

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. П.Н. ЛЕБЕДЕВА  
АСТРОКОСМИЧЕСКИЙ ЦЕНТР

на правах рукописи

Полушкин Сергей Васильевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ  
МЕТАНОЛЬНЫХ МАЗЕРОВ

(01.03.02 — астрофизика и звёздная астрономия)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2011

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
*Вальтц Ирина Евгеньевна*  
(АКЦ ФИАН)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
профессор *Зинченко Игорь Иванович*  
(ИПФ РАН)

кандидат физико-математических наук  
*Самодуров Владимир Алексеевич*  
(ПРАО АКЦ ФИАН)

Ведущая организация: Государственный Астрономический Институт  
им. П.К. Штернберга, МГУ им. М.В. Ломоносова

Защита состоится "27" июня 2011 года в 16:30 На заседании Диссертационного совета Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), шифр Д002.023.01

Адрес: Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2, конференц-зал Института космических исследований РАН (ИКИ РАН)

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

Автореферат разослан "27" мая 2011 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета Д002.023.01  
д.ф.-м.н.

*Ю.А. Ковалев*

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы.

Одним из важнейших компонентов нашей Галактики является межзвездная среда. В основном, она состоит из газа – большей частью из водорода, и пыли. Наличие межзвездного газа имеет большое значение, т.к. именно в нем происходит процесс звездообразования. Межзвездная среда изучается, в частности, по излучению космических мазеров, возникающему, преимущественно, в областях образования массивных звезд, в свою очередь, влияющих на эволюцию окружающего газа. Самые распространенные мазеры наблюдаются на молекулах гидроксила  $\text{OH}$ , водяного пара  $\text{H}_2\text{O}$ , монооксида кремния  $\text{SiO}$  и метанола  $\text{CH}_3\text{OH}$ .

Механизм работы космических мазеров такой же, как и у лабораторных лазеров, т.е. они излучают за счет инверсной заселенности уровней. В лабораторных лазерах путь, проходимый светом в активной среде, увеличивается за счет зеркал, а излучение распространяется только в одном направлении, и получается узконаправленный пучок. Космические мазеры излучают изотропно, а активная среда в них имеет большую протяженность. Накачка осуществляется либо через радиативные, либо через столкновительные процессы. При радиативной накачке важно, чтобы кванты стока свободно выходили из мазерного источника, иначе возникнет термализация уровней и инверсная заселенность пропадет. При столкновительной накачке важно, чтобы накачка и сток осуществлялись частицами с разной энергией.

Первый космический мазер был открыт на молекуле  $\text{OH}$  на длине волны 18 см в 1963 г. [1].

Излучение совпадало с зонами HII вокруг молодых звезд. В 1968 г. в направлении мазеров  $\text{OH}$  в 1969 г. были открыты мазеры  $\text{H}_2\text{O}$  [2]. Мазерные линии метанола случайно обнаружили в 1971 г. в направлении области звездообразования Ori A. Их длина волны совпала с полосой частот молекулы  $\text{N}_2\text{O}$  [3].

Молекула метанола представляет собой вращающийся волчок. Атом водорода значительно легче атома кислорода. Он слегка оттягивает атом кис-

лорода на себя, и возникает прецессия вокруг оси вращения молекулы. Из-за этого снимается вырождение, и становятся разрешенными порядка двухсот переходов, доступных для радионаблюдений.

Существует два вида молекулы метанола  $A$  и  $E$ , которые отличаются ориентацией спина ядра атома водорода, вдоль и против оси вращения, соответственно. Метанольные мазеры делятся на два класса. Первоначально метанольные мазеры классифицировали по принадлежности к тем или иным объектам [4]. Так например, мазеры I класса не совпадают ни с мазерами OH, ни с мазерами  $H_2O$  и удалены от инфракрасных источников и ультракомпактных III зон, а мазеры II класса совпадают с мазерами OH и зонами III. Но позже выяснилось, что эти факты прямо указывают на более глубокий смысл в различии этих мазеров, а именно, в условиях их накачки. В мазерах I класса накачка происходит за счет столкновений, а в мазерах II класса – за счет инфракрасного излучения и столкновений – см. [5] и ссылки в этой работе.

Мазеры I класса наблюдаются в следующих переходах:  $7_0 - 6_1A^+$  на 44 ГГц,  $4_{-1} - 3_0E$  на 36 ГГц,  $5_{-1} - 4_0E$  на 84 ГГц,  $8_0 - 7_1A^+$  на 95 ГГц и  $9_0 - 8_1A^+$  на 146 ГГц. А мазеры II класса излучают в переходах  $5_1 - 6_0A^+$  на 6,7 ГГц,  $2_0 - 3_{-1}E$  на 12 ГГц,  $2_1 - 3_0E$  на 19 ГГц и  $9_2 - 10_1A^+$ . Самыми яркими линиями для мазеров I и II класса являются  $7_0 - 6_1A^+$  (44 ГГц) и  $5_1 - 6_0A^+$  (6.7 ГГц), соответственно [6, 7].

Так как мазерные линии очень яркие – до 500 Ян на 44 ГГц (M8E) и почти до 5000 Ян на 6.7 ГГц (G9.62+0.19), – их изучение может быть полезным при поиске областей звездообразования. Известно, что наша Галактика имеет спиральную структуру. Однако до сих пор неясно, сколько в ней спиральных рукавов [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. Поскольку мазеры наблюдаются в областях звездообразования, а те, в свою очередь, находятся в спиральных рукавах Галактики, то изучение мазеров может помочь ответить на этот вопрос.

В 2010 г. метанольный мазер II класса на частоте 6.7 ГГц был обнаружен в галактике Андромеды (M31) [15]. Этот мазер можно использовать для определения собственного движения M31 и для моделирования динамики и эволюции локальной группы галактик.

