

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. П.Н. ЛЕБЕДЕВА
АСТРОКОСМИЧЕСКИЙ ЦЕНТР

На правах рукописи

Алакоз Алексей Валерьевич

**“Исследование областей звездообразования
в радиолиниях метанола, метилацетилена, метилцианида,
цианоацетилена и гидроксила”**

Специальность 01.03.02 — астрофизика и радиоастрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2006

Работа выполнена в Астрокосмическом центре Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук
С.В. Каленский

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук И.И. Зинченко (ИПФ РАН)
кандидат физико-математических наук Г.М. Рудницкий (ГАИШ МГУ)

Ведущая организация:

Уральский Государственный Университет

Защита состоится 26 июня 2006 года в 15:00 на заседании
Диссертационного совета Д002.023.01 Физического института
им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, Москва, Ленинский
проспект, д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического
института им. П.Н. Лебедева РАН.

Автореферат разослан 25 мая 2006 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
д.ф.-м.н.

Ю.А. Ковалев

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Изучение ранних стадий эволюции звёзд и планетных систем невозможно без знания параметров молекулярных облаков, связанных с областями звёздообразования. Большинство молекулярных облаков (особенно наиболее плотные области, где происходит образование звёзд и планет) непрозрачно в оптическом диапазоне, поэтому наблюдения радиолиний молекул являются основным, а зачастую и единственным методом изучения этих объектов.

В настоящее время в космосе обнаружено более 100 молекул, как двух – трехатомных (H_2 , C_2 , CO , CS и т.д.), так и более сложных (CH_3CCH , CH_3OH , $HC_{11}N$ и др., см. например <http://www.cv.nrao.edu/~awootten/allmols.html>). Молекулы наблюдаются в плотных холодных облаках газа – молекулярных облаках, а также в оболочках звёзд. С помощью наблюдений молекулярных радиолиний удастся определить многие важнейшие параметры межзвёздной среды – кинетическую температуру, плотность, массу облака, а также обилие молекул. Это обстоятельство способствовало интенсивным исследованиям областей звёздообразования в линиях простых молекул, таких как CO , CS , NH_3 . К сожалению, лишь немногие из этих областей были достаточно хорошо исследованы в линиях более сложных молекул типа метилацетилена (CH_3CCH), метанола (CH_3OH), метилцианида (CH_3CN). Дело в том, что сложные молекулы менее обильны, чем простые и их тепловые линии обычно слабее, что делает наблюдения более трудными. Однако такие наблюдения представляют большую ценность для химии межзвёздной среды. Кроме того, тенденция к формированию групп линий, которые можно наблюдать одновременно на одной и той же аппаратуре, позволяет избежать влияния погрешностей калибровки и наведения. В связи с этим исследования областей звездообразования в линиях сложных молекул являются актуальной задачей.

Мазерное излучение молекулы гидроксила связано с активными процессами, с молодыми звёздами. Мазерные конденсации располагаются предположительно в дисках вокруг этих звёзд или на границах потоков молекулярного газа, источником энергии которых является звезда. Поэтому наблюдение мазеров гидроксила позволяет получить представление о процессах в околозвёздной среде и ее структуре. Кроме того, излучение мазерных конденсаций чувствительно к изменению условий окружающей среды и его переменность является хорошим индикатором различных возмущений (изменения температуры, плотности газа, взаимодействие с ударными волнами и полем излучения).

Цели и задачи диссертационной работы:

- 1) Исследование областей образования массивных звезд в спектральных радиолиниях метанола CH_3OH , метилацетилена CH_3CCH , метилцианида CH_3CN и цианоацетилена HC_3N для поиска новых источников излучения и определения физических параметров молекулярных облаков (температуры газа, плотности, массы и размеров облака, обилия молекул на луче зрения и т.п.), их химического состава и структуры.
- 2) Исследование вспышки мазерного излучения в линии гидроксила на длине волны 18 см в области звездообразования W75 N, в результате которой обнаружен самый сильный космический мазер OH за всю историю наблюдений.

Личный вклад автора. Все работы из списка публикаций по теме диссертации выполнены в соавторстве.

В работе, посвященной исследованию областей звездообразования в линиях метанола (глава 2 диссертации, основные результаты в работах [1,9] из списка публикаций) автором была проведена обработка данных. Кроме того автор участвовал в последующем анализе и обсуждении результатов.

В работах, посвященных изучению областей звездообразования по тепловому излучению метилацетилена (1 глава диссертации), автор участвовал в подготовке и проведении наблюдений (около 50 % наблюдательного времени в качестве дежурного наблюдателя), обработал наблюдательные данные, участвовал в построении карт источников, провел моделирование химической эволюции, а также участвовал в постановке задачи и обсуждении результатов. Основные результаты главы опубликованы в работах [4,7,8,9].

В работе, посвященной исследованию областей звездообразования в линиях метилцианида (3 глава диссертации, результаты опубликованы в работах [2,3,7,9]) автор принимал участие в наблюдениях на частотах 110 и 92 ГГц, обработке и последующем анализе наблюдательных данных стандартным методом вращательных диаграмм, обсуждении результатов.

Наблюдения областей звездообразования в линиях цианоацетилена (3 глава диссертации, результаты опубликованы в работе [5]) – автор принимал участие в наблюдениях, провел обработку и анализ данных, принимал участие в обсуждении результатов.

В работе [6] (4 глава диссертации), об открытии и изучении вспышки мазерного излучения гидроксила в области W75 N — автор принимал участие в наблюдениях на радиотелескопах в Нансэ (в качестве дежурного наблюдателя

наравне с соавторами), и Калязине (подготовка и проведение наблюдений с соавторами), занимался подготовкой наблюдений на Европейской сети РСДБ (EVN). Принимал участие в обработке и анализе данных, а также в обсуждении результатов.

