

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

На правах рукописи  
УДК 524.5; 524.52; 524.527

Баяндина Ольга Сергеевна

**СВОЙСТВА МОЛЕКУЛЯРНОГО  
МАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
В ГАЗО-ПЫЛЕВЫХ КОМПЛЕКСАХ  
МЛЕЧНОГО ПУТИ**

Специальность 01.03.02  
астрофизика и звездная астрономия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2016

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

**Научный руководитель:**

**Вальтц Ирина Евгеньевна**, доктор физико-математических наук, АКЦ ФИАН, г. Москва / Ведущий научный сотрудник.

**Официальные оппоненты:**

**Вибе Дмитрий Зигфридович**, доктор физико-математических наук, Институт Астрономии РАН, г. Москва / Зав. отделом физики и эволюции звезд.

**Соболев Андрей Михайлович**, кандидат физико-математических наук, Уральский Федеральный Университет им. Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург / Зав. отделом астрофизики и физики Солнца.

**Ведущая организация:**

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (Государственный Астрономический Институт им. П.К. Штернберга), г. Москва.

Защита состоится «18» мая 2016 г. в 12:00

на заседании диссертационного совета Д002.023.01 Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: Москва, ул. Профсоюзная 84/32, Институт космических исследований РАН, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, Ленинский проспект, дом 53.

Автореферат и диссертация в электронном виде представлены на сайте ФИАН <http://www.asc-lebedev.ru> в разделе "Диссертационный совет".

Автореферат разослан «    » апреля 2016 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук

Ю.А. Ковалев

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность темы и анализ современного состояния исследований

Звезды образуются в межзвездной среде. Межзвездная среда изучается астрономами с XVII века, но в настоящее время одной из наиболее интересных нерешенных проблем является построение последовательности возникновения и угасания пекулярных явлений, в частности, мазерной активности молекул, сопровождающих развитие газо-пылевых конденсаций в областях звездообразования. Рассмотрим подробнее существующие на сегодняшний день представлений об эволюции мазерных объектов.

Звездообразование происходит в молекулярных облаках [1]. Случайными первичными возмущениями осуществляются пробы эволюции, которые изначально приводят к возникновению неоднородностей среды. В результате таких процессов в гигантских молекулярных облаках (размером до нескольких десятков парсек) образуются скопления (*англ. clumps*) молекулярных ядер (*англ. cores*) [2]. В скоплениях может быть сосредоточена масса межзвездного вещества до  $10^3$ – $10^4 M_{\odot}$  плотностью  $\sim 10^3 \text{ см}^{-3}$  при температуре  $\sim 10 \text{ К}$  [3] (см. также ссылки в этой работе). Молекулярные ядра представляют собой компактные области массой от 10 до  $100 M_{\odot}$  [3] размером  $\lesssim 0.1 \text{ пк}$  с плотностью молекулярного водорода  $n(\text{H}_2) \gtrsim 10^7 \text{ см}^{-3}$  и температурой  $T \gtrsim 100 \text{ К}$  [4] — именно в них и зарождаются звезды [5].

Процесс зарождения звезды начинается с внутреннего охлаждения молекулярного ядра, не пропускающего внешний нагрев по причине собственной высокой плотности, и его последующего коллапса, в результате чего образуются молодые звездные объекты (*англ. Young Stellar Object, YSO*), первой стадией существования которых являются протозвезды (см. [6], а также материал, размещенный по адресу: [https://www.cfa.harvard.edu/rg/star\\_and\\_planet\\_formation/young\\_stellar\\_objects.html](https://www.cfa.harvard.edu/rg/star_and_planet_formation/young_stellar_objects.html)).

Появление звезды (и даже ее начальная стадия — образование протозвезды в молекулярном ядре) влияет на окружающую среду, излучение и потоки вещества проникают в пространство молекулярного облака и провоцируют ускорение сжатия и дальнейшую эволюцию соседних молекулярных ядер [7].

Молекулярные облака не излучают в оптическом диапазоне и наблюдаются как темные туманности, в радиодиапазоне их можно зафиксировать только в линии молекулы CO ( $J=1-0$ ) на волне 2.6 мм. Момент начала формирования протозвезды скрыт от внешнего наблюдателя газо-пылевым коконом.

Одним из самых ранних признаков возникающего процесса коллапса ядра и появления протозвезды является мазерная активность возбужденной

этим процессом ближней окрестной части молекулярного облака. При этом наблюдаются мазерные линии гидроксила ОН (как в сателлитах, так и в главных линиях), водяного пара  $\text{H}_2\text{O}$  и многочисленные линии метанола, т.е. высвечивается фейерверк мазерных линий наиболее обильных молекул при распадах их инвертированных состояний.

В работах [8–10] эти мазерные метки упорядочены эволюционной шкалой, на которой последовательно размещены все перечисленные выше мазеры, включая этап, завершающий формирование протозвезды и переход в стадию звезды с образованием зоны НII.

Первыми регистрируемым сигналом, который сопровождает фазу образования протозвезды, можно считать излучение метанольных мазеров I класса в газо-пылевой среде в самых простых условиях существования конденсации до начала активного сжатия и появления самостоятельного излучения самого протозвездного объекта.

Согласно классификации для метанольных мазеров I и II классов (сIMM и сIM [11] (*англ. class I/II methanol maser*) – в более ранних работах нами использовались аббревиатуры MMI и MMII), установленной в работах [12, 13], сIMM – это мазер, который возбуждается в силу особого строения молекулы только за счет столкновений метанола с молекулами водорода в среде, не подверженной влиянию какого-либо излучения, т.е. инвертирование уровней, обеспечивающих последующее высвечивание по типу сIMM (максимально на частоте 44 ГГц в переходе  $7_0 - 6_1A^+$ ), не сопровождается радиативной поддержкой. В обзорах, посвященных поиску этих мазеров на частотах 44 и 36 ГГц, было показано, что исключительной особенностью этих мазеров было то, что они не ассоциировались с другими мазерами –  $\text{H}_2\text{O}$ , ОН и метанольными мазерами II класса (радиативно-столкновительная накачка, максимальное излучение на частоте 6.7 МГц в переходе  $5_1 - 6_0A^+$ ), т.е. обнаруживались на значительных расстояниях (до 2 пк) от этих мазеров и ультракомпактных зон НII [13] (см. также ссылки в этой работе). Эти факты, естественно, приводили к заключению, что сIMMs формируются в конденсациях, находящихся на начальной стадии эволюции задолго до появления источника излучения и других мазеров.

В классификации метанольных мазеров отмечалось, что фактором, усиливающим столкновительную накачку сIMM, может быть фронт биполярных потоков, сжимающий конденсацию, увеличивающий плотность вещества в ней и, тем самым, число столкновений молекул и кинетическую температуру газа, что провоцирует испарение метанола с поверхности пылинок и увеличение его обилия. Выброс вещества может происходить в фазах развития соседних горячих ядер на стадии протозвезд, расположенных в том же скоплении того же молекулярного облака.

На близких расстояниях к YSO, где окружающая среда подвергается

излучению протозвезды, тип излучения ансамбля молекул метанола должен меняться с сИММ на сПММ. Теоретически сИММs и сПММs не могут сосуществовать по причине «конкурирующих» механизмов накачки с противоположным воздействием на населенности уровней [9, 14–17].

Это жесткое условие предполагает, что влияние на конденсацию, излучающую как сИММ, возможно только в виде динамического давления окружающего движущегося вещества, но не в виде излучения.

Тот факт, что метанольные мазеры сПММs, в отличие от сИММs, всегда ассоциируются с гидроксидом и водой [18], не противоречит условиям радиативно-столкновительной накачки мазеров ОН и сПММ, излучения любого диапазона от протозвезды и одновременного присутствия биполярного потока (столкновительная накачка для мазеров  $\text{H}_2\text{O}$ ). При этом соображения, касающиеся эволюционного статуса мазеров в конденсациях на этой стадии, на сегодняшний день достаточно противоречивы. Прежде всего это касается ассоциаций сПММ с ультракомпактными зонами НII (*UCHII* – *англ. ultracompact HII region*).

