

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

На правах рукописи

Литовченко Иван Дмитриевич

**РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ
МОЛЕКУЛЯРНОГО МАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Специальность 01.03.02
астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2013

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

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук Вальтц Ирина Евгеньевна, АКЦ ФИАН, ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Рудницкий Георгий Михайлович, Государственный Астрономический Институт им. П.К. Штернберга, МГУ им. М.В. Ломоносова, заведующий отделом.

кандидат физико-математических наук Соболев Андрей Михайлович, Уральский Федеральный Университет им. Б.Н. Ельцина, заведующий отделом.

Ведущая организация: Институт Астрономии Российской Академии Наук, г. Москва

Защита состоится "5" декабря 2013 г. в "15" час "00" мин на заседании диссертационного совета Д002.023.01 Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН) в конференц-зале Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) по адресу: Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН по адресу: г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, с авторефератом диссертации на сайте <http://www.asc-lebedev.ru>

Автореферат разослан "4" ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Ю.А. Ковалев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Гидроксил ОН был первой молекулой в космосе из числа примерно 10, на которых наблюдается мазерное излучение, метанол CH_3OH – последней. Что между мазерами общего и каковы различия, сильно зависит от степени эволюционного развития молекулярного облака и конкретного типа объектов, в которых мазеры формируются.

Наличие ультракомпактных зон III или источников IRAS провоцирует возбуждение вращательных уровней молекул ОН и метанола дальним инфракрасным излучением с последующим распадом и мазерным излучением по типу ОН(1665,1667) и в метанольных мазерах II класса (здесь и далее – ММII) на характерных частотах 6.7 ГГц по каскаду А-метанола и на 12.2 ГГц – по каскаду Е-метанола. Это давно известный и хорошо разработанный радиативно-столкновительный механизм накачки (см. для ОН [1] и для CH_3OH [2, 3, 4] и ссылки в этих работах).

Вдали от УСIII или источников IRAS влияние внешнего излучения на ансамбли молекул отсутствует, поэтому возбуждение и распад молекул происходят по другой схеме.

Механизм накачки метанольных мазеров I класса (здесь и далее – ММI) – чисто столкновительный, который объясняется естественным состоянием плотных конденсаций в межзвездной среде и свойствами структуры уровней самих молекул метанола [5]. Распад возбужденных состояний молекул при этом сопровождается мазерным излучением, в основном, на частотах 44 ГГц и 95 ГГц в каскаде А-метанола и на 36 ГГц в каскаде Е-метанола. Столкновительный механизм накачки действует также при возбуждении мазеров ОН в сателлитной линии на частоте 1720 МГц [6].

Мазеры ОН наблюдаются в разных источниках. В звездах они обнаруживаются только в одном из четырех переходов сверхтонкой структуры Λ -удвоения вращательных уровней молекулы ОН. Для основного электронного состояния молекулы частота этого перехода составляет 1612 МГц. В межзвездной среде наблюдаются все четыре сверхтонких перехода Λ -удвоения в направлении областей звездообразования (далее мы будем использовать аббревиатуру SFR – от "*Star Forming Regions*") на ранних эволюционных стадиях развития, но, в основном, в главных линиях ОН(1665) и ОН(1667), и очень редко – в сателлитах. Так, в работе [7] среди 200 SFR, в направлении которых наблюдается излучение в главных линиях ОН, всего 11 источников излучают на частоте 1612 МГц и 12 – на частоте 1720 МГц.

В сателлите ОН(1720) в излучении чаще наблюдаются области, представляющие собой границу взаимодействия фронта остатка сверхновой с молеку-

лярным облаком – при этом главные линии наблюдаются в поглощении – см., например [8].

Метанольные мазеры, как отмечено выше, делятся на два класса (далее – ММІ и ММІІ). ММІІ, как и мазеры ОН в главных линиях, наблюдаются в направлении SFR в протопланетных дисках. Связь ММІ с различными объектами межзвездной среды неочевидна: чаще всего они не ассоциируются с объектами, типичными для областей звездообразования – например, с ультракомпактными зонами НІІ (UCHII), источниками IRAS или с мазерами ОН(1665,1667).

Кроме ультракомпактных зон НІІ и источников инфракрасного излучения, окружающих протозвездные и очень молодые звездные объекты, в окрестностях молодых звездных объектов часто наблюдаются турбулентные явления, имеющие форму биполярных потоков, изгибов вещества в виде дуг или полуколец или другие сложные вихревые формы, в которых прослеживается взаимодействие ударных волн с окружающей материей. Эти явления отражают энергетически мощные процессы, которые должны оказывать влияние на газо-пылевые сгустки вещества, вкрапленные в молекулярные облака, и на те химико-физические процессы, которые в них происходят. Фронт ударной волны приводит в движение многочисленные плотные филаменты, рассеивает и разгоняет их на всех масштабах и скоростях. Хорошо известно, что перегретая под воздействием энергетического потока конденсация охлаждается, высвечиваясь в линиях СО и SiO, трассирующих движение вещества, а также в линиях CS и NH₃, трассирующих плотный газ. На фронтах ударных волн наблюдается широкий спектр вращательных и колебательных линий молекулярного водорода Н₂ [9]. Молекулярный водород отслеживает газ, возмущенный столкновениями различных потоков с молекулярными облаками. В частности, ударная волна возбуждает свечение в линии молекулы Н₂ $v=1-0$ S(1) на длине волны 2.12 мкм. Наличие излучения в этой линии служит признаком существования в окружающей конденсацию среде фронта биполярного потока или другого активного динамического процесса.

По современным представлениям, в межзвездной среде реализуется сценарий, в котором в местах вторжения высокоскоростных фронтов ударных волн и потоков в молекулярные облака в конденсациях высокой плотности вырабатываются сложные органические молекулы – в частности, именно метанол.

Биполярные потоки, сжимающие мазерную конденсацию, могут оказывать существенное влияние на интенсивность метанольных мазеров I класса [10, 11], накачка которых чувствительна к вариациям плотности среды. Однако в качестве возможных кандидатов на поиск метанольного мазерного излучения I класса можно рассматривать также остатки фронтов ударных волн, распространявшихся при взрыве сверхновых звезд. При этом столкновительная накачка будет обеспечена прохождением ударной волны через соседнее с остат-

ком сверхновой молекулярное облако ("*adjacent cloud*").

