 ± 0.70	1.00	0.25 ± 0.03	$0.46 \cdot 10^{13} \pm 55.58 \cdot 10^{10}$	0.20 ± 0.05
11	7.19 ± 0.14	2.41 ± 0.36	0.17	0.41 ± 0.02	$0.69 \cdot 10^{13} \pm 50.60 \cdot 10^{10}$	0.36 ± 0.10
12	7.47 ± 0.13	2.56 ± 0.33	0.21	0.68 ± 0.02	$1.11 \cdot 10^{13} \pm 42.72 \cdot 10^{10}$	1.03 ± 0.43

1.7. Обсуждение результатов

По результатам расчетов обилия молекул, в исследуемом объекте обнаруживается наибольшее количество таких молекул как C₂H, CH₃CCH, HCN и CS, причем, полученные значения обилия CS - это нижняя граница реального содержания этих молекул.

Для областей S255 и S257 и молекулярного облака между ними отношение лучевой концентрации серы ³²S к её изотопу ³⁴S составляет 22,5 [42]. Но в результате расчета лучевых концентраций молекул CS и C³⁴S получи-

лось, что это соотношение не выполняется. Например, лучевая концентрация CS больше лучевой концентрации $C^{34}S$ всего на порядок (в позиции 10). Это может говорить о том, что излучение CS в данном объекте оптически толстое, и были получены значения по нижней границе лучевой концентрации. Оценка оптической толщины в позициях 8 - 13 показывает, что в позициях 10 - 11 значение составило ≈ 2 , в позициях 9 и 12 - ≈ 1 , в позиции 8 - $\approx 0,6$ и в позиции 13 $\approx 0,01$.

Молекулы $HC^{18}O^+$ и DCO^+ имеют наименьшее содержание и обнаружены только в центральной позиции 10.

При этом, рассматривая полученную зависимость обилия C_2H , можно отметить следующие особенности: значения обилия в позициях 1–8 (в направлении на звезду LS 19 в S255) и 13–18 (в направлении на звезду HD 253327 в S257) имеют тенденцию к увеличению в сравнении с позициями 9–12 в молекулярном облаке. Так, в направлении на молекулярное облако в позиции 10 обилие составило $x_{C_2H} = (5.83 \pm 5.07) \times 10^{-9}$, а в направлениях на ионизирующие звёзды (позиции 1 и 18) $x_{C_2H} = (13.91 \pm 2.47) \times 10^{-9}$ и $x_{C_2H} = (9.60 \pm 2.83) \times 10^{-9}$ соответственно. В направлении на молекулярное облако четко видно уменьшение обилия этинила примерно в 2 раза по сравнению с достаточно плоскими участками радиального профиля в направлении областей НII. Плоская форма участка профиля обилия говорит в пользу того, что области НII окружены квазисферическими молекулярными оболочками, в которых этинил распределен практически равномерно. То, что такие молекулы как HCN и CS обнаружены не только в направлении на молекулярное облако, но и в направлении на ионизирующие звезды, также говорит налицо молекулярного газа вокруг областей НII.

Как известно, все обнаруженные молекулы образуются в плотном молекулярном облаке [1], а молекула этинила C_2H также еще образуется и в более разреженной оболочке этого облака, но в меньшем количестве.

Для эффективного образования этинила необходимо, чтобы в меж-

звездном газе содержался ион C^+ и молекулярный водород H_2 (см. работы [48–50]), эти условия выполняются в ФДО. В молекулярном облаке углерод содержится преимущественно в составе молекул CO из-за ослабления поля излучения звезды пылью и экранирования молекулами H_2 . Поэтому уменьшение обилия этинила в молекулярном облаке в позициях 7–13 легко объяснимо конвертацией углерода в CO. Примерно одинаковое обилие этинила в направлениях на области III указывает, что их химическая эволюция протекает сходным образом. Это неудивительно, ведь эти области III ионизируются звездами практически одинакового спектрального класса и имеют одинаковый размер. Увеличение обилия этинила в 1.5–2 раза в позициях 12 и 13 не превосходит разброса в пределах баров ошибок определения величины. На оптическом (например, рисунок 1.2) и ИК-изображениях 2MASS в направлениях на позиции 12–13 видны точечные источники. В частности, в область, которая соответствует позиции 12, попадает звезда с эмиссионными линиями S255 1, где наблюдается излучение в линии $H\alpha$ [51] (яркая точка видна на рисунке 1.2 в позициях 12 и 13) и объект Хербига – Аро S235 H_2 1 [52]. Рядом расположен рентгеновский источник CXOU J061250.6+175909 – молодая звезда малой массы в скоплении S255-IR [53]. Вполне возможно, что ионизирующее излучение в окрестности этих точечных источников приводит к локальному росту обилия этинила за счет ионизации углеродосодержащих молекул с высвобождением иона C^+ , который принимает участие в химических цепочках образования этинила. Радиальный профиль обилия этинила не содержит каких-либо особенностей в направлениях на фронт ионизации (позиции 6 и 16 для S255 и S257, соответственно). Позициям с температурой пыли 23–25 K соответствует УФ-поле с $G_0 = 50$ –100 в единицах поля Хабинга (см. напр. [54]). Значение G_0 в S255–257 близко к тому, что найдено в ФДО близ Конской Головы.

В работе [37] приведены данные наблюдений $C_2H(4-3)$ в направлении S255 IRS1 (центральная позиция 10 в данном исследовании) на ALMA и

получены оценки лучевой концентрации этинила. Несмотря на разность масштабов, оценки согласуются в пределах фактора 5 (в данном исследовании оценка меньше), что свидетельствует о том, что этинил содержится в плотном молекулярном облаке.

Сравнение лучевых концентраций этинила в окрестности S255–S257 со значениями, найденными в других ФДО, показало, что значения $N_{\text{C}_2\text{H}}$ в направлениях на области НII сходны с теми, что были найдены в Конской Голове, IC 63 [55] и М 8 [22]. По мере приближения к пику лучевой концентрации газа в молекулярном облаке, $N_{\text{C}_2\text{H}}$ приближается к значениям, наблюдаемым в ФДО Барьер Ориона [21] и некоторых молекулярных облаках (например, [56, 57]), а максимальные наблюдаемые значения $N_{\text{C}_2\text{H}}$ в позициях 10 и 11 сравнимы с ФДО и молекулярным облаком ОМС-1 [58], см. также рис.10 в работе [57]. Обилие этинила на радиальном профиле сходно со значением, наблюдаемым в Барьере Ориона: по оценкам из работы [21] обилие в интервале $(0.7 - 2.7) \times 10^{-9}$ в объекте с полем излучения $G_0 \sim 10^4$ может быть объяснено с помощью высокотемпературных химических реакций с возбужденным молекулярным водородом. Таким образом, ФДО в S255–257 представляет интерес для астрохимического моделирования, ведь в нем сравнимое обилие этинила наблюдаются при меньших на два порядка величины значениях G_0 .

1.8. Заключение по Главе 1

- Обработаны данные наблюдений молекул C_2H , HCN , OCS , HCS^+ , HN^{13}C , HC^{18}O^+ , ^{34}SO , DCO^+ , CS , C^{34}S , DCN , HNCO , CH_3CCH в областях НII S255 и S257 в двадцати позициях вдоль прямых, соединяющих ИК-источник S255 IRS1, находящийся в молекулярном облаке, с ионизирующими звёздами каждой из областей, LS 19 и HD 253327.
- Получены лучевые концентрации и обилия молекул C_2H , HCN , OCS ,

HCS^+ , HN^{13}C , HC^{18}O^+ , ^{34}SO , DCO^+ , CS , C^{34}S , DCN , HNCO , CH_3CCN в направлении на исследуемые области.

- Показано, что наиболее яркое излучение молекул наблюдается в направлении на молекулярное облако (например, яркостная температура для $\text{CS} \approx 15 \text{ K}$), наиболее слабое – в направлениях на ионизирующие звёзды ($< 1 \text{ K}$ для CS , HCN и C_2H). Наибольшую ширину имеют линии в направлениях на ионизирующие звёзды ($\approx 3 - 5 \text{ км/с}$), наименьшую – в направлении на молекулярное облако между областями НII ($\approx 2 \text{ км/с}$).
- Получена доля дейтерия в молекулах DCN и DCO^+ .

1.9. Положения, выносимые на защиту по результатам первой главы

- Показано, что наибольшее значение лучевых концентраций молекул достигается в направлении на центр молекулярного облака, далее оно уменьшается плавно в обе стороны к ионизирующим звездам. Показано, что наибольшее обилие молекул (кроме этинила C_2H) достигается в направлении на центр молекулярного облака, т. е. в молекулярном газе. Значения обилия этинила, напротив, минимальны в направлении на центр молекулярного облака (60×10^{-10}), а в направлениях на ионизирующие звёзды становятся больше примерно в два раза, что говорит о том, что этинил также активно образуется в ФДО.
- При помощи анализа формы профилей линий показано, что в молекулярной обложке присутствует несколько кинематических компонент, которые разделяются на луче зрения по мере приближения к ионизирующим звездам. Такими компонентами могут быть передняя и задняя стенки областей НII. Обнаружение таких молекул как C_2H , HCN и CS в направлении на области НII говорит о наличии также моле-

кулярного газа и областей ФДО в передней и задней стенках этих областей.

Глава 2. Моделирование окрестностей областей HII S255-S257

2.1. Введение

Одним из ключевых методов диагностики физических условий и процессов, происходящих в молекулярных облаках и областях звездообразования, является астрохимическое моделирование [5], которое позволяет определить, при каких физических условиях и на каких временах формируется молекулярный состав, максимально близкий к наблюдаемому.

В данной главе представлены результаты астрохимического моделирования, призванного объяснить результаты наблюдения линий молекул C_2H , HCN , OCS , HCS^+ , $HN^{13}C$, $HC^{18}O^+$, ^{34}SO , DCO^+ , CS , $C^{34}S$, DCN , $HNCO$, CH_3CCH в направлении на области ионизованного водорода S255 и S257 и молекулярное облако между ними.

2.2. Химическая модель

Для астрохимического моделирования использовался разработанный в ИНАСАН программный код Presta с сеткой химических реакций ALCHEMIC [8], позволяющий исследовать химическую эволюцию вещества в молекулярных облаках и областях звездообразования с учетом всех основных химических процессов, включая реакции в газовой и твердой (на поверхностях космических пылинок) фазах.