Научная новизна работы. Все результаты диссертации, выносимые на защиту, являются новыми. Они отражают решения поставленных задач и сведены в разделе “Основные результаты, выносимые на защиту”. В частности, оценки параметров базируются на новых наблюдениях, причем многие из источников в проведенных обзорах наблюдались в этих молекулярных линиях впервые. Приводятся новые результаты наблюдений молекулы гидроксила в области звездообразования W75 N на длине волны 18 см, приведшие к обнаружению вспышки мазерного излучения, ставшей, по-видимому, самой сильной за весь период наблюдений мазеров OH в космосе.

Научная и практическая ценность работы. Результаты проведенных обзоров и анализа областей звездообразования в линиях метанола, метилацетилена, метилцианида и цианоацетилена могут быть использованы в дальнейших теоретических и экспериментальных исследованиях межзвездной среды, химического состава, структуры и физических условий в областях формирования массивных звезд. Полученные данные могут служить также базой для построения моделей химической и динамической эволюции молекулярных облаков

Результаты наблюдений вспышки мазерного излучения OH в области W75 N представляют интерес для понимания процессов в среде, окружающей молодые массивные звезды. Наблюдаемые мощные сильнопеременные детали являются источником информации о возмущении параметров окружающей среды и возможной периодичности этих процессов; кроме того, их длительное наблюдение может выявить собственные движения мазерных конденсаций. Этот источник является хорошим объектом для изучения с помощью интерферометров, в том числе космического базирования, из-за большой плотности потока и компактности.

Апробация результатов. Все основные результаты и положения, выносимые на защиту, достаточно обоснованы в диссертации и положенных в ее основу публикациях. Результаты обсуждались на следующих семинарах и конференциях:

- 1) Школа-семинар молодых радиоастрономов "Современные методы об-

- работки радиоастрономических наблюдений", 19-21 марта 1996, Пущино
- 2) IAU симпозиум №178, Molecules in Astrophysics Probes & Processes, 1–5 июля 1996, Лейден, Нидерланды.
 - 3) Международная конференция памяти И.С. Шкловского, С.А. Каплана и С.Б. Пикельнера, 23 – 27 сентября 1996 г., Москва
 - 4) XXVII Радиоастрономическая конференция: 50 лет отечественной радиоастрономии, 10–14 ноября 1997 г., С.-Петербург
 - 5) Школа–семинар молодых радиоастрономов "Радиоастрономия в космосе", 14–16 апреля 1998г., Пущино
 - 6) Protostars and Planets IV, 6–11 июля 1998, Санта-Барбара, Калифорния, США
 - 7) XIII International Conference for Physics Students, Коимбра, Португалия, 1998
 - 8) Всероссийская конференция: Астрофизика на рубеже веков, 17-22 мая 1999г., Пущино
 - 9) IAU симпозиум №197, Astrochemistry: From Molecular Clouds to Planetary Systems, 23–27 август 1999, Sogwipo, Cheju Island, Корея
 - 10) 33-й симпозиум ESLAB : Star formation from the Small to the Large Scale, 2–5 ноября, 1999, Noordwijk, Нидерланды
 - 11) JENAM-2000(Joint European and National Astronomical Meeting): European Astronomy at the Turn of the Millenium, 29 мая — 3 июня 2000 г., Москва
 - 12) XXXII Young European Radio Astronomer's Conference, YERAC 2000, 17–20 сентября 2000, Гранада, Испания
 - 13) Международный симпозиум: Астрономия 2005 — современное состояние и перспективы, 1 – 6 июня 2005, Москва
 - 14) Совещание "Звездообразование в Галактике и за ее пределами" 17 – 18 апреля 2006, Москва
 - 15) Отчетные сессии Астрокосмического центра ФИАН
 - 16) Семинары Астрокосмического центра ФИАН

Основные результаты, выносимые на защиту

- 1) Проведены обработка и анализ полученных спектров 44 галактических областей звездообразования в линиях метилацетилена (CH_3CCH) на частоте 102 ГГц и 25 областей на частоте 85 ГГц. Сделана оценка кинетической температуры и лучевой концентрации метилацетилена. Кинетическая температура оказалась порядка 20 — 60 К, что в пределах погрешностей совпадает с температурой, полученной для теплых облаков из наблюдений других молекул. В большинстве источников лучевая концентрация метилацетилена лежит в интервале $(1 - 5) \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$, а относительное содержание составляет порядка 10^{-9} .

По изображениям объектов были сделаны оценки размеров, массы и плотности пяти источников. Размеры оказались порядка 0.1 — 1 пк, массы — порядка сотен и тысяч масс Солнца, и плотность — порядка 10^5 см^{-3} .

Результаты моделирования химической эволюции для NGC2264 показывают, что химический возраст облака, который соответствует наблюдаемому обилию метилацетилена, составляет порядка 6×10^4 лет.

- 2) Проведен анализ наблюдений 12 областей звездообразования в линиях метанола (CH_3OH) на частоте 96 ГГц двумя независимыми методами. Полученные значения температуры, плотности газа и относительного содержания метанола согласуются между собой и лежат в пределах, соответственно, 15 — 50К, $0.3 - 5 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$ и $4 \times 10^{-10} - 1.7 \times 10^{-7}$
- 3) Проведен анализ наблюдений двадцати пяти источников в линиях метилцианида (CH_3CN) на частоте 110 ГГц, девятнадцати на 92 ГГц и трех на 147 ГГц. Определена лучевая концентрация и температура источников излучения. Наиболее сильное излучение CH_3CN обнаружено в направлении горячих ядер. Для теплых облаков получена оценка кинетической температуры (от 30 до 50 К) и относительного содержания метилцианида, которое оказалось порядка 10^{-10} .