Стратегия исследования мазерных источников проста и сводится к нескольким этапам – поиск новых источников для расширения числа объектов и повышения качества статистических оценок, изучение конкретных источников по результатам наблюдений и параметрам полученных мазерных и тепловых линий в окружающей среде и построение моделей источников на основании экспериментальных данных.

При этом разработка способов поиска метанольных мазеров I класса до сих пор остается проблемой. Исследования в мазерных линиях проводятся, как правило, в направлении известных областей звездообразования, причем точки наведения выбираются, в основном, по двум критериям. Это или известные мазерные источники OH, H₂O см., например, [12, 13], а также метанольные мазеры II класса [14, 15], или источники IRAS с цветовыми характеристиками ультракомпактных зон III – см., например, [16]. Наблюдения мазеров OH давно стало рутинной задачей и сводятся зачастую к исследованию их переменности. Расширение критериев выбора объектов для поиска и исследований – очень важная задача, которая позволяет более целенаправленно и осмысленно проводить наблюдения и более продуктивно использовать дорогостоящее антенное время.

Предлагаемый метод исследования – наблюдения на одиночных радиотелескопах. Между тем по результатам уже проведенных ранее многочисленных экспериментов можно сделать уверенный вывод о том, что точности диаграмм одиночных радиотелескопов не предоставляют достаточные сведения о размерах мазерных конденсаций и расстояниях между ними и до источников влияния на мазерные конденсации, которые необходимы для корректного построения моделей и сравнения физических параметров мазерных областей. Для этого необходимо привлекать интерферометрические наблюдения, которые обеспечивают более высокую точность в определении координат источников и их размеров.

На основании вышесказанного были сформулированы следующие основные направления исследования метанольных мазеров I класса, мазеров OH и тепловых линий окружающей среды в рамках данной работы.

Цели и задачи работы.

- 1) Проверка правильности предположения о возможной связи между метанольными мазерными областями I класса и остатками сверхновых.
- 2) Обзор областей образования звезд для поиска новых метанольных мазеров I класса в направлении разных типов объектов в областях звездообразования с более широким спектром характеристик по сравнению с традиционным.

- 3) Проверка правильности предположения относительно общности столкновительного механизма накачки метанольных мазеров I класса и мазерного излучения OH(1720) в областях звездообразования, не ассоциирующихся с остатками сверхновых.
- 4) Четвертая задача была поставлена в рамках предполетной подготовки миссии Радиоастрон и носит методический характер, связанный с обработкой наземных интерферометрических данных по наблюдениям мазерных источников при наличии в системе радиотелескопов космического плеча.

На защиту выносятся следующие основные результаты:

- 1) В области двух остатков сверхновых G27.4–0.2 протектировано метанольное мазерное излучение I класса на частоте 44 ГГц в линии $7_0 - 6_1^+$, не наблюдавшееся ранее. Данный мазер попал в 10% самых сильных метанольных мазеров I класса. В окрестности мазера получена карта на частоте 44 ГГц размером ($27' \times 27'$). Показано, что излучение на 44 ГГц формируется только в пределах данного мазера. Показано также, что не представляется возможным сделать однозначный вывод о том, в какой мере влияют два остатка сверхновых SNR G27.4+0.0(Kes73) и G27.3–0.02 на формирование плотной области, в которой формируются мазеры. Требуется, по крайней мере, крупномасштабное картографирование в линиях, отслеживающих плотный газ (CS, NH₃), высокоскоростное движение вещества (CO) и ударные волны (H₂1-0S(1) на длине волны 2.12 мкм).
- 2) С целью обнаружения новых метанольных мазеров I класса были проведены поисковые наблюдения на частоте 44 ГГц в переходе $7_0 - 6_1^+$ в направлении областей звездообразования из четырех списков, составленных по разным критериям. Открыто 9 новых мазеров, большая часть которых излучает в тепловых линиях, трассирующих плотный газ и имеет слабые сантиметровые потоки, что можно считать новым критерием для выбора объектов с целью обнаружения метанольного мазера I класса – это означает, что данные объекты находятся на очень ранней эволюционной стадии.
- 3) Исследованы 6 остатков сверхновых на координатах и скоростях мазерного излучения сателлита OH(1720): метанольное мазерное излучение I класса на частоте 44 ГГц не обнаружено на уровне 3σ . Основной вывод – наличие мазера OH(1720) в направлении остатка сверхновой не является достаточным условием для возникновения метанольного мазера.

4) Решена обратная задача – проведен обзор в направлении 111 метанольных мазеров I класса на частоте 1720 МГц в линии ОН. Основным результатом данной работы является обнаружение множества эмиссионных линий ОН(1720), которые могут быть мазерными, наблюдаемых в большем количестве в направлении ММІ, чем в направлении SNR, SFR и ММІІ, а также большого количества линий поглощения ОН(1720), формирующих узкие несимметричные спектры. **Наличие эмиссионных линий ОН(1720) может считаться прямым указанием на присутствие в наблюдаемых областях ударных волн, вероятнее всего, возникающих в мазерных конденсациях ММІ в процессе образования протозвезд на фронтах биполярных потоков от этих объектов, которые провоцируют усиление столкновительного механизма накачки, единственно ответственного, по современным представлениям, как за появление линий ММІ и ОН(1720), так и за появление в крыльях эмиссионных линий ОН спектров поглощения, содержащих узкие абсорбционные детали.**

5) Показано, что методика *корреляционной* обработки выходных данных с наземных интерферометров с помощью Программного цифрового коррелятора Астрокосмического Центра успешно реализуется, и формат выходных данных коррелятора совместим с форматом данных, который используется в общепринятом программном пакете AIPS, предназначенном для посткорреляционной обработки интерферометрических наблюдений. Это программное обеспечение AIPS протестировано многолетним использованием на различных обсерваториях и гарантирует получение достоверных сведений о структуре компактных радиоисточников.

Научная новизна и практическая ценность работы.

1) Предсказан и обнаружен яркий метанольный мазер I класса, не наблюдавшийся ранее на частоте 44 ГГц, в области интерференции двух остатков сверхновых, который представляет собой новый интересный объект для дальнейшего исследования на других частотах.

2) Открыто 9 новых метанольных мазеров I класса в областях образования с низкими радиопотоками в сантиметровом диапазоне длин волн, что указывает на очень раннюю стадию их эволюции и может служить новым критерием отбора областей для поиска метанольного излучения I класса.