В астрономии очень важна проблема определения структуры излучающих областей. Этому вопросу всегда уделялось большое внимание: стро-

ится модель Галактики, определяются расстояния до объектов, с помощью интерферометров уточняются размеры источников. Эти данные необходимы при изучении моделей космических объектов, а также физических условий в излучающих газо-пылевых фрагментах межзвездной среды. Фотометрические способы для нашей Галактики дают неточные результаты. Это связано с непрозрачностью межзвездной среды для видимого излучения. Поэтому расстояния в Галактике определяются, в основном, кинематическими способами в радиодиапазоне. Один из таких способов – это определение тригонометрических параллаксов мазеров. В настоящее время началось систематическое определение тригонометрических параллаксов метанольных мазеров II класса на частоте 12 ГГц на VLBA (США): Reid et al. 2009 [16], Moscadelli et al. 2009. [17], Xu et al. 2009 [18], Zhang et al. 2009 [19], Brunthaler et al. 2009 [20]. Для мазеров  $\text{H}_2\text{O}$  и мазеров монооксида кремния с использованием интерферометра VERA (Япония): Honma et al. 2007 [21], Choi et al. 2008 [22], Sato et al. 2008 [23]. Современные данные по определениям расстояний мы будем использовать в своей работе.

По наблюдениям мазеров также можно определять параметры молодых звезд, например, массу протозвезды или величину магнитного поля по эффекту Зеемана [24].

На сегодняшний день природа метанольных мазеров еще не изучена. Особенно это касается метанольных мазеров I класса. Дело в том, что столкновения молекул метанола и молекул водорода обеспечивают, в силу особенностей правил перехода между уровнями этой молекулы, естественную инверсию квантовых уровней [25]. Поскольку наличие столкновений – неотъемлемое свойство любой среды, можно было бы предположить, что такие мазеры должны наблюдаться повсеместно в любом месте спирального рукава Галактики, в котором сосредоточено достаточное количество межзвездного газа. Между тем метанольных мазеров I класса (MMI) на сегодняшний день известно лишь около 200 – см. [26], а также каталог <http://www.asc.rssi.ru/MMI>, в то время как число метанольных мазеров II класса (MMII) приближается к 1000 – см. каталоги [27] и [28]. При этом – если предположения о моделях накачки этих мазеров верны – модель накачки MMI более проста и не требует дополнительных воздействий со стороны близких источников излуче-

ния, обеспечивающих радиативную часть накачки ММII. Другими словами, если условий столкновений для формирования этих мазеров недостаточно, в межзвездной среде должны существовать дополнительные факторы, усиливающие естественное влияние столкновений, обеспечивающих столь простую работу модели накачки ММI. В качестве такого дополнительного фактора рассматривается наличие биполярных потоков от молодых протозвезд [29, 30], фронт которых может сжать газопылевую конденсацию, увеличивая тем самым число столкновений и ускоряя процесс испарений молекул метанола с поверхности пылинок, обогащая излучающую среду.

Статистические исследования показывают, что ММI лишь в 24% случаев ассоциируются с биполярными потоками (<http://www.asc.rssi.ru/MMI>), этот вопрос до сих пор остается открытым. Исследованию связи ММI и биполярных потоков посвящена часть данной диссертации.

Особое место в таких исследованиях занимает изучение структуры и расположения мазерных конденсаций. Это сложные и дорогостоящие наблюдения, которые проводятся методами VLBI (Very Long Baseline Interferometry), или – в переводе – РСДБ: Радиоинтерферометрия со СверхДлинными Базами.

В первом приближении интерферометр можно представить как сегментированный телескоп. Сегменты не обязательно должны находиться на параболической поверхности, если учесть временную задержку прохождения сигнала от зеркала до фокуса. Радиоинтерферометр имеет такое же разрешение, как и телескоп с диаметром, равным максимальному удалению между двумя антеннами, но с меньшей чувствительностью из-за маленькой площади собирающей поверхности. Телескоп строит изображение напрямую, фокусируя сигнал в фокальной плоскости. В интерферометре сигнал фокусируется при помощи коррелятора.

Базой называется расстояние между двумя антеннами.

Основной задачей РСДБ является построение двумерного распределения яркости наблюдаемого источника. На практике наблюдается функция видности. Для базы между  $(i, j)$  антеннами она выглядит следующим образом [34]:

$$V^{i,j}(u, v) = \int \int A_{\nu}(l, m) I_{\nu}(l, m) \exp [2\pi i(u^{i,j}l + v^{i,j}m)] dldm, \quad (0.1)$$

где  $\nu$  – частота излучения,  $(l, m)$  – базисные векторы в системе координат, свя-

занной с источником,  $(u, v)$  – ортогональные компоненты двумерной проекции вектора базы, если смотреть с наблюдаемого источника, которые измеряются в длинах волн,  $V(u, v)$  – функция видности,  $A_\nu(l, m)$  – эффективная собирающая поверхность,  $I_\nu(l, m)$  – интенсивность. Распределение интенсивности можно вычислить при помощи обратного преобразования Фурье. Однако наблюдаемая функция видности отличается от реальной [35]:

$$\hat{V}^{i,j}(u, v) = \mathbf{g}_i \mathbf{g}_j^* V^{i,j} + \epsilon_{i,j} , \quad (0.2)$$

Здесь  $\hat{V}^{i,j}(u, v)$  – наблюдаемая функция видности,  $V^{i,j}$  – реальная функция видности,  $\mathbf{g}$  – комплексный передаточный коэффициент каждой антенны,  $\epsilon_{i,j}$  – погрешность.

Наиболее важным моментом в таких наблюдениях является калибровка.

Калибровкой называется процесс определения параметров передаточных функций. В данном случае, калибровка сводится к определению фазы и амплитуды  $\mathbf{g}$ .

Амплитудную калибровку можно выполнять двумя способами: априорная калибровка и калибровка по источнику. При априорной калибровке используются параметры антенны, такие как эффективная площадь и шумовая температура. При калибровке по внешнему источнику телескоп наводится на объект с известной интенсивностью, определяется коэффициент пропорциональности между откликом антенны и реальным значением потока.

При калибровке фазы определяются временные задержки. Для сдвига фазы на частоте  $\nu$  справедливы формулы:

$$\phi = 2\pi\nu\Delta\tau , \quad (0.3)$$

где  $\tau$  – это временная задержка. В первом приближении для задержки получается:

$$\Delta\tau = \Delta\tau_0 + \Delta\dot{\tau}(t - t_0) , \quad (0.4)$$

где  $\Delta\dot{\tau}$  – производная по времени от  $\tau$ , а индекс "0" означает значение в момент времени  $t_0$ . Далее вычисляются такие значения параметров  $\Delta\tau_0$  и  $\Delta\dot{\tau}$ , при которых амплитуда принимает максимальное значение. Для фазовой калибровки используют яркие компактные объекты, расположенные близко к

наблюдаемому источнику, чтобы за время перевода антенны с калибратора на источник значения параметров  $\Delta\tau_0$  и  $\Delta\dot{\tau}$  не успевали сильно измениться.

