

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

На правах рукописи

Ларионов Григорий Михайлович

**ИССЛЕДОВАНИЕ
МЕТАНОЛЬНЫХ МАЗЕРОВ I КЛАССА
И ИХ ОКРУЖЕНИЯ**

Специальность 01.03.02 — астрофизика и радиоастрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2008

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

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
И.Е. Вальтц

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
Р.Д. Дагкесаманский
кандидат физико-математических наук
Г.М. Рудницкий

Ведущая организация:

Институт астрономии РАН (ИНАСАН)

Защита состоится 9 июня 2008 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 диссертаций можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н. Лебедева РАН.

Автореферат разослан

2008 г.

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

Ю.А. Ковалев

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Мазерные линии межзвездного метанола были случайно открыты Барретом и др. в 1971 г. (1) на 37-м антенне в Хайстеке (США) с диаграммой 1'.3 в направлении хорошо известной области звездообразования Ori A. Они попали в полосу частот молекулы N_2O , которую искали авторы. Баррет и др. (1) отождествили 5 сильных линий метанола серии $(J_2 - J_1)E$ на частоте 25 ГГц и высказали предположение, что интенсивность наблюдаемых линий имеет нетепловую природу. Далее Хиллзом и др. (2) в наблюдениях на 100-м телескопе в Эффельсберге было показано, что эти узкие, яркие линии излучаются пространственно разнесенными компонентами, верхний предел на размеры которых дает яркостную температуру более 800 К, что в 10 раз превышает максимальную кинетическую температуру, которая может быть получена из ширины метанольных линий. Впоследствии тот же результат был получен в интерферометрических экспериментах. Этот факт подтвердил мазерную природу наблюдавшихся линий.

То, что существует два типа источников метанольного мазерного излучения, стало очевидно примерно через 15 лет после их открытия. В основу классификации метанольных мазеров, которая была разработана Батрлой и др. (3) и Ментенем (4) был положен эмпирический факт, который стал первым классификационным признаком и который заключался в том, что в направлении некоторых источников наблюдаются мазерные линии на одних частотах и полное отсутствие излучения (возможны, впрочем, линии поглощения или тепловая эмиссия) на других. В других источниках – на тех же частотах – наблюдалась обратная картина. Этот факт был внешним проявлением разных механизмов накачки уровней молекулы: в одних источниках работал столкновительный механизм инверсии (I-ый класс), в других – столкновительно-радиативный (II-ой класс).

Исследование пространственной структуры излучения областей формирования мазерного излучения подтверждало подобную гипотезу: наблюдения на интерферометрах показали, что мазеры I класса располагаются изолированно от мазеров OH и H_2O и на достаточно больших расстояниях (до 1 пк - Ментен и др. (5)) от ультракомпактных НП-зон или источников инфракрасного излучения, в то время как мазеры II класса наблюдаются непосредственно в направлении компактных НП-зон и сов-

падают, по крайней мере, с мазерами ОН. Это свойство метанольных мазеров I и II класса стало вторым фундаментальным признаком их различия.

20 лет тому назад механизм накачки метанольных мазеров I класса представлялся вполне очевидным как простое следствие базового свойства самой молекулы метанола: было показано (Лис (6)), что при столкновительных возбуждениях метанола можно ожидать инверсию в каскадах вращательных уровней J с верхними уровнями $k = -1$ в E -метаноле и с верхними уровнями $k = 0$ в A -метаноле и предпочтительные переходы $k = -1 - 0$ (E) и $k = 0 - 1$ (A) в соответствии с правилами отбора на частотах 36 ГГц ($4_{-1} - 3_0E$), 84 ГГц ($5_{-1} - 4_0E$), 44 ГГц ($7_0 - 6_1A^+$), 95 ГГц ($8_0 - 7_1A^+$) и 146 ГГц ($9_0 - 8_1A^+$). Полное подобие спектров наблюдавшихся на этих частотах мазеров (I-ый класс) подтверждало, что данные переходы инвертируются одним и тем же механизмом. Этот же механизм формирует линии поглощения на частоте 12.2 ГГц ($2_0 - 3_{-1}E$) – Батрла и др. (3) и должен формировать линии поглощения на частоте 6.7 ГГц ($5_1 - 6_0A^+$) – Ментен (4). Яркие мазерные линии, открытые на частоте 12.2 ГГц (3) и, позднее, на частоте 6.7 ГГц (Ментен (7)), очевидно, производились другим механизмом накачки, и эти мазеры принадлежали к другому классу, который и называли II-м.

Механизм накачки мазеров I класса не требует дополнительного источника энергии. Однако, как отмечалось в ряде работ Пламбек и Ментена (8) и Джонстона и др. (9), мазерная эмиссия может возникать в области взаимодействия фронта биполярного потока с плотным газом. Радиативная модель накачки источников II класса обсуждалась в работе Батрлы и др. (3), но детально столкновительно-радиативная модель была разработана значительно позже (см., например, (10) и ссылки в этой работе).