Проведены наблюдения и обработка полученных спектров 17 галактических областей звездообразования в линии цианоацетилена (HC_3N) 4 – 3 на частоте 36.4 ГГц. Определена лучевая концентрация HC_3N , а для восьми из них (NGC2264, L379, W51E1/E2, DR 21(West), DR 21(OH), DR 21, S140 и Сер А) оценено относительное содержание цианоацетилена. Обилие HC_3N в этих объектах составляет около $(1 - 70) \times 10^{-10}$.

- 4) В области звездообразования W75 N открыта вспышка мазерного радиоизлучения в линии OH на частоте 1665 МГц (18 см) с потоком около 1000 Ян. На момент наблюдений это был самый сильный мазер OH за всю историю исследований со времени открытия космических мазеров OH в 1965 г. Линейная поляризация излучения вспыхнувшей детали достигает 100%. В 2000 – 2001 гг. в этом источнике наблюдалась более слабая вспышка с потоком 145 Ян, которая, вероятно, являлась предвестником мощной вспышки. Интенсивность двух других спектральных деталей уменьшилась при появлении вспышки.

Содержание работы

Работа состоит из Введения, четырех глав, и Заключения. Объем работы составляет 130 страниц, в том числе 25 рисунков и 21 таблица. Список цитируемой литературы содержит 155 наименований.

Во **Введении** представлено описание диссертационной работы, ее цели и задачи, новизна научной работы, ее научная и практическая ценность, личный вклад автора, апробация работы, публикации по теме диссертации, ее структура и объем.

Глава 1 посвящена анализу обзора 63 галактических областей звездообразования в линиях метилацетилена (CH_3CCH) $6_K - 5_K$ и $5_K - 4_K$ на частотах 102.5 и 85.5 ГГц, соответственно.

В п. 1.1 и 1.2 дано введение в тему работы и описание проведенных наблюдений. Было зарегистрировано излучение 44 источников на частоте 102.5 ГГц и 25 — на частоте 85.5 ГГц. Приведены полученные во время наблюдений спектры.

В пункте 1.3 описан анализ полученных данных. Сделано заключение об отсутствии в наблюдаемых спектрах метилацетилена линий с высокой энергией возбуждения уровней и, соответственно, об отсутствии заметного вклада горячих ядер (компактных массивных областей с температурой газа выше 100 К) в излучение этой молекулы. Для 40 источников на частоте 102.5 ГГц и для 23 источников на частоте 85.5 ГГц стандартным методом вращательных диаграмм получена температура, которая лежит в диапазоне от 20 до 60 К, что характерно для облаков теплого газа, и согласуется в пределах ошибок с температурами, полученными по результатам наблюдений аммиака, метанола и метилцианида (главы 2 и 3 диссертации; Вилсон и Мауэрсбергер, 1990). Лучевая концентрация метилацетилена меняется в пределах от $4 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ до $1.2 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$, причем у большинства (около 70%) источников она лежит в гораздо более узком диапазоне между 10^{14} и $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Относительное содер-

жание метилацетилена $N_{\text{CH}_3\text{CCH}}/N_{\text{H}_2}$, определенное с привлечением данных наблюдений ^{13}CO для определения N_{H_2} оказалось порядка 10^{-9} . Наблюдения в линии ^{13}CO 1–0 на частоте 110 ГГц были проведены ранее в Онсале (глава 3 диссертации). При расчете лучевой концентрации ^{13}CO и H_2 линия ^{13}CO 1–0 считалась оптически тонкой, размеры излучающих областей в разных линиях - одинаковыми, температура принималась равной вращательной температуре CH_3CCH , а относительное содержание ^{13}CO равным 1.7×10^{-6} (Лукас и Лист, 1998).

Вращательные диаграммы дают правильный результат только в том случае, если они строятся по оптически тонким линиям. Поэтому результаты наблюдений W3(OH), DR21(OH), Orion KL и W51E1/E2, в которых зарегистрировано достаточно большое число линий (до $K = 4$ включительно) были дополнительно проанализированы без предположения о том, что линии оптически тонкие. С этой целью были вычислены отношения яркостных температур линий для различных наборов температуры газа и лучевой концентрации CH_3CCH в предположении, что населенности уровней термализованы. Затем из этих моделей были выбраны те, которые удовлетворяли наблюдательным данным по критерию χ^2 . Результаты показывают, что данным наблюдений могут удовлетворять как модели, в которых наблюдавшиеся линии являются оптически тонкими, так и модели, в которых линии с квантовыми числами $K = 0$ и 1 имеют оптическую толщину τ около единицы. В последнем случае интенсивность линий оказывается примерно на порядок выше реально наблюдаемой, следовательно, модели с $\tau \sim 1$ возможны лишь при значительной диллюции излучения CH_3CCH . Следует отметить, что температура газа в моделях с $\tau \sim 1$ лишь слегка ниже температуры, полученной по вращательным диаграммам.

В п. 1.3.1 — 1.3.3 описана процедура построения карт пяти источников (NGC 2264, G30.8–0.1, G34.26+0.15, DR 21(OH) и S 140) методом максимума энтропии (Промыслов, 1999; Вилчек и Драпац, 1985). Представлены карты, приведены комментарии к каждому из картированных источников. Для каждого из этих источников были определены линейные размеры и вириальная масса в предположении, что источник является однородным ненамагниченным шаром постоянной плотности (Чезарони и др., 1994). Расстояние до источника определялось по его лучевой скорости и кривой вращения Галактики (Бранд и Блитц, 1993). Сделаны оценки плотности газа и относительно-го содержания метилацетилена при условии равенства массы источника его вириальной массе. Размеры получились порядка 0.1 — 1 пк, массы — порядка сотен и тысяч масс Солнца, а плотность — порядка 10^5 см^{-3} . Для всех источ-

ников, кроме G34.26+0.15, обилие метилацетилена, полученное таким способом, отличается не более чем в два раза от полученного в п.1.3. Что касается G34.26+0.15, то, как показано в диссертации, лучевая концентрация ^{13}CO , полученная для данного объекта, вероятно, занижена, а обилие CH_3CCN , приведенное в п.1.3, завышено. Полученные значения обилия согласуются с оценками, сделанными для областей теплого газа в Орионе (Блейк и др., 1987; Койпер и др., 1984), Sgr B2 (Черчвелл и Холлис, 1983; Койпер и др., 1984), S 140 (Койпер и др., 1984), а также с оценками, которые можно сделать для холодного облака ТМС-1 из наблюдений C^{18}O и метилацетилена (Пратап и др., 1997).