Используемая астрохимическая модель предполагает решение уравнений химической кинетики, где концентрации газопазных n_i^{gas} и адсорби-

рованных n_i^{sur} компонентов подчиняются соотношениям

$$\begin{aligned} \frac{dn_i^{\text{gas}}}{dt} = & \sum_{j,l} k_{jl}^{\text{gas}} n_j^{\text{gas}} n_l^{\text{gas}} - n_i^{\text{gas}} \sum_j k_{ij}^{\text{gas}} n_j^{\text{gas}} + \sum_j k_{\text{ext},j}^{\text{gas}} n_j^{\text{gas}} - \\ & - k_{\text{ext},i}^{\text{gas}} n_i^{\text{gas}} - k_{\text{ads},i} n_i^{\text{gas}} + k_{\text{des},i} n_i^{\text{sur}}, \quad (2.1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dn_i^{\text{sur}}}{dt} = & \sum_{j,l} k_{jl}^{\text{sur}} n_j^{\text{sur}} n_l^{\text{sur}} - n_i^{\text{sur}} \sum_j k_{ij}^{\text{sur}} n_j^{\text{sur}} + \sum_j k_{\text{ext},j}^{\text{sur}} n_j^{\text{sur}} - \\ & - k_{\text{ext},i}^{\text{sur}} n_i^{\text{sur}} + k_{\text{ads},i} n_i^{\text{gas}} - k_{\text{des},i} n_i^{\text{sur}}, \quad (2.2) \end{aligned}$$

где k_{ij}^{gas} и k_{ij}^{gas} — коэффициенты скоростей реакций в газовой и твёрдой фазах между компонентами i и j , $k_{\text{ext},i}^{\text{gas}}$ и $k_{\text{ext},i}^{\text{sur}}$ — коэффициенты скоростей реакций, обусловленных влиянием внешних факторов (космические лучи, УФ-излучение), $k_{\text{ads},i}$ — коэффициент скорости адсорбции компонента с индексом i на космическую пыль, $k_{\text{des},i}$ — коэффициент скорости десорбции компонента i с пыли.

Подробное описание кода можно найти в работе [59]. Апробация программного кода была произведена также в работе [60].

В данном исследовании было проведено моделирование химической эволюции вещества в сферически симметричном молекулярном облаке, имеющем профиль плотности $n(r)$.

Для оценки профиля плотности использовались данные о лучевой концентрации молекулярного водорода вдоль рассматриваемого среза, полученные по данным космического телескопа *Herschel* и взятые из статьи [38]. На карте распределения молекулярного водорода были выбраны области диаметром $28''$ с центрами в позициях, в которых проводились наблюдения (см. рисунок 1.2); лучевые концентрации молекулярного водорода усреднялись по размеру позиции. Зависимость $n(r)$ аппроксимировалась выражением:

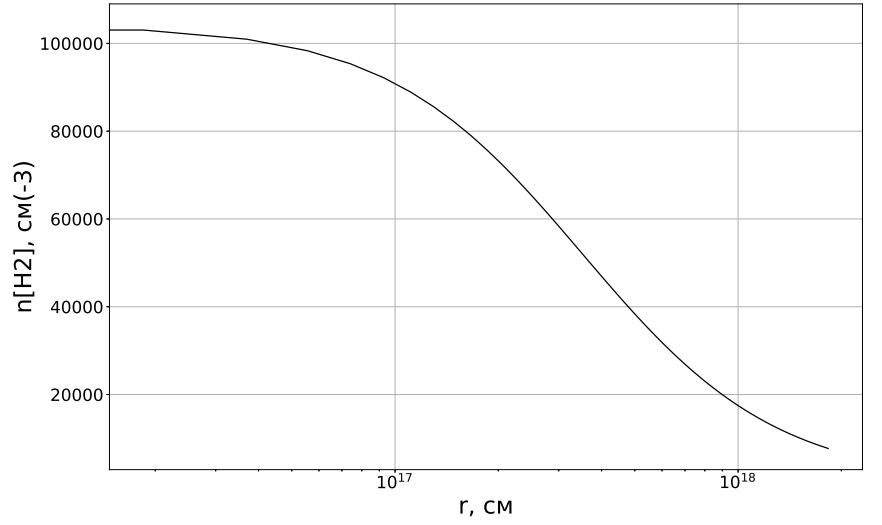


Рис. 2.1. Профиль плотности молекулярного водорода в направлении к звезде LS 19 от центра молекулярного облака до ФДО (от позиции 10 до позиции 5).

$$n(r) = \frac{n_0}{1 + \left(\frac{r}{r_0}\right)^p}, \quad (2.3)$$

где n_0 — значение плотности водорода в центре облака; p и r_0 — параметры распределения.

В результате проведенной аппроксимации для параметров в выражении (2.3) были получены следующие значения: $n_0 = 1.04 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, $r_0 = 3.5 \cdot 10^{17} \text{ см}$, $p = 1.53$. На рисунке 2.1 представлен профиль концентрации молекулярного водорода для исследуемой области в направлении от центра молекулярного облака к звезде LS 19, т. е. от позиции 10 до позиции 5. Профиль демонстрирует увеличение содержания H_2 вглубь молекулярного облака, т.е. в направлении позиции 10.

Температура газа считалась постоянной и равной значению температуры пыли, т. е. $T_{\text{dust}} = T_{\text{gas}}$. При этом, при подборе параметров моделирования были рассмотрены варианты значений температуры газа и пыли $T_{\text{dust}} = T_{\text{gas}} = (10; 15; 20; 25) \text{ K}$.

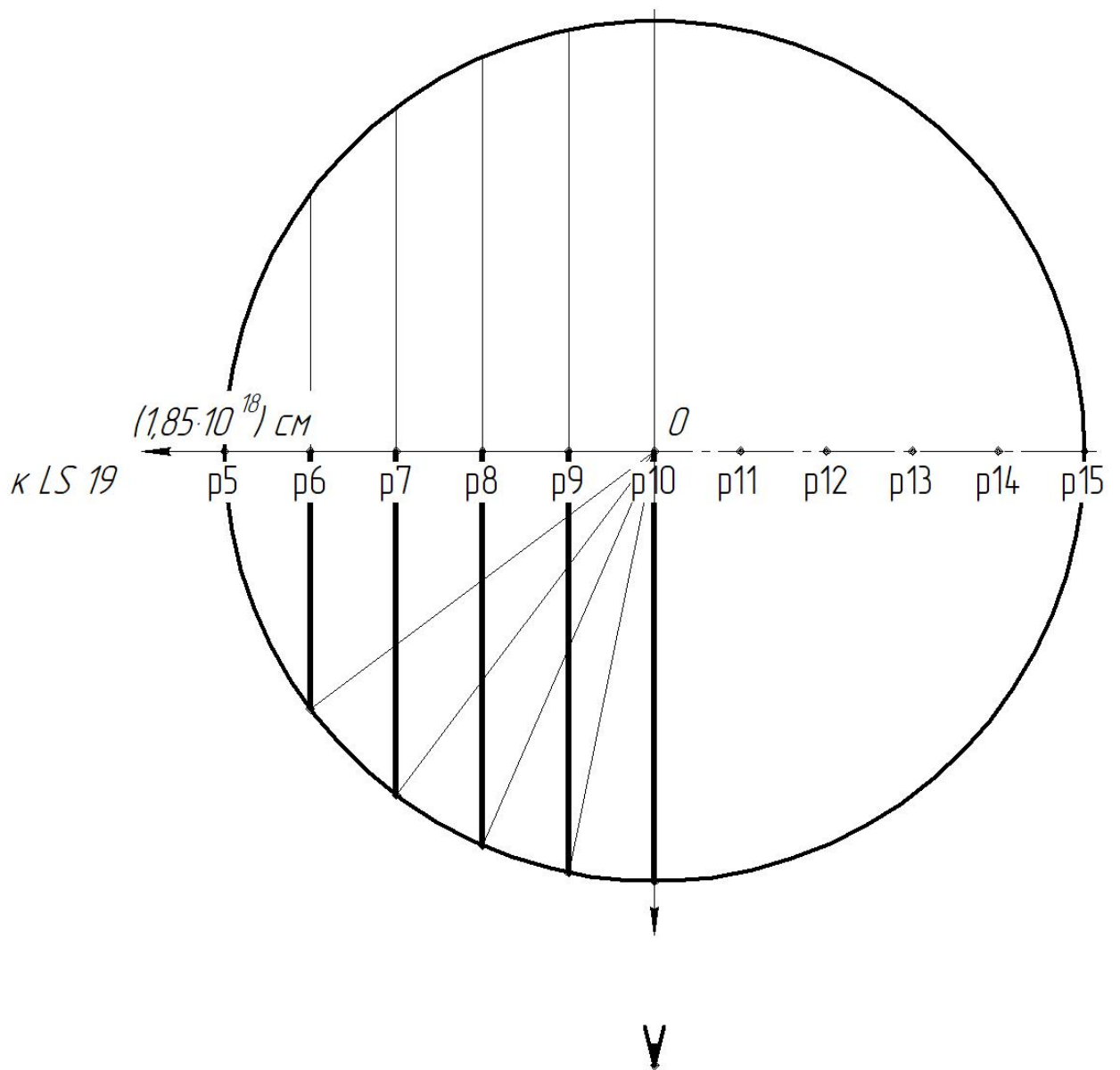


Рис. 2.2. Расчетная схема модели молекулярного облака в соответствии с позициями в исследуемом объекте.

Таблица 2.1. Резюме параметров модели.

Параметр	Значение
Скорость ионизации космическими лучами (с^{-1})	1.3×10^{-17}
Температура газа, T_{gas} (К)	10; 15; 20; 25
Температура пыли, T_{dust} (К)	10; 15; 20; 25
Средняя интенсивность УФ-излучения «снаружи», G_{out}	0, 10, 10^2 , 10^3 , 10^4 , 10^5
Средняя интенсивность УФ-излучения «внутри», G_{in}	0
Возраст, год	10^2 , 10^3 , 10^4 , 10^5
Радиус молекулярного облака, R (см)	1.85×10^{18}
Профиль плотности водорода, $n(r)$	$n(r) = \frac{1.04 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}}{1 + \left(\frac{r}{3.5 \cdot 10^{17} \text{ см}} \right)^{1.53}}$

Далее для принятых профилей плотности и температуры вычислялись радиальные распределения концентрации молекул для различных моментов времени. По этим распределениям рассчитывались лучевые концентрации молекул для прицельных параметров, соответствующих наблюдаемым позициям. При этом варьировались некоторые параметры химической модели, пытаясь достичь максимального согласия между расчетами и наблюдениями: среднюю интенсивность УФ-излучения «снаружи» (от ионизирующей звезды), «внутри» (от источника IRS1), а также возраст молекулярного облака.