Метанольные мазеры II класса в областях звездообразования (*англ. Star Forming Region, SFR*) ассоциируются с мазерами ОН в главных линиях и с радиоконтинуумом сантиметрового диапазона (зоны НII, проэволюционировавшие области) [19, 20]. Но при этом в работе [21] отмечалось, что сПММs реже мазеров ОН ассоциируются с сильными зонами НII (с потоком  $>100$  мЯн). На основании анализа ассоциации сПММs с излучением радиоконтинуума разных диапазонов, представленных в работе [22] (см. также ссылки в этой работе), показано, что вообще только малая часть сПММs ассоциируется с зонами НII (т.е. во многих случаях поток в континууме сантиметрового диапазона  $<1$  мЯн), большая часть ассоциируется с миллиметровым- и субмм-континуумом и, следовательно, они соответствуют очень ранней стадии эволюции, предшествующей зоне НII.

Мазеры  $\text{H}_2\text{O}$ , как и сПММs, также, по-видимому, отслеживают достаточно раннюю эволюционную фазу – приведем несколько основополагающих примеров. В работе [23] на основании исследования на VLA (*англ. Very Large Array*, Национальная радиоастрономическая обсерватория, США) пространственной структуры 74-х групп мазеров ОН– $\text{H}_2\text{O}$  было показано, что  $\text{H}_2\text{O}$ -мазеры появляются первыми на стадии начала ядерных реакций, ОН-мазеры – позже в окружающей оболочке протозвезды на стадии аккреции и образования потока, в котором  $\text{H}_2\text{O}$ -мазеры выбрасываются наружу. Затем на основании исследования 146 биполярных потоков на 22 ГГц, было показано, что в 38% случаев в них присутствует мазерное излучение  $\text{H}_2\text{O}$ , причем интервалы спектра скорости максимума на 22 ГГц соответствуют спектрам линий СО – в то же время их высокая светимость в дальнем инфракрасном диапазоне указывала на наличие ультра-компактной зоны НII [24]. Предполагается, что на

этой стадии области с мазерами OH разрушаются в процессе быстро формирующейся зоны III [23]. И, наконец, в работе [25] было показано, что мазеры H<sub>2</sub>O, как и мазеры sPIMMs (выборка 69 областей образования массивных протозвездных объектов (*англ. High Mass Protostellar Object, HMPO*)), в большей степени ассоциируются с радиоконтинуумом миллиметрового, а не сантиметрового диапазона, т.е. с фазой эволюции «до образования ультракомпактной зоны III» (*англ. pre-USIII*).

Мазеры OH и H<sub>2</sub>O в SFRs сильно ассоциируются между собой (в 79% случаев для 202 мазеров OH [26]), но исследования пространственного расположения sPIMMs и мазеров H<sub>2</sub>O относительно инфракрасных источников в некоторых отдельных гигантских молекулярных облаках показывают, что sPIMMs могут принадлежать более ранней эволюционной фазе, чем сильные мазеры H<sub>2</sub>O — см. примеры, обсуждаемые в работе [9], с другой стороны, в обзоре [18] указывалось на то, что мазеры sPIMMs образуются позже мазеров H<sub>2</sub>O и сосуществуют с мазерами OH. При этом отмечается также [26], что одиночные мазеры H<sub>2</sub>O, ассоциирующиеся с излучением на 4.5 мкм, могут формироваться на очень ранней стадии, предшествующей формированию протяженного биполярного потока.

Следует отметить, что перекрытие sPIMMs с другими мазерами также наблюдается. Например, ассоциация sPIMMs с мазерами H<sub>2</sub>O, а также сильных мазеров sPIMMs со слабыми мазерами sPIMMs отмечалась в работе [27], в работе [28] показано, что 40% sPIMMs ассоциируется с мазерами sPIMMs в размере 30'', а в пределах 2', типичных для диаграмм направленности одиночных радиотелескопов для диапазонов частот этих мазеров, в нашем каталоге [29] это значение достигает 70%. Но этот эффект может и не указывать на их физическую ассоциацию, а только на особенности выборки: обычно поиск sPIMMs осуществлялся в направлении хорошо исследованных областей звездообразования, как правило, содержащих уже известные мазеры OH, H<sub>2</sub>O, sPIMMs и зоны III, или на слишком большой угловой размер областей, выбранных для статистических оценок.

Если исходить из того, что sPIMMs и sPIMMs не совпадают, т.е. не связаны с одним и тем же возбуждающим источником, а видимая ассоциация — это результат плохого пространственного разрешения, то в таком предположении нельзя сделать никаких выводов об относительном возрасте sPIMM и sPIMM, пока между ними не определено линейное расстояние.

Отсутствие влияния излучения на метанол, заложенное в механизме накачки sPIMMs, автоматически означает, что область sPIMM расположена вне зоны влияния излучения. Этот факт накладывает ограничения на шкалу расстояний в области мазерной активности в окружающем протозвезду молекулярном облаке.

В первичной классификации sPIMM и sPIMM предполагалось, что рассто-

яние между сИММ и сПММ — не менее 1-2 кпк, позднее в интерферометрических исследованиях сИММs на VLA в пределах 1'' в 37 полях, содержащих мазеры сПММ, H<sub>2</sub>O и UCHII было получено, что, в среднем, расстояние между сИММ и зонами ионизованного водорода может быть меньше 0.5 пк [30].

В нашей работе [31] приводится сводка оценок общей протяженности групп мазеров (т.е., по определению, данному в работе [23], скоплений мазерных пятен одного типа), полученных, в основном, по интерферометрическим данным:

- для групп мазерных пятен OH — от 2 000 а.е. [21] до (30 000–100 000) а.е. [23];
- для групп мазерных пятен H<sub>2</sub>O — также от 30 000 а.е. до 100 000 а.е. [23] и гораздо меньше по другим оценкам — (15–40) а.е. [32, 33];
- для групп мазерных пятен метанола II класса — в интервале от 55 а.е. до 7 300 а.е. [33];
- для групп метанольных мазерных пятен I класса — в пределах от  $\geq 12 000$  а.е. ( $\geq 0.06$  пк) до  $\geq 140 000$  а.е. ( $\geq 0.7$  пк) [34];
- для ассоциаций сПММ–H<sub>2</sub>O — от 400 а.е. до 1 000 а.е. [35].

При этом размер отдельного мазерного пятна OH или сПММ может быть около 3 а.е. [36], пятна мазера H<sub>2</sub>O  $\lesssim (1-10)$  а.е. [37] (см. также ссылки в этой работе), а отдельного пятна сИММ — примерно от 500 до 1 000 а.е. [34].

Группы сПММs и H<sub>2</sub>O могут иметь форму дисков [32, 33, 35] или отслеживать форму оболочки зоны HII (например, в W3(OH) [36]), форму вытянутых дуг в случае групп сИММ [38] и даже, возможно, возникать в атмосферах протопланет — такая модель была предложена для интерпретации расположения мазерных пятен сПММs в источнике W3(OH) [39]. Подобные размеры групп сопоставимы с типичными ожидаемыми размерами зон HII (100–500) а.е. [40].

Обращает на себя внимание тот факт, что при этом моделирование условий формирования протозвездных объектов, анализ синтетических спектров и сопоставление их с результатами многочисленных многочастотных наблюдений мазерных и тепловых линий метанола, в спектре которого можно наблюдать и рассчитывать интенсивности более 300 линий, для областей звездообразования приводят к широкому интервалу значений основных физических параметров — плотности среды  $n = 10^4 - 10^8$  см<sup>-3</sup> и кинетической температуры 30–200 К [41–43]. Конкретнее, для сИММ условия ограничены в пределах  $n \sim 10^4 - 10^6$  см<sup>-3</sup> и  $T > 60$  К, эти параметры оптимизированы в расчетах для остатков сверхновых (*Supernova Remnant, SNR*) по четырем мазерным линиям метанола на частотах 36 ( $4_{-1} - 3_0E$ ), 44 ( $7_0 - 6_1A^+$ ), 84 ( $5_{-1} - 4_0E$ ) и 95 ( $8_0 - 7_1A^+$ ) ГГц [44, 45]. Для сПММ  $n(\text{H}_2) \sim 10^4 - 10^9$  см<sup>-3</sup> при  $T_{\text{kin}} \sim 100 - 200$  К [46]. Для мазеров OH моделирование (см. ссылки в работе [47]) дает условия  $n(\text{H}_2) \sim 10^5$  см<sup>-3</sup> и  $T_{\text{kin}} \sim 50 - 125$  К и при наблюдениях на 100-м радиотелескопе GBT (*англ. Green Bank Telescope, Национальная радиоастрономи-*

ческая обсерватория, США) значения плотности и кинетической температуры газа  $n(\text{H}_2) \sim 10^6\text{-}10^8 \text{ см}^{-3}$  и  $T_{\text{kin}} = 300\text{-}400 \text{ К}$  [37].