Если наблюдаемый источник компактный и достаточно яркий, то его можно использовать для самокалибровки. На первом шаге самокалибровки берется простая модель, например, точечный источник. Потом вычисляется разность квадратов между наблюдаемой функцией видности и модельной. Минимизируя полученную разность, можно найти  $\Delta\tau_0$  и  $\Delta\dot{\tau}$ . На следующем шаге к точечному источнику применяются полученные значения параметров, и модель усложняется. Далее снова минимизируется разность квадратов между наблюдаемой и модельной функцией видности. Так с каждой итерацией модель источника улучшается и приближается к реальной структуре.

Требуется также калибровка диапазона. Это связано с тем, что на разных частотах приемник обладает разной чувствительностью. Для калибровки используются источники с известным спектром.

Радиоинтерферометрия является мощным средством изучения межзвездной среды и мазеров. С помощью современных радиоинтерферометров можно с хорошей точностью определить важнейшие астрономические параметры мазерных источников, такие как их координаты, расстояния до объектов и их размеры.

### **Цели и задачи работы.**

- 1) Исследование тонкой пространственной структуры метанольного излучения I класса: построение спектра и карты главного мазерного источника в области звездообразования DR21(OH) по наблюдениям на интерферометре VLA на частоте 44 ГГц в переходе  $7_0 - 6_1A^+$ . Сравнение результатов с картами и спектрами других эпох и выявление возможной связи метанольного мазера с молодыми дозвездными объектами.
- 2) Исследование особенностей метанольного мазерного излучения I класса на удалении от главного мазерного источника DR21(OH): построение карты окрестностей области звездообразования на частоте 44 ГГц. Сопоставление карты на 44 ГГц с картой излучения области в инфракрасном диапазоне.



- 3) Исследование природы метанольного мазерного излучения II класса: построение спектра и карты источника G23.01-0.41 на частоте перехода  $5_1 - 6_0A^+$  6.7 ГГц по данным наблюдений на европейской интерферометрической сети EVN.
- 4) Отработка методики обработки данных спектральных наблюдений на интерферометрических сетях VLA (США) и EVN (Европейская сеть).

### **Научная новизна и практическая ценность работы.**

- 1) Построена карта метанольного мазера I класса DR21(OH) с наилучшей на сегодняшний день точностью.
- 2) Построена карта метанольного мазера I класса DR21(OH) с наилучшей на сегодняшний день точностью.
- 3) Выполнено картографирование окрестностей области звездообразования DR21(OH) и впервые показано, что существует единая крупномасштабная структура мазерного излучения с градиентом скорости.
- 4) Впервые обнаружена переменность метанольных мазеров I класса.
- 5) Определены параметры протопланетного диска в области звездообразования G23.01-0.41, оценена масса центрального объекта и размер диска.
- 6) Созданы две компактные пошаговые инструкции для использования задач и настроек пакета *AIPS*, которые может использовать любой специалист:
  - a) для обработки данных спектральных наблюдений на Европейской интерферометрической сети *EVN*;
  - b) для обработки данных высокочастотных спектральных наблюдений на решетке *VLA* (США).

### **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, посвященных исследованию тонкой пространственной структуры метанольного лазера в DR21(OH), автор выполнил обработку интерферометрических данных, провел их анализ и интерпретацию результатов.

В работах, посвященных картографированию окрестности области звездообразования DR21(OH), автор провел наблюдения на 20-м радиотелескопе Онсальской обсерватории (Швеция), самостоятельно обрабатывал данные наблюдений и принимал участие в интерпретации полученных результатов.

В работах, посвященных исследованию тонкой пространственной структуры метанольного лазера в области звездообразования G23.01–0.41, автор самостоятельно обрабатывал данные интерферометрических наблюдений и интерпретировал полученные результаты.

Автор самостоятельно создал две инструкции для работы с интерферометрическими данными, которые доступны в электронном виде в режиме *online* по адресу <ftp://ra.asc.rssi.ru/Polushkin/> (логин: Spolushkin, пароль: instrvlba\_2011) и могут быть использованы любыми исследователями как для научной работы, так и для создания практических методик для обучения студентов и молодых начинающих специалистов.

### **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. Международная научная конференция "Астрономия и астрофизика начала XXI века" , 2008, Москва (Россия).
3. XII Школа молодых ученых "Актуальные проблемы физики" , 2008, Москва (Россия).

4. Международная конференция "16th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics" ,  
2009, Киев, (Украина).
5. Международная конференция "Кирхгофф-150" ,  
2009, пос. Научный, (Украина).
6. Всероссийская Астрономическая конференция ВАК-2010. "От эпохи Галилея до наших дней" ,  
2010, Нижний Архыз, (Россия).
7. Отчетные сессии Астрокосмического центра ФИАН.

Обучение работе на интерферометрах и обсуждение выполняемых в диссертации задач проходило на следующих мероприятиях:

1. Asian Radio Astronomy Winter School, 2007, 22-26 January, National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ), Mitaka/Tokyo, Japan.  
<http://vsop.mtk.nao.ac.jp/RAWS2007/>
2. ERIS 2007 European Radio Interferometry School, 2007, 10-15 September, Max Planck Institut fur Radioastronomy, Bonn, Germany.  
[http://www.mpi-fr-bonn.mpg.de/div/eris/index\\_e.html](http://www.mpi-fr-bonn.mpg.de/div/eris/index_e.html)
3. ERIS 2009 European Radio Interferometry School, 2009, 7-11 September, Sponsored by RadioNet, Oxford Astrophysics & Royal Astronomical Society, Oxford, Great Britain.  
<http://astrowiki.physics.ox.ac.uk/ERIS2009/>

## Публикации.

Основное содержание диссертации отражено в 14 публикациях:

1. **С.В. Полушкин**, И.Е. Вальтц //  
*«Карта метанольного мазерного свечения II класса на частоте 6.7 ГГц в протопланетном диске G23.01-0.41».*  
2011, Астрон. Ж. **88**, 484-495.