Хотя первые метанольные мазеры I класса были открыты в направлении областей образования массивных звезд, было высказано предположение (см., например, Катарци и Москаделли (11)), что как раз эти мазеры, достаточно удаленные от ультракомпактных III-зон и инфракрасных объектов, и, возможно, связанные с биполярными потоками, могут быть использованы для исследования процесса образования маломассивных звезд, в котором биполярные потоки играют доминирующую роль. Напротив, метанольные мазеры II класса можно использовать для изучения горячих и плотных молекулярных ядер в окрестностях компактных III-зон и исследования процесса формирования и эволюции массивных звезд.

Таким образом, классификация метанольных мазеров содержит следу-

ющие основные пункты ((3), (4)):

I-ый класс:

излучение в переходах $7_0 - 6_1 A^+$ (44 ГГц), $8_0 - 7_1 A^+$ (95 ГГц), $9_0 - 8_1 A^+$ (146 ГГц), $J_2 - J_1 E$ (25 ГГц), $4_{-1} - 3_0 E$ (36 ГГц), $5_{-1} - 4_0 E$ (84 ГГц), поглощение на частотах 12.2 ГГц и 6.7 ГГц, удаленность и изолированность от ультракомпактных III-зон, инфракрасных источников, мазеров OH и H₂O, возможная связь с биполярными потоками, столкновительный механизм накачки. Прототипом являются источники Ori KL, OMC2, NGC2264, W51, DR21West.

II-ой класс:

излучение в переходах $2_0 - 3_{-1} E$ (12 ГГц), $2_1 - 3_0 E$ (19 ГГц) $9_2 - 10_1 A^+$ (23 ГГц) $5_1 - 6_0 A^+$ (6.7 ГГц), ассоциация с ультракомпактными III-зонами, инфракрасными источниками и мазерами OH и H₂O, столкновительно-радиативный механизм накачки. Прототипом являются источники W3(OH), NGC7538, NGC6334E,F.

В общих чертах установленная классификация верна до сих пор, но в настоящее время ситуация не представляется столь однозначной. По мере накопления наблюдательных данных стало очевидно, что, практически, по всем пунктам классификации имеются исключения.

Так например, работе см. Уолша и др. (12) и Слыша и др. (13) было показано, что метанольные мазеры II класса и ультракомпактные III-зоны коррелируют очень слабо, с источниками IRAS по данным работы Эллингена и др. (14) не ассоциируются вообще, а корреляция между яркостью мазеров и источников IRAS не наблюдается вовсе (Ван дер Уолт и др. (15)), хотя именно излучение ультракомпактных III-зон и инфракрасных источников должно обеспечивать их накачку в радиативно-столкновительном механизме.

Не удалось обнаружить и корреляцию метанольных мазеров I класса с биполярными потоками (Каленский и др. (16)), в то время как в некоторых биполярных потоках, напротив, были обнаружены мазеры II класса (13).

Кроме того, в работе Хашика и др. (17) был найден метанольный мазер I класса на частоте 44 ГГц в направлении источника W3(OH), который впоследствии оказался классическим мазером II класса и одним из самых мощных мазерных излучателей на частоте 6.7 ГГц (7) (он входит в число прототипов мазеров II класса, на которых базируется классификация). С другой стороны, в обзорах на частотах 44 ГГц и 95 ГГц, предпринятых с целью поиска метанольных мазеров I класса ((18)–(20)), в направлении очень многих метанольных мазеров II класса они были найдены.

А в интерферометрических исследованиях на VLA на 44 ГГц Куртц и др. (21) показали, что в областях образования массивных звезд, в которых наблюдаются метанольные мазеры II класса, наблюдается также мазерное излучение на 44 ГГц, причем мазеры I и II классов совпадают пространственно в пределах 0.2-0.5 пк. Это оказалось верным даже в отношении самого мощного мазера II класса $9.62+0.19$, в котором ранее не предполагалось обнаружить излучение I класса.

Другими словами, по-видимому, многие мазерные источники являются объектами смешанного типа, в которых сочетаются признаки классификации обоих классов.

Тем не менее, статистически это никак не проверялось и до сих пор неясно, являются ли отклонения от установленной классификации случайными или преобладающими и систематическими. Полной статистической картины, которая охватывала бы все наблюдаемые ситуации, в настоящий момент не существует. Чтобы сделать подобные оценки, мы создали каталог метанольных мазеров I класса, который представляем в данной работе.

Уточнение значений физических параметров межзвездного вещества позволяет моделировать схемы таких важнейших явлений, сопровождающих процессы звездообразования, как, например, накачка космических мазеров.

В столкновительных моделях накачки главную роль играет плотность вещества. Если источник излучения точечный, то плотность излучающего вещества можно получить непосредственно из наблюдаемой интенсивности каких-либо молекулярных линий по соответствующим формулам. Но точечными, вероятнее всего, являются лишь сами мазерные конденсации. Окружающее же их вещество, плотность которого может непосредственно влиять на процесс накачки мазера, сосредоточено обычно в некотором объеме, превышающем объем мазерной конденсации. Только зная реальный размер этой окружающей мазер области, можно оценить плотность вещества, в которое вкраплен мазер.