2.3. Астрохимическое моделирование этинила C_2H вокруг областей S255 и S257

Один из основных путей синтеза этинила [61] — реакция диссоциативной рекомбинации иона $C_2H_2^+$, который, в свою очередь, является продуктом цепочки реакций, начинающейся с иона CH^+ . Происхождение этого иона остается неясным. В диффузных облаках, где он наблюдается, основная реакция его синтеза обладает большим температурным барьером (4640 К [62]), тогда как реакция разрушения (реакция диссоциативной рекомбинации) является безбарьерной. Это означает, что в «классических» астрохимических моделях теоретическое содержание CH^+ оказывается существенно ниже наблюдаемого (в силу доминирования процессов разрушения над процессами синтеза).



Для объяснения наблюдаемого высокого содержания CH^+ предлагаются модели, в которых происхождение этого иона связывается с ударными волнами (напр. [63]) или с диссипацией турбулентных структур (напр. [64]). В отсутствие ударных волн и сильной турбулентности важным фактором, повышающим скорость реакции 2.4, может оказаться фотовозбуждение молекул H_2 : внутренняя энергия возбужденных колебательных состояний может оказаться достаточной для преодоления барьера даже в состоянии $v = 1$ [65], не говоря о более высоких. Важность учета колебательных состояний молекулы H_2 уже была отмечена в работе [20]. В работах [66, 67] рассматривалось их влияние на химические процессы в протопланетных дисках. При этом в работе [67] указано, что в дисках эти реакции важны в том числе и для эволюции этинила.

О влиянии возбужденного состояния молекул H_2 на содержание этинила будет сказано ниже в подразделе 2.4.

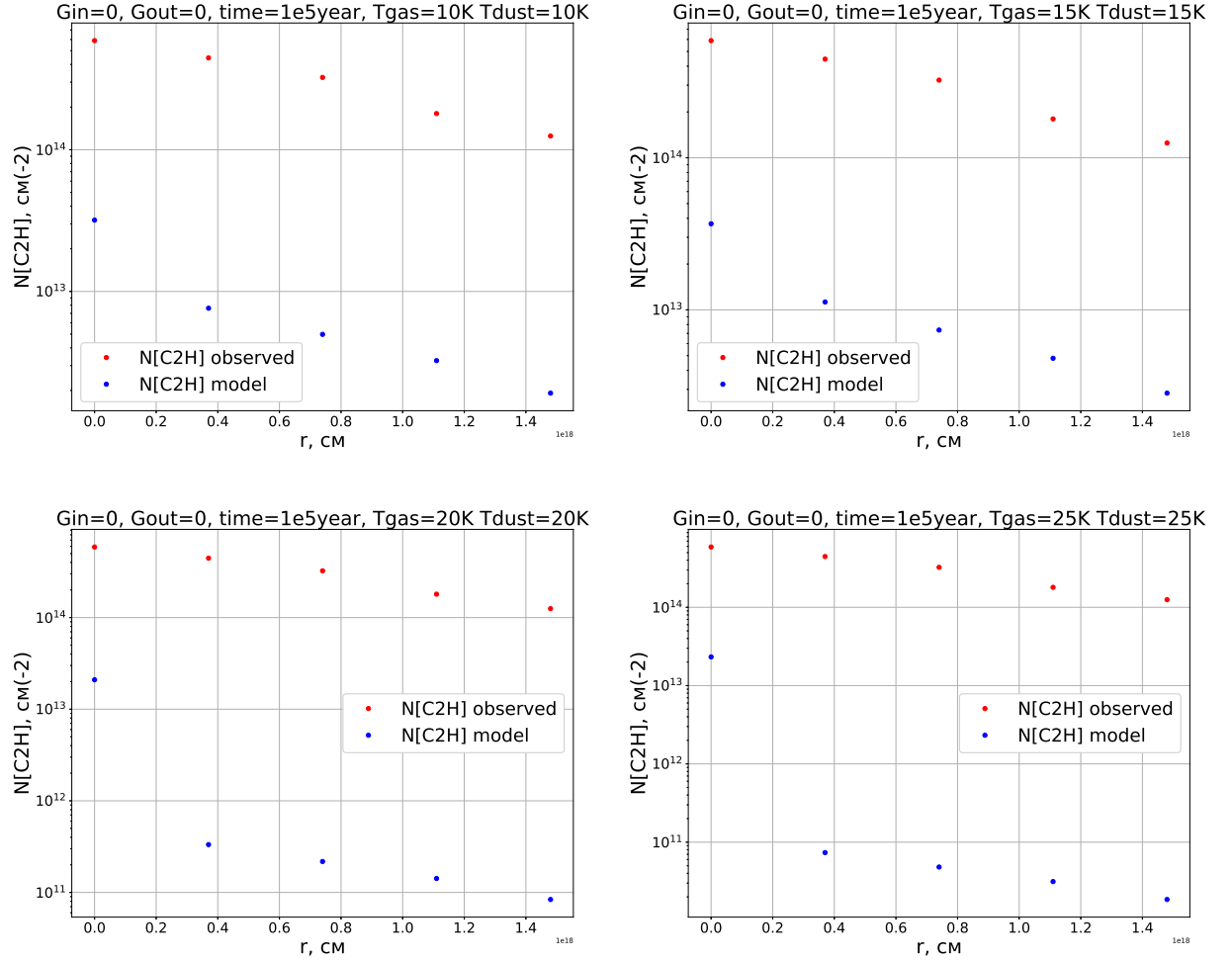


Рис. 2.3. Результаты моделирования эволюции содержания этинила для разных значений температуры газа и пыли $T_{\text{dust}} = T_{\text{gas}}$. Точка 0 соответствует позиции 10. Направление оси абсцисс - к звезде LS 19. Показаны значений лучевых концентраций в позициях 6–10.

Хотя наиболее близкое значение температуры к наблюдаемой температуре пыли $T_{\text{dust}} = 25$ K, нами было рассмотрено четыре варианта значений температуры для возраста облака 10^5 лет, и для значений внутренней и внешней средней интенсивности УФ-излучения $G_{\text{in}} = G_{\text{out}} = 0$. Результаты представлены на рисунке 2.3.

Как видно из результатов на рисунке 2.3, лучевая концентрация в позиции 10 не меняет своё значение в зависимости от изменений температуры газа и пыли. В остальных позициях 6–9 значения лучевых концентраций уменьшаются в пределах двух порядков при увеличении температуры от

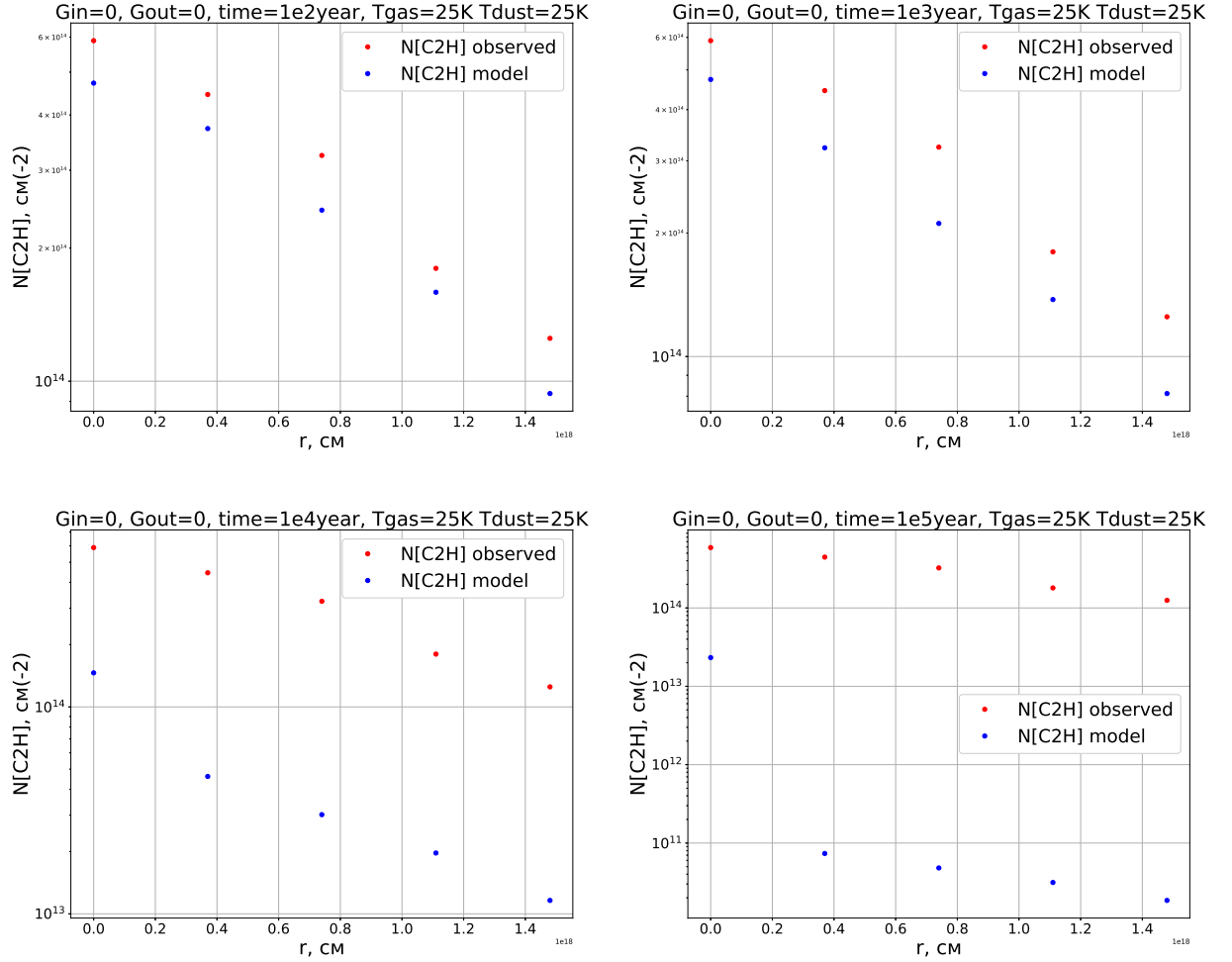


Рис. 2.4. Результаты моделирования эволюции содержания этинила для разных значений возраста облака. Точка 0 соответствует позиции 10. Направление оси абсцисс - к звезде LS 19. Показаны значений лучевых концентраций в позициях 6–10.