2. **С.В. Полушкин**, И.Е. Вальтц//  
*«Метанольное излучение I класса в окрестности DR21(OH)»*.  
2010, Астрон. Ж. **87**, 546-559.
3. **С.В. Полушкин**, И.Е. Вальтц//  
*«Дисковая структура вокруг массивного протозвездного объекта G23.01-0.41 по данным с EVN на частоте 6.7 ГГц»*.  
ВАК-2010 "От эпохи Галилея до наших дней" ,  
2010, 12-19 сентября, САО, Нижний Архыз, Россия.  
Тезисы конференции, стр. 103.
4. **С.В. Полушкин**, И.Е. Вальтц, В.И. Слыш//  
*«Пространственная структура метанольного мазера I класса DR21(OH) на 44 ГГц в эпоху 2003 г.»*.  
2009, Астрон. Ж. **86**, 134-148.
5. **S.V. Polushkin**, I.E. Valts, S.V. Kalenskii//  
*«Class I Methanol Maser Emission in DR21(OH) Environments»* .  
"16th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics"  
2009, April 27 - May 2, Kyiv (Ukraine). Abstract book, P.19.
6. **С.В. Полушкин**, И.Е. Вальтц, С.В. Каленский//  
*«Новый мазерный источник в окрестности DR 21(OH)»*.  
Международная конференция "150 лет спектральным исследованиям в астрофизике"  
2009, 7-13 июня, Крымская Астрофизическая Обсерватория, Научный, Украина.  
2009, Кинематика и физика небесных тел, стр. 163.
7. А.В. Алакоз, **С.В. Полушкин**, И.Е. Вальтц//  
*«Метанольный диск в окрестности DR21(OH) по данным наблюдений на VLA на 44 ГГц»*.

Международная конференция "150 лет спектральным исследованиям в астрофизике" ,

2009, 7-13 июня, Крымская Астрофизическая Обсерватория, Научный, Украина.

2009, Кинематика и физика небесных тел, стр. 157.

8. **С.В. Полушкин**, И.Е. Вальтц, В.И. Слыш//

*«Открытие переменности метанольных мазеров класса I».*

Международная научная конференция "Астрономия и астрофизика начала XXI века" ,

2008, 1-5 июля, Москва (Россия). Тезисы докладов, стр. 70.

9. **С.В. Полушкин**, И.Е. Вальтц, В.И. Слыш//

*«Практика работы с пакетом AIPS for VLA для спектральных линий: STEP BY STEP».*

Международная научная конференция "Астрономия и астрофизика начала XXI века" ,

2008, 1-5 июля, Москва (Россия). Тезисы докладов, стр. 78.

10. **С.В. Полушкин**, И.Е. Вальтц, В.И. Слыш//

*«DR21(OH) и биполярные потоки: анализ ситуации».*

Международная научная конференция "Астрономия и астрофизика начала XXI века" ,

2008, 1-5 июля, Москва (Россия). Тезисы докладов, стр. 79.

11. **С.В. Полушкин**, И.Е. Вальтц, В.И. Слыш//

*«Пространственная структура метанольного мазера I класса DR21(OH) на 44 ГГц в эпоху 2003 г.».*

Международная научная конференция "Астрономия и астрофизика начала XXI века" ,

2008, 1-5 июля, Москва (Россия). Тезисы докладов, стр. 80.

12. **С.В. Полушкин**, И.Е. Вальтц, В.И. Слыш//  
 «*DR21(OH) и биполярные потоки: анализ ситуации*».  
 Международная научная конференция "Астрономия и астрофизика начала XXI века" ,  
 2008, 1-5 июля, Москва (Россия). Тезисы докладов, стр. 79.
13. **С.В. Полушкин**//  
 «*Пространственная структура метанольных мазера I класса DR21(OH) на 44 ГГц в эпоху 2003 г.*».  
 XII Школа молодых ученых "Актуальные проблемы физики" ,  
 2008, 23-27 ноября, Тезисы докладов, стр. 71.
14. **С.В. Полушкин**, И.Е. Вальтц//  
 «*Пространственная структура метанольных мазера в области звездообразования DR21(OH)*».  
 2007, Труды Всероссийской астрономической конференции "ВАК - 2007" ,  
 стр. 323.

### **Структура и объем диссертации.**

Работа состоит из введения, трех глав, заключения и двух приложений. Объем работы составляет 135 страниц, в том числе 23 рисунка и 6 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 115 наименований.

### **Краткое содержание диссертации.**

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

В **Главе 1** приведены результаты обработки архивных наблюдений с VLA области звездообразования DR21(OH) на частоте покоя перехода  $7_0 - 6_1A^+$  44069.4840 МГц в линии метанольного мазерного излучения I класса.

Область DR21 относится к одной из наиболее изучаемых областей звездообразования в Северном полушарии. Она представляет собой северную часть комплекса W75S, который, в свою очередь, является южной частью чрезвычайно богатой мазерными источниками области W75 в созвездии Лебедя, в том числе и метанольными мазерами. На наличие связи метанольных мазеров I класса в DR21(OH) с биполярным движением вещества указывают лишь косвенные признаки.

В направлении DR21(OH) наблюдаются биполярные потоки на разных частотах в нескольких линиях CO в разных переходах и в изотопах, сильно различающиеся ориентацией и размахом крыльев линий [36], [37], [12].

Биполярные потоки, кроме линий CO, должны проявляться в линии молекулярного водорода  $H_2$  1-0S(1), поскольку этот переход может возбуждаться столкновениями на фронте ударной волны [38], [39]. Однако излучение в районе DR21(OH) в этой линии очень слабое, видны лишь отдельные джеты и волокна, и ни один из потоков, видимых в CO, по излучению в линии  $H_2$  не подтверждается в современном анализе ситуации [40].

Однако в работе [41] делается обратный вывод: конфигурацию метанольных мазерных пятен в DR21(OH), образующих два скопления, расстояние между которыми на карте, приведенной в работе [42], около 0.25 пк, можно интерпретировать как два лепестка биполярного потока, которые трассируются этими скоплениями. Отмечается при этом, что источник, обеспечивающий конфигурацию компонентов мазера, неочевиден.

Картографирование в мазерных линиях метанола I класса с целью выявить пространственное расположение мазерных сгустков помогает решению таких вопросов.