В п. 1.3.4. описаны результаты моделирования химической эволюции. На основании полученных данных о температуре и плотности газа было проведено моделирование химической эволюции картографированных объектов. В качестве набора химических реакций для моделирования использовалась так называемая „новая стандартная модель“ (Ли и др., 1996). Программа для проведения модельных расчетов была любезно предоставлена Р. Терзиевой из группы проф. Хербста из университета Огайо. Модель учитывает только газофазную химию без участия пылинок. Начальный набор химических элементов соответствовал случаю низкого содержания металлов (Ли и др., 1996). Моделирование проводилось для двух значений отношения C/O : 0.41 и 0.8. Для $\text{C}/\text{O}=0.41$ обилие CH_3CCN достигает максимума при $t_m \sim 6 \times 10^4$ лет от начала эволюции. Затем обилие убывает на несколько порядков и достигает равновесного состояния при $t \geq 10^7$ лет. При увеличении C/O до 0.8 t_m и максимальное обилие CH_3CCN уменьшается. Такая же зависимость обилия от времени характерна и для многих других молекул (Ли и др., 1996). Сравнение наблюдаемого обилия CH_3CCN с результатами моделирования показывает, что для молекулярных облаков характерно обилие метилацетилена, которое возникает вблизи пика при $t_m \sim 6 \times 10^4$ лет.

Полученные результаты суммированы в п. 1.4

Глава 2 посвящена описанию анализа наблюдений тепловых линий метанола $2_K - 1_K$ на частоте 96 ГГц в направлении на 12 областей звездообразования.

В п. 2.1 – 2.3 дано введение в тему работы, а также описание проведенных наблюдений и их результаты.

Наблюдения на частоте 96 ГГц были проведены в декабре 1994 года на радиотелескопе в Онсале. Излучение было обнаружено в направлении на все 12 наблюдавшихся источников. Полученные данные анализировались в два этапа — сначала параметры источников были определены аналитически, а

затем при помощи расчетов статистического равновесия.

В п. 2.4 описано определение параметров наблюдавшихся источников аналитическим методом. Для метанола характерны сильные отклонения населенности уровней от больцмановского распределения и вращательные диаграммы часто дают неправильные значения температуры. Для того, чтобы определить параметры источников аналитически, сделаны предположения о том, что во всех линиях наблюдаются одни и те же однородные источники и справедлива двухтемпературная модель возбуждения метанола. Двухтемпературная модель возбуждения означает, что все переходы без изменения квантового числа K имеют одинаковую температуру T_{rot} , а переходы $J_0 - J_{-1}E$ имеют одинаковую температуру возбуждения $T_{KK'}$. Двухтемпературная модель приблизительно согласуется с результатами расчетов статистического равновесия в широком диапазоне температур и плотностей, типичных для областей звездообразования в Галактике для уровней $J \leq 6$ и $0 \leq K \leq 2$. Заметим, что в случае двухтемпературного возбуждения T_{rot} , определенная выше, близка к кинетической температуре газа и может сильно отличаться от вращательной температуры, полученной с помощью стандартного метода вращательных диаграмм. В результате анализа получены оценки кинетической и реальной (не усредненной по лучу диаграммы направленности) яркостной температуры, оптической толщи линий, лучевой концентрации метанола, его относительного содержания.

В п. 2.5 приведено описание расчетов статистического равновесия стандартным методом LVG (большого градиента скорости). Свободными параметрами модели являлись кинетическая температура, плотность молекулярного водорода и плотность метанола E . Был произведен расчет сетки моделей с различными значениями этих параметров, из которых затем были отобраны те модели, которые наиболее соответствовали наблюдательным данным согласно процедуре, описанной Малви (1963).

В п. 2.6 обсуждаются и сравниваются результаты, полученные в предыдущих пунктах главы. Определенные разными методами параметры наблюдавшихся объектов согласуются между собой. Кинетическая температура оказалась порядка 20 К (10 – 25 К, за исключением W3OH). Точность определения обилия метанола невысока, однако для большинства источников (за исключением Сер А) обилие лежит в пределах $4 \times 10^{-10} - 1.2 \times 10^{-8}$. Такое обилие типично для темных облаков (Фрайберг и др., 1988; Каленский и Соболев, 1994) и гораздо ниже обилия в Орионе KL и некоторых других "горячих ядрах" ($\sim 10^{-7}$, Ментен и др., 1986, 1988) или крыльях биполярных потоков (Бачиллер и др., 1995).

Температуры, определенные по наблюдениям аммиака в тех же источниках в работах других авторов (например Черчвелл и др., 1990; Мауэрсбергер и др., 1986) оказались в среднем в 1.5 раза выше. Это может быть связано с несовпадением областей, наблюдаемых в линиях метанола и аммиака.

В п 2.7 суммируются результаты главы.

В Главе 3 приведены результаты обзора 27 галактических областей звездообразования в линиях метилцианида (CH_3CN) $6_K - 5_K$, $5_K - 4_K$ и $8_K - 7_K$ на частотах 110, 92 и 147 ГГц, соответственно, а также результаты наблюдений 34 галактических областей звездообразования в линии цианоацетилена (HC_3N) $4 - 3$ на частоте 36.4 ГГц.