3) Показано, что излучение мазеров ОН на частоте 1720 МГц в направлении остатков сверхновых не является достаточным основанием для возникновения в тех же конденсациях метанольных мазеров I класса, несмотря на

то, что фронт ударной волны должен обеспечивать совместную столкновительную накачку этих мазеров.

4) С успехом решена обратная задача – открыто множество мазеров ОН на частоте 1720 МГц в направлении метанольных мазеров I класса, совместную столкновительную накачку которых могут обеспечивать не остатки сверхновых, а биполярные потоки.

5) Большую практическую ценность представляют собой результаты проведения предполетного эксперимента и обработки данных на российском наземном космическом интерферометре "КВАЗАР" с использованием трех 32-м антенн в сильно разнесенных географических пунктах Бадары (Алтайский край), Заленчукская (Карачаево-Черкесская АО), Светлое (Ленинградская область) и 22-м радиотелескопа в Пушино (Московская область), имитирующего космическое плечо. Отработана методика корреляционной обработки выходных данных с наземных интерферометров с помощью Программного цифрового коррелятора Астрокосмического Центра и ее совмещения с посткорреляционной обработкой радиоспектроскопических данных путем анализа частоты интерференции в рутинном общепринятом международном пакете AIPS.

Личный вклад автора.

В процессе выполнения диссертационной работы были проведены три цикла наблюдений: два – на 20-м радиотелескопе космической обсерватории в Онсале, Швеция (см. работы №№ 6, 7, 8, 11, 12 из списка публикаций, представленном ниже в данном автореферате) и один – на 70-м антенне Национального центра управления и испытаний космических средств в Евпатории, Украина (см. работы №№ 2, 5, 9, 10 из списка публикаций, представленном ниже в данном автореферате), в которых автор лично принимал участие. Он участвовал в разработке задач для этих экспериментов, самостоятельно осуществлял разбиение каталогов для посуточных наблюдений и составлял наблюдательные файлы с параметрами наведений для управления телескопами, участвовал в наблюдениях в качестве оператора и контролировал запись полученных данных. Автор провел первичную и окончательную обработку результатов наблюдений, статистический анализ данных, расчет физических характеристик наблюдавшихся источников и представил выводы в виде таблиц, рисунков и текстов статей для публикаций. В четвертой части работы автор самостоятельно выполнил обработку скоррелированных данных наблюдений мазера W3(OH), полученных в результате работы российского интерферометра "КВАЗАР" с имитацией космического плеча с помощью радиотелескопа в Пушино, Россия (см. работы №№ 1, 3, 4 из списка публикаций, представленном ниже в данном автореферате).

Стендовые доклады и устные презентации для конференций и семина-

ров автор подготовил самостоятельно. Вклад автора в перечисленные работы, несомненно, является преобладающим, несмотря на то, что все исследования выполнены в соавторстве с участниками экспериментов.

Апробация работы.

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

1. Всероссийская Астрономическая конференция ВАК-2010. "От эпохи Галилея до наших дней" ,
2010, САО, Нижний Архыз, Россия.
2. Международная студенческая научная конференция "Физика космоса" ,
2011, Уральский государственный университет, обсерватория Коуровка, Россия.
3. Международная конференция "16th Open Young Scientists Conference on Astronomy and Space Physics" ,
2009, Киевский государственный университет, Киев, Украина.
4. XL Young European Radio Astronomers conference,
2010, Alcala de Henares, Spain.
5. International Symposium IAU-280 "The Molecular Universe" ,
2011, Toledo, Spain.
6. IAU Symposium №287 "Cosmic masers: From OH to H₀" ,
2012, Stellenbosch, South Africa.
7. Конференция молодых ученых "Фундаментальные и прикладные космические исследования" ,
2012, Институт космических исследований РАН, Москва, Россия.
8. XLII Young European Radio Astronomers Conference,
2012, Пущино, Россия.
9. Ежегодные научные сессии Астрокосмического центра ФИАН 2010, 2011, 2012.

Обучение работе на интерферометрах и одиночных телескопах проходило на мероприятии *Summer school in astrophysics "Single-dish Radio Astronomy and Radio Science"* , 2011, 12-17 сентября, Pula (Cagliari, Italy).

Публикации.

Результаты диссертации опубликованы в 12 работах, в том числе в изданиях из списка *ВАК* три статьи - в **Астрономическом Журнале** [2, 6, 7] и четыре - в **Трудах Международного Астрономического Союза** [4, 5, 8, 9]:

1. **I.D. Litovchenko**, A.V. Alakoz, V.I. Kostenko, S.F. Lihachev, A.M. Finkelstein and A.V. Ipatov.

«Interferometric observations of the source W3(OH) in the main lines of OH in preparation and holding the early science program of the space mission RadioAstron».

Abstract book of XLII Young European Radio Astronomers conference, published by PRAO ASC LPI, 2012, Pushchino, Russia, p.11.

А также:

И.Д. Литовченко, А.В. Алакоз, С.Ф. Лихачев, В.И. Костенко, А.В. Ипатов, А.М. Финкельштейн.

«Посткорреляционная обработка радиоспектроскопических данных методом анализа частоты интерференционных лепестков».

2012, Препринт ФИАН №18, стр. 1-29.

2. **И.Д. Литовченко**, О.С. Баяндина, А.В. Алакоз, И.Е. Вальтц, Г.М. Ларионов, Д.В. Муха, А.С.Набатов, А.А. Коноваленко, В.В. Захаренко, Е.В. Алексеев, В.С. Николаенко, В.Ф. Кулишенко, С.А. Одинцов.

«Радиолинии OH на частоте 1720 МГц как индикаторы биполярных потоков в окрестностях метанольных мазеров I класса».

2012, Астрономический журнал, **89**, 593-610.

3. **И.Д. Литовченко**, А.В. Алакоз, В.И. Костенко, С.Ф. Лихачев, А.М. Финкельштейн, А.В. Ипатов.

«Наблюдение мазера OH в источнике W3(OH) с использованием Российской интерферометрической сети "Квазар" в рамках подготовки научных наблюдений космической миссии РадиоАстрон».

Тезисы конференции молодых ученых "Фундаментальные и прикладные космические исследования" , 2012, издательство Института Космических Исследований РАН., стр. 53.