В диссертации приводятся результаты обзора биполярных потоков и метанольных мазеров, а также картографирования ряда источников в линиях CS, трассирующих плотный газ, и измерений размеров излучающих областей для определения значений плотности и массы газа в центрах биполярных потоков и в метанольных мазерных конденсациях, связанных и не связанных с биполярными потоками. Цель такой работы – путем оценок физических параметров среды найти указания на возможную связь

биполярных потоков и тех областей, в которых формируются мазеры.

Цели и задачи работы.

- 1) Создание самой полной на настоящий момент выборки метанольных мазеров I класса и статистический анализ их свойств.
- 2) Проведение обзора в линиях CS(2-1) и C34S(2-1), трассирующих плотный газ, для определения концентрации молекулярного вещества в большой выборке биполярных потоков и метанольных мазеров как связанных, так и не связанных с биполярными потоками.
- 3) Подробное исследование отдельных областей звездообразования в линиях CS, измерение их размеров, плотности излучающей среды и массы газа в биполярных потоках и в окружении метанольных мазерных конденсаций с целью найти указания на возможную связь биполярных потоков и тех областей, в которых формируются мазеры.

Научная новизна работы.

- 1) Создан первый каталог метанольных мазеров I класса, включающий 160 источников.
- 2) На основе максимально полной на сегодняшний день выборки метанольных мазеров I класса впервые проведен статистический анализ их свойств и свойств объектов окружающей их среды.
- 3) Впервые проведен однородный обзор большой выборки метанольных мазеров и биполярных потоков в линии CS и ее изотопа C³⁴S – одной из наиболее распространенных линий излучения межзвездной среды, трассирующей плотный газ.
- 4) Впервые проведено однородное, выполненное на одном и том же телескопе картографирование биполярных потоков и источников мазерного излучения в линиях CS, что позволило сопоставить размеры областей, в которых формируется мазерное излучение и оценить плотность среды биполярных потоков и областей локализации метанольных мазеров, а также массы газа в биполярных потоках и в среде, в которую вкраплены метанольные мазерные конденсации.

Личный вклад автора.

Все статьи из списка публикаций по теме диссертации выполнены в соавторстве. Общий вклад авторов мы считаем равным, но при этом конкретные виды работ, как правило, выполняются не в равной степени и варьируются в различных статьях.

В работах [1], [2], [3], посвященных статистическому анализу большой выборки метанольных мазеров I класса, автор участвовал в сборе, систематизации данных каталога, их анализе и интерпретации статистических результатов.

В работах [4] и [6], посвященных картографированию областей образования массивных звезд, автор частично участвовал в наблюдениях, самостоятельно обрабатывал данные наблюдений и принимал участие в интерпретации полученных результатов.

Картографирование 18 областей звездообразования на 20-м радиотелескопе Онсальской обсерватории (Швеция), обработка данных и интерпретация полученных результатов, которые представлены в работе [7], выполнены автором самостоятельно.

В работе [8] автор участвовал в постановке задачи, подготовке и проведении обзора биполярных потоков и метанольных мазеров в линиях $J=2-1$ CS и $C^{34}S$, а также в обработке полученных наблюдательных данных и интерпретации результатов.

Апробация работы.

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

1. Всероссийская Астрономическая конференция "ВАК-2007", 2007, Казань (Россия).
2. Конференция Института астрономии РАН "Звездообразование в Галактике и за ее пределами", 2006, Москва (Россия).
3. Международный симпозиум "Астрономия 2005 - современное состояние и перспективы",

- 2005, Москва (Россия).
4. JENAM-2004 "The Many Scales in the Universe",
2004, Гранада (Испания).
 5. 4th Cologne-Bonn-Zermatt Symposium "The Dense Interstellar Medium
in Galaxies",
2003, Церматт (Швейцария).
 6. International Workshop "High Mass Star Formation: an Origin in Clusters",
2000, Вольтерра (Италия).
 7. IAU Symposium 197 "Astrochemistry: From Molecular Clouds to Planetary
Systems",
1998, Согвипо (Ю. Корея).
 8. 3rd Cologne-Zermatt Symposium "The Physics and Chemistry of the
Interstellar Medium",
1998, Церматт (Швейцария).
 9. IAU Symposium 178 "Molecules in Astrophysics Probes and Processes",
1996, 1-5 июля, Лейден (Голландия).
 10. Конференция "Памяти трех выдающихся астрофизиков: профс. И.С.
Шкловского, С.А. Каплана, С.Б. Пикельнера",
1996, Москва (Россия).
 11. Отчетные сессии Астрокосмического центра ФИ РАН.
 12. Отчетные конференции Радиоастрономического учебно-научного цен-
тра АКЦ ФИАН.

Публикации.