Другими словами, в целом физические условия для молекулярных ядер являются достаточно близкими даже при наличии отклонений в конкретных мазерных пятнах, соответствующих отдельно взятым сгусткам, излучающим в том или ином переходе какой-либо молекулы, что сильно контрастирует с разбросом как в размерах отдельных пятен, так и в размерах и конфигурациях групп, в которые эти пятна объединяются. Подобные факты необходимо объяснить.

По-видимому, ключевые моменты заключаются, в том, что

1) скорее, расстояние между конденсацией на стадии эволюции, в которой излучаются только линии метанола типа sMМ, и любым молекулярным ядром на стадии протозвезды, выбрасывающей поток вещества, может оказаться более принципиальным для представления их взаимной последовательности на шкале эволюции;

2) помимо упомянутых выше биполярных потоков, на настоящее время мало изучена возможность того, что мазерная активность в молекулярных ядрах на ранней стадии сжатия может быть спровоцирована другими нестационарными явлениями, возникающими в областях звездообразования, — такими, как, например, самогравитация коллапсирующих газо-пылевых фрагментов или магнитные поля, которыми пронизана межзвездная среда;

3) не изучена степень воздействия фронтов молекулярных потоков от протозвезд и исчезающих остатков сверхновых на мазерную активность в первичных сгустках материи, излучающих в линиях метанола I класса, на мазерную активность молекул OH и H<sub>2</sub>O.

## Основная цель работы

Изучение влияния различных динамических процессов на эволюцию межзвездной среды и выявление эволюционной связи мазеров метанола, OH и H<sub>2</sub>O путем получения более точных взаимных привязок различных молекулярных мазеров в пределах отдельных конденсаций с особым акцентом на раннюю стадию сжатия молекулярного ядра.

## Конкретные задачи и предполагаемые методы исследований:

1) оценка возможной роли небольших темных облаков в формировании протозвездных конденсаций;



- 2) оценка влияния магнитного поля на процессы сжатия газо-пылевых фрагментов межзвездной среды;
- 3) проведение исследований мазеров OH в направлении метанольных мазеров I класса на одиночных телескопах и на интерферометрах;
- 4) проведение исследований мазеров H<sub>2</sub>O в направлении метанольных мазеров I класса на одиночных телескопах и на интерферометрах.

## Научная новизна и практическая ценность работы

Научная новизна заключается в том, что все эксперименты, результаты которых представлены в диссертации, проведены впервые, полученные данные ранее не публиковались и могут быть использованы в перспективе для дальнейших научных исследований. Практическая ценность заключается в том, что в процессе обработки данных собственных наблюдений автор не только использовала широкий спектр существующих программных пакетов, но и предлагала собственные методики обработки. В частности, результаты, полученные на решетке VLA в рамках собственного проекта исследований, обрабатывались в пакете CASA (*англ. Common Astronomy Software Applications*), который разрабатывается международным консорциумом ученых на базе Национальной радиоастрономической обсерватории США для предоставления наиболее широкого круга возможностей обработки данных, полученных на радиотелескопах нового поколения, таких, как ALMA (*англ. Atacama Large Millimeter Array*, Европейская южная обсерватория, Чили) и VLA, и который является новым современным инструментом, используемым в интерферометрии. Предположительно, именно этот пакет будет использоваться при обработке данных наблюдений с телескопов космической миссии Миллиметрон. Подобных технических систем в мире не существует, это системы будущего, и на настоящий момент не очень значительное количество специалистов владеет методами обработки таких наблюдательных данных. В диссертации разбираются все шаги использованных задач и процедур. Данные материалы подробно представлены в публикациях для широкой общественности, что способствует развитию техники обработки результатов наблюдений на интерферометрических, в том числе, и наземно-космических решетках. Эти результаты могут быть использованы научными сотрудниками, которые проводят эксперименты на современном уровне.

## На защиту выносятся следующие основные результаты:

- 1) Модифицирован каталог метанольных мазеров I класса и создана его новая электронная версия, доступная в режиме online. На настоящий

момент этот каталог содержит 206 объектов. Проведено отождествление этих мазеров с абсорбционными и эмиссионными объектами ближнего инфракрасного диапазона, открытых в рамках проектов космических миссий *MSX* (англ. *Midcourse Space Experiment*) и *Spitzer* (англ. *NASA Spitzer Space Telescope*). Показано, что метанольными мазеры I класса в 71% случаев отождествляются с темными инфракрасными облаками с четкими границами SDC (англ. *Spitzer Dark Clouds*) и в 42% случаев – с протяженными объектами типа биполярных потоков *Spitzer*/EGOs (англ. *Extended Green Objects*). Высказано предположение, что метанольные мазеры I класса могут формироваться в изолированных самогравитирующих конденсациях, каковыми являются SDC. Выборка SDC предлагается как новый самостоятельный список для исследования на частотах метанольного излучения I класса с целью обнаружения новых объектов данного типа.

- 2) В результате обработки архивных данных поляризационных наблюдений 7 мазеров OH, проведенных на радиотелескопе NRT (англ. *Nancay Radio Telescope*, Нансэ, Франция) в линиях на частотах 1665 МГц и 1667 МГц в 4-х параметрах Стокса, получены гауссовы параметры деталей спектров и сделаны оценки поляризационных параметров: степень круговой поляризации  $m_C$ , плотность потока в линейной поляризации  $p$ , степень линейной поляризации  $m_L$ . Показано, что значения напряженности магнитного поля  $B$  колеблются для разных источников в интервале от  $<0.5$  мГс до 1.4 мГс, что типично для многих областей звездообразования. Показано, что ассоциации скоплений «ОН-метанол» реальны, т.е. магнитное поле, действующее в пределах скоплений OH, может распространяться и на группы метанольных мазеров, а по размерам исследуемые области могут быть связанными структурами типа небольших облаков IRDC (англ. *Infrared Dark Cloud*) или протопланетными дисками. На основании полученных значений величины напряженности магнитного поля получены значения отношения массы к магнитному потоку в размере исследуемой области, значения отношения теплового давления к магнитному и вириальные соотношения энергий кинетической, магнитной и гравитационной. Показано, что во всех источниках отношение массы к магнитному потоку превышает критическое значение, а энергия хаотических движений и энергия магнитного поля существенно меньше энергии гравитационных связей. С другой стороны, показано, что значение отношения теплового давления к магнитному во всех случаях  $<1$ , т.е. облака могут находиться в магнитно-доминирующем режиме. Подобное противоречие связывается с возможными большими ошибками как в определении

значений напряженности магнитного поля, так и в возможных завышенных оценках расстояний до источников, увеличивающих размер исследуемых областей.

- 3) На основании собственных наблюдений метанольных мазеров I класса, ассоциирующихся с источниками EGO, выполненных на 70-м радиотелескопе Центра дальней космической связи в Евпатории (Крым) **показано, что в направлении источников типа *Spitzer*/EGOs излучение OH(1720) присутствует в 72% случаев. Наблюдаются, в основном, широкие эмиссионные линии OH(1720), средняя плотность на луче зрения молекул OH в которых не превышает значения  $10^{16} \text{ см}^{-2}$ , а плотность молекулярного водорода составляет не более  $10^2 \text{ см}^3$  в предположении, что размер конденсации равен 1000 а.е. Это может косвенно указывать на незначительную мощность биполярных потоков, на пространственное несовпадение метанольных конденсаций и конденсаций OH(1720), на различия в моделях их накачки, а также на то, что размеры объектов EGO могут быть существенно меньше 1000 а.е.**
  