4. **I.D. Litovchenko**, A.V. Alakoz, V.I. Kostenko, S.F. Lihachev, A.M. Finkelstein and A.V. Ipatov.

«OH maser observation using the Russian interferometric network "Quasar" in preparation of scientific observations of the space mission RadioAstron».

Proceedings of the International Astronomical Union, Symposium No. 287: "Cosmic masers: From OH to H₀" . Editors: R.S. Booth, E.M.L. Humphreys and W.H.T. Vlemmings. ISSN: 1743-9213. Cambridge University Press, 2012, pp 504-505.

5. I.E. Val'tts, **I.D. Litovchenko**, O.S. Bayandina, A.V. Alakoz, G.M. Larionov, D.V. Mukha, A.S. Nabatov, A.A. Konovalenko, V.V. Zakharenko, E.V. Alekseev, V.S. Nikolaenko, V.F. Kulishenko and S.A. Odintsov.

«New OH Observations toward Class I Methanol Masers».

Proceedings of the International Astronomical Union, Symposium No. 287: "Cosmic masers: From OH to H₀" . Editors: R.S. Booth, E.M.L. Humphreys and W.H.T. Vlemmings. ISSN: 1743-9213. Cambridge University Press, 2012, pp 294-295.

6. **И.Д. Литовченко**, А.В. Алакоз, И.Е. Вальтц, Г.М. Ларионов.

«Поиск метанольного мазерного излучения I класса в направлении некоторых остатков сверхновых».

2011, *Астрономический журнал*, **88**, 1061-1072.

7. **И.Д. Литовченко**, А.В. Алакоз, И.Е. Вальтц, Г.М. Ларионов.

«Поиск метанольного мазерного излучения I класса в разных типах объектов межзвездной среды».

2011, *Астрономический журнал*, **88**, 1177-1187.

8. G.M. Larionov, **I.D. Litovchenko**, I.E. Val'tts and A.V. Alakoz.

«Class I Methanol Maser Observations at 44 GHz in the Direction of Some SNRs and SFRs».

Proceedings of the International Astronomical Union, Symposium No. 280: "The Molecular Universe" . Editors: José Cernicharo and Rafael Bachiller. ISSN: 1743-9213. Cambridge University Press, 2011, 226L.

9. G.M. Larionov, **I.D. Litovchenko**, O.S. Bayandina, I.E. Val'tts, A.V. Alakoz, D.V. Mukha, A.S. Nabatov, A.A. Konovalenko, V.V. Zakharenko, E.V. Alekseev, V.S. Nikolaenko, V.F. Kulishenko and S.A. Odintsov.

«OH 1720-MHz Observations toward Northern Class I Methanol Masers with 70-m Ukrainian Telescope».

Proceedings of the International Astronomical Union, Symposium No. 280: "The Molecular Universe" . Editors: José Cernicharo and Rafael Bachiller. ISSN: 1743-9213. Cambridge University Press, 2011, 227L.

10. **И.Д. Литовченко**, А.В. Алакоз, О.С. Баяндина, И.Е. Вальтц, Г.М. Ларионов, Д.В. Муха, А.С.Набатов, А.А. Коноваленко, В.В. Захаренко, Е.В. Алексеев, В.С. Николаенко, В.Ф. Кулишенко, С.А. Одинцов.

«Обзор метанольных мазеров I класса в линии спутника OH (1720 МГц) на 70-м радиотелескопе НАНУ (Украина)».

Труды 40-й международной студенческой научной конференции "Физика космоса" , издательство Уральского университета, 2011, Коуровка, Россия, стр. 302.

11. **I.D. Litovchenko**, A.V. Alakoz, I.E. Val'tts.

«44 GHz methanol maser emission around SNR G27.4-0.16 and new detections of class I methanol masers in the direction of high-mass protostellar candidates».

Abstract book of XL Young European Radio Astronomers conference, published by Universidad de Alcala, 2010, Alcala de Henares, Spain, p.11.

12. **I.D. Litovchenko**, A.V. Alakoz, I.E. Val'tts.

«Mapping of Class I Methanol Emission in the Environment of Masers Identified with SNR and Discovery of New Masers».

Abstract book of 17th Open Young Scientists Conference on Astronomy and Space Physics, published by University of Kiev, 2010, Kiev, Ukraine, стр. 49.

Структура и объем диссертации.

Работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем работы составляет 120 страниц, в том числе 31 рисунок на 31 странице и 11 таблиц на 17 страницах. Список цитируемой литературы из 112 наименований на 9 страницах.

Краткое содержание диссертации.

Во **Введении** представлено изложение темы работы, ее цели и задачи, апробация, публикации по теме диссертации, ее структура, объем и краткое описание диссертации.

Глава I. Поиск метанольного мазерного излучения I класса в направлении некоторых остатков сверхновых.

Поиск метанольного излучения I класса в направлении остатков сверхновых (SNR) специально никогда не проводился, хотя прецеденты ассоциаций SNR и метанольного излучения I класса имеются – например, в известных областях звездообразования W43, W44, W51. Вопрос ассоциации метанольных мазеров II класса с остатками сверхновых обсуждался в работах [17, 18].

В каталоге метанольных мазеров I класса [19, 20] из 198 источников отождествляется с SNR 31 объект (16%) в пределах $10'$, что примерно в 3 раза меньше типичного размера SNR ($30'$, [21]). Между тем связь MMI с остатками сверхновых в большинстве обнаруженных ассоциаций не является очевидной и требует специального изучения. Так как метанольные мазеры I класса могут образовывать группы источников, расположенные в областях размером до нескольких угловых минут, наиболее оптимальным представляется исследование окрестностей какого-либо известного мазера, который ассоциируется с SNR.

С этой целью выполнены наблюдения на Онсальском 20-м радиотелескопе (Швеция) на частоте 44 ГГц в линии метанола $7_0 - 6_1 A^+$ в направлении малоизученной области G27.4–0.2. Проведено картографирование области G27.4–0.2, характеризующейся наличием мазерных источников и близких по угловым координатам и лучевой скорости двух остатков сверхновых, возможно, влияющих на ускорение конденсирования межзвездной газо-пылевой среды. Данный фактор может играть роль в увеличении вероятности формирования молекул метанола и их высвечивания в мазерных линиях. Этот мазер ранее не исследовался на 44 ГГц. Основанием попытки установления связи между мазерной областью и остатками этих сверхновых является близость по координатам и одинаковый интервал скоростей на луче зрения профилей линии нейтрального водорода, наблюдаемый в направлении этих остатков сверхновых.