10 K до 25 K. Для дальнейших оценочных расчетов была принято значение температуры газа и пыли $T_{\text{dust}} = T_{\text{gas}} = 25\text{ K}$, как наиболее близкое к наблюдаемому значению.

Была рассмотрена зависимость лучевой концентрации этинила от возраста облака. Как было отмечено в подразделе 1.2, возраст звезды LS 19 определен как 10^6 лет. При этом, по результатам моделирования (см. рисунок 2.4) наиболее лучшая сходимость значений модели и наблюдений достигается при возрасте молекулярного облака $10^2 - 10^3$ лет. При возрасте 10^4 лет расхождение значений с наблюдаемыми составляет порядок, а при

возрасте 10^5 лет - четыре порядка.

Результаты моделирования эволюции содержания этинила для разных значений внешней средней интенсивности УФ-излучения G_{out} представлены на рисунке 2.5. В направлении на позиции 6–9 лучевая концентрация этинила практически не меняется, лишь немного увеличивается. В направлении на позицию 10, наоборот, с увеличением значения G_{out} до значения 10^5 , лучевая концентрация этинила уменьшается на два порядка.

Модели с изменением внутренней средней интенсивности УФ-излучения G_{in} молекулярного облака не рассматривались, так как УФ-поле внутри облака несущественно (внутри облака нет мощных источников УФ-излучения).

2.4. Реакции с возбужденным молекулярным водородом в химической модели областей S255–S257

В данном подразделе описан вклад возбужденных состояний молекулы H_2 в эволюцию содержания этинила в фотодиссоциационных областях.

2.4.1. Населенности уровней молекулы водорода в объектах S255-S257

Чтобы оценить населенности уровней молекулярного водорода, был использован программный код Meudon PDR Code (1.5.4) [68], который позволяет рассчитать атомную и молекулярную структуру молекулярных облаков, а также ФДО. При расчете использовались параметры областей S255 и S257 (лучевая концентрация H_2 , лучевая концентрация и обилие C_2H в позициях 6–14). При вычислении населенностей колебательно-вращательных уровней H_2 было предположено, что облако освещено ультрафиолетовым излучением центрального источника со средней интенсивностью, характеризуемой безразмерной величиной G (в единицах средней интенсивности излучения в солнечной окрестности).

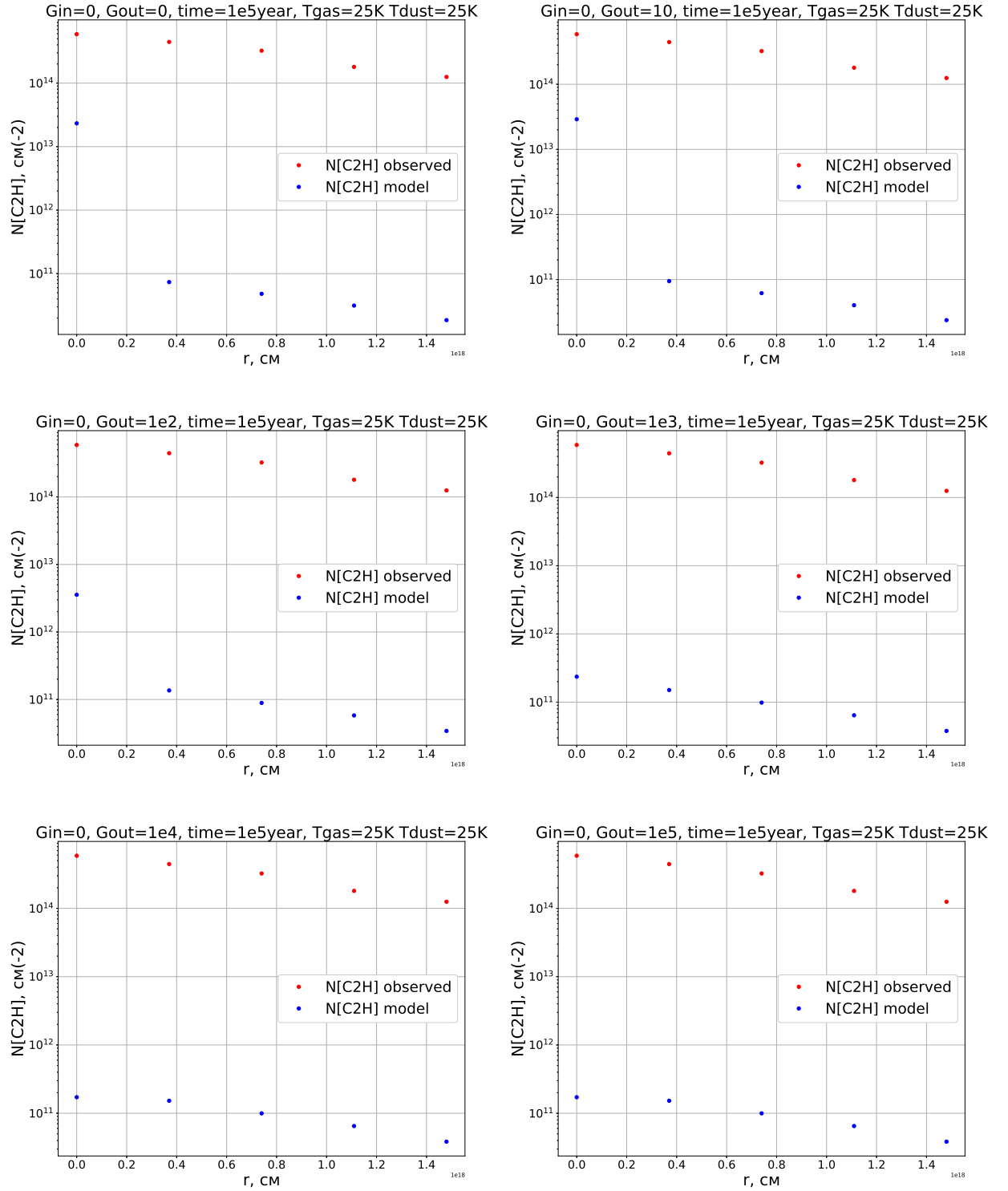


Рис. 2.5. Результаты моделирования эволюции содержания этинила для разных значений внешней средней интенсивности УФ-излучения G_{out} . Точка 0 соответствует позиции 10. Направление оси абсцисс - к звезде LS 19. Показаны значений лучевых концентраций в позициях 6–10.

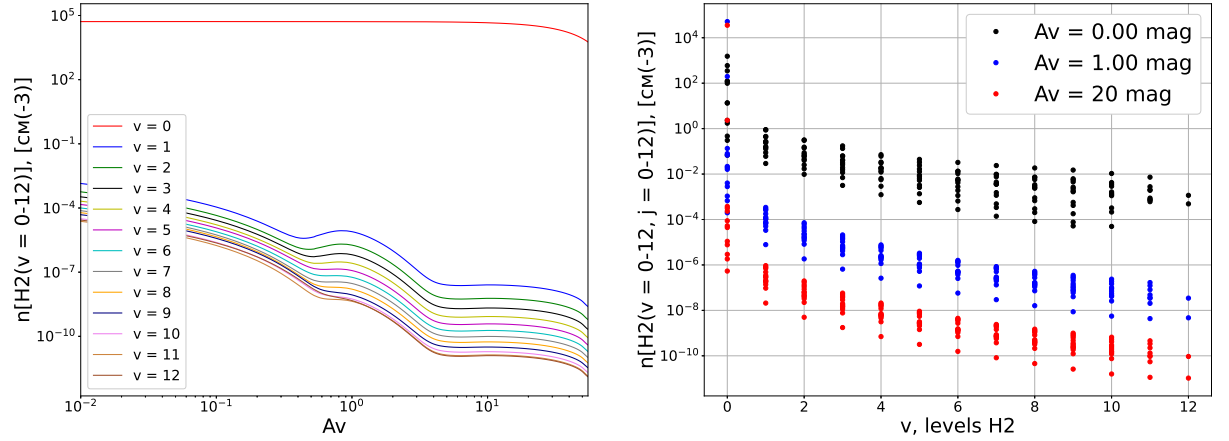


Рис. 2.6. Населенности уровней молекулы H_2 для поля излучения центрального источника $G = 10$. Слева - населенности колебательных уровней молекулы H_2 как функция A_V . Справа - населенности вращательных уровней молекулы H_2 в различных колебательных состояниях для избранных значений A_V .

Результаты расчетов содержания возбужденного водорода для $G = 10$ приведены на рисунке 2.6. На левой панели рисунка 2.6 представлено содержание молекулярного водорода на колебательных уровнях $v = 0 - 12$. В этом случае содержание водорода на всех возбужденных уровнях не превышает 10^{-8} от содержания водорода в основном состоянии. В работе [20] для реакций с ионом углерода C^+ рекомендовано рассматривать реакции с возбужденными молекулами водорода, если их содержание превосходит 10^{-6} от содержания H_2 в основном состоянии. Очевидно, что при $G = 10$ реакции с возбужденным водородом важной роли не играют.

На правой панели рис. 2.6 представлено содержание молекулярного водорода в различных вращательных состояниях ($j = 0 - 12$) на различных колебательных уровнях ($v = 0 - 12$) для нескольких значений A_V . Вращательные уровни, соответствующие определенному колебательному уровню, показаны вертикально расположенными точками.