Один из периодов картографирования на 44 ГГц в переходе метанола  $7_0 - 6_1 A^+$  относится к 2003 г. – в открытом доступе в архиве НРАО имеются неопубликованные данные, обработку которых мы представляем в данной работе. Это одно из самых поздних наблюдений, проведенных на решетке VLA, уже полностью укомплектованной 44 ГГц-приемниками. Предыдущие исследования проводились при неполной комплектации VLA. Цель работы – сопоставить пространственные мазерные детали этого периода с результатами предыдущих исследований, а также выявить возможную переменность в ин-

тенсивностях мазерных линий.

Наблюдения мазера DR21(OH) проводились на интерферометре VLA (НРАО<sup>1</sup>, США) в А-конфигурации антенн (при которой размер интерферометра максимален, что обеспечивает режим наиболее высокого разрешения) в течение 10 часов 10 августа 2003 г. на частоте покоя перехода  $7_0 - 6_1A^+$  44069.4840 МГц. Синтезированной диаграммой решетки достигается угловое разрешение  $0''.05$ .

Спектрометр представлял собой автокоррелятор из 128 каналов, полная полоса 3125 кГц (т.е. примерно 21 км/с). На частоте 44 ГГц этот коррелятор обеспечивает спектральное разрешение по скорости 0.17 км/с в каждом канале.

В нашей работе показано, что мазер имеет 18 пространственных компонентов, 17 из которых сосредоточены в двух скоплениях, и один этим скоплениям не принадлежит.

Получен спектр источника и построены карты во всех каналах и отдельно в группах каналов с потоком более 0.2 Ян на эпоху наблюдений 2003 г.

Получены абсолютные координаты опорной детали спектра, в которой наблюдается самое сильное интегральное излучение.

Для 18 мазерных деталей были получены потоки – в пике линии и в пространственном интеграле, самые точные на сегодняшний день координаты компонентов относительно максимальной детали спектра, размеры большой и малой осей излучающих конденсаций и позиционные углы эллипсов, скорость деталей на луче зрения и их спектральная ширина.

Подтверждено существование далекой детали, расположенной севернее цепочки мазерных компонентов. Высказано предположение, что эта деталь отождествляется с филаментом  $H_2$ , трассирующим разлетающийся газ.

В общих чертах полученная пространственная структура совпадает с наблюдавшейся ранее другими авторами, а имеющиеся различия незначительны и не позволяют определить собственные движения компонентов, которые не обнаружены в пределах ошибок измерений за период в 8 лет.

Можно с уверенностью утверждать, что в спектре DR21(OH) наблюда-

---

<sup>1</sup>The National Radio Astronomy Observatory is operated by Associated Universities, Inc., under contact with the National Science Foundation.



ется сильное уярчение одной из спектральных деталей (не менее чем в два раза), которое никогда не наблюдалось ранее.

Учитывая, что метанольные мазеры I класса, в отличие от мазеров OH и  $\text{H}_2\text{O}$ , не являются переменными, подобный эффект должен быть связан с резким изменением физических условий в соответствующем пространственном компоненте мазера, например, за счет прохождения ударной волны. Природа предполагаемого взрывного или иного катастрофического процесса должна быть тщательно изучена, кроме того, требуется разработать новые гипотезы для объяснения такого явления, поскольку биполярные потоки, огибая конденсацию, могут лишь незначительно увеличить плотность вещества в ней, что не должно привести к резкому взрывному эффекту. Изучение модели мазера с учетом новых наблюдательных данных является перспективной целью такого рода исследований.

В **Главе 2** приведены результаты картографирования окрестностей области DR21(OH) на 44 ГГц в линии  $7_0 - 6_1 A^+$  метанольного мазерного излучения I класса на 20-м радиотелескопе обсерватории в Онсале (Швеция).

Плотный газ в DR21(OH) представляет собой структуру, вытянутую с северо-востока на юго-запад и ориентированную вдоль линии, соединяющей два наблюдающихся в центральной части этой области источника непрерывного излучения в мм диапазоне MM1 и MM2 [43, 44]. Конфигурация вещества, излучающего в тепловых линиях метанола [30], несколько отличается от той, которая наблюдается в тепловых линиях  $\text{NH}_3$ , CS или  $\text{C}^{18}\text{O}$ , хотя и демонстрирует, как и  $\text{NH}_3$ , более горячий и плотный газ вокруг более яркого и компактного источника миллиметрового излучения MM1. Ассоциация теплового излучения метанола с компонентами метанольного мазерного излучения, как показано в работе [30], не наблюдается, и проследить наличие движущегося вещества по профилям тепловых метанольных линий не представляется возможным.

На основе исследования пространственного расположения компонентов метанольного мазера I класса в DR21(OH), изложенного в предыдущей главе, было высказано предположение [45] о том, что отдельно расположенный компонент метанольного мазера I класса связан с филаментом  $\text{H}_2$  и что подобные мазеры могут быть обнаружены на позициях филаментов  $\text{H}_2$  [40], трассиру-

ющих разлетающийся газ. Этот далекий компонент не принадлежит области, в которой сосредоточены мазеры  $\text{OH}$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , и не совпадает с общей структурой метанольного мазера, имеющей вид двух скоплений пространственно разнесенных мазерных конденсаций.

Чтобы выяснить, является ли совпадение компонента метанольного мазера с филаментом  $\text{H}_2$  случайным, или все-таки существует связь метанольного излучения с излучением молекулярного водорода, а также с целью обнаружения новых компонентов мазера мы провели наблюдения в отдельных узлах на 36 ГГц и на 44 ГГц и картографирование окрестностей DR21(OH) на 44 ГГц вне структуры главного метанольного мазерного агрегата I класса в направлениях, свободных от III-зон.

Наблюдения проводились на 20-м радиотелескопе в Онсале (Швеция) в два этапа. Первая часть наблюдений выполнялась с 29 ноября по 5 декабря 2007 г. на частоте 36169.2400 МГц в переходе  $4_{-1} - 3_0$  и на частоте 44069.4900 МГц в переходе  $7_0 - 6_1A^+$  в направлении мазера DR21(OH) и шести участков карты "B" [40], содержащих яркие пятна, джеты или дуги, излучающие в линии  $\text{H}_2$ . Исследовался также объект ERO3, в котором недавно был обнаружен метанольный мазер II класса [47, 48]. Ширина диаграммы направленности составляет  $105''$  на 36 ГГц и  $88''$  на 44 ГГц.

В пяти из шести исследованных нами узлах 2-х микронного свечения, также как и в направлении ERO3, было зафиксировано излучение метанола, однако в силу того, что диаграмма имеет размер более  $1'$ , определить, к какой именно точке относится максимум излучения, не представлялось возможным.