- 4) Подготовлен и выполнен обзор 100 областей звездообразования на координатах и лучевых скоростях метанольных мазеров I класса в четырех линиях основного состояния OH на интерферометрической решетке VLA с пространственным разрешением  $12''$ , в том числе, для 20 инфракрасных объектов *Spitzer*/EGOs. Эмиссия OH обнаружена в 10 EGOs: главные линии OH на частотах 1665 и 1667 МГц наблюдаются в 50% и 45% объектов, соответственно; линия-спутник на частоте 1612 МГц наблюдается в 15% случаев, линия-спутник на частоте 1720 МГц — в 5% случаев. **Оценка расстояния (медианные величины) между скоплениями мазерных пятен OH и точечным источником *Spitzer*/GLIMPSE, который ассоциируется с EGO (0.04 пк), скоплениями мазерных пятен OH и скоплениями мазерных пятен метанола I класса (0.14 пк), скоплениями мазерных пятен OH и скоплениями мазерных пятен метанола II класса (0.03 пк) показывает, что метанольные мазеры I класса расположены дальше от источника возбуждающего излучения, чем скопления мазеров OH и мазерных пятен метанола II класса. Показано, что метанольные мазеры I класса не сосуществуют с точечным источником GLIMPSE, мазерами OH и метанольными мазерами II класса в пределах одного и того же молекулярного ядра, т.е. это разные ядра, которые могут находиться на разных стадиях эволюционного развития.**

5) Выполнен обзор 24-х EGOs в мазерной линии  $\text{H}_2\text{O}$  на волне 1.35 см на РТ-22 Пушчинской радиоастрономической обсерватории. Излучение зарегистрировано в 11 EGOs. Впервые обнаружено излучение  $\text{H}_2\text{O}$  источника G28.83–0.25, которое, вероятно, соответствует ранней стадии распространения ударной волны. Показано, что в некоторых EGOs лучевые скорости главных деталей спектров  $\text{H}_2\text{O}$  и метанольных мазеров I класса различаются более чем на 5-10 км/с. Возможные объяснения этому факту: 1) эти мазеры сформированы в разных молекулярных ядрах, 2) излучение  $\text{H}_2\text{O}$  исходит из небольших областей на фронте ударной волны, возбуждающей мазер, что приводит к сдвигу скорости мазера  $\text{H}_2\text{O}$  относительно более спокойной среды, содержащей протяженные структуры с метанольным излучением I класса. Эти гипотезы можно и целесообразно проверить с помощью получения интерферометрических данных для мазеров  $\text{H}_2\text{O}$  в объектах EGOs.

## Личный вклад автора

Научные задачи и проблемы, которые ставились в процессе выполнения диссертации, решались совместно с научным руководителем и соавторами. При этом личный вклад автора, который составляет более 50% от общего объема работы, состоял в следующем.

1. Автор самостоятельно модернизировала составленный соавторами ранее каталог метанольных мазеров I класса, провела ревизию опубликованной версии, в которую добавила важную составляющую межзвездной среды — абсорбционные и эмиссионные в коротковолновом и средневолновом инфракрасном диапазоне облака IRDC и SDC и объекты EGO. При этом с помощью современных программ проведен анализ и отождествление данных каталога и данных наблюдений космических миссий *MSX* и *Spitzer*. Каталог в новой версии был подготовлен к публикации автором и лег в основу дальнейшей работы над диссертацией.

2. В работе с магнитными полями в газо-пылевых конденсациях, наблюдавшихся в линиях метанола и OH, автор использовала архивные данные из обзора на радиотелескопе в Нансэ (Франция), выполненного сотрудниками лаборатории, но их обработку, интерпретацию результатов, подготовку публикаций в статьях и представление на конференциях автор выполняла самостоятельно.

3. В наблюдениях на одиночном 70-м радиотелескопе (Евпатория, Крым) метанольных мазерных конденсаций в линии OH на частоте 1720 МГц, трасси-

рующей ударную волну, автор принимала личное участие. Отбор из собственного каталога метанольных мазеров I класса, отождествленных с протяженными на волне 4.5 мкм объектами EGO, составление программы наблюдений, выполнение процесса наведения телескопа на источники, контроль записи и анализа информации, обработка данных, представление полученных из наблюдений параметров линий и физических параметров источников выполнены автором лично и самостоятельно.

4. 100 метанольных мазерных конденсаций, отобранных из собственного каталога, наблюдались на интерферометрической решетке VLA в полном спектре основного состояния радикала OH в рамках собственного проекта, одним из главных заявителей которого была автор диссертации. Автор лично провела конкретизацию наблюдательных программ для операторов интерферометра, подготовку фазовых и амплитудных калибраторов для использования в обработке данных по источникам, очистку и картографирование данных, интерпретацию полученных результатов и моделирование 20 молекулярных ядер, содержащих EGOs, которые полностью вошли в содержание диссертации.

5. В наблюдениях метанольных конденсаций I класса, протяженных на волне 4.5 мкм (EGOs), на одиночном радиотелескопе RT-22 в Пушино в мазерной линии H<sub>2</sub>O на волне 1.35 см автор принимала личное участие. Ею составлена таблица сравнительных параметров наблюдений. В соответствующей статье вводная часть, постановка задачи и частично интерпретация наблюдений написана автором лично.

6. Автор лично принимала участие в составлении задания для наблюдений протопланетного диска в глобуле IC 1396 N на наземно-космическом интерферометре РадиоАстрон в мазерной линии H<sub>2</sub>O, коррелированные данные обрабатывались автором самостоятельно, также как и выполнение оформления полученных результатов и полное написание текста статьи.

## Достоверность результатов

Достоверность результатов проведенных исследований и обоснованность выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается надежностью и техническим состоянием телескопов и международных интерферометрических сетей, наблюдения на которых проводил автор, совершенством методики обработки данных, которая проводилась с помощью современных программных пакетов, и апробацией на всероссийских и международных конференциях и семинарах с участием известных и опытных специалистов.

## Апробация работы

Все результаты, представленные в диссертации были представлены научной общественности на следующих семинарах и конференциях:

1. Всероссийская Астрономическая конференция ВАК-2010 «От эпохи Галилея до наших дней»,  
2010, САО, Нижний Архыз, Россия.
2. 40-я Международная студенческая научная конференция «Физика космоса»,  
2011, Уральский государственный университет, обсерватория Коуровка, Россия.
3. International Symposium IAU-280 «The Molecular Universe»,  
2011, Toledo, Spain.
4. XLII Young European Radio Astronomers Conference,  
2012, Pushchino Radio Astronomical of ASC LPI, Pushchino, Russia.
5. IAU Symposium №287 «Cosmic masers: From OH to H<sub>0</sub>»,  
2012, Stellenbosh, South Africa.
6. IAU Symposium №302 «Magnetic Fields Throughout Stellar Evolution»,  
2013, Biarritz, French Republic.
7. Всероссийская Астрономическая конференция ВАК-2013 «Многоликая Вселенная»,  
2013, Санкт-Петербург, Россия.
8. XI Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования»,  
2014, Институт космических исследований РАН, Москва, Россия.
9. Молодежная научная школа-конференция при 40-й Ассамблее COSPAR,  
2014, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия.
10. XXXII Всероссийская конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии», симпозиум «Задачи обсерватории Миллиметрон»,  
2015, Пушчинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН, Пушино, Россия.

11. Научная конференция «Астрономия от ближнего космоса до космологических далей»,  
2015, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга,  
Москва, Россия.
12. European Week of Astronomy and Space Science (EWASS-2015),  
2015, Tenerife, St. Cristobal de Laguna, Spain.
13. 45-я Международная студенческая научная конференция «Физика космоса»,  
2016, Уральский государственный университет, обсерватория Коуровка,  
Россия.
14. Отчетные сессии Астрокосмического центра ФИАН 2010-2015.

В процессе обучения и работы над диссертацией автор принимала участие в следующих мероприятиях:

1. Практика по обработке интерферометрических данных в программном пакете CASA на основе наблюдений, выполненных на VLA (NRAO, USA) в рамках собственной заявки VLA-13A-406; **с представлением устного доклада по теме «An OH Survey in the Direction of Class I Methanol Masers»**,  
2015, 4–17 апреля, **Национальная радиоастрономическая обсерватория США (NRAO)**, г. Сокорро, штат Нью-Мехико, США.
2. NRAO Postdoctoral Symposium,  
2015, 6–7 April, National Radio Astronomy Observatory (NRAO), Socorro, New Mexico, USA.
3. International School on Submillimeter Astronomy SOMA-2015 organized by Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT) and Astro Space Center of P.N. Lebedev Physical Institute (ASC LPI),  
2015, 12–24 July, MIPT, Dolgoprudny, Russia.
4. 10th Heidelberg Summer School 2015: «Dynamics of the interstellar Medium and Star Formation» organized by the International Max Planck Research School for Astronomy and Cosmic Physics at the University of Heidelberg (IMPRS-HD),  
2015, 21–25 September, Max Planck House in Heidelberg, Germany.