На рис. 2.7 приведены результаты расчетов содержания молекулярного водорода для $G = 100$. Следует обратить внимание на то, что при

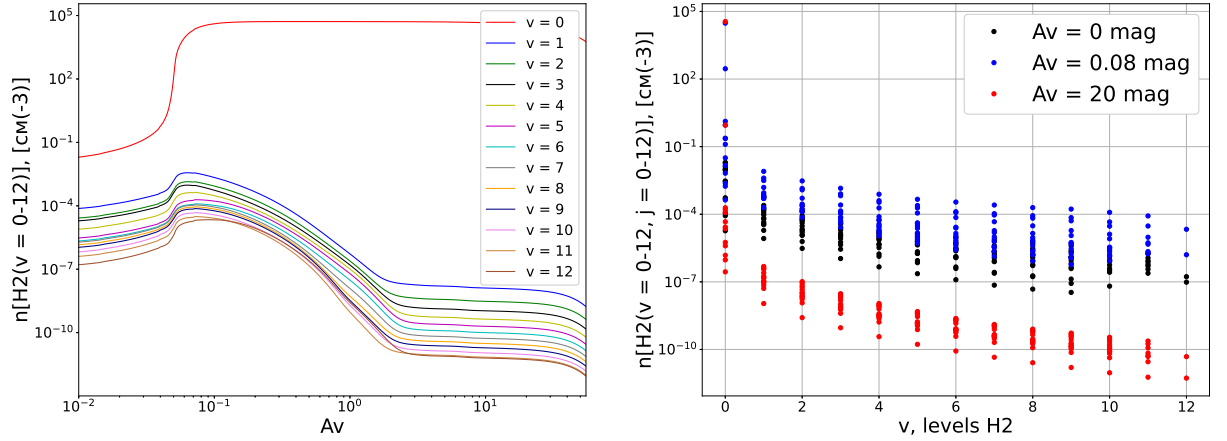


Рис. 2.7. Населенности уровней молекулы H_2 для поля излучения центрального источника $G = 100$. Слева - населенности колебательных уровней молекулы H_2 как функция A_V . Справа - населенности вращательных уровней молекулы H_2 в различных колебательных состояниях для избранных значений A_V .

$A_V < 1$ содержание H_2 понижено из-за фотодиссоциации (рис. 2.7, поэтому, несмотря на низкое абсолютное содержание $\text{H}_2(v=1)$, его относительное содержание, $\text{H}_2(v=1)/\text{H}_2(v=0)$, оказывается высоким и превосходит уровень 10^{-6} при $A_V \leq 0.05 \div 0.06^m$, в том числе, в центре молекулярного облака (в позиции 10), где расположен ИК источник IRS1. Из рис. 2.7 видно, что при небольших значениях A_V относительное содержание выше 10^{-6} наблюдается также для некоторых возбужденных вращательных состояний ($j > 0$).

На рис. 2.8 показаны результаты моделирования содержания молекулярного водорода для $G = 1000$. В этом случае область диссоциированного водорода простирается до $A_V \sim 0.6$, а доля молекул водорода, находящихся в первом возбужденном колебательном состоянии ($\text{H}_2(v=1)/\text{H}_2(v=0)$), достигает нескольких процентов, снижаясь до 10^{-6} только при $A_V \gtrsim 0.8$. Вклад возбужденных вращательных состояний становится в этом варианте еще более существенным.

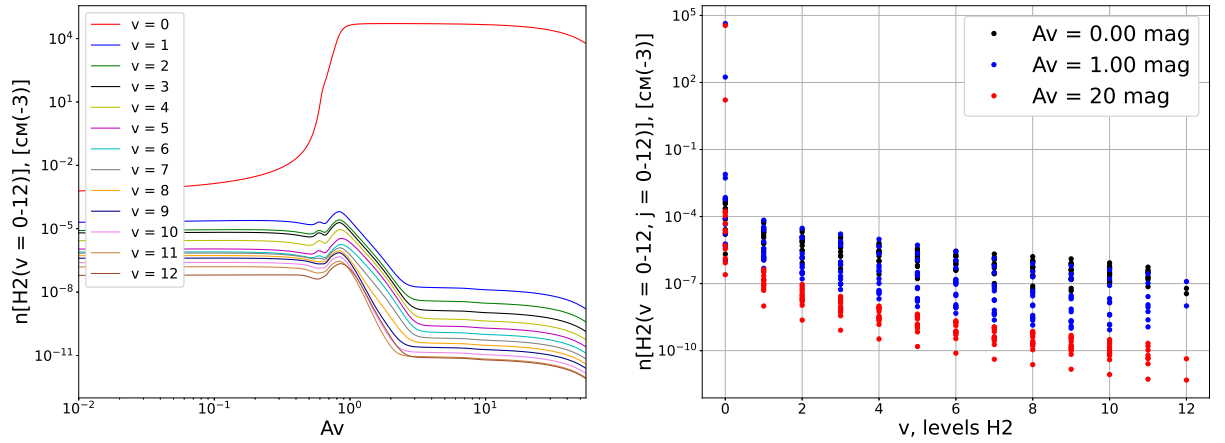


Рис. 2.8. Населенности уровней молекулы H_2 для поля излучения центрального источника $G = 1000$. Слева - населенности колебательных уровней молекулы H_2 как функция A_V . Справа - населенности вращательных уровней молекулы H_2 в различных колебательных состояниях для избранных значений A_V .

2.4.2. Результаты химического моделирования

Полный учет возбужденных состояний молекулы H_2 в астрохимическом моделировании требует, во-первых, расчета населенностей уровней в каждой рассматриваемой позиции, во-вторых, знания коэффициента скорости реакции (2.4) для каждого состояния (то есть для каждого сочетания v и j). Решение первой задачи возможно, например, при помощи кода Meudon. Но коэффициенты скоростей k , зависящие от состояния молекулы H_2 , вычислены только для очень небольшого числа реакций и состояний (см. напр. [69]). Поэтому в данной работе был использован приближенный подход, призванный в целом прояснить важность учета состояния молекулы H_2 при моделировании химической эволюции ФДО и прилегающих регионов, подобных областям S255-S257. Для этого в сетку реакций модели Presta была добавлена обобщенная реакция 2.5, в которой H_2^* соответствует первому возбужденному колебательному состоянию H_2 . Относительное содержание возбужденных молекул H_2 как функция A_V вычислялось с использованием результатов, показанных на рис. 2.7 и 2.8. Предполагалось,

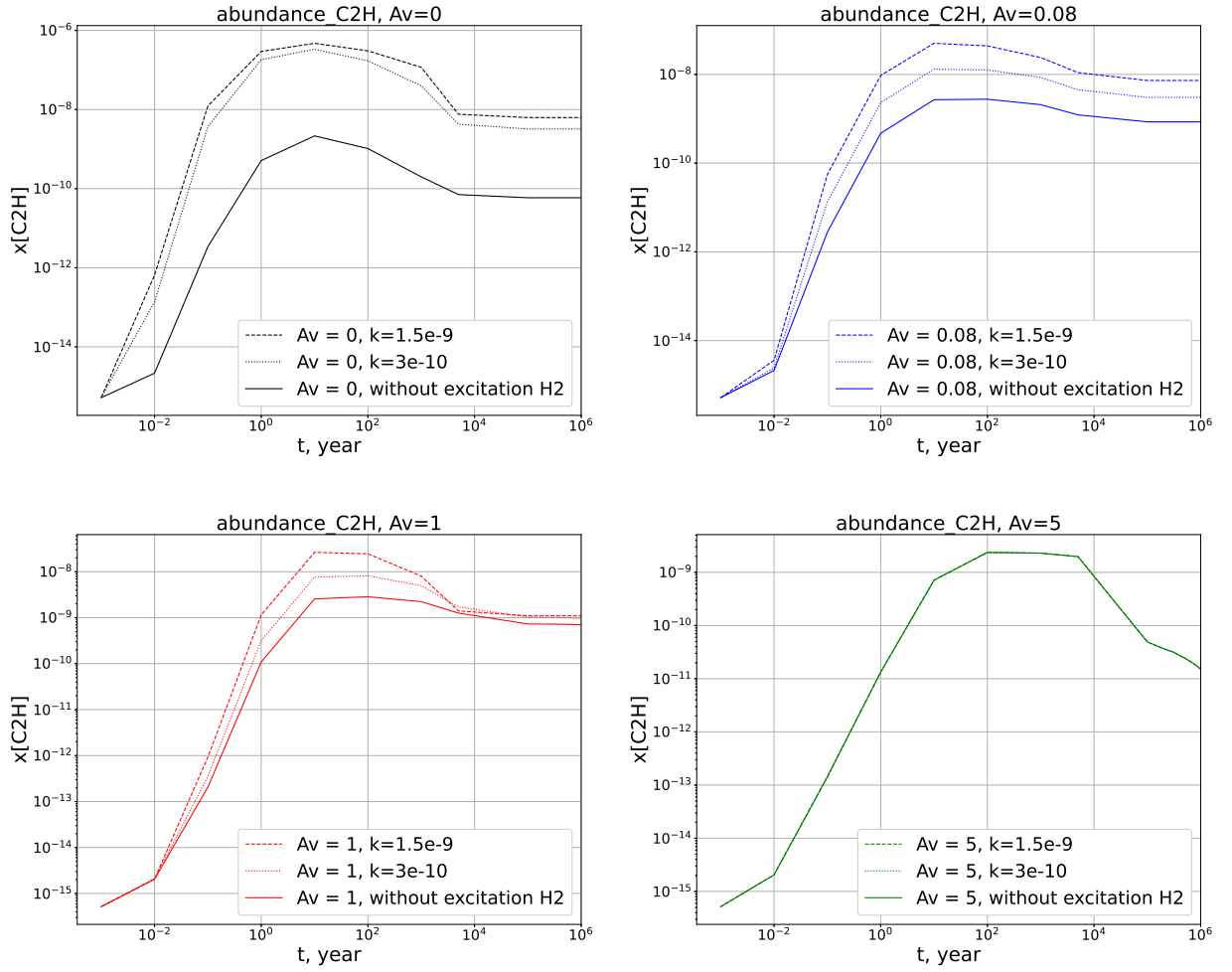


Рис. 2.9. Результаты моделирования эволюции содержания этинила для точек с разными A_V внутри облака при $G = 100$. Штриховыми линиями показаны результаты расчетов для высокого значения коэффициента скорости, пунктиром — для низкого значения коэффициента скорости. Сплошными линиями показаны результаты расчетов без учета реакций с возбужденными молекулами H_2 .