Основное содержание диссертации отражено в 16 публикациях:

1. **Г.М. Ларионов, И.Е. Вальтц**//
«Метанольные мазерные группы и излучение I класса: распределение плотностей потоков».
2007, Астрон. Ж. 84, 902-909.
2. **Г.М. Ларионов, И.Е. Вальтц**//
«Метанольное излучение в изолированных мазерных конденсациях: статистический профиль распределения скоростей».
2007, Астрон. Ж. 84, 839-856.
3. **И.Е. Вальтц, Г.М. Ларионов**//
«Каталог метанольных мазеров I класса».
2007, Астрон. Ж. 84, 579-591.
4. **Г.М. Ларионов, И. Зинченко, И.Е. Вальтц**//
«Исследование трех массивных областей звездообразования в линиях CS».
2006, Астрон. Ж. 83, 130-138.
5. **И.Е. Вальтц, Г.М. Ларионов**//
«Каталог метанольных мазеров I класса».
Конференция Института астрономии РАН "Звездообразование в Галактике и за ее пределами",
2006, апрель 17-18, Москва (Россия). Сб. трудов конференции под ред. Вибе и Кирсановой, С. 141.
6. **Г.М. Ларионов, И. Зинченко, И.Е. Вальтц**//
«Исследование трех массивных областей звездообразования в линиях CS».
Международный симпозиум "Астрономия 2005 – современное состояние и перспективы",
2005, 1-6 июня, Москва (Россия). Труды ГАИШ, С. 72.

7. **G.M. Larionov**, I.E. Val'tts//
 «Study of peculiarity in Class I methanol maser spectra». JENAM-2004
 "The Many Scales in the Universe",
 2004, 13-17 Sept., Granada (Spain). Abstract book, P. 136.
8. В.Г. Промыслов, **Г.М. Ларионов**, С.В. Каленский//
 «Исследование области звездообразования L 379IRS3 в линиях CH₃OH
 и CS».
 2003, Астрон. Ж. 80, 304-314
9. **G.M. Larionov**, I.I. Zinchenko, I.E. Val'tts//
 «Study of massive star formation in CS lines». 4th Cologne-Bonn-Zermatt
 Symposium "The Dense Interstellar Medium in Galaxies",
 2003, 22-26 Sept., Zermatt (Switzerland). Abstract book, P. 157.
10. **Г.М. Ларионов**, В.Г. Промыслов, И.Е. Вальтц и др.//
 «Картографирование биполярных потоков и метанольных мазеров
 в линии CS(2-1)».
 2001, Астрон. Ж. 78, 387-395.
11. **G.M. Larionov**, I.E. Val'tts.//
 «The results of mapping of bipolar outflows and methanol masers in
 CS(2-1) line».
 International Workshop "High Mass Star Formation: an Origin in Clusters",
 2000, 31 May - 3 June, Volterra (Italy). Abstract book, P. 110.
12. **G.M. Larionov**, I.E. Val'tts, A. Winnberg et al.//
 «Survey of Bipolar Outflows and Methanol Masers in the C₃2S(2-1) and
 C₃4S (2-1) Lines in the Northern Sky».
 1999, A&ASS, 139, 257-275.
13. **G.M. Larionov**, I.E. Val'tts.// «Survey of bipolar outflows and methanol
 masers in the C₃2S(2-1) and C₃4S(2-1) lines in the Northern sky».
 3rd Cologne-Zermatt Symposium "The Physics and Chemistry of the
 Interstellar Medium",
 1998, 22-25 Sept., Zermatt (Switzerland). Abstract book, P. 117.

14. **G.M. Larionov**, I.E. Val'tts.//
«Study of dense molecular clouds toward bipolar outflows and methanol masers in CS(2-1) line».
 IAU Symposium 197 "Astrochemistry: From Molecular Clouds to Planetary Systems",
 1998, 23-27 Aug., Sogvipo (S. Korea). Abstract book, P. 89.
15. I.E. Val'tts, **G.M. Larionov**.// *«CS(2-1) Survey of Methanol Masers and Bipolar Outflows in the Northern Sky».*
 IAU Symposium 178 "Molecules in Astrophysics Probes and Processes",
 1996, 1-5 July, Lieden (Netherlands). Abstract book, P. 106.
16. **Г.М. Ларионов**, И.Е. Вальтц.//
«Обзор биполярных потоков и метанольных мазеров в линии CS(2-1) на частоте 98 ГГц».
 Конференция "Памяти трех выдающихся астрофизиков: профс. И.С. Шкловского, С.А. Каплана, С.Б. Пикельнера",
 1996, 23-28 сентября, Москва (Россия). Тезисы докладов, С. 36.

Структура и объем диссертации.

Работа состоит из Введения, трех глав, и Заключения. Объем работы составляет 178 страниц, в том числе 47 рисунков и 12 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 154 наименований.

Содержание диссертации.

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

В **Главе 1** приведены результаты статистического анализа большой выборки метанольных мазеров I класса.

Представлен каталог метанольных мазеров I класса, открытых на данный момент в северном и южном полушарии, содержащий 160 источников.