## Публикации по теме диссертации

Список публикаций по теме диссертации приведен в конце автореферата. Все основные результаты, которые выносятся на защиту и представлены в диссертации, опубликованы в ведущем рецензируемом журнале и в материалах всероссийских и международных конференций. Всего имеется 25 публикаций, в том числе — 6 статей в *Астрономическом Журнале* (список ВАК).

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем работы составляет 145 страниц, в том числе 34 рисунка и 14 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 206 наименований.

В главах 1–4 последовательно представлены работы, соответствующие намеченной цели и конкретным задачам, которые представлены выше.

В заключении суммируются основные результаты, которые выносятся на защиту и формулируются перспективные направления для дальнейших исследований.

## Краткое содержание диссертации

**Во Введении** изложены основные сведения о мазерной активности молекулярного вещества в межзвездной среде и сформулированы актуальные на настоящий момент задачи и нерешенные проблемы, связанные с пониманием процессов эволюции дозвездных объектов.

**Глава I. Метанольное мазерное свечение I класса в инфракрасных облаках и третья версия каталога *cIMM/SFR*.**

Самогравитацию вещества можно ожидать в изолированных газопылевых сгустках, проявляющих себя, например, как инфракрасные темные облака (*IRDC* и *SDC*) или протяженные эмиссионные объекты (*EGOs*), открытые в рамках проектов космических миссий *MSX* и *Spitzer*.

*IRDC* и *SDC* — это плотные ( $n_{H_2} \sim 10^6 \text{ см}^{-3}$ ), холодные ( $T \sim 10 \text{ K}$ ) [48] фрагменты межзвездной среды, т.е. небольшие изолированные темные облака с четко выраженными границами, наблюдающиеся в поглощении в среднем инфракрасном диапазоне на фоне излучения плоскости Галактики.

*EGOs* (*Extended Green Objects*) — новый класс объектов межзвездной среды (более 300 источников), идентифицированный в рамках обработки изображений, полученных в процессе работы с каталогом *GLIMPSE* космической миссии *Spitzer* (*Galactic Legacy Infrared Mid-Plane Survey Extraordinaire*) [49].



*Spitzer* имеет четырехканальную камеру, работающую на длинах волн ближнего инфракрасного диапазона 3.6, 4.5, 5.8, 8.0 мкм (*IRAC — InfraRed Array Camera*, URL: <http://www.cfa.harvard.edu/irac/>). Полученный каталог EGOs содержит объекты с избытком цвета и протяженной (*extended*) эмиссией в полосе 4.5 мкм (зеленой в цветовой шкале камеры IRAC) — отсюда название источников (протяженные зеленые объекты).

В данной главе проведено исследование ассоциации метанольных мазеров I класса с абсорбционными и эмиссионными объектами коротковолнового и средневолнового инфракрасных диапазонов с целью оценки вероятности влияния процесса самогравитации на усиление накачки этих мазеров.

Приводится описание собственного каталога метанольных мазеров I класса, который используется в анализе как базовый, каталогов темных инфракрасных облаков и облаков, излучающих в ближнем инфракрасном диапазоне, использованных для сравнения, а также описание процедуры проведения отождествления и использованных программ.

При этом собственный каталог 206-ти метанольных мазеров I класса, открытых в направлении областей звездообразования (*cIMM/SFR*), главным образом, на частоте 44 ГГц, был модифицирован и создана его новая электронная версия, представленная пользователям в открытом доступе в режиме online. На настоящий момент этот каталог содержит 206 объектов. Один из наиболее важных выводов: *cIMM*, попадающие в зону долгот обзора *Spitzer*, *GLIMPSE*, в 71% случаев отождествляются с темными инфракрасными облаками SDCs и в 42% случаев — с объектами EGO, излучающими на частоте 44 ГГц. Таким образом, представляется возможным, что *cIMM* могут формироваться в изолированных самогравитирующих конденсациях, каковыми на определенных стадиях эволюции могут стать SDCs. Выборка SDCs предлагается как новый список для исследования на частотах метанольного мазерного излучения I класса с целью обнаружения новых *cIMM*. Проведен подробный статистический анализ с использованием характеристик областей формирования *cIMM/SFR*, представленных в указанном каталоге.

## **Глава II. Магнитные поля в метанольных мазерных конденсациях по данным исследований сопряженных областей.**

Существование магнитного поля в Галактике обусловлено наличием заряженных несвязанных частиц, имеющих эволюционное происхождение. Магнитное поле «вморожено» в то вещество, которое является его носителем (т.е. движется вместе с ним), и зависит от его физических характеристик. Оно сосредоточено в спиральных рукавах в разреженной межзвездной среде, но вокруг плотных газо-пылевых конденсаций, в протопланетных дисках, в околозвездном пространстве и вокруг планет испытывает искажения и имеет пеккулярные свойства.

Магнитное поле играет немалую роль в процессе эволюции межзвездной

среды. Если напряженность магнитного поля достаточна, оно может контролировать плотность газо-пылевой среды, поддерживая, с одной стороны, процесс распада гигантских молекулярных облаков и образование конденсаций, в которых зарождаются звезды, с другой — противостоять гравитационному коллапсу этих облаков, сдерживая коллапс, сохраняя их морфологию и структуру, в свою очередь, испытывая искажения вплоть до реверсивных изменений направления в процессе вращения дисков вокруг протозвезд и звезд. Подобный контроль может влиять на темпы эволюции областей звездообразования и время появления в них характерных пекулярных объектов — таких, как источники инфракрасного излучения, мазерные источники или ультракомпактные НП-зоны, возникающие на ранних стадиях развития протозвезд [50].

В настоящий момент к нерешенным проблемам относятся мелкомасштабные исследования магнитных полей, касающиеся взаимодействия магнитного поля и дозвездных конденсаций межзвездной среды. В количественном выражении далеки от завершения представления о формировании полной картины эволюции областей звездообразования с учетом задержки магнитным полем коллапса газо-пылевых фрагментов и обратного влияния нестационарных самогравитирующих объектов на трансформацию направления силовых линий магнитных полей и изменение локальных значений его напряженности. Роль этих взаимосвязанных процессов также очень важна при оценке времени эволюции протозвездных структур.

Создавая выделенное направление, магнитное поле способно снимать энергетическое вырождение тонкой и сверхтонкой структуры уровней молекул и расщеплять переходы. В зависимости от структуры молекулы величина расщеплений различна. В молекулах ОН она обусловлена спином непарного электрона. Но, в отличие от молекул ОН, в наиболее изучаемой в настоящий момент молекуле метанола непарного электрона нет, и Зеемановское расщепление уровней в такой молекуле касается только уровней, обусловленных ядерным спином, и пропорционально не электронному спину, а ядерному магнетону, который меньше на порядок величины. Исследование Зеемановского спектра в метаноле заведомо не будет столь же эффективным, как исследование спектра молекулы ОН — во всяком случае, в отношении слабых магнитных полей. Поэтому оценкам магнитного поля по расщеплению мазерных линий метанола до последнего времени значительного внимания не уделялось, тем более, что магнитное поле в метанольных конденсациях можно правильно оценить по Зеемановскому расщеплению мазерных линий ОН, которые ассоциируются с мазерными линиями метанола.

При этом известно, что значительная часть метанольных мазеров как I-го, так и II-го класса отождествляется с мазерами ОН — по крайней мере, в пределах 2-х угловых минут (более 75% — см. каталог в работе [29]), в типичном размере диаграмм одиночных радиотелескопов, работающих на частоте

те 44 ГГц, соответствующей излучению наиболее яркой линии метанольного спектра I класса. Эта стадия эволюции, при которой время жизни метанольных мазеров I класса и мазеров OH частично совпадает, вероятно, является следующей, более продвинутой стадией развития межзвездных конденсаций. Для этих метанольных конденсаций можно определить величину магнитного поля по расщеплению мазерных линий OH.