Мазерное излучение на 44 ГГц, не наблюдавшееся ранее, обнаружено. Данный мазер попал в 10% самых сильных метанольных мазеров I класса (от полного числа известных 198 на момент наблюдений) – в пределах точности измерения величины интегрального потока. В окрестности мазера получена карта на частоте 44 ГГц размером ($27' \times 27'$) с шагом $1'$, содержащая 729 точек. Показано, что излучение на 44 ГГц формируется только в пределах данной мазерной области. Сделан вывод, что для оценки влияния ударных волн от сверхновых требуются дополнительные исследования, по крайней мере, в

линии молекулярного водорода.

В наблюдениях на том же телескопе с теми же характеристиками выполнено еще одно исследование, изложенное ниже, касающееся возможной ассоциации метанольных мазеров I класса и остатков сверхновых.

Очевидным признаком взаимодействия остатков сверхновых с молекулярными облаками ("*Interacting SuperNova Remnants*") является мазерное излучение OH на частоте 1720 МГц, обусловленное столкновительной накачкой – см., например, [22, 23] и ссылки в этих работах.

Успешные наблюдения с целью поиска мазерного излучения OH(1720) в направлении сверхновых проводились неоднократно – как в плоскости Галактики в северном [24] и в южном полушариях [25], так и в Магеллановых Облаках [26]. Проводились также интерферометрические исследования с целью исследования связи SNR и молекулярных облаков – см., например, [27] и ссылки в этой работе. Эти исследования в значительной степени были инициированы успешным исследованием тонкой пространственной структуры мазерного излучения OH(1720) на VLA, в ходе которого было обнаружено 26 неразрешенных мазерных пятен в направлении SNR W28 [28].

Между тем на 2009 г. по данным из работы [27] лишь в 24 остатках сверхновых, исследованных на 1720 МГц при помощи одиночных антенн и интерферометров с чувствительностью 5-25 мЯн и 35-160 мЯн, соответственно, были обнаружены мазеры OH(1720) (ME SNR – т.е. "*Maser-Emitting*"), что составляет не более, чем 15% от общего числа SNR.

Поиск метанольного мазерного излучения I класса в направлении некоторых остатков сверхновых, в которых наблюдается мазерное излучение OH на частоте 1720 МГц – одна из задач данного обзора. Критерии отбора этих объектов, обсуждение результатов и комментарии к отдельным источникам изложены в соответствующих разделах данной главы диссертации.

В результате наблюдений показано, что в шести исследованных остатках сверхновых на координатах мазерного излучения сателлита OH(1720) метанольное мазерное излучение I класса на частоте 44 ГГц не обнаружено на уровне 3σ , т.е. это условие не является достаточным для обнаружения метанольных мазеров.

Глава II. Поиск метанольного мазерного излучения I класса в разных типах объектов межзвездной среды.

Как указывалось во введении, выбор критерия для поиска новых мазеров представляет собой проблемную задачу. Мы провели обзор областей звездообразования, содержащих объекты, находящиеся на разных стадиях эволюции, в направлении разных типов объектов северного полушария: в областях формирования протозвезд большой массы, в пылевых кольцах вокруг зон III и в протозвездных кандидатах, ассоциирующихся с мощными молекулярными потоками и Галактическими зонами III.

Подробнее – для обзора использовались четыре списка:

1. Находящиеся на ранней стадии эволюции кандидаты в массивные протозвездные объекты (НМРО) из работы Шридарана и др. [29], выбранные из каталога IRAS в соответствии со следующими критериями: они обнаружены в обзоре плотного газа, излучающего в линиях CS(2-1) в областях образования массивных звезд [30], удовлетворяют критерию Вуда и Черчвелла [31] выбора ультракомпактных НII зон по их цвету в дальнем инфракрасном диапазоне (FIR), яркие в FIR диапазоне ($F_{60} > 90$ Ян и $F_{100} > 500$ Ян), не были обнаружены в обзоре Галактики на 5 ГГц на потоках выше 25 мЯн, т.е. не имеют собственных ультракомпактных зон НII и изолированы от других зон НII.

2. Области с массивными молекулярными потоками из работы Кин и др. [32], связанными с ультракомпактными и компактными зонами НII.

3. Предполагаемые области генерации второго поколения звезд из работы Деарвенг и др. [33] – изолированные области НII с простой морфологией, которые находятся достаточно далеко от Галактической плоскости и содержат следующие объекты: почти сферическую зону НII вокруг возбуждающей звезды или кластера, пылевое кольцо вокруг ионизованного газа, которое излучает в диапазоне mid-IR и в миллиметровом диапазоне, точечный источник MSX в направлении пылевого кольца.

4. Области образования звезд большой массы из работы Киу и др. [34]), содержащие молодые объекты высокой светимости ($L > 10^3 L_{\odot}$), которые ассоциируются с молекулярными потоками.

На 44 ГГц исследовались 35 объектов из 69, представленных в первом списке, 12 объектов из 15, представленных во втором списке, 9 объектов из 17, представленных в третьем списке, и 3 объекта из 9, представленных в четвертом списке.

Наблюдения были проведены на Онсальском 20-м радиотелескопе (Швеция) на частоте 44 ГГц в линии метанола $7_0 - 6_1 A^+$.

Положительные результаты на 44 ГГц получены для объектов из первого списка (обнаружено 8 мазеров, два из которых наблюдались ранее на 95 ГГц и, таким образом, уже известны как метанольные мазеры I класса), и четвертого списка (обнаружено три мазера, два из них входят в первый список [29]). Все эти мазеры обнаружены в направлении областей формирования звезд большой массы.

Получены гауссовы параметры всех новых мазерных источников, в диссертации приведены спектры новых метанольных мазеров и в режиме *online* для иллюстрации представлены изображения трех областей, для которых имеются данные, полученные на длине волны 8 мкм на телескопе миссии *Spitzer* с камерой IRAC.

Спектральные детали узкие (во многих случаях < 1 км/с), что подтверждает их мазерную природу, и достаточно яркие, что позволяет исследовать

их тонкую пространственную структуру на интерферометрах. Спектральный интервал для полученных спектров не превышает ширину тепловых линий – например, CS, а центры интервалов совпадают с соответствующими значениями для скоростей линий CS – следовательно, мазерные конденсации находятся в покое по отношению к молекулярному облаку, в котором они сформировались.