Анализ данных каталога показал, что в 76% случаев метанольные мазеры I класса ассоциируются с источниками IRAS, в 59% случаев – с ультракомпактными HII-зонами, в 63% случаев в направлении этих мазеров наблюдаются линии CS, трассирующие плотный газ, и лишь в 24% случаев – с биполярными потоками. Показано, что метанольные мазеры I класса не являются аутсайдерами по отношению к другим межзвездным мазерам: в 64% случаев они ассоциируются с мазерами OH, в 91% случаев – с мазерами H₂O и в 72% случаев – с метанольными мазерами II класса.

На основе каталога проведен анализ распределений лучевых скоростей метанольных мазеров I класса относительно скоростей родительских молекулярных облаков. Анализ основан на данных каталога этих мазеров и каталогов линий CS(2–1), трассирующих плотный спокойный газ. На большом статистическом материале показано, что детали спектров метанольных мазеров I класса концентрируются в районе скорости родительского молекулярного облака. Этот факт говорит в пользу гипотезы о модели метанольного мазера I класса как изолированной конденсации, обтекаемой истекающим из активной области веществом, благодаря которому происходит уплотнение мазерной среды и повышается вероятность активизации столкновительного механизма мазерной накачки вращательных уровней молекулы. Распределение скоростей мазерных линий I класса принципиально отличается от распределения скоростей мазерных линий II класса, образующих два скопления мазерных линий по обе стороны от относительного нуля, который соответствует скорости покоя окружающей среды. Распределение скоростей мазерных линий II класса можно трактовать как отражение движения в кеплеровских дисках, в то время как линии I класса, очевидно, не демонстрируют никаких систематических движений.

Принимая во внимание большую выборку источников смешанного типа (115 метанольных мазеров I класса, которые отождествились с мазерами II класса), мы провели работу по поиску зависимости между плотностью потока метанольных мазеров I класса и плотностью потока метанольных мазеров II класса, в выборке, содержащей 70 смешанных источников, излучающих на частотах 44 ГГц (I класс) и на частотах 6.7 ГГц и 12.2 ГГц (II класс). В этой полной выборке никакой зависимости найти не удалось, что соответствует выводу, полученному другими авторами. В то же время известны следующие факты, которые мы учли в данной части исследования. В работе Касвелла и др. (22) было отмечено несовпадение максимумов излучения в линиях $5_1 - 6_0A^+$ (6.7 ГГц) и $2_0 - 3_{-1}E$ (12.2 ГГц) при-

близительно для половины от общего числа исследованных источников. В работе (23) эти несовпадения были выражены количественно, а именно, мазерные линии были объединены в три группы: I-я группа содержит спектральные детали линий наиболее ярких в переходе $5_1 - 6_0A^+$ (6.7 ГГц), не совпадающих по скорости с наиболее яркими деталями линий $2_0 - 3_{-1}E$ (12.2 ГГц), II-я группа содержит спектральные детали линий сравнительно более ярких в переходе $2_0 - 3_{-1}E$ на частоте 12.2 ГГц, не совпадающих по скорости с наиболее яркими деталями линий $5_1 - 6_0A^+$ (6.7 ГГц), III-я группа содержит спектральные детали, для которых скорости максимумов излучений обеих линий совпадают. Анализ источников, относящихся к метанольным мазерным группам, показал, что во II-ой группе существует антикорреляция плотностей потоков, которой соответствует зависимость между потоками на 44 ГГц и на 6.7 ГГц, а также на 44 ГГц и на 12.2 ГГц, $lgS_{6.7+12.2} = (-1.68 \pm 0.38) \times lgS_{44} + (4.01 \pm 0.60)$. В группе I для мазеров на 6.7 ГГц эта зависимость менее крутая. Это означает, что в источниках с преобладающим излучением на частоте 6.7 ГГц метанольные мазеры I класса на 44 ГГц подавляются сильнее.

В **Главе 2** приведены результаты обзора биполярных потоков и метанольных мазеров в линиях $J=2-1$ CS и $C^{34}S$ на частоте 98 ГГц.

В то же время известно, что некоторые хорошо изученные области имеют мощные биполярные потоки, но не проявляют мазерной активности. В других наблюдаются биполярные потоки и метанольные мазеры, однако влияние центральной звезды, массы, возраста, мощности потока и других характеристик на процесс возбуждения мазеров неизвестен. Независимо от того, формируются ли метанольные мазеры в газовом диске, окружающем протозвездный объект, или и на фронте ударной волны — результате взаимодействия между потоком и молекулярным облаком, мазерная конденсация должна быть вкраплена в область очень плотного газа.

Индикатором очень плотного газа является линия CS — $n_{crit} = 10^4 - 10^7 \text{ cm}^{-3}$ — при меньших значениях плотности среды эта линия не возбуждается (см., например, (24)).