В данной главе представлены результаты обработки архивных данных поляризационных наблюдений газо-пылевых конденсаций, полученных на радиотелескопе в Нансэ (Франция) в линиях гидроксила OH на частотах 1665 МГц и 1667 МГц в 4-х параметрах Стокса. Для исследования были выбраны 7 областей, содержащих как скопления мазерных конденсаций OH, для которых проводились наблюдения, так и скопления мазеров метанола I и II класса, различающихся эволюционно.

Показано, что ассоциации мазеров реальны, т.е. магнитное поле, действующее в пределах скоплений OH, может распространяться и на группы метанольных мазеров. Приведены гауссовы параметры деталей спектров OH и сделаны оценки поляризационных параметров: получена степень круговой поляризации  $m_C$ , плотность потока в линейной поляризации  $p$ , степень линейной поляризации  $m_L$ . По величине Зеемановского расщепления линий OH и с помощью обработки параметра Стокса  $V$  приближением производной от параметра Стокса  $I$  получены оценки величины  $B$  напряженности магнитного поля. Показано, что величина  $B$  колеблется для разных источников в интервале от  $\leq 0.5$  мГс до 1.4 мГс. Проведен анализ ассоциации мазеров OH с метанольным излучением: отмечается, что величина магнитного поля в мазерах OH в межзвездных конденсациях, ассоциирующихся с метанольными мазерами I класса, определяется, по крайней мере, надежнее, чем в межзвездных конденсациях с мазерами OH, ассоциирующихся с метанольным излучением II класса, и имеет более высокие значения. Установлены линейные размеры  $R$  для этих ассоциаций. Показано, что по размерам исследуемые области могут быть связанными структурами типа глобул Бока, небольших облаков IRDC или протопланетных дисков.

На основании полученных значений величины магнитного поля  $B$  проведена оценка астрофизических параметров мазерных конденсаций. Получены значения величины отношения массы к величине магнитного потока в размере исследуемой области, содержащей мазеры OH и мазеры метанола, значения отношения теплового давления к магнитному и вириальные соотношения энергий кинетической, магнитной и гравитационной. Показано, что во всех источниках отношение массы к магнитному потоку превышает критическое значение, а энергия хаотических движений и энергия магнитного поля существенно меньше энергии гравитационных связей, это означает, что облако находится в критическом неравновесном состоянии и магнитное поле не ока-

зывает сопротивления гравитационной силе массы облака. С другой стороны, показано, что значение отношения теплового давления к магнитному во всех случаях  $<1$ , т.е. облака могут находиться в магнитно-доминирующем режиме — магнитное поле может препятствовать коллапсу облака. Подобное противоречие связывается с возможными большими ошибками как в определении значений напряженности магнитного поля, так и в возможных завышенных оценках расстояний до источников, увеличивающих размер исследуемых областей.

### **Глава III. Исследования метанольных мазерных конденсаций I класса, ассоциирующихся с объектами EGO, в линиях гидроксила OH на одиночном телескопе и на интерферометре.**

Ранее исследования EGOs проводились в линиях мазеров cIMM и sIMM [51], в тепловых линиях  $\text{HCO}^+$ ,  $\text{H}_{13}\text{CO}^+$ ,  $\text{SiO}$  [51], а также в линиях  $\text{NH}_3$  и в мазерных линиях  $\text{H}_2\text{O}$  [52]. Высокая вероятность обнаружения метанольных мазеров I класса на частоте 95 ГГц ( $\sim 70\%$ ), достигнутая в обзоре 57 EGOs, убедительно подтверждает связь cIMM и EGOs [53]. Мазеры  $\text{H}_2\text{O}$ , которые также ассоциируются с биполярными потоками, были обнаружены в  $\sim 68\%$  случаев в направлении 64 из 94 EGOs [52].

Как показано выше, EGOs отождествляются с силуэтами темных инфракрасных облаков и являются убедительными маркерами как метанольного мазерного излучения I класса, трассирующего, по современным представлениям, биполярные потоки от протозвездных объектов, так и метанольного мазерного излучения II класса, трассирующего молодые звездные объекты (протозвезды и звезды на стадии до главной последовательности). Эти признаки, наряду с протяженностью излучения пыли на 4.5 мкм, дали основания полагать, что EGOs принадлежат очень ранней стадии развития молекулярных облаков с признаками начала формирования подвижной среды в виде потоков из протозвездных объектов большой массы. Протяженный характер излучения этих объектов интерпретировался исследователями как след потоков ионизированного молекулярного газа, т.е. биполярных потоков, истекающих от протозвезд, поскольку инфракрасные цвета объектов EGOs, обусловленные свечением в линиях полициклических ароматических углеводородов, попадают в тот же диапазон цветовой зависимости, что и молодые протозвезды, погруженные в пылевые оболочки.

В линиях OH EGOs до сих пор не наблюдались, систематические обзоры cIMMs в этих линиях также не проводились.

Галактические OH мазеры встречаются в самых различных условиях — в проэволюционировавших звездах, остатках сверхновых и в областях образования массивных звезд. Чаще всего главные линии OH (на частотах 1665 и 1667 МГц) обнаруживаются в областях звездообразования, в то время как сателлиты (1612 и 1720 МГц) — в проэволюционировавших звездах

(1612 МГц) и на границах взаимодействия фронта остатка сверхновой с молекулярным облаком (1720 МГц). Исключения из этой схемы существуют, но они, как правило, представляют менее 5% от любой рассматриваемой выборки.

Считается установленным, что мазеры ОН на частоте 1720 МГц формируются под воздействием столкновительной накачки, которую, как правило, обеспечивает фронт ударной волны от сверхновой. Поскольку метанольные мазеры I класса также формируются под воздействием столкновительной накачки, обусловленной действием биполярного потока от протозвезды, возникает естественное предположение, что в метанольных мазерных конденсациях I класса также может наблюдаться излучение ОН на частоте 1720 МГц, спровоцированное фронтом ударной волны не от остатка сверхновой, но от биполярного потока — как и метанольное излучение I класса. Причем наилучшими кандидатами для такого поиска должны быть именно EGOs, природа которых как трэйсеров биполярных потоков считается доказанной.

С целью проверки данного предположения в 2010 г. нами были выполнены исследования EGOs в линии ОН(1720) на антенне Центра Дальней Космической связи в Евпатории (Крым) [54]. Хотя спектры были повреждены помехами, оказалось возможным извлечь из них некоторые полезные данные. В 18 EGOs, исследованных в данном обзоре, ранее наблюдалась эмиссия сИММ. Излучение ОН(1720) было найдено в 72% из этих EGOs, т.е. в 13 источниках из 18, в которых суммарно обнаружено 9 мазерных и 14 тепловых компонента. В среднем, значение плотности молекулярного водорода, полученное по этим тепловым компонентам, составляет  $\leq 100 \text{ см}^{-3}$ . Это позволяет предположить: 1) слабое влияние биполярных потоков в EGOs, 2) пространственное несовпадение конденсаций сИММ и ОН(1720) или 3) различия в механизмах их накачки. Например, в последнем случае переход ОН(1720) может быть возбужден при более низких плотностях или в более широком диапазоне плотностей.

На основании результатов этих наблюдений был выполнен обзор 100 источников из каталога метанольных мазеров I класса, содержащего 206 объектов [29], на радиоинтерферометре VLA. Среди этих 100 источников 20 областей являются объектами EGO на склонении севернее  $-34^\circ$ .

Наблюдения проводились в период с 10 июля по 31 августа 2013 г. в С-конфигурации решетки. Мы наблюдали в полосе L (1000–2000 МГц) пять спектральных линий: линия HI (частота покоя 1420.40 МГц) и четыре линии основного состояния ОН — главные и сателлиты (частоты покоя 1612.231, 1665.402, 1667.359 и 1720.53 МГц). На длине волны излучения линий ОН 18 см главная диаграмма антенн VLA составляет  $27'$ . Угловое разрешение, соответствующее синтезированной диаграмме интерферометра, составляло  $12''$ .

В этой главе представлен первый этап обработки полученных интерферометрических данных. Обсуждаются результаты, в частности, статистического

анализа, касающиеся новых мазерных излучателей EGOs.