Хорошо известно, что радиоизлучение CH_3CN часто возникает в горячем газе, в частности, в горячих ядрах – горячих и плотных нейтральных областях с размерами в несколько сотых долей парсека. Кроме горячих ядер, метилцианид был обнаружен в направлении тёплых (30 – 50 К) облаков в областях образования массивных звёзд (Олми и др., 1993) и в тёмных облаках (Ирвин и др., 1987).

Излучение на частоте 110 ГГц было зарегистрировано в 25 объектах из 27 наблюдавшихся. 16 источников найдено на частоте 92 ГГц и 3 – на 147 ГГц. Кроме линий основного изотопа CH_3CN в G34.26+0.15 была обнаружена слабая бледа линий $\text{CH}_3^{13}\text{CN}$ $5_0 - 4_0$ и $5_1 - 4_1$ на частотах 91941.596 и 91939.834 МГц, соответственно. Отношение интенсивностей линий $\text{CH}_3^{13}\text{CN}/\text{CH}_3^{12}\text{CN}$ приблизительно равно 0.15, что гораздо выше содержания ^{13}C по отношению к ^{12}C и заставляет предположить большую оптическую толщину линий CH_3CN . Это предположение подтверждается вращательными диаграммами и расчётами статистического равновесия (см. ниже; Каленский и др., 2000). Во всех наблюдавшихся источниках мы обнаружили линию $1 - 0$ ^{13}CO , которая попадает в полосу спектроанализатора при наблюдениях на 110 ГГц. Был проведен анализ полученных данных по CH_3CN стандартным методом вращательных диаграмм, следуя Тернеру (Тернер, 1991).

В некоторых источниках точки на вращательных диаграммах не ложатся на прямую линию – точки, которые соответствуют уровням с $K = 3$ сильно отскакивают вниз. Проведенный анализ показал, что провал точек при $K = 3$ вызван большой оптической толщиной линий. Таким образом, вращательные диаграммы, как и обнаружение излучения $^{13}\text{CH}_3\text{CN}$, указывают на то, что линии могут быть оптически толстыми.

На основании вращательных диаграмм источники были разделены на две группы. Источники, отнесенные к группе I, показывают значительный провал точек с $K = 3$. Отсюда можно сделать вывод, что линии на 110 и 92 ГГц

оптически толстые. Так как для оптически толстых линий CH_3CN вращательные диаграммы дают завышенную температуру, вращательная температура источников первой группы является верхним пределом на кинетическую температуру газа. Источники, относящиеся к первой группе, являются наиболее яркими объектами в нашей выборке. Все они, за исключением G30.8–0.1, хорошо известны как горячие ядра (Винк и др., 1994; Охиши, 1996).

К группе II относятся источники, в которых провал точек с $K = 3$ либо отсутствует, либо не может быть обнаружен, так как не зарегистрированы соседние линии с $K = 4$.

Объекты II группы представляют собой теплые облака, для которых получена температура от 20 К до 80 К, лучевая концентрация молекул CH_3CN $(0.5 - 8) \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и обилие $\text{CH}_3\text{CN} \sim 10^{-10}$. Одним из наиболее изученных теплых облаков является NGC 2264 IRS1. Определенная нами температура (43 К) согласуется со значением 55 К, полученным в работе Шрейер и др. (1997) на основании тщательного изучения этого источника в большом числе линий различных молекул.

Молекула цианоацетилена обладает рядом свойств, делающих ее удобным инструментом для определения параметров молекулярных облаков. В-первых, из-за большого дипольного момента (3.72 D) для столкновительного возбуждения даже низших уровней необходима плотность не менее 10^4 см^{-3} . Лучевая концентрация HC_3N в молекулярных облаках достаточно высока для того, чтобы линии были обнаружимы, но вместе с тем недостаточна для того, чтобы они были оптически толстыми (см. например, Бут и др., 1983; Бергин и др., 1996).

Наблюдения проводились в октябре 1997 года и в марте 1998 года на радиотелескопе РТ-22 Пушинской радиоастрономической обсерватории. В ходе наблюдений было обнаружено 17 источников.

Полученные значения антенной температуры, усредненной по главному лучу диаграммы направленности (T_{mb}) невелики; как правило они ниже 0.5 К. Даже с учетом возможной дилуции получаем, что яркостная температура источников не превышает 2–4 К. Такая низкая температура согласуется с выводом предыдущих исследователей о том, что линии HC_3N оптически тонкие. В предположении, что населенности уровней термализованы, была сделана оценка лучевой концентрации цианоацетилена. Значения кинетической температуры для этих расчетов взяты из наблюдений метилацетилена, аммиака и других молекул (глава 1 диссертации, а также ссылки в главе 3). Кроме того, используя лучевую концентрацию H_2 , полученную по данным наблюдений ^{13}CO на частоте 110 ГГц (см. главу 3 диссертации), было определе-

но относительное содержание цианоацетилена для 7 источников (NGC 2264, W 51E1/E2, DR 21(West), DR 21(OH), DR 21, S 140 и Cep A). Для L 379 относительное содержание цианоацетилена определено по лучевой концентрации H_2 и температуре, взятым из работы Келли и Макдональда (1996). Поскольку наблюдения HC_3N проводились с диаграммой направленности $2'$, а наблюдения ^{13}CO — со значительно меньшей диаграммой ($34''$), для правильного расчета обилия нам необходимо знать размеры источников. Так как эти размеры неизвестны, в диссертации приводятся два крайних случая — точечный источник и источник с размерами больше $2'$ (в дальнейшем — протяженный источник). Лучевая концентрация в случае протяженного источника лежит в диапазоне $(0.4 - 6.5) \cdot 10^{13}$, что находится в согласии с данными других исследователей. Обилие HC_3N в случае протяженного источника меняется в интервале $(1 - 6) \cdot 10^{-10}$, а в случае точечного — $(1 - 7) \cdot 10^{-9}$.