В данной работе мы представляем результаты обзора большой выборки источников в линиях $J=2-1$ CS и $C^{34}S$, проведенный для сравнения плотности среды в биполярных потоках и в окрестностях метанольных мазеров I и II классов как связанных с биполярными потоками, так и не связанных с ними. Несмотря на многочисленные наблюдения CS не было таких, в которых физические свойства биполярных потоков и метанольных ма-

зеров сравнивались. Кроме того, не было одновременных наблюдений на одном и том же телескопе, что сводит к минимуму ошибки наведения и калибровки. Наблюдения на одной и той же частоте означает к тому же, что диаграмма телескопа одинакова для всех исследуемых областей.

В период с 14 по 31 мая 1995 года на 20-м радиотелескопе в Онсале (Швеция) нами были проведены наблюдения 158 источников в линии CS(2–1) (111 биполярных потоков, 26 метанольных мазеров I класса и 47 метанольных мазеров II класса, 10 источников являются одновременно мазерами I и II класса), из них 149 с положительным результатом (97 биполярных потоков, 26 метанольных мазеров I класса и 45 метанольных мазеров II класса). Из этих 149 источников 51 источник наблюдался в изотопе C³⁴S. У всех источников, наблюдавшихся в линии изотопа C³⁴S, обнаружена линия.

Проведенный анализ главных деталей линии CS в окрестностях метанольных мазеров I класса показал, что главная деталь линии CS, в среднем, шире, чем у биполярных потоков и в окрестностях метанольных мазеров II класса, следовательно, часть облака, в котором формируется мазер, может быть более массивной. В то же время сложная структура линии (с крыльями линии) обнаружена у 52% биполярных потоков, 23% метанольных мазеров I класса и 37% метанольных мазеров II класса. Т.е. широкие крылья линии CS, которые указывают на движение вещества, реже встречаются в направлении метанольных мазеров I класса.

Результаты наблюдений линии CS(2–1) и изотопа C³⁴S(2–1) позволяют рассчитать значение концентрации молекул CS на луче зрения.

Нами получено, что

$$N_{CS}(BO) = (2.0 \pm 0.6) \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$$

$$N_{CS}(MMI) = (9.8 \pm 0.9) \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$$

$$N_{CS}(MMII) = (11.9 \pm 1.2) \times 10^{14} \text{ см}^{-2}.$$

Эти оценки для центров биполярных потоков находятся в хорошем согласии с оценками других авторов, однако для окрестностей метанольных мазеров эта величина почти на порядок выше.

Проведен анализ светимостей биполярных потоков и газопылевого вещества в окрестностях метанольных мазеров в инфракрасном диапазоне, светимостей в линии CS и плотностей молекул CS на луче зрения. Показано, что для исследуемых источников между светимостью в линии CS и интегральной IR-светимостью, а также между светимостью в инфракрасном диапазоне и плотностью молекул CS на луче зрения существуют зависимости, причем окружение метанольных мазеров обоих классов силь-

нее, чем биполярные потоки и в IR-континууме, и в линии CS, т.е. мазеры формируются в более плотных и более горячих областях, чем биполярные потоки.

Эти факты говорят не в пользу модели накачки метанольных мазеров I класса на фронте ударной волны, вызванной биполярным потоком, поскольку их менее плотная среда не может воздействовать на мазерные конденсации. Возможно, впрочем, что мы наблюдаем эволюционную картину: фронт ударной волны потока уже прошел, уплотнив конденсацию, что могло спровоцировать накачку мазеров.

В **Главе 3** приведены результаты картографирования биполярных потоков и источников метанольного мазерного излучения в линиях CS для оценок размеров излучающей в CS областей и сравнения значений плотности и массы в биполярных потоках и в областях локализации метанольных мазеров.

Выводы, сделанные в предыдущей главе относительно свойств вещества в биполярных потоках и в окрестностях метанольных мазеров, базируются на измерениях концентрации молекул CS на луче зрения. Уточнение физических параметров позволяет моделировать схемы таких важнейших явлений, сопровождающих процессы звездообразования, как, например, накачка космических мазеров. В столкновительных моделях накачки главную роль играет плотность вещества. Если источник излучения точечный, то плотность излучающего вещества можно получить непосредственно из наблюдаемой интенсивности каких-либо молекулярных линий по соответствующим формулам. Но точечными, вероятнее всего, являются лишь сами мазерные конденсации. Окружающее же их вещество, плотность которого может непосредственно влиять на процесс накачки мазера, сосредоточено обычно в некотором объеме, превышающем объем мазерной конденсации. Только зная реальный размер этой окружающей мазер области, можно оценить плотность вещества, в которое вкраплен мазер. Оценку размеров излучающей области можно получить путем картографирования. В данной главе приведены результаты картографирования биполярных потоков и источников мазерного излучения в линиях CS для оценок значений плотности в биполярных потоках и в областях локализации метанольных мазеров.

По результатам наблюдений в линии CS(2-1) на Онсальском 20-м радиотелескопе построены карты 18 областей (биполярные потоки и области локализации метанольных мазеров). Уточнены координаты максимумов

излучения конденсаций CS. По 9 картам проведены оценки линейных размеров, плотности и массы областей.