Калибровка, построение изображений и анализ данных выполнялись с помощью программного пакета CASA (*Common Astronomy Software Applications*; <http://casa.nrao.edu>). Излучение в одной или более линиях OH было детектировано в 10 из 20 EGOs. Одна или обе главных линии были обнаружены во всех 10 объектах, линия-сателлит на частоте 1612 МГц — только в двух. Линия-сателлит на частоте 1720 МГц была найдена только в одном источнике — EGO G45.47+0.07. В остальных 9 источниках, в которых есть излучение в главных линиях, эмиссия OH(1720) не обнаружена на уровне шума  $\sim 0.02$  Ян/луч. Во всех случаях линии OH не находятся в состоянии термодинамического равновесия. Для источников с положительным результатом для каждой линии, т.е. для каждого мазерного пятна, приводятся полученные в процессе фиттинга координаты, интегрированная в интервале скоростей и в пике линии плотность потока, скорость центра линии, ширина линии и яркостная температура. Представлены спектры OH и трехцветные карты, полученные с использованием приложения для визуализации данных и астрономических изображений SAOImage DS9 (<http://ds9.si.edu/site/Home.html>).

Хотя наличие излучения в главных линиях противоречит предположению о том, что данные области возбуждаются ударной волной, в данной работе показано, что расстояния между скоплениями мазерных пятен sIMM, cIMM и OH решают эту дилемму и позволяют объяснить некоторые наблюдаемые различия и сходства в их эволюционных особенностях.

Как отмечалось выше, межзвездные мазеры формируются в широком, иногда перекрывающемся, диапазоне физических условий, и один из наиболее интересных вопросов касается появления различных типов мазеров на разных эволюционных стадиях молодого протозвездного объекта (*YSO*). Разные типы мазеров могут отслеживать разные физические явления, сопровождающие развитие *YSO*, что заставляет исследовать новые возможности для установления более строгих ограничений на перекрытия фаз формирования мазеров и соответствующих механизмов накачки.

Ключ к разрешению подобных проблем может быть найден в измерениях расстояний между разными типами мазерных скоплений и в оценках размеров отдельных мазерных пятен внутри скоплений и их локализации по отношению к другим областям образования звезд. Такую возможность как раз предоставляют однородные интерферометрические исследования. Используя однородные координаты, полученные на VLA для точечных источников из каталога GLIMPSE и для мазеров cIMM и sIMM, полученных в работах [49, 55], совместно с координатами мазеров OH, полученными в наших наблюдениях также на VLA, мы рассчитали проекции расстояний между этими объектами в каждом EGO. Численные значения приведены в результатах, которые вынесены на защиту.

Один из главных результатов этой работы заключается в том, что в нашей выборке EGOs расстояния между точечным источником GLIMPSE, мазером OH и мазером sPMM оказались близки к типичному размеру ядра в плотном молекулярном облаке в EGO 0.022–0.053 пк [56], но мазер sPMMs находится на более удаленном от них расстоянии в пределах масштаба потоков в областях образования массивных звезд от  $\lesssim 0.1$  до  $> 1$  пк [57] или размера ультракомпактной зоны ПП  $\lesssim 0.1$  пк [58].

Поэтому необходимо рассматривать полную иерархию «молекулярное облако — скопление — ядро» [59], а не только одно ядро. Если предположить, что все ядра образуются одновременно, но эволюционируют во времени в соответствии с собственными физическими параметрами и под возможным воздействием соседних ядер, присутствие или отсутствие пекулярных объектов, включая мазеры, будет зависеть от скорости, с которой эволюционирует отдельное ядро.

Принимая во внимание теоретическую несовместимость механизмов накачки мазеров sPMM и cPMM, мы приходим к выводу, что мазеры sPMM не сосуществуют с точечным источником GLIMPSE или мазерами OH и cPMM в пределах одного и того же ядра. Мазеры sPMM могут формироваться при других физических условиях в *соседнем* молекулярном ядре в том же скоплении ядер, возможно, под воздействием ударной волны от биполярного потока [60] от первого ядра — в наших случаях, в форме EGOs, или при прохождении фронта ударной волны от расширяющейся ультракомпактной зоны ПП [61].

Другими словами, если мы наблюдаем в некоторой области метанольные мазеры *обоих* классов, это означает, что мы видим не одно, а два молекулярных ядра — в одном из них сосредоточены точечный источник GLIMPSE, мазеры OH, H<sub>2</sub>O и cPMM, другое содержит только мазер sPMM. Расстояние между этими ядрами должно быть порядка  $\sim 1$  пк (типичное расстояние между звездами), и они могут быть на разных стадиях эволюционного развития. Интерферометрические измерения параметров мазеров H<sub>2</sub>O в этих областях необходимы для проверки данной модели.

#### **Глава IV. Исследования метанольных мазерных конденсаций I класса в линиях H<sub>2</sub>O на одиночном телескопе и на интерферометре.**

В данной главе представлены результаты наблюдений 24-х источников мазерного излучения H<sub>2</sub>O на волне 1.35 см, связанных с протяженными областями инфракрасного излучения EGOs, и результаты исследования тонкой пространственной структуры метанольного мазера I класса IC 1396 N в мазерной линии H<sub>2</sub>O на наземно-космическом интерферометре РадиоАстрон.

Наблюдения на 22-м радиотелескопе Пушчинской радиоастрономической обсерватории АКЦ ФИАН были выполнены в январе-мае 2015 года. Ширина диаграммы направленности РТ-22 по половинной мощности на этой длине

волны составляет  $2.6'$ . Предел обнаружения излучения  $\text{H}_2\text{O}$  для разных объектов был в среднем  $5\text{--}10$  Ян. Излучение  $\text{H}_2\text{O}$  зарегистрировано в направлении 11 EGOs. Впервые обнаружено излучение  $\text{H}_2\text{O}$  источника G28.83–0.25. В нем наблюдалась эмиссия  $\text{H}_2\text{O}$  на скорости  $77.6$  км/с с плотностью потока  $19$  Ян в январе и  $16$  Ян в феврале 2015 г. Вероятно, мы застали источник на ранней стадии распространения ударной волны. Для обнаруженных мазеров  $\text{H}_2\text{O}$  приводятся спектры и параметры мазерного излучения, у некоторых из них обнаружена сильная переменность в линии  $\text{H}_2\text{O}$ . Для каждого источника приводятся подробные комментарии.

Накачка мазеров  $\text{H}_2\text{O}$ , как и метанольных мазеров I класса — чисто столкновительная. Эти мазеры вместе с протяженной эмиссией на длине волны  $4.5$  мкм (EGOs) могут быть индикаторами очень ранней стадии развития молодых звездных объектов. Однако половина объектов EGOs нашей выборки не были обнаружены в линии  $\text{H}_2\text{O}$ , что можно объяснить слабой чувствительностью Пущинской аппаратуры. Мазерное излучение  $\text{H}_2\text{O}$  не обнаружено, в том числе, и в направлении двух особенных источников — G6.05–1.45 (M8E) и G359.94+0.17.

В M8E, с которым связан источник радиоконтинуума — компактная область III, источник ближнего ИК-излучения и биполярный выброс вещества, наблюдаемый в линии молекулы CO  $J = 2 - 1$ , в работе [27] был обнаружен мазер  $\text{CH}_3\text{OH}$   $44$  ГГц ( $F_{peak} \sim 520$  Ян), принадлежащий к I классу метанольных мазеров, который оказался самым сильным из известных на сегодняшний день. В марте 1975 г. [62] в нем наблюдалось слабое мазерное излучение  $\text{H}_2\text{O}$  на  $V_{LSR} = 10.9$  км/с. Нами излучение  $\text{H}_2\text{O}$  не было обнаружено.

Источник G359.94+0.17 ассоциируется с темным инфракрасным облаком (IRDC), проецирующимся на область Центра Галактики. В этом источнике именно на координатах мазера  $\text{H}_2\text{O}$  было обнаружено сильное излучение  $\text{CH}_3\text{OH}$  в линии  $7_0 - 6_1A^+$   $44$  ГГц с  $F_{peak} \sim 50$  Ян на  $V_{LSR} = 16.5$  км/с, характерное для метанольных мазеров I класса [63]. Мазерное излучение  $\text{H}_2\text{O}$  имело характеристики  $1.4$  Ян на  $7.6$  км/с и  $1.7$  Ян на  $21.6$  км/с [63], но нами это излучение не было зарегистрировано, вероятно, также из-за недостаточной чувствительности.