В работах других авторов (Гвенлан и др., 2000; Раффл и др., 1997) проводилось моделирование химической эволюции молекулярных облаков; в частности, исследовалась зависимость обилия HC_3N от времени. Оказалось, что максимальное обилие цианоацетилена составляет порядка $10^{-8} - 10^{-10}$. Оно достигается при возрасте облаков в промежутке от 10^5 до 10^7 лет и падает на несколько порядков за пределами этого промежутка. Таким образом, химический возраст наблюдавшихся облаков заключен в интервале $10^5 - 10^7$ лет. Эта оценка согласуется с возрастом теплых облаков, полученным по наблюдениям ряда других молекул, например, CH_3CCH (глава 1 диссертации).

В Главе 4 описано открытие вспышки мазерного радиоизлучения в линии OH на частоте 1665 МГц с потоком около 1000 Ян в области звездообразования W75 N.

Поляризационные наблюдения мазерного излучения от W75 N проводились на радиотелескопе в Нансэ (Франция) в октябре 2003 года и на 64-м радиотелескопе в Калязине (Россия) в июле и октябре 2004 года в линиях OH 1665 и 1667 МГц. Помимо собственных наблюдений мы проанализировали также данные наблюдений этого источника в линиях OH из архива VLBA NRAO в ноябре 2000 г. и в январе 2001 г. (наблюдения В.Фиша и Мигенеса). Спектры W75 N, полученные на VLBA в 1998 г. (Слыш и др., 2002) и в 2001 г. (архив VLBA), в Нансэ в 2003 г. и в Калязине в 2004 г. в линии 1665 МГц в правой круговой поляризации, приведены на рис. 1. В ноябре 2000 г. и в январе 2001 г. (архив VLBA) в спектре источника появилась сильная спектральная деталь на лучевой скорости 2.3 км/с с шириной линии 0.35 км/с и более слабая деталь на лучевой скорости -0.2 км/с. Они обозначены как P_1 и P_2 , соответственно. В спектре от 2003/X (Нансэ) появилась очень яркая деталь

на лучевой скорости 1.8 км/с с потоком 750 Ян и шириной линии 0.35 км/с (N_1), а также две более слабые детали на лучевых скоростях 0 км/с (N_2) и -1 км/с (N_3). Поляризационные измерения в Нансэ показывают, что все детали вспышки (N_1 , N_2 и N_3) имеют высокую (до 100%) степень линейной поляризации. Отличие лучевой скорости новых деталей N_1 и N_2 от лучевых скоростей P_1 и P_2 , составляющее примерно 0.5 км/с, а также затухание P_1 и P_2 в апреле 2001 года свидетельствуют о том, что наблюдается вспышка новых спектральных деталей, а не уярчение старых. В то же время детали А — Г сохранились с неизменными потоками и лучевыми скоростями. Последующие наблюдения, проведенные в Калязине в июле 2004 г., подтвердили присутствие вспыхнувших деталей практически на тех же лучевых скоростях и с теми же потоками. Более поздние наблюдения в Калязине в октябре-декабре 2004 г. указывают на затухание самой сильной детали (N_1) с одновременным ростом более слабых деталей вспышки (N_2 и N_3).

Несмотря на то, что переменность мазеров ОН является хорошо установленным фактом, о каких-либо вспышках мазерного излучения ОН со столь большими значениями потока ранее не сообщалось. Более того, в настоящее время нет ни одного известного мазера ОН с потоком больше или сравнимым с W75 N.

В работе Слыша и др. (2002) была предложена модель мазера W75 N, в которой мазерные пятна расположены в дисках, вращающихся вокруг двух массивных звезд спектрального класса В, которые, в свою очередь, возбуждают ультракомпактные HII-зоны VLA 1 и VLA 2 (Торреллес и др., 1997). Расстояние между звездами — порядка 1400 а.е. С областью VLA 1 связаны спектральные детали с лучевыми скоростями от 12.45 км/с до 3.70 км/с, а с областью VLA 2 связаны только две детали — J и K с лучевыми скоростями 3.0 км/с и 0.65 км/с, соответственно. Судя по лучевым скоростям спектральных деталей вспышки — 2 км/с и 0 км/с, они также могут быть связаны с областью VLA 2. В рамках модели ударной волны звездного ветра можно предположить, что вспышка началась в связи с приходом ударной волны в область повышенного содержания молекул воды и гидроксила и повышением кинетической температуры в этой области, либо с повышением обилия воды и гидроксила, вызванным ударной волной.