Поэтому в период с 5 по 11 декабря 2008 г. была проведена вторая часть исследований с целью уточнения координат и определения протяженности обнаруженных источников. Было проведено картографирование области в метанольной мазерной линии  $7_0 - 6_1A^+$  на частоте 44 ГГц с центром на координатах DR21(OH) в 15 ячейках по  $40''$  по прямому восхождению и в 11 ячейках по склонению, т.е. в размере  $(600 \times 400)''$ .

Показано, что с диаграммой Онсальского радиотелескопа наблюдается обширная область слабого мазерного излучения на 44 ГГц и три максимума: два из них тяготеют к центральной части области (DR21(OH)) и южной (DR21West), третий – DR21N – является новым [46] и наши наблюдения под-

тверждают его существование.

Наблюдаемая обширная область вытянута с севера на юг, ее линейный размер примерно в десять раз превышает размер главной области излучения на 44 ГГц в DR21(OH). В нее погружены все другие структуры, том числе и протозвездный диск ERO3, обнаруженный ранее на частоте 6.7 ГГц [47], [48].

Пространственное разрешение данной карты не позволяет выделить структуры на частоте 44 ГГц, связанные с пятнами и джетами, излучающими в линии молекулярного водорода: следует изучить всю область с более высоким спектральным и пространственным разрешением и с более высокой чувствительностью.

Однако весьма интересным представляется тот факт, что в наблюдаемой структуре наблюдается градиент скорости с севера на юг (от -5 км/с до -2 км/с), в котором участвуют все спектральные детали, начиная от самой северной, открытой нами в первой части данных наблюдений в Онсале, до известной мазерной детали в конфигурации DR21West. Другую скорость, отличную от скоростей и градиента всей массы спектральных деталей, имеет наиболее сильная деталь DR21(OH). Именно эта главная деталь проявляет признаки переменности, т.е. выделена из общей массы мазерных конденсаций. Общность по скоростям восточной части мазерной конфигурации DR21(OH) со всей массой остальных деталей дает возможность предположить, что главное внимание стоит уделить не поиску их ассоциации с биполярным потоком, для которого до сих пор не найдена центральная машина, а объяснению природы активного и яркого, выделенного из общей массы по скорости главного компонента DR21(OH).

Можно предположить, что в принципе метанольные мазеры I класса – не только в DR21 – погружены в такие же обширные структуры, поэтому подобные исследования представляются перспективной задачей. Такие же соображения были высказаны в работе [49], в которой, в частности, указывалось, что накопление данных о протяженном мазерном излучении небольшой яркости может стать ключевым в понимании физических условий в областях формирования массивных звезд.

В **Главе 3** представлены результаты обработки архивных данных с EVN области звездообразования G23.01–0.41 на частоте 6.7 ГГц ( $5_1 - 6_0A^+$ ) в

линии метанольного мазерного излучения II класса.

Изолированная область звездообразования G23.01-0.41 принадлежит небольшому созвездию "Щит"(Scutum) в направлении галактического центра и доступна наблюдениям как в Северном, так и в Южном полушарии. Расположена на краю диффузной зоны III, оптических отождествлений не имеет.

По признаку отсутствия излучения в континууме и сильного избытка цвета в ближнем инфракрасном диапазоне (NIR) было показано, что данный мазерный источник находится на очень ранней эволюционной стадии – до появления ультракомпактной зоны III вокруг погруженной в газопылевую оболочку массивной звезды [50]. Область имеет компактное ( $<0.1$  пк), массивное ( $\sim 400 M_{\odot}$ ), горячее ( $\sim 100$  K), плотное молекулярное ядро (НМС), с которым ассоциируется биполярный поток [51]. Расстояние до источника 4.59 кпк [52]. Мазер II класса G23.01-0.41 был включен в программу исследований на EVN на частоте 6.7 ГГц. Мы представляем обработку и интерпретацию данных наблюдений 2007 года, код эксперимента EM061E.

Цель настоящей работы – исследовать тонкую пространственную структуру метанольного мазерного источника, сопоставить и систематизировать имеющиеся наблюдательные данные по этой области звездообразования как в непрерывном спектре, так и в линиях, имеющих тепловую и мазерную природу.

Наблюдения мазера G23.01–0.41 проводились на интерферометре EVN (EVN, или Европейская сеть РСДБ, – это объединенная научная организация Европейских, Китайских, Южноафриканских и других астрономических институтов, спонсируемых национальными исследовательскими советами. Данные наблюдений размещены в открытом доступе в архиве EVN на сайте <http://www.evlbi.org/>) 17 марта 2007 г. в течение 6 часов (с 3:30 до 9:30) на частоте покоя перехода  $5_1 - 6_0A^+$  6.66678195 ГГц на координатах RA= $18^h34^m40^s.39$ , DEC=  $-09^{\circ}00'38''.5$  (J2000). Для калибровки наблюдались 4 квазара: J1751+0939, J1825-0737, J2101+0341 и J2253+1608. В наблюдениях участвовало 8 антенн. Максимальное расстояние между антеннами (Jodrell Bank и Hartebeesthoek) составляло 8441 км, что соответствует угловому разрешению  $0''.001$ .

Спектрометр представлял собой автокоррелятор из 1024 каналов, полная полоса 2 МГц, т.е. 100 км/с. Спектральное разрешение по частоте 1.9531 кГц, или 0.0878 км/с по скорости.

Архивные данные представлены в виде 9 файлов в формате FITS. Кроме того, к ним прилагается директория PIPELINE, содержащая таблицы с начальной калибровкой. Для обработки данных нами использовался пакет AIPS (НРАО, США).

По данным наблюдений на EVN на частоте 6.7 ГГц в переходе метанольного мазерного излучения II класса  $5_1 - 6_0A^+$ ), представленных в открытом доступе в архиве, получен полный калиброванный кросскорреляционный спектр источника G23.01–0.41 и карта мазера.

Карта состоит из 24-х мазерных пятен, каждое из которых представляют собой группу, объединяющую несколько спектральных каналов, в которых присутствует излучение на одних и тех же координатах и на одной и той же скорости. На карте отчетливо прослеживается пространственное разнесение пятен, соответствующее разнесению спектральных деталей.