Подробно рассмотрены те области, которые включены в первый список (Шридаран и др. [29]), поскольку именно в этой выборке есть максимальные положительные результаты на 44 ГГц.

В работе [29] отобраны 69 кандидатов в протозвездные объекты большой массы. В качестве критериев для отбора использовались потоки в дальней инфракрасной области спектра (для определения светимости и температуры пыли), излучение в континууме в радиодиапазоне на 3.6 см и на 1.2 мм и данные по наблюдениям молекулярных линий. Излучение пыли на 1.2 мм присутствует во всех 69 объектах, в то время как радиоизлучение на волне 3.6 см очень слабое или не наблюдается совсем.

Нами выполнен подробный статистический анализ, для которого использовались некоторые данные исследований из работы [29], в новейшем исследовании областей образования массивных звезд, проведенных в статье [35], и в наших наблюдениях, используя источники, общие для этих трех работ. Наблюдения и анализ были проведены для 37 объектов из этих 69 (54%).

Показано, что ассоциация биполярного потока, который проявляется в крыльях линии CO, с массивным протозвездным объектом (НМРО), также как и наличие теплового излучения в линиях сложных молекул, не является достаточным условием для обнаружения метанольного излучения I класса.

Существование в области НМРО мазера H₂O и метанольного мазера II класса повышает вероятность обнаружения метанольного излучения I класса в направлении НМРО, причем с метанольными мазерами I класса ассоциируются мазеры метанольные мазеры II класса с более сильными потоками в линиях.

Наиболее важным результатом является установление очевидности того факта, что области, в которых с успехом диагностируется метанольное мазерное излучение I класса, имеют очень низкие сантиметровые потоки – что указывает на отсутствие развитой ультракомпактной зоны НII и, следовательно, на молодость объекта.

Результаты наблюдений, статистического анализа более подробно рассмотрены в тексте диссертации и сведены в таблицу. Главный вывод представлен в разделе "Результаты, которые выносятся на защиту".

Глава III. Радиолнии ОН на частоте 1720 МГц как индикаторы биполярных потоков в окрестностях метанольных мазеров I класса.

Столкновительный механизм накачки чувствителен к изменениям плотно-

сти среды. Считается, что на процесс возникновения метанольного мазерного излучения I класса существенное влияние могут оказывать биполярные потоки истекающего вещества как от массивных, так и от маломассивных молодых звезд.

Можно поставить вопрос: могут ли мазеры OH и MMI формироваться в одних и тех же конденсациях, другими словами, могут ли биполярные потоки повлиять на процесс формирования мазеров OH(1720) или – может ли фронт ударной волны от сверхновой, пересекающий конденсацию, увеличить вероятность возникновения метанольного мазера I класса.

Соображение о том, что радикал OH может накачиваться биполярным потоком, высказывалось в работе [36], в которой открыт, предположительно, новый класс мазеров OH в области W3(OH) в направлении протозвездного объекта Turner-Welch.

Возможность формирования мазеров OH с излучением на частоте 1720 МГц под воздействием ударных волн в контексте исследования сверхновых обсуждалась многократно – см., например, [8], [24], а также [37] и ссылки в этой работе.

Поиск излучения в линии OH(1720) в направлении метанольных мазеров I класса в молекулярных облаках без привязки к остаткам сверхновых специально никогда не проводился. Такая попытка была предпринята только в отношении метанольных мазеров II класса, которые формируются под воздействием столкновительно-радиативной накачки. На радиотелескопе в Нансэ (Франция) исследовались 100 областей звездообразования, в которых наблюдается метанольное излучение II класса, на 4-х частотах мазерного излучения OH [38]. Несмотря на то, что мазеры OH, излучающие в главных линиях на частотах 1665 МГц и 1612 МГц, были обнаружены в 55% случаев, количество мазеров на частоте 1720 МГц, как и в обзоре южного неба [7] также незначительно – только в 6% случаев такое излучение было обнаружено. Этот факт может указывать лишь на то, что в механизме накачки метанольных мазеров II класса роль излучения от ближайших протозвезд или ультракомпактных зон III гораздо более значительна, чем роль столкновений. Подобная картина не может наблюдаться в направлении метанольных мазеров I класса, если механизм их накачки (также как и механизм накачки мазеров OH, излучающих на частоте 1720 МГц) чисто столкновительный. Возможная связь метанольных мазеров I класса и мазеров OH, излучающих на частоте 1720 МГц, требует специального изучения.

Первые наблюдения, связывающие метанольные мазеры I класса и мазеры OH(1720), появились в 2008 г.: сообщалось об обнаружении излучения на 95 ГГц в направлении остатка сверхновой Kes79 [39]. Этот результат не подтвердился в работе [40] на 44 ГГц при наблюдениях в Онсале и не подтвержден в наблюдениях на 95 ГГц, выполненных на 12-м телескопе в Аризоне

и на 44 ГГц на VLA (Claussen & Frail – частное сообщение, упомянутое в публикации [41]). В той же работе в Онсале [40] была предпринята попытка обнаружения метанольного излучения на 44 ГГц в направлении нескольких известных сверхновых, в спектрах которых наблюдается излучение ОН на частоте 1720 МГц – также с отрицательным результатом. Исследования связи SNR, ОН(1720) и ММІ являются актуальными и продолжаются на VLA – см. [42].

Однако наиболее оптимальным решением этих проблем и первым шагом в исследования вопроса о связи метанольного мазерного излучения I класса и мазерного излучения ОН(1720) представляется изучение полной выборки метанольных мазеров I класса на частоте 1720 МГц с целью получения надежных статистических оценок.

Нами был проведен обзор в направлении 111 метанольных мазеров I класса на частоте 1720 МГц в линии ОН на 70-м радиотелескопе с диаграммой 9', с разрешением по лучевой скорости 0.7 км/с при шумовой температуре системы, в среднем, 35 К.

В данной главе представлены параметры наблюдений и их обработки – в частности, рассмотрены вопросы регистрации и декодирования полученных данных, проработаны особенности наблюдавшихся спектров, проведен подробный анализ эмиссионных и абсорбционных деталей и расчет плотности молекул ОН на луче зрения и плотности окружающего вещества.