что барьер у реакции 2.5 отсутствует, а для коэффициентов скоростей рассматривались значения $k = 3 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3\text{с}^{-1}$ [65] и $1.5 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3\text{с}^{-1}$ [20].



Результаты расчетов для $G = 100$ показаны на рис. 2.9 (моделирование для $G = 10$ не проводилось). Наиболее сильно учет возбуждения молекулы водорода сказывается при $A_V = 0$ (верхняя левая панель), когда вычисленные содержания этинила превышают его содержания в стандарт-

ной модели (без учета возбуждения) более чем на два порядка. При этом высокое и низкое значения коэффициента скорости дают практически одни и те же результаты. Однако и при больших значениях A_V , вплоть до ~ 0.1 , рост содержания C_2H за счет реакций с возбужденными молекулами H_2 при высоком значении k составляет примерно порядок величины, особенно на ранних временах (см. верхнюю правую панель). При низком значении k расхождение меньше, чуть более половины порядка. При $A_V = 1$ (левая нижняя панель) различие в моделях проявляется только на очень ранних временах и к возрасту около 10^4 лет практически исчезает. При $A_V = 5$ (правая нижняя панель) различий в моделях нет, то есть реакции с возбужденными молекулами водорода не играют роли (в силу невысокой населенности возбужденных состояний), а содержание этинила сильно падает, из-за того что атомы углерода оказываются связанными в соединениях, адсорбированных на пылинках.

На рис. 2.10 показаны результаты расчетов эволюции содержания этинила в модели со средней интенсивностью УФ-излучения $G = 1000$. В этом случае при $A_V = 0$ (слева сверху) содержания в моделях с учетом возбуждения H_2 и без его учета также различаются значительно, причем на самых ранних временах различие достигает трех порядков. Однако итоговые содержания этинила оказываются очень небольшими в силу его эффективной фотодиссоциации. В модели с $A_V = 0.08$ (справа сверху) итоговые содержания этинила несколько выше, а различие моделей с учетом возбуждения H_2 и без него превышает порядок величины. При $A_V = 1$ (слева внизу) содержания этинила в моделях с учетом возбуждения молекул H_2 приближаются к значениям порядка 10^{-8} и на больших временах превосходят его содержание в «стандартной» модели на порядок величины. При $A_V = 5$ (справа внизу) различий между моделями нет, а итоговое содержание этинила очень мало. Очевидно, что при $A_V = 5$ модели с $G = 100$ и $G = 1000$ практически не отличаются.

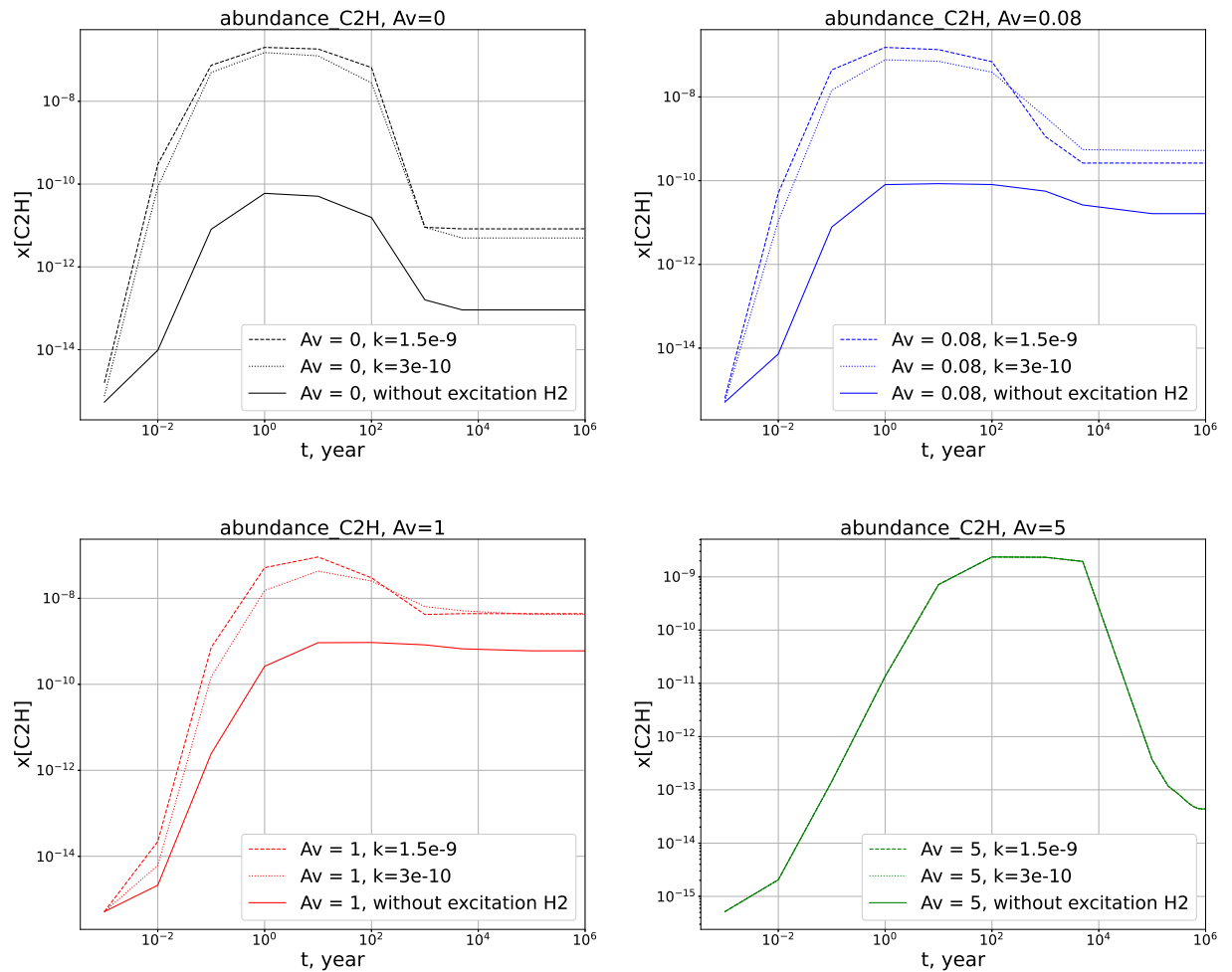


Рис. 2.10. Результаты моделирования эволюции содержания этинила для точек с разными A_V внутри облака при $G = 1000$. Штриховыми линиями показаны результаты расчетов для высокого значения коэффициента скорости, пунктиром — для низкого значения коэффициента скорости. Сплошными линиями показаны результаты расчетов без учета реакций с возбужденными молекулами H_2 .

2.5. Обсуждение

Астрохимическое моделирование проводилось для молекулярного облака, зажато между областями ионизованного водорода областей S255 и S257. Облако было принято сферически симметричным в части геометрии, центр облака расположен в позиции 10, радиус составляет 1.85×10^{18} см (позиция 5). Такое значение радиуса молекулярного облака было выбрано с целью моделирования ФДО, которым соответствуют позиции 6–7 и позиции 13–14. Для начала исследования и проведения предварительных расчетов была рассмотрена часть молекулярного облака (половина) в направлении звезды LS 19. По лучу зрения модель также считалась симметричной относительно оси, соединяющей центр молекулярного облака (позицию 10) и ионизирующую звезду LS 19. Учитывая вышесказанное проводилось моделирование сектора (1/4) круга (см. рисунок 2.2).

Была принята эталонная модель, физические параметры которой наиболее близко соответствуют наблюдательным данным. И вариация параметров для расчета других моделей происходила вокруг эталонной модели. Параметры эталонной модели соответствовали плотности, описанной степенной функцией, температуре газа и пыли $T_{\text{dust}} = T_{\text{gas}} = 25$ K, средняя интенсивность УФ-излучения "внутри" $G_{\text{in}} = 0$, средняя интенсивность УФ-излучения "снаружи" $G_{\text{out}} = 1000$, возраст облака 10^5 лет.

По результатам моделирования было определено, что при всех рассмотренных сочетаниях параметров не удастся добиться различия между теорией и наблюдениями меньше порядка величины. А при расчете эталонной модели разница между модельными значениями лучевых концентраций этинила и наблюдаемыми составляет три порядка величины (см. рисунок 2.11).

В связи с тем, что проведена предварительная оценка и предварительные расчеты, требуется провести моделирование молекулярного состава