Для каждого пятна получены абсолютные координаты, значение потока в пике и пространственный интеграл потока по размерам пятна, размер, позиционный угол, скорость на луче зрения относительно местного стандарта покоя и ширина спектральной линии.

Считается, что диски вокруг молодых звезд – обычное явление [53, 54, 55, 56]. Они содержат большое количество теплого молекулярного газа, и поэтому высока вероятность обнаружить в них мазерное излучение. Если в околозвездном диске (другие названия – "аккреционный, или "протопланетный" [53]) образуется метанольный мазер, и диск расположен под некоторым углом к лучу зрения, то на картинную плоскость он спроецируется как эллипс.

Расположение некоторых пятен в источнике G23.01-0.41 удается аппроксимировать эллипсом: для этого были использованы их относительные координаты.

Для эллипса мы получили следующие параметры:  $a=0''.20$ ,  $b=0''.13$ ,  $PA=-0^\circ.40$ ,  $x_0=0''.20$ ,  $y_0=-0''.13$  или  $\alpha_0 = 18^\circ 34' 40''.282$ ,  $\delta_0 = -09^\circ 00' 38''.27$ , где  $a$  и  $b$  – это большая и малая полуоси эллипса, соответственно,  $PA$  – позиционный угол,  $x_0$  и  $y_0$  – относительные координаты центра

эллипса,  $\alpha_0$  и  $\delta_0$  – абсолютные координаты центра эллипса.

Для дальнейшей обработки мы использовали модель наклонного диска, вращающегося вокруг протозвезды или молодой звезды, представленную в работе [57]. Используя значения скорости для каждой отдельной детали, мы определили скорость вращения диска  $V_{rot}$ , скорость расширения (сжатия) диска  $V_{exp}$  и скорость всей системы относительно местного стандарта покоя  $V_{sys}$  путем минимизации функции  $\chi^2$ , заимствованной из работы [57].

Морфологически мазер относится к типу протопланетного диска в форме "кольца" и двух выбросов, или, возможно, двух частей спиральной структуры диска.

Показано, что положение метанольного мазера, излучающего на частоте на 6.7 ГГц совпадает с пиком непрерывного излучения на 3 мм [51], а скорость горячего молекулярного облака, полученная из наблюдений теплового излучения молекулы  $\text{CH}_3\text{CN}(6-5)$   $V_{sys}=77.4$  км/с совпадает со значением  $V_{sys}=77.8$  км/с, полученным в данной работе при моделировании протопланетного диска.

Получено значение скорости вращения протопланетного диска, которое составляет примерно 5 км/с, его размер (диаметр) 1800 а.е. и значение массы центрального источника  $23.5 M_{\odot}$ .

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

В **Приложении I** содержится подробная Инструкция для обработки в AIPS архивных данных спектральных наблюдений на Европейской интерферометрической сети *EVN*.

В **Приложении II** содержится подробная Инструкция для обработки в AIPS архивных данных спектральных наблюдений на интерферометрической решетке *VLA*.

## Основные результаты, которые выносятся на защиту.

- 1) С угловым разрешением  $0''.05$  интерферометрической решетки VLA (США) получены астрономические параметры тонкой пространственной структуры метанольного мазера I в области звездообразования DR21(OH) на частоте 44 ГГц. **Получены спектр мазерных деталей и карта мазера, причем наиболее яркая деталь впервые имеет привязку к абсолютным координатам с наилучшей на сегодняшний день точностью. Получены параметры пространственных компонентов – потоки в пике линии и в пространственном интеграле, координаты и размеры большой и малой осей излучающих конденсаций, их позиционные углы, скорость деталей на луче зрения и их спектральная ширина. Показано, что мазер имеет 18 пространственных компонентов, 17 из которых сосредоточены в двух скоплениях, и один этим скоплениям не принадлежит. Собственные движения мазерных компонентов относительно 1995 г. за период 8 лет не зарегистрированы в пределах ошибок измерений.**
- 2) На основе анализа спектров в интервале 13 лет наблюдений **показано, что присутствует сильное уярчение одной из спектральных деталей** (не менее чем в два раза) – подобный эффект в метанольных мазерах I класса обнаружен впервые и должен быть связан с резким изменением физических условий в соответствующем пространственном компоненте мазера, например, за счет прохождения ударной волны. Определены все параметры данного компонента.
- 3) На 20-м радиотелескопе Онсальской обсерватории (Швеция) в двух циклах наблюдений на частоте 44 ГГц исследована спектральная и пространственная структура окрестостей источника DR21(OH). **Показано, что в окрестности DR21(OH) существует единая обширная структура высокочастотного метанольного мазерного излучения, которая вытянута с севера на юг. Ее линейный раз-**

мер в десять раз превышает размер главной области излучения на 44 ГГц в DR21(OH). Мазерные детали формируются в интервале спектра от -5 км/с до -2 км/с с градиентом скорости от северных деталей к южным.

- 4) С угловым разрешением  $0''.001$  Европейской интерферометрической сети EVN по данным наблюдений на частоте 6.7 ГГц построена карта мазерных пятен метанольного источника II класса G23.01-0.41, содержащая 24 пространственных компонента. Получены параметры пространственных компонентов – потоки в пике линии и в пространственном интеграле, координаты и размеры большой и малой осей излучающих конденсаций, их позиционные углы, скорость деталей на луче зрения и их спектральная ширина. **Показано, что источник метанольного мазерного излучения II класса G23.01-0.41 представляет собой протопланетный диск. Пространственное расположение мазерных деталей на карте аппроксимируется эллипсом. Получены абсолютные координаты центра эллипса. Определен его диаметр, который составляет 1800 а.е., и масса центральной протозвезды, которая равна 23.5 массы Солнца.**

### Литература

- [1] S. Weinreb, M. L. Meeks, J. C. Carter, A. H. Barret *et al.*, Nature **208**, 440 (1965).
- [2] A.C. Cheung, *et al.*, Nature **221**, 626 (1969).
- [3] A. H. Barrett, P. R. Schwartz, and J. W. Waters, Astrophys. J. **168**, L101 (1971).
- [4] K. M. Menten, Doctoral thesis, Bonn University (1987).
- [5] A. M. Sobolev, D. M. Cragg, and P. D. Godfrey, Astron. and Astrophys. **324**, 211 (1997).