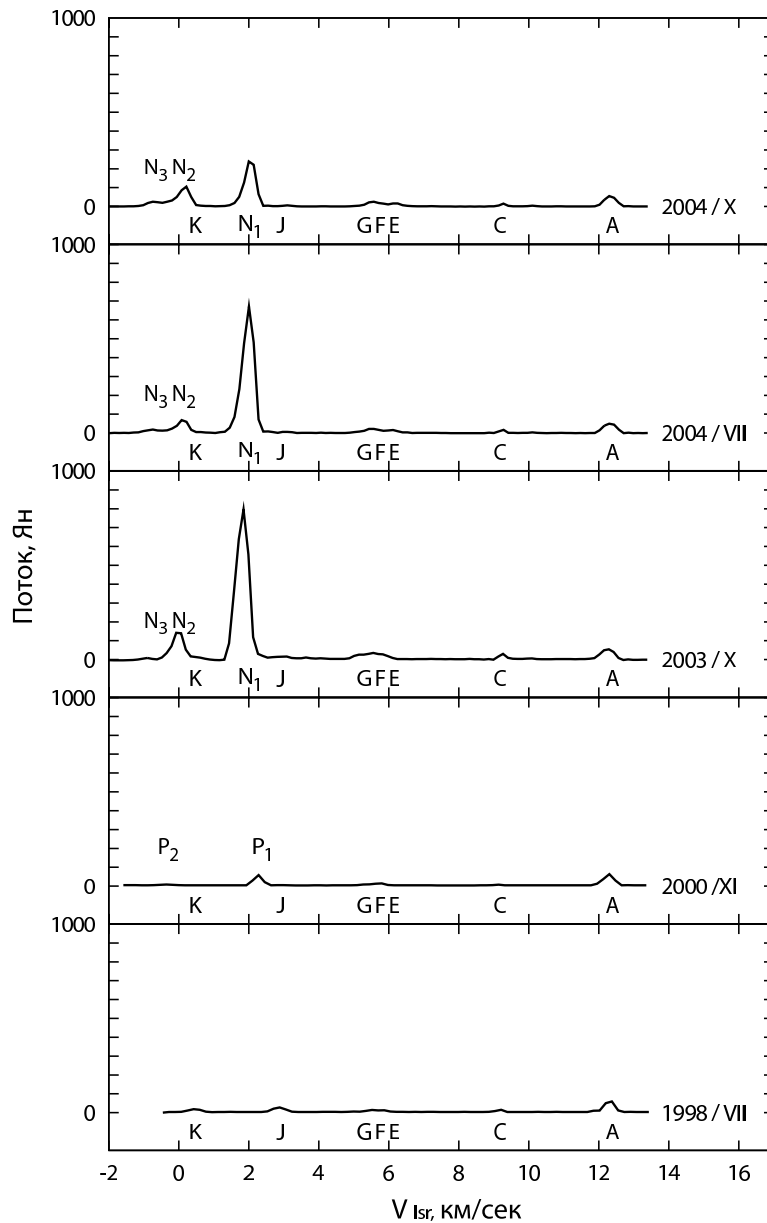


Рис. 1: Спектры мазера OH W75N в линии 1665 МГц (правая круговая поляризация), полученные в разные эпохи. 1998/VII — решетка VLBA, 1 июля 1998 г., 2000/XI — решетка VLBA, 22 ноября 2000 г., 2003/X — радиотелескоп Нансэ, 24 октября 2003 г., 2004/VII — радиотелескоп в Калязине, 14 июля 2004 г., 2004/X — радиотелескоп в Калязине, 20 октября 2004 г. Буквами А — К обозначены спектральные детали, отождествленные в работе Слыша и др. (2002), буквами P₁, P₂ и N₁, N₂, N₃ — новые спектральные детали предвестника (P) и вспышки (N). Спектры VLBA приведены в интерференционном режиме, в котором исключается вклад от мешающего мазера W75 S, расположенного на расстоянии 14'. Рисунок из статьи Алакоза и др. (А.В.Алакоз и др., 2005)

В **Заключении** обсуждаются и суммируются результаты, выносимые на защиту диссертации.

Публикации по теме диссертации

Список работ, в которых опубликованы основные результаты диссертации.

Публикации в ведущих рецензируемых журналах:

- 1) Kalenskii S. V.; Dzura A. M., Booth R. S., Winnberg A., **Alakoz A. V.**, “*Determination of molecular cloud parameters using thermal methanol lines.*”, *Astronomy and Astrophysics*, v.321, 1997, p.311-322
- 2) Kalenskii S.V., Promislov V.G., **Alakoz A.**, Winnberg A., Johansson L. E. B., “*Probing the properties of methyl cyanide sources*”, *Astronomy and Astrophysics*, v.354, 2000, p.1036-1040
- 3) С.В.Каленский, В.Г.Промыслов, **А.В.Алакоз**, А.Виннберг, Л.Е.Б.Юханссон, “*Определение параметров молекулярного газа по линиям метилцианида*”, *Астрономический Журнал*, том 77, No 11, 2000, стр.819-833
- 4) **А.В.Алакоз**, С.В.Каленский, В.Г.Промыслов, Л.Е.Б.Юханссон, А.Виннберг, “*Характеристики теплых молекулярных облаков по результатам наблюдений метилацетилен*”, *Астрономический Журнал*, том 79, No 7, 2002, стр.610-626
- 5) **А.В.Алакоз**, С.В.Каленский, М.А.Воронков, В.И.Слыш, “*Наблюдения источников цианоацетилен*”, *Астрономический Журнал*, том 80, No 1, 2003, с.83-87
- 6) **А.В.Алакоз**, В.И.Слыш, М.В.Попов, И.Е.Вальц, “*Самый яркий ма-зер OH на небе: вспышка излучения в W75N*”, *Письма в Астрономический журнал*, том 31, No 6, 2005, с.422-426

Публикации в сборниках конференций:

- 7) S.V.Kalenskii, V.G.Promislov, **A.V.Alakoz**, A.Winnberg and L.E.B.Johansson, “*Observations of Star-Forming Regions in Methyl Acetylene and Methyl Cyanide Lines*”, *IAU Symposium 197, Astrochemistry: From Molecular Clouds to Planetary Systems*, Cheju Island, Korea August 23-27, 1999, Abstract Book , p 174-175

- 8) **Alakoz A. V.**, Kalenskii S. V., Promislov V. G., Winnberg A., Johansson L. E. B., "*Observations of Star-Forming Regions in the Lines of Methyl Acetylene*", Proceedings of the 33rd ESLAB symposium on star formation from the small to the large scale, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands: European Space Agency (ESA), Edited by F. Favata, A. Kaas, and A. Wilson, 2000. ESA SP 445., p.315-318
- 9) Kalenskii Sergei V., **Alakoz Alexei V.**, Promyslov Vitaly G., "*A Study of Warm Clouds in the Lines of Complex Molecules*", SFCHEM 2002: Chemistry as a Diagnostic of Star Formation, proceedings of the conference at University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada N2L 3G1. Edited by Charles L. Curry and Michel Fich. NRC Press, Ottawa, Canada, 2003, p. 321-323