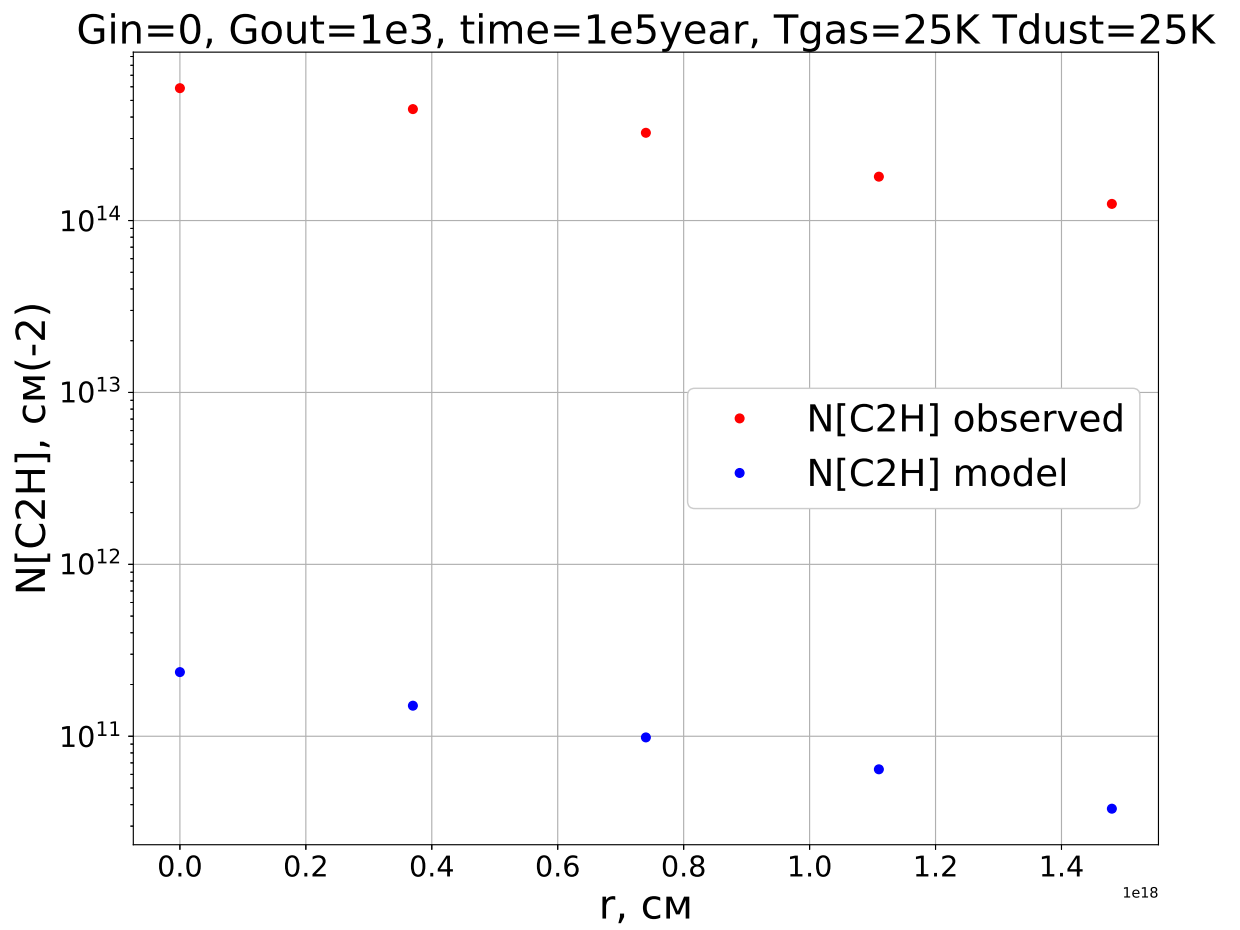


Рис. 2.11. Результаты расчета эталонной модели.

ва рассматриваемого объекта в дополнение к моделированию этинила. Молекулы для проведения более полного расчета представлены в главе 1, а именно C_2H , HCN , OCS , HCS^+ , $HN^{13}C$, $HC^{18}O^+$, ^{34}SO , CS , $C^{34}S$, $HNCO$, CH_3CSH .

Также были рассмотрены возможные вариации населенности уровней молекулярного водорода в объектах S255–S257, и исследован возможный вклад возбужденного колебательного состояния молекулы H_2 $v = 1$ в химические реакции, приводящие к синтезу этинила (C_2H). В ходе проведенного исследования было показано, что при высоком поле излучения и при небольших значениях $A_V \leq 1$ учет реакций с молекулами водорода, находящимися в возбужденном состоянии, приводит к существенному (как минимум на порядок величины) увеличению модельного содержания этинила. Превышение может оказаться более значительным при учете колебательных состояний с $v > 1$. Это означает, что учет возбужденных состояний необходим при моделировании подобных объектов.

2.6. Заключение по Главе 2

- Представлено астрохимическое моделирование этинила в молекулярном облаке между областями ионизованного водорода S255-S257 с помощью кода Presta для разных значений физических параметров. Проведено сравнение полученных модельных результатов лучевой концентрации этинила с наблюдательными данными, которое показывает, что не удастся добиться сходимости результатов моделирования и наблюдений с разницей меньше порядка величины.
- Рассмотрено влияние возбужденного состояния молекул водорода, участвующих в реакции образования иона CH^+ , который в свою очередь участвует в цепочке образования этинила.

2.7. Положения, выносимые на защиту по результатам второй главы

- При помощи астрохимического моделирования этинила вокруг областей S255 и S257 показано, что при варьировании таких параметров модели, как средняя интенсивность УФ-излучения, возраст молекулярного облака, температура газа и пыли можно получить соответствие с наблюдаемыми значениями лучевых концентраций этинила в пределах порядка величины.
- Показано, что при высоком поле излучения и при небольших значениях $A_V \leq 1$ учет реакций с молекулами водорода, находящимися в возбужденном состоянии, приводит к существенному (как минимум на порядок величины) увеличению модельного содержания этинила.

Заключение

В настоящей работе было проведено исследование физических условий, влияющих на эволюцию этинила в направлении на области ионизованного водорода S255–S257 и молекулярное облако между ними, а также рассмотрена структура и химический состав данных областей.

Были обработаны данные наблюдений молекул C_2H , HCN , OCS , HCS^+ , $HN^{13}C$, $HC^{18}O^+$, ^{34}SO , DCO^+ , CS , $C^{34}S$, DCN , $HNCO$, CH_3CCH в областях HII S255 и S257 в двадцати позициях вдоль прямых, соединяющих ИК-источник S255 IRS1, находящийся в молекулярном облаке, с ионизирующими звёздами каждой из областей, LS 19 и HD 253327. Были рассчитаны лучевые концентрации и обилия этих молекул в направлении на исследуемые области и доля дейтерия в молекулах DCN и DCO^+ , обнаруженных в молекулярном облаке.

Определено, что форма профилей линий указывает на то, что в молекулярной оболочке областей HII присутствует несколько кинематических компонент, которые разделяются на луче зрения по мере приближения к ионизирующим звездам. Такими компонентами могут быть передняя и задняя стенки областей HII. Обнаружение таких молекул как C_2H , HCN и CS в направлении на области HII говорит о наличии также молекулярного газа и областей ФДО в передней и задней стенках этих областей.

Также в данной работе проведено астрохимическое моделирование этинила в молекулярном облаке между областями ионизованного водорода S255-S257. Рассмотрено влияние возбужденного состояния молекул водорода, участвующих в реакции образования иона CH^+ . Показано, что при высоком поле излучения и при небольших значениях $A_V \leq 1$ в данном объекте необходим учет реакций с молекулами водорода, находящимися в

возбужденном состоянии.

Разработанная в диссертации методика позволяет в дальнейшем проводить исследования и моделирование химического состава молекулярных облаков. В качестве продолжения данного исследования планируется:

- Провести астрохимическое моделирование молекул C_2H , HCN , OCS , HCS^+ , $HN^{13}C$, $HC^{18}O^+$, ^{34}SO , CS , $C^{34}S$, $HNCO$, CH_3CCH в окрестностях областей HII S255 и S257 для широкого диапазона входных параметров, варьируемых по отношению к соответствующей наблюдением эталонной модели.
- В части населенности уровней ввести в код Presta учет возбужденного состояния водорода для проведения моделирования.
- Дополнить исследование химического состава областей S255 и S257 и их окрестностей такими молекулами как формальдегид и метанол.

Литература

1. Засов, Постнов (2006) Общая астрофизика // М.: Век 2 — 2006. — 496 с.
2. Редкол.: Сюняев (Гл. ред.) и др. (1986) Физика космоса: Маленькая энциклопедия // М.: Советская энциклопедия — 1986. — 783 с.
3. Schinnerer & Leroy (2024) Molecular Gas and the Star-Formation Process on Cloud Scales in Nearby Galaxies // *An. Rev. Astron. Astrophys* — 2024. — V. 62. — Pp. 369-436.
4. McGuire (2022) 2021 Census of Interstellar, Circumstellar, Extragalactic, Protoplanetary Disk, and Exoplanetary Molecules // *The Astrophysical Journal Supplement Series* — 2022. — V. 259. — Pp. 51.
5. Jørgensen, Belloche, & Garrod (2020) Astrochemistry During the Formation of Stars // *An. Rev. Astron. Astrophys* — 2020. — V. 58. — Pp. 727-778.
6. Yang, Lijun Hua & Aigen Li (2024) Where Have All the Sulfur Atoms Gone? Polycyclic Aromatic Hydrocarbon as a Possible Sink for the Missing Sulfur in the Interstellar Medium. I. The C-S Band Strengths // *The Astrophysical Journal* — 2024. — V. 974. — Pp. 1.
7. Murga et al. (2020) Impact of PAH photodissociation on the formation of small hydrocarbons in the Orion Bar and the horsehead PDRs // *MNRAS* — 2020. — V. 497. — Pp. 2327-2339.

8. *Semenov & Wiebe (2011)* Chemical Evolution of Turbulent Protoplanetary Disks and the Solar Nebula // *Astrophys. J. Suppl* — 2011. — V. 196. — Pp. 25.
9. *Tielens (2013)* The molecular universe // *Reviews of Modern Physics* — 2013. — V. 85. — Pp. 1021-1081.
10. *Berne, Tielens (2012)* Formation of buckminsterfullerene (C60) in interstellar space // *Proceedings of The National Academy of Science of the United States* — 2012. — V. 109. — Pp. 401-406.
11. *Berne, Montillaud & Joblin (2015)* Top-down formation of fullerenes in the interstellar medium // *Astron. and Astrophys* — 2015. — V. 577. — Pp. 9.
12. *Tielens, Hagen (1982)* Model calculations of the molecular composition of interstellar grain mantles // *Astron. and Astrophys* — 1982. — V. 114. — Pp. 245-260.
13. *Zhen et al. (2014)* Laboratory Formation of Fullerenes from PAHs: Top-down Interstellar Chemistry // *The Astrophysical Journal Letters* — 2014. — V. 797. — Pp. 5.
14. *Pety et al. (2005)* Are PAHs precursors of small hydrocarbons in photodissociation regions? The Horsehead case // *Astron. and Astrophys* — 2005. — V. 435. — Pp. 885-899.
15. *Guzman et al. (2015)* Spatially Resolved L-C3H⁺ Emission in the Horsehead Photodissociation Region: Further Evidence for a Top-Down Hydrocarbon Chemistry // *The Astrophysical Journal Letters* — 2015. — V. 800. — Pp. 6.
16. *Ewine F. van Dishoeck et al. (2018)* Astrochemistry: overview and challenges. // *IAU Symposium* — 2018. — V. 332. — Pp. 3-22.