Без очевидных помех получено 72 спектра, в 27 (38%) из которых не наблюдаются ни эмиссионные, ни абсорбционные детали ОН.

Для статистического анализа отобраны 45 наиболее надежных спектров. Из них в 10 источниках наблюдается только линии излучения ОН, в 5 – только линии поглощения, в 30 спектрах наблюдаются как линии излучения, так и линии поглощения.

Во всех спектрах наблюдается заметная круговая поляризация.

Поскольку до проведения интерферометрических наблюдений мазерная природа наблюдавшихся нами линий ОН не может считаться определенно доказанной, мы провели средние оценки плотности молекул ОН на луче зрения в предположении о возможной теловой природе этих линий.

Получено, что средняя плотность молекул ОН на луче зрения составляет $N_{OH}=10^{17}$ см⁻² для узких эмиссионных деталей, ширина которых не превышает 2 км/с. Исходя из теоретических предположений о параметрах областей излучающих ОН(1720) [22] и экспериментальных оценок размеров наблюдавшихся метанольных мазерных конденсаций I класса [43], получена оценка плотности молекулярного водорода, которая варьируется в интервале от $n_{H_2}=10^2$ см⁻³ до $n_{H_2}=10^7$ см⁻³ в зависимости от того, является область излучения ОН(1720) фрагментом обычной межзвездной среды или она подверглась воздействию фронта биполярного потока.

Потоки в узких деталях – не менее 100 мЯн, для значительного количества линий - более 500 мЯн.

Эти характеристики означают, что предположение о мазерной природе наблюдаемых линий OH(1720) в направлении ММІ является правомерным, а значения наблюдаемых потоков позволяют поставить эти источники в эксперименты VLBI для определения размеров и яркостной температуры излучающих конденсаций.

Сравнение статистических данных показывает:

Мазерное излучение OH(1720) в направлении SNR наблюдается в 10% случаев, т.е. в 20 SNR из 200 ([44] и ссылки в этой работе).

Мазерное излучение OH(1720) в направлении SFR по данным наблюдений в южном полушарии присутствует в 11% случаев, т.е. в 28 SFR из 200 [7].

Мазерное излучение OH(1720) в направлении ММІІ по данным наблюдений в северном полушарии присутствует в 6% случаев, т.е. в направлении 6 SFR из 100 [38].

Узкие линии излучения OH(1720) в направлении ММІ по данным наблюдений настоящего обзора присутствует в 35% случаев, т.е. в 25 ММІ из 72, для которых получены надежные спектры. В 13 спектрах (еще 18%) также присутствуют эмиссионные детали OH(1720) на той же скорости, что и мазерные детали ММІ, но более широкие. Возможно, они представляют собой бленды и содержат более узкие линии, которые могут оказаться мазерными.

Глава IV. Посткорреляционная обработка радиоспектроскопических данных методом анализа частоты интерференции.

Радиоастрономические исследования проводятся с использованием больших радиотелескопов, как одиночных, так и объединенных в интерферометры. Использование интерферометров, в особенности систем со сверхдлинными базами (РСДБ), позволяет получать изображения исследуемых объектов с угловым разрешением в тысячные доли секунды, т.е. в сотни раз лучшим, чем в оптических исследованиях.

В рамках проекта Радиоастрон на орбиту был выведен искусственный спутник Земли с космическим радиотелескопом (КРТ) диаметром 10 метров, работающим в диапазонах 0.327, 1.65, 4.85 и 18-25 ГГц. В работе совместно с наземными радио-телескопами КРТ составит интерферометр, обеспечивающий угловое разрешение до 10 микросекунд дуги в диапазоне 18-25 ГГц.

Космическая обсерватория Радиоастрон обеспечит сверхвысокое, недостижимое в земных условиях, угловое разрешение, которое позволит впервые исследовать пространственную структуру сверхкомпактных объектов во Вселенной: квазаров, ядер галактик, пульсаров и протопланетных систем.

Протозвезды и протопланетные диски формируются в межзвездной среде вокруг звезд большой массы. Изучение этих объектов – современное и относительно новое направление в астрономии. Протозвезды большой массы наблю-

дать трудно: они являются редкими объектами и расположены, как правило, на далеких расстояниях, из-за этого поглощение излучения пылью не позволяет наблюдать эти области в оптическом и ультрафиолетовом диапазонах. Поэтому при изучении образования звезд большой массы именно радиоастрономические наблюдения с высоким пространственным разрешением, проводимые с помощью больших одиночных антенн или с помощью радиointерферометров играют важнейшую роль, а создание таких систем в настоящее время стремительно развивают данную отрасль науки.

Современные наземные интерферометры – а именно, радиотелескопы и интерферометрические системы Европы и США (EVN, VLBA, VLA) – позволяют достичь угловое разрешение лучше миллисекунды дуги, что соответствует пространственному разрешению порядка 1 астрономической единицы при расстоянии, типичном для областей образования звезд большой массы. Исследования таких областей концентрируются на наблюдении яркого неравновесного (т.е. мазерного) излучения в газо-пылевой среде молекулярных облаков, в которые вкраплены молодые массивные звезды или протозвезды. Другими словами, космические мазеры дают уникальную возможность исследовать области звездообразования с высоким пространственным разрешением.

Исследования компактных объектов в областях звездообразования – протозвезд и протопланет – традиционными методами радиоспектроскопии и с помощью предполетных программ наземно-космического радиointерферометра представляют собой актуальную проблему современной астрофизики.

Оптимальная методика проведения измерений с наземно-космическим радиointерферометром разрабатывается на основе сформулированных на предполетном этапе работы научных задач и на основе знания технических параметров аппаратуры.

Одной из таких предполетных программ были наблюдения на российском интерферометре "КВАЗАР" с имитацией космического плеча с помощью 22-м радиотелескопа Пушинской обсерватории.

Наземные предполетные наблюдения с имитацией космического плеча состоялись 2-3 февраля 2011 г. с использованием известного гидроксильного мазера W3(OH).

Основной целью этого эксперимента была отработка методики обработки результатов наблюдений, которая включает в себя как корреляционную часть, которая выполняется с помощью Программного цифрового коррелятора, разработанного в Астрокосмическом Центре ФИАН, так и посткорреляционную обработку выходных данных коррелятора с помощью стандартного общепринятого программного обеспечения AIPS.