Список литературы

- Алакоз и др.* (А.В.Алакоз, В.И.Слыш, М.В.Попов, И.Е.Вальтц) Письма в Астрономический журнал, **31**, No 6, с.422-426 (2005)
- Бачиллер и др.* (Bachiller R., Liechti S., Walmsley C.M., Colomer F.) // A&A V. 295, L51 (1995)
- Бергин и др.* (E.A. Bergin, R.L. Snell, P.F. Goldsmith) // ApJ **460**, 343, (1996)
- Блейк и др.* (Blake G.A., Sutton E.C., Masson C.R., Phillips T.G.) // ApJ V. 315, P. 621 (1987)
- Бранд и Блитц* (L. Brand, L. Blitz) // Astron. Astrophys. **275**, 67 (1993)
- Бут и др.* (P. Vanden Bout, R.B. Loren, R.L. Snell, A. Wootten) // ApJ **271**, 161, (1983)
- Вилсон и Мауэрсбергер* (T. L. Wilson, R. Mauersberger) // Astron. Astrophys. **239**, 305, (1990)
- Вилчек и Драпац* (Wilczek R., Drapatz S.) // A&A V. 142, P. 9 (1985)
- Винк и др.* (Wink J.E., Duvert J., Guilloteau S., Güsten R., Walmsley C.M., Wilson T.L.) // A&A V. 281, P. 505 (1994)
- Гвенлан и др.* (C. Gwenlan, D.P. Ruffle, S. Viti, T.W. Hartquist, D.A. Williams) // A&A **354**, 1127, (2000)
- Ирвин и др.* (Irvine W.M., Goldsmith P.F., Hjalmarson Å) // ASSL Vol. 134: Interstellar Processes, eds. D.J. Hollenbach, H.A. Thronson Jr. Reidel, Dordrecht, P. 561 (1987)
- Каленский и Соболев* (Kalenskii S.V., Sobolev A.M.) // Письма в Астрон. журн. **20**, 113 (1994)
- Каленский и др.* (Kalenskii S.V., Dzura A.M., Booth R.S., Winnberg A., Alakoz A.V.) // A&A V. 321, P. 311 (1997)
- Каленский и др.* С. В. Каленский, В. Г. Промыслов, А. В. Алакоз, А. Виннберг, Л. Е. Б. Йоханссон // Астрон. журн. **77**, 819 (2000)
- Келли и Макдональд* (M.L. Kelly, G.H. Macdonald) // MNRAS **282**, 401, (1996)
- Койпер и др.* (T. B. H. Kuiper, E. N. Rodriguez Kuiper, D. F. Dickinson, V. E. Turner, B. Zuckerman) // Astrophys. J. **276**, 211 (1984)
- Ли и др.* (H. H. Lee, R. P. A. Bettens, E. Herbst) // Astrophys. J., Suppl. Ser. **119**, 111, (1996)
- Лукас и Лист* (R. Lucas, H. Liszt) // Astron. Astrophys. **337**, 246 (1998)

- Мауэрсбергер и др.* (Mauersberger R., Henkel C., Wilson T.L., Walmsley C.M.) // A&A V. 162, 199 (1986)
- Ментен и др.* (Menten K.M., Walmsley C.M., Henkel C., Wilson T.L.) // A&A V. 157, P. 318 (1986)
- Ментен и др.* (Menten K.M., Walmsley C.M., Henkel C., Wilson T.L.) // A&A V. 198, P. 253 (1988)
- Малви* (Mulvey J.H.) // Statistical Methods in the Treatment of Experimental Data. In: Galbraith W., Williams W.S.C. (eds.) High Energy and Nuclear Physics Data Handbook. Chilton, sect. 14
- Олми и др.* (Olm L., Cesaroni R., Walmsley C.M.) // A&A V. 276, P. 489 (1993)
- Охиши* (Ohishi M.) // Observations of hot cores, in: Molecules in Astrophysics: Probes and Processes, ed. E.F. van Dishoeck, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, P. 61 (1996)
- Пратап и др.* (P. Prata, J. E. Dickens, R. L. Snell, M. P. Miralles, E. A. Bergin, W. M. Irvine, F. P. Schloerb) // Astron. Astrophys. **486**, 862 (1997)
- Промыслов* (Promislov V.G.) // Maximum entropy image restoration by evolutionary algorithm, in Advances in Soft Computing - Engineering Design and Manufacturing, eds. R. Roy, T. Furuhashi, P.K. Chawdhry, Springer-Verlag, London, P. 421 (1999)
- Раффл и др.* (D.P. Ruffle, T.W. Hartquist, S.D. Taylor, D.A. Williams) // MNRAS **291**, 235, (1997)
- Слыш и др.* (V. I. Slysh, V. Migenes, I. E. Val'tts, et al.) // Astrophys. J. **564**, 317 (2002)
- Тернер* (Turner B.E.) // ApJS V. 76, P. 617 (1991)
- Торреллес и др.* (J. M. Torrelles, J. F. Gómez, L. F. Rodríguez et al.) // Astrophys. J. **489**, 744 (1997)
- Фрайберг и др.* (Friberg P., Madden C.S., Hjalmarsen A., Irvine W.M.) // A&A **195**, 281 (1988)
- Чезарони и др.* (R. Cesaroni, E. Churchwell, P. Hofner, C. M. Walmsley, S. Kurtz) // A&A **288**, 903 (1994)
- Черчвелл и Холлис* (E. Churchwell, J. M. Hollis) // Astrophys. J. **272**, 591 (1983)
- Черчвелл и др.* (E.Churchwell, C.M.Walmsley, R.Cesaroni) // A&AS, **83**, 119 (1990)

Шрейер и др. (Schreyer K., Helmich F.P., van Dishoeck E.F., Henning Th.) //
A&A V. 326, P. 347 (1997)