17. *Pavlyuchenkov, Kirsanova & Wiebe (2013)* Infrared emission and the destruction of dust in HII regions // *Astronomy Reports* — 2013. — V. 57. — Pp. 573-585.
18. *Murga et al. (2017)* SHIVA: a dust destruction model // *MNRAS* — 2019. — V. 488. — Pp. 965-977.
19. *Le Gal et al. (2017)* A new study of the chemical structure of the Horsehead nebula: the influence of grain-surface chemistry // *Astron. and Astrophys* — 2017. — V. 605. — Pp. 16.
20. *Agundez et al. (2010)* The Chemistry of Vibrationally Excited H₂ in the Interstellar Medium // *Astrophys. J* — 2017. — V. 713. — Pp. 662-670.
21. *Cuadrado et al. (2015)* The chemistry and spatial distribution of small hydrocarbons in UV-irradiated molecular clouds: the Orion Bar PDR (Corrigendum) // *Astron. and Astrophys* — 2015. — V. 579. — Pp. 1.
22. *Tiwari et al. (2019)* Observational study of hydrocarbons in the bright photodissociation region of Messier 8 // *Astron. and Astrophys* — 2019. — V. 626. — Pp. 13.
23. *Jochims et al. (1994)* Size Effects on Dissociation Rates of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Cations: Laboratory Studies and Astrophysical Implications // *Astrophys. J* — 1994. — V. 420. — Pp. 307.
24. *Zhen et al. (2015)* Laboratory Photo-chemistry of PAHs: Ionization versus Fragmentation // *The Astrophysical Journal Letters* — 2015. — V. 804. — Pp. 7.
25. *Joblin et al. (2019)* Photo-processing of astro-PAHs // *Journal of Physics: Conference Series* — 2020. — V. 1412.

26. *Deharveng, Zavagno & Caplan (2005)* Triggered massive-star formation on the borders of Galactic H II regions. I. A search for “collect and collapse” candidates // *Astron. and Astrophys* — 2005. — V. 433. — Pp. 565-577.
27. *Deharveng et al. (2010)* A gallery of bubbles. The nature of the bubbles observed by Spitzer and what ATLASGAL tells us about the surrounding neutral material // *Astron. and Astrophys* — 2010. — V. 523. — Pp. 35.
28. *Churchwell et al. (2006)* The Bubbling Galactic Disk // *Astrophys. J* — 2006. — V. 649. — Pp. 759-778.
29. *Simpson et al. (2012)* The Milky Way Project First Data Release: a bubblier Galactic disc // *MNRAS* — 2012. — V. 424. — Pp. 2442-2460.
30. *Sharpless, Stewart (1959)* A Catalogue of H II Regions // *Astrophysical Journal Supplement* — 1959. — V. 4. — Pp. 257.
31. *Russeil, Adami & Georgelin (2007)* Revised distances of Northern HII regions // *Astron. and Astrophys* — 2007. — V. 470. — Pp. 161-171.
32. *Moffat, Fitzgerald & Jackson (1979)* The rotation and structure of the Galaxy beyond the solar circle. I. Photometry and spectroscopy of 276 stars in 45 H II regions and other young stellar groups toward the galactic anticentre // *Astron. and Astrophys* — 1979. — V. 38. — Pp. 197-225.
33. *Ojha et al. (2011)* Star Formation Activity in the Galactic H II Complex S255-S257 // *Astrophys. J* — 2011. — V. 738. — Pp. 18.
34. *Chavarria et al. (2008)* Spitzer Observations of the Massive Star-forming Complex S254-S258: Structure and Evolution // *Astrophys. J* — 2008. — V. 682. — Pp. 445-462.
35. *Zinchenko et al. (2012)* A Multi-wavelength High-resolution study of the S255 Star-forming Region: General Structure and Kinematics // *Astrophys. J* — 2012. — V. 755. — Pp. 19.

36. *Chavarria et al. (2014)* A multiwavelength study of embedded clusters in W5-east, NGC 7538, S235, S252 and S254-S258 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* — 2014. — V. 439. — Pp. 3719-3754.
37. *Zinchenko et al. (2020)* Dense Cores, Filaments, and Outflows in the S255IR Region of High-mass Star Formation // *Astrophys. J* — 2020. — V. 889. — Pp. 12.
38. *Ladeyschikov et al. (2021)* The link between gas and stars in the S254-S258 star-forming region // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc* — 2021. — V. 506. — Pp. 4447-4464.
39. *Marsh et al. (2017)* Multitemperature mapping of dust structures throughout the Galactic Plane using the PPMAP tool with Herschel Hi-GAL data // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc* — 2017. — V. 471(3). — Pp. 2730-2742.
40. *Bieging et al. (2009)* Sequential Star Formation in the Sh 254-258 Molecular Cloud: Heinrich Hertz Telescope Maps of CO J = 2-1 and 3-2 Emission // *The Astronomical Journal* — 2009. — V. 138. — Pp. 975-985.
41. *Mangum, Shirley (2015)* How to Calculate Molecular Column Density // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* — 2015. — V. 127. — Pp. 266.
42. *Wilson (1999)* Isotopes in the interstellar medium and circumstellar envelopes // *Reports on Progress in Physics* — 1999. — V. 62. — Pp. 143.
43. *Kirsanova, Wiebe & Sobolev (2009)* Chemodynamical evolution of gas near an expanding HII region // *Astronomy Reports* — 2009. — V. 53. — Pp. 611-633.

44. *Kirsanova et al. (2019)* Molecular envelope around the HII region RCW 120 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* — 2019. — V. 488. — Pp. 5641-5650.
45. *Lozinskaya, Moiseev & Podorvanyuk (2003)* Detailed Kinematic Study of the Ionized and Neutral Gas in the Complex of Star Formation in the Galaxy IC 1613 // *Astronomy Letters* — 2003. — V. 29. — Pp. 77-90.
46. *Pokhrel, Simpson & Bagetakos (2020)* A Catalog of Holes and Shells in the Interstellar Medium of the LITTLE THINGS Dwarf Galaxies // *The Astronomical Journal* — 2020. — V. 160. — Pp. 66.
47. *Kirsanova et al. (2020)* The PDR structure and kinematics around the compact H II regions S235 A and S235 C with [C II], [13C II], [O I], and HCO+ line profiles // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* — 2020. — V. 497. — Pp. 2651-2669.
48. *Dalgarno, Black (1976)* REVIEW: Molecule formation in the interstellar gas // *Reports on Progress in Physics* — 1976. — V. 39. — Pp. 573-612.
49. *Sternberg, Dalgarno (1995)* Chemistry in Dense Photon-dominated Regions // *Astrophysical Journal Supplement* — 1995. — V. 99. — Pp. 565.
50. *Sakai, Yamamoto (2013)* Warm Carbon-Chain Chemistry // *Chemical Reviews* — 2013. — V. 113. — Pp. 8981-9015.
51. *Alvarez, Hoare (2005)* A search for shock-excited optical emission from the outflows of massive young stellar objects // *Astron. and Astrophys* — 2005. — V. 440. — Pp. 569-581.
52. *Miralles, Salas, Cruz-Gonzalez & Kurtz (1997)* Discovery of Jets and HH-like Objects near the S255 IR Complex // *The Astrophysical Journal* — 1997. — V. 488. — Pp. 749-759.

53. *Mucciarelli, Preibisch & Zinnecker (2011)* Revealing the "missing" low-mass stars in the S254-S258 star forming region by deep X-ray imaging // *Astron. and Astrophys* — 2011. — V. 533. — Pp. 13.
54. *Kirsanova et al. (2020)* 3D structure of the H II region Sh2-235 from tunable-filter optical observations // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* — 2020. — V. 497. — Pp. 1050-1058.
55. *Teyssier et al. (2004)* Carbon budget and carbon chemistry in Photon Dominated Regions // *Astron. and Astrophys* — 2004. — V. 417. — Pp. 135-149.
56. *Pirogov et al. (2016)* Multifrequency studies of massive cores with complex spatial and kinematic structures // *Astronomy Reports* — 2004. — V. 60. — Pp. 904-923.
57. *Bouvier et al. (2020)* Hunting for hot corinos and WCCC sources in the OMC-2/3 filament // *Astron. and Astrophys* — 2020. — V. 636. — Pp. 26.
58. *Ungerechts et al. (1997)* Chemical and Physical Gradients along the OMC-1 Ridge // *Astrophys. J* — 1997. — V. 482. — Pp. 245-266.
59. *Wiebe et al. (2019)* Luminosity outburst chemistry in protoplanetary discs: going beyond standard tracers // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc* — 2019. — V. 485. — Pp. 1843-1863.
60. *Looveren et al (2022)* DR21(OH) SUB-CORES: Inferring an Evolutionary Status Using the Prestaline Tool // *Astronomy Letters*. — 2022. — V. 48. — Pp. 517-529.
61. *Бочкарев (1992)* Основы физики межзвездной среды // *М.: Изд-во МГУ* — 1992. — 352 с.
62. *Wakelam et al. (2015)* The 2014 KIDA Network for Interstellar Chemistry // *Astrophys. J. Suppl* — 2015. — V. 217. — Pp. 20.

63. *Gredel, van Dishoeck & Black (1993)* The abundance of CH⁺ in translucent molecular clouds : further tests of shock models // *Astron. and Astrophys* — 1993. — V. 269. — Pp. 477-495.
64. *Godard, Falgarone & Pineau des Forêts (2014)* Chemical probes of turbulence in the diffuse medium: the TDR model // *Astron. and Astrophys* — 2014. — V. 570. — Pp. A27.
65. *Zanchet et al. (2013)* H₂(v = 0,1) + C⁺(² P) → H+CH⁺ State-to-state Rate Constants for Chemical Pumping Models in Astrophysical Media // *Astrophys. J* — 2013. — V. 766. — Pp. 80.
66. *Agundez et al. (2018)* The chemistry of disks around T Tauri and Herbig Ae/Be stars // *Astron. and Astrophys* — 2018. — V. 616. — Pp. A19.
67. *Ruaud (2021)* H₂ Rovibrational Excitation in Protoplanetary Disks and Its Effects on the Chemistry // *Astrophys. J* — 2021. — V. 916. — Pp. 103.
68. *Le Petit, Nehmé, Le Bourlot & Roueff (2006)* A Model for Atomic and Molecular Interstellar Gas: The Meudon PDR Code // *Astrophys. J. Suppl* — 2006. — V. 164. — Pp. 506-529.
69. *Goicoechea & Roncero (2022)* The role of highly vibrationally excited H₂ initiating the nitrogen chemistry. Quantum study and 3? detection of NH emission in the Orion Bar PDR // *Astron. and Astrophys* — 2022. — V. 664. — Pp. 14.