- [6] V. I. Slysh, S. V. Kalenskii, I. E. Val'tts, and R. Otrupcek, //Monthly Notices Roy. Astron. Soc.
- [7] K. M. Menten, *Astrophys. J.* **380**, L75 (1991).
- [8] M.J. Reid *et al.*, *Astrophys.J.* **700**, 137, (2009).
- [9] S.C. Simson, *Astron. and Astrophys.*, **46**, 261, (1976).
- [10] R.S. Cohen, *et al.*, *Astrophys.J.*, **239**, L53 (1980).
- [11] F.N. Bash, *Astrophys.J.*, **250**, 551, (1981).
- [12] J.P. Vallee, *Astrophys.J.*, **1**
- [13] R. Drimmel, *Astron. and Astrophys.*, **358**, L13, (2000).
- [14] D. Russeil, *Astron. and Astrophys.*, **397**, 233, (2003).
- [15] L.O. Sjuwerman, *et al.*, *The Astrophysical Journal Letters*, **724**, L158, (2010).
- [16] Reid, *et al.*, *Astrophys.J.*, **693**, 397 (2009).
- [17] Moscadelli, *et al.*, *Astrophys.J.*, **693**, 406 (2009).
- [18] Xu, *et.al.*, *Astrophys.J.*, **693**, 413 (2009).
- [19] Zhang, *et al.*, *Astrophys.J.*, **693**, 419 (2009).
- [20] Brunthaler, *et al.*, *Astrophys.J.*, **693**, 424 (2009).
- [21] Honma, *et al.*, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **59**, 889, (2007).
- [22] Choi, *et al.*, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **60**, 1007, (2008).
- [23] Sato, *et al.*, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **60**, 975, (2008).
- [24] W. H. T. Vlemmings, *Astron. and Astrophys.*, 484, 773 (2008).
- [25] R. M. Lees, //Astrophys. J. **184**, 763 (1973).

- [26] И. Е. Вальтц, Г. М. Ларионов, //Астрон. журн. **84**, 579 (2007).
- [27] А.В. Малышев, А.М. Соболев, //Компилятивный каталог метанольных мазеров II класса. Физика Космоса. Программа, тезисы докладов и сообщений 28-й международной студенческой научной конференции 1-5 февраля 1999г., Екатеринбург. (1999).
- [28] M.R. Pestalozzi, *et al.*, //Astron. and Astrophys. **432**,737 (2005).
- [29] R. Bachiller, S. Liechti, C. M. Walmsley, and F. Colomer, //Astron. and Astrophys. **295**, L51 (1995).
- [30] S. Leichti and C. M. Walmsley, //Astron. and Astrophys. **321**,625 (1997).
- [31] D.A. Frail, *et al.*, Astrophys.J., **111**, 1651 (1996).
- [32] V.I. Slysh, *et al.*, Astron. and Astrophys., 134, 269 (1999).
- [33] С.В. Каленский и др. Астрон Журн. **87**, 1012 (2010).
- [34] Philip Edwards, Asian Radio Astronomy Winter Scool (2007).
- [35] Seiji Kamenno, Asian Radio Astronomy Winter Scool (2007).
- [36] S-P. Lai, J. M. Girart, and R. M. Crutcher, //Astrophys. J. **598**, 392 (2003).
- [37] J. G. Mangum, A. Wooten, and L. G. Mundy, //Astrophys. J. **378**, 576 (1991).
- [38] C. F. McKee, D. F. Chernoff, and D. J. Hollenbach, in M. F. Kessler and J. P. Phillips, eds., //Proc. of the XVIth ESLAB Symp. 108, "Galactic and Extragalactic Infrared Spectroscopy". Reidel, Dordrecht, p. 103. (1982).
- [39] M. D. Smith, J. Eislöffel, and C. J. Davies, //Astron. and Astrophys. **327**, 1206 (1998).
- [40] C. J. Davis *et al.*, //Monthly Notices Roy. Astron. Soc.**374**, 29 (2007).

- [41] S. Kurtz, P. Hofner, and C.V. Álvarez, //Astrophys. J. Suppl. Ser. **155**, 149 (2004).
- [42] L. Kogan and V. Slysh, //Astrophys. J. **497**, 800 (1998).
- [43] J. G. Mangum, A. Wooten, and L. G. Mundy, //Astrophys. J. **378**, 576 (1991).
- [44] J. G. Mangum, A. Wooten, and L. G. Mundy, //Astrophys. J. **388**, 467 (1992).
- [45] С. В. Полушкин, И. Е. Вальтц, В. И. Слыш, //Астрон. журн **86**, 134 (2009).
- [46] P. Pratap, P. A. Shute, T. S. Keane *et al.*, //Astronomical J. **135**, 1718 (2008).
- [47] L. Harvey-Smith, R. Soria-Ruiz, A. Duarte-Cabrall, and R. J. Cohen, //Monthly Notices Roy. Astron. Soc. **384**, 719 (2008).
- [48] L. Harvey-Smith and R. Soria-Ruiz, //Monthly Notices Roy. Astron. Soc. **391**, 1273 (2008).
- [49] M. R. Pestalozzi, //in: Astrophysical Masers and their Environment, eds J. Chapman and W. Baan, Proc. IAU Symp. No. 242 (Cambridge University Press, 2008), p. 89.
- [50] C. Codella, L. Testi, and R. Cesaroni, //Astron. and Astrophys. **213**, 339 (1997).
- [51] R. S. Furuya, R. Cesaroni, S. Takahashi, *et al.*, //Astrophys. J. **673**, 363 (2008).
- [52] A. Brunthaler, M. J. Reid, K. M. Menten, *et al.*, //Astrophys. J. **693**, 424 (2009).
- [53] R. P. Norris, S. E. Byleveld, P. J. Diamond *et al.*, //Astrophys. J. **508**, 275 (1998).
- [54] C. J. Phillips, R. P. Norris, S. P. Ellingsen, and P. M. McCulloch, //Monthly Notices Roy. Astron. Soc. **300**, 1131 (1998).

- [55] V. Minier, R. S. Booth, and J. E. Conway, //Astron. and Astrophys. **362**, 1093 (2000).
- [56] V. Minier, J. E. Conway, and R. S. Booth, //Astron. and Astrophys. **369**, 278 (2001).
- [57] L. Uscanga, Y. Gomez, A. C. Raga *et al.*, //Monthly Notices Roy. Astron. Soc. **390**, 1127 (2008).