Показано, что оба этапа обработки совместимы по форматам данных, и посткорреляционной обработка методом анализа частоты интерференции вполне обеспечивает решение задач наземно-космического интерферометра.

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

Список литературы

- [1] M. Elitzur, Review of Modern Physics, **54**, 1225 (1982).
- [2] D. M. Cragg, K. P. Johns, and P. D. Godfrey *et al.*, Monthly Notices Roy. Astron. Soc. **259**, 203 (1992).
- [3] A. M. Sobolev and S. Deguchi, Astron. and Astrophys. **291**, 569 (1994).
- [4] A. M. Sobolev, D. M. Cragg, and P. D. Godfrey, Astron. and Astrophys. **324**, 211 (1997).
- [5] R. M. Lees, Astrophys. J. **184**, 763 (1973).
- [6] M. Elitzur, Astrophys. J. **203**, 124 (1976).
- [7] J. L. Caswell, Monthly Notices Roy. Astron. Soc. **349**, 99 (2004).
- [8] J. W. Hewitt, F. Yusef-Zadeh, M. Wardle, D. A. Roberts *et al.*, Astrophys. J. **652**, 1288 (2006).
- [9] J. M. De Buizer, Monthly Notices Roy. Astron. Soc. **341**, 277 (2003).
- [10] R. Bachiller, S. Liechti, C. M. Walmsley *et al.*, Astron. and Astrophys. **295**, L51 (1995).
- [11] S. Leichti and C. M. Walmsley, Astron. and Astrophys. **321**, 625 (1997).
- [12] A. D. Haschick, K. M. Menten, and W. A. Baan, Astron. and Astrophys. **339**, 949 (1989).
- [13] R. Bachiller, K. M. Menten, J. Gomez-Gonzalez, and A. Barcia, Astron. and Astrophys. **240**, 116 (1990).
- [14] V. I. Slysh, S. V. Kalenskii, I. E. Val'tts, and R. Otrupcek, Monthly Notices Roy. Astron. Soc. **268**, 464 (1994).
- [15] S. P. Ellingsen, Monthly Notices Roy. Astron. Soc. **359**, 1498 (2005).
- [16] С. В. Каленский, Р. Бачиллер, И. И. Берулис И. Е. Вальтц и др., Астрон. журн. **69**, 1002 (1992).
- [17] J. L. Caswell, Monthly Notices Roy. Astron. Soc. **308**, 683 (1999).

- [18] J. L. Caswell, Monthly Notices Roy. Astron. Soc. **349**, 99 (2004).
- [19] И. Е. Вальтц, Г. М. Ларионов, Астрон. журн. **84**, 579 (2007).
- [20] I. E. Val'tts, G. M. Larionov, O. S. Bayandina, (2010).
arXiv:1005.3715v3[astro-ph.GA] <http://www.asc.rssi.ru/MMI>.
- [21] Bon-Chul Koo and Ji-hyun Kang, Monthly Notices Roy. Astron. Soc. **349**, 983 (2004).
- [22] P. Lockett, E. Gauthier, and M. Elitzur, Astrophys. J. **511**, 235 (1999).
- [23] Y. Pihlstrom, V. L. Fish, L. O. Sjouwerman, L. K. Zschaechner *et al.*,
Astrophys. J. **676**, 371 (2008).
- [24] D. A. Frail, W. M. Goss, E. M. Reynoso, E. B. Giacani *et al.*, Astron.
J. **111**, 1651 (1996).
- [25] A. J. Green, D. A. Frail, W. M. Goss, and R. Otrupcek,
- [26] C. L. Brogan, W. M. Goss, J. S. Lazendic, and A. J. Green, Astron.
J. **128**, 700 (2004). Astron. J. **114**, 2058 (1997).
- [27] J. W. Hewitt and F. Yusef-Zadeh, Astrophys. J. **694**, L16 (2009).
- [28] D. A. Frail, W. M. Goss, and V. I. Slysh, Astrophys. J. **424**, L111
(1994).
- [29] T. K. Sridharan, H. Beuther, P. Silke, K. M. Menten *et al.*, Astrophys.
J. **566**, 931 (2002).
- [30] L. Bronfman, L. A. Nyman and J. May, Astron. and Astrophys. Suppl.
Ser. **115**, 81 (1996).
- [31] D.O.S. Wood and E. Churchwell, Astrophys. J. **340**, 265 (1989).
- [32] S-L. Qin, J-J. Wang, G. Zhao, M. Miller *et al.*, , J-J Wang, G. Zhao,
M. Miller *et al.*, Astron. and Astrophys. **484**, 361 (2008).
- [33] L. Deharveng, A. Zavagno and J. Caplan, 2005, Astron. and
Astrophys. **433**, 565 (2005).
- [34] K. Qiu, Q. Zhang, S. T. Megeath, R. A. Gutermuth *et al.*, Astrophys.
J. **685**, 1005 (2008).
- [35] F. Fontani, R. Cesaroni, and R. S. Furuya, Astron. and Astrophys.
517, 56 (2010).
- [36] A. L. Argon, M. J. Reid, and K. M. Menten, Astrophys. J. **593**, 925
(2003).

- [37] C. L. Brogan, Proceedings IAU Symp. No. 242 "Astrophysical Masers and their Environments eds. J. M. Chapman and W. A. Baan, p. 299 (2007).
- [38] M. Szymczak and E. Gerard, *Astron. and Astrophys.* **414**, 235 (2004).
- [39] S. Y. Zubrin and V. M. Shulga, Proceedings of 15th Young Scientists Conf., Kiev, Ukraine, p. 41 (2008).
- [40] И. Д. Литовченко, А. В. Алакоз, И. Е. Вальтц, Г. М. Ларионов, *Астрон. журн.* **88**, 1061 (2011).
- [41] D. A. Frail, *Mem. Soc. Astron. Italiana* **75**, 282 (2008), arXiv:1108.4137v1 [astro-ph.HE] (2011).
- [42] Y. M. Pihlström, L. O. Sjouwerman, and V. L. Fish arXiv:1105.4377v1 [astro-ph.GA] (2011).
- [43] В. И. Слыш, И. Е. Вальтц, С. В. Каленский, В. В. Голубев *Астрон. журн.* **76**, 892 (1999).
- [44] J. W. Hewitt and F. Yusef-Zadeh, *Astrophys. J.* **683**, 189 (2008).