Линейные размеры излучающих в CS областей в картинной плоскости рассчитаны с учетом угловых размеров областей, полученных в результате картографирования, и расстояния до источника. Расстояния до объектов, в основном, заимствованы из литературы. Плотность вещества получена на основе значений концентраций на луче зрения, которые рассчитываются по результатам данных наблюдений в основной линии и в изотопе, представленных во второй Главе.

Измерение размеров показало, что все источники являются протяженными для диаграммы Онсальского радиотелескопа. Получена нижняя граница линейных размеров (0.2–2.1 пк) для исследованных конденсаций CS. Получены оценки плотности водорода в конденсациях CS – значения лежат в пределах $n(H_2) = (0.3–13.1) \times 10^4 \text{ см}^{-3}$ – и оценки массы конденсаций, $\approx 7 M_{\odot}$ – $\approx 2800 M_{\odot}$.

Эти – более точные оценки – подтверждают, что метанольные мазеры ассоциируются с более плотными и более массивными областями – вне зависимости от того, связана ли мазерная конденсация с биполярным потоком.

Картографирование было выполнено отдельно в линиях CS(3–2) и C³⁴S(2–1) для некоторых областей образования массивных звезд с высокой мазерной активностью. Мы приводим данные обработки для трех из них: G265.14+1.45, G269.16–1.14, G291.27–0.71). Наблюдается хорошая корреляция между картами в линиях CS(2–1), CS(3–2) и C³⁴S(2–1). Проведено исследование относительного положения метанольных мазеров, H₂O мазеров, источников IRAS и максимумов излучения в линии CS. Показано, что в большинстве случаев положения мазерных источников близки к положению источников IRAS. Получены оценки некоторых физических параметров областей (линейные размеры, плотность, масса). Оценки концентрации ЛТР и БГС близки, это указывает на то, что газ, излучающий в переходах CS(3–2) и CS(2–1), распределен более или менее равномерно. Значения плотностей $n \approx 1 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$, массы лежат в пределах $10^3 – 10^4 M_{\odot}$. Полученные значения масс источников в ЛТР приближены к результатам расчетов вириальных масс. Сравнение лучевых скоростей излучения в разных скоростных интервалах в линии CS и скоростей метанольных мазерных источников показало, что скорости мазерных источников такие же, как и скорости излучения в линии CS, что подтверждает выводы, полученные в 1-ой Главе.

В результате наблюдений на 12 метровом телескопе Китт-Пик (США) построены карты молекулярного облака и высокоскоростного потока, связанных с областью звездообразования L379IRS3, в линии CS (3–2) на частоте 147 ГГц с привлечением данных наших наблюдений в Онсале на частоте 97 ГГц в линии C³⁴S(2–1). В линии CS(3–2) наблюдается как излучение спокойного газа (в интервале лучевых скоростей 12–25 км/с), так и излучение высокоскоростного газа биполярного потока за пределами этого интервала. В этих линиях методом максимума энтропии построены карты молекулярного облака и биполярного потока. Определены параметры газа в L379IRS3. Для молекул CS получена лучевая концентрация 8×10^{14} см⁻² в молекулярном облаке и обилие, равное 4×10^{-9} .

В **Заключении** суммируются результаты, которые выносятся на защиту диссертации. Они отражают решения поставленных целей и задач, которые приведены выше.

Основные результаты, которые выносятся на защиту.

- 1. Создан первый каталог метанольных мазеров I класса, включающий 160 источников с интегральной интенсивностью максимальной детали на 44 ГГц не менее 3 Ян км/с.** На основе статистического анализа данных каталога показано, что более 50% метанольных мазеров I класса отождествляется с объектами, типичными для областей активного звездообразования: источниками IRAS, ультракомпактными III-зонами, плотными газопылевыми сгустками (след в линиях CS), межзвездными мазерами OH и H₂O. В то же время с биполярными потоками, которые могли бы играть роль в накачке этих мазеров на фронтах взаимодействия с молекулярными облаками, отождествилось менее четверти от общего числа объектов каталога. С метанольными мазерами II класса, формирующимися в окрестностях молодых массивных звезд, мазеры I класса отождествились в 72% случаев. Эти результаты позволяют сделать вывод, что метанольные мазерные области наиболее надежно классифицируются по типу накачки мазера, а не по признаку ассоциации с другими астрономическими объектами.
- 2. На большом статистическом материале показано, что детали спектров метанольных мазеров I класса концентрируются в**

районе скорости родительского молекулярного облака. Этот факт говорит в пользу гипотезы о модели метанольного мазера I класса как изолированной конденсации, обтекаемой истекающим из активной области веществом, благодаря которому происходит уплотнение мазерной среды и повышается вероятность активизации столкновительного механизма мазерной накачки вращательных уровней молекулы.

3. **Найдена антикорреляционная зависимость между плотностями потоков метанольных мазеров I класса и II класса** $lgS_{6.7+12.2} = (-1.68 \pm 0.38) \times lgS_{44} + (4.01 \pm 0.60)$ на основании анализа большой выборки, содержащая 70 смешанных источников, излучающих на частотах 44 ГГц (I класс) и на частотах 6.7 ГГц и 12.2 ГГц (II класс).
4. Проведен обзор центров биполярных потоков и окрестностей метанольных мазеров в большой выборке объектов (158 источников), включая картографирование некоторых из них. Наблюдения проводились в линии CS(2–1) и в изотопе C³⁴S, трассирующих плотный газ. **Получены значения концентрации молекул на луче зрения, линейных размеров, плотности и массы излучающих в CS областей, на основании которых показано, что среда, окружающая метанольные мазеры, в среднем, более плотная и более массивная, чем среда биполярных потоков.** Это может означать, что либо биполярные потоки не могут воздействовать на мазерные конденсации, либо мы наблюдаем эволюционную картину: фронт ударной волны потока уже прошел, уплотнив конденсацию, что могло спровоцировать накачку мазеров.
5. **По результатам картографирования областей образования массивных звезд в линиях CS получены оценки некоторых физических параметров областей (масса, плотность, линейные размеры).** Сравнение лучевых скоростей излучения в разных скоростных интервалах в линии CS и скоростей метанольных мазерных источников подтвердило, что скорости мазерных источников такие же, как и скорости излучения в линии CS, которое трассирует спокойный плотный газ.

Литература

- [1] A. H. Barrett, P. R. Schwartz, and J. W. Waters, *Astrophys. J.* **168**, L101 (1971).
- [2] R. Hills, V. Pankonin, and T. L. Landecker, *Astron. and Astrophys.* **39**, L149 (1975).
- [3] W. Batrla, H. E. Matthews, K. M. Menten, and C. M. Walmsley, *Nature* **326**, 49 (1987).
- [4] K. M. Menten, *Proc. of the Third Haystack Observatory Meeting*, Eds. A. D. Haschick and P. T. P. Ho, 119 (1991).
- [5] K. M. Menten, C. M. Walmsley, C. M. Henkel, and T. L. Wilson, *Astron. and Astrophys.* **157**, 318 (1986).
- [6] R. M. Lees, *Astrophys. J.* **184**, 763 (1973).
- [7] Menten K.M., 1991, *ApJ* 380, L75.
- [8] R. L. Plambeck and K. M. Menten, *Astrophys. J.* **364**, 555 (1990).
- [9] K. J. Johnston R. Guame, and S. Stolovy, *et al.*, *Astrophys. J.* **385**, 232 (1992).
- [10] A. M. Sobolev, D. M. Cragg, and P. D. Godfrey, *Astron. and Astrophys.* **324**, 211 (1997).
- [11] M. Catarzi and L. Moscadelli, *Proc. of the Conf. "Astrophysical Masers"*, Eds. A. W. Clegg and G. E. Nedoluha, *Lecture Notes in Physics* **412**, 187 (1992).

- [12] A. J. Walsh, A. R. Hyland, G. Robinson, and M. G. Burton, Monthly Notices Roy. Astron. Soc. **291**, 261 (1997).
- [13] V. I. Slysh, I. E. Val'tts, S. V. Kalenskii, *et al.*, Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. **134**, 115 (1999).
- [14] S. P. Ellingsen, M. L. von Bibra, P. M. Mc Culloch, *et al.*, Notices Roy. Astron. Soc. **280**, 378 (1996).
- [15] D. Van der Walt, S. Retief, M. Gaylard, and G. McLeod, Monthly Notices Roy. Astron. Soc. **282**, 1085 (1996).
- [16] С. В. Каленский, Р. Бачиллер, И. И. Берулис *и др.*, Астрон. журн. **69**, 1002 (1992).
- [17] A. D. Haschick, K. M. Menten, and W. A. Baan, Astrophys. J. **354**, 556 (1990).
- [18] V. I. Slysh, S. V. Kalenskii, I. E. Val'tts, and R. Otrupcek, Monthly Notices Roy. Astron. Soc. **268**, 464 (1994).
- [19] I. E. Val'tts, S. P. Ellingsen, V. I. Slysh, *et al.*, Monthly Notices Roy. Astron. Soc. **317**, 315 (2000).
- [20] S. P. Ellingsen, Monthly Notices Roy. Astron. Soc. **359**, 1498 (2005).
- [21] S. Kurtz, P. Hofner, and C.V. Álvarez, Astrophys. J. Suppl. Ser. **155**, 149 (2004).
- [22] J. L. Caswell, R. A. Vaile, S. P. Ellingsen, *et al.*, Monthly Notices Roy. Astron. Soc. **274**, 1126 (1995).
- [23] И. Е. Вальтц, С. Ю. Любченко, Астрон. журн. **81**, 918 (2004).
- [24] Mundy L.G., Evans N.J. II, Snell R.L., Goldsmith P.F., Bally J., 1986, ApJ 306, 670.