Интересные результаты дает сравнение лучевых скоростей метанольных мазеров и мазеров  $\text{H}_2\text{O}$  в объектах EGOs. В большинстве этих источников лучевые скорости главных деталей спектров  $\text{H}_2\text{O}$  и метанольных мазеров I класса совпадает, что может означать, что они находятся в одном и том же молекулярном ядре в сходной по времени стадии эволюции. Но в некоторых EGOs эти скорости различаются более чем на  $5\text{--}10$  км/с. Возможные объяснения этому факту: 1) эти мазеры сформированы в разных молекулярных ядрах, 2) излучение  $\text{H}_2\text{O}$  исходит из небольших областей за фронтом ударной волны, возбуждающей мазер, что приводит к сдвигу скорости мазера  $\text{H}_2\text{O}$



относительно более спокойной среды, содержащей протяженные структуры с метанольным излучением I класса, 3) мазеры  $\text{H}_2\text{O}$  и метанола находятся на разных участках фронта биполярного потока, например,  $\text{H}_2\text{O}$  — в основании потока, а метанольные мазеры — на фронте взаимодействия ударной волны с веществом окружающего молекулярного облака. Эти гипотезы можно и целесообразно проверить с помощью получения интерферометрических данных для мазеров  $\text{H}_2\text{O}$  в объектах EGOs.

Как отмечает соавтор работы Г. М. Рудницкий, несмотря на общий признак истечения вещества в EGOs, которое наблюдается в коротковолновом инфракрасном диапазоне в обзоре *Spitzer*, при тщательном анализе спектров мазеров  $\text{H}_2\text{O}$  в этих источниках они оказываются не вполне однородными по своему составу. По крайней мере, объекты EGOs могут содержать как мало-массивные, так и массивные протозвезды (аргументы см. в работе [64]), что может в дальнейшем привести к большим различиям эволюционного характера. В этом смысле также представляются перспективными исследования тонкой пространственной структуры EGOs в мазерной линии  $\text{H}_2\text{O}$ , которые могут дать полезные результаты.

На РТ-22 ПРАО на 1.35 см проводится постоянный мониторинг потока многих метанольных мазеров I класса.

Мы приводим результаты исследования структуры скопления мазерных конденсаций  $\text{H}_2\text{O}$  и динамики мазерных пятен в кометарной глобуле IC 1396 N (IRAS 21391+5802), полученные в рамках наблюдений по собственной заявке на наземно-космическом интерферометре с участием космического радиотелескопа РадиоАстрон.

В эту газо-пылевую конденсацию глобулу вкраплена протозвезда промежуточной массы, светимость которой в дальнем инфракрасном диапазоне составляет  $460 L_{\odot}$ . Глобула проходит несколько промежуточных стадий образования молодых звездных объектов, интенсивно излучающих в миллиметровом диапазоне длин волн. Самый яркий источник на волне 3.1 мм — молекулярное ядро VIMA-2 — является центром нескольких биполярных молекулярных потоков [66, 67], наблюдавшихся в крыльях многих тепловых линий (см. [68–70] и ссылки в этих работах). Именно с ним ассоциируется мазерное излучение  $\text{H}_2\text{O}$  [71]. В окрестности IC 1396 N/VIMA2 не наблюдается ни мазерное излучение OH, ни мазерное излучение метанола II класса на частоте 6.7 ГГц, которое, как считается, формируется в аккреционных дисках, но наблюдается мазерное излучение метанола I класса на частоте 44 ГГц, что свидетельствует о самой ранней стадии сжатия протозвездного вещества. Однако этот источник не ассоциируется ни с EGO, ни с IRDC или SDC.

Мазер  $\text{H}_2\text{O}$  ранее исследовался на VLA [72] и VLBA (*Very Long Baseline Array*, США) [73–75]. Предположительно, по мнению авторов [74], в IC 1396 N наблюдается межзвездный аккреционный диск, аккумулирующий угловой мо-

мент коллапсирующего молекулярного ядра, что может дать начало процессу формирования протопланетной системы.

Относительно близкое расстояние до этого источника (750 пк), а также наличие в нем нескольких YSOs, потоков вещества и, возможно, протопланетного диска или протозвездного ветра делают его идеальной лабораторией для изучения общих аспектов процесса звездообразования.

Наблюдения были выполнены в 2014 г. на наземно-космическом интерферометре с 10-м радиотелескопом РадиоАстрон. В процессе наблюдений мазера была проведена серия пяти последовательных сессий, которые можно разделить на три категории по размерам наземно-космических баз: выполненные с короткими базами — до 2.5 диаметров Земли (июль), со средними базами — 3.8 диаметра Земли (одна сессия в октябре и одна в декабре), и с длинными базами — 5.9 и 5.1 диаметра Земли (в ноябре и в декабре, соответственно).

Посткорреляционная обработка данных была выполнена с использованием программного пакета AIPS. Первичная калибровка групповой задержки сигнала и частоты интерференции (задача *FRING*) выполнялась по калибровочному источнику (квazar 2137+510). Малое время накопления сигнала на квазаре не позволило произвести калибровку, необходимую для определения абсолютных координат мазерных деталей. Для самокалибровки задача *FRING* выполнялась повторно по самой яркой детали ( $V_{LSR} = -9.4$  км/с) в мазерном источнике. Калибровка полосы пропускания также выполнялась по мазерному источнику.

В работе приведены соответствующие значения эффективных угловых разрешений для этих средних значений проекций баз, представлен список участвовавших антенн, параметры наблюдений, на рисунках приводятся реализованные покрытия uv-плоскости для наземно-космических баз и отдельно — только для наземных, авто- и кросскорреляционные спектры для всех 5 сессий (задачи *POSSM* и *SETJY*), карты, построенные методом интерференционных лепестков (задача *FRMAP*) для самых ярких спектральных деталей, комбинированные карты мазерных пятен в координатах Ra-Dec и диаграммы скорость — расстояния ( $V_{LSR}-RA$ ). Получены позиции мазерных пятен, скорости и значения плотностей потоков для мазерных деталей.

Анализ результатов наблюдений показал следующее. Отклик от источника был обнаружен на проекциях баз  $>2.3$  диаметров Земли (*англ. Earth Diameter, ED*), что указывает на нижний предел на размер мазера  $L > 0.3$  а.е. и на верхний предел на яркостную температуру  $6.25 \times 10^{12}$  К. В спектре наблюдаются группы низкоскоростных деталей в интервале скоростей от  $-4.4$  до  $+0.6$  км/с и две высокоскоростные детали на скоростях  $V_{LSR} = -9.4$  км/с и  $V_{LSR} = +4.4$  км/с, удаленные от наиболее яркой центральной детали на скорости  $\sim 0.3$  км/с на расстояния 157 а.е. и 70 а.е., соответственно. Мазерные компоненты центральной части спектра по скоростям делятся на четы-

ре группы, по координатам — на три. Три пространственных группы низкоскоростных мазерных компонентов 2014 г. выстраиваются на прямой линии протяженностью  $\sim 200$  а.е., при этом две группы не наблюдались в 1996 г. и, видимо, являются джетами, сформировавшимися в период 18 лет между наблюдениями 1996 и 2014 г.г. Прослеживается линейная зависимость  $V_{LSR}$  от расстояния между джетами и центральной группой пятен со скоростями  $V_{LSR} \sim 0.3$  км/с, в то время как центральная группа с теми же координатами, но со скоростями  $V_{LSR} \approx -3.4$  км/с возможно, связана линейной зависимостью с высокоскоростными деталями. Сопоставление расположения мазерных пятен 2014 г. и 1996 г. на диаграмме  $V_{LSR}$  — расстояние для низкоскоростных деталей показывает, что большая часть низкоскоростных деталей сохраняет свое пространственное положение на протяжении 18 лет.

Петля, наблюдавшаяся в центре источника в 1996 г. в работе [75] и правильная структура, которая наблюдалась в работе [74] и интерпретировалась как кешплеровский диск (также в 1996 г.), также детектируется в наблюдениях 2014 г. Другими словами, на протяжении 18 лет пространственная структура мазера, которой соответствует центральная часть спектра с интервалом скорости примерно  $\pm 1.5$  км/с, сохраняется в масштабе менее 20 миллизекунд дуги, что на расстоянии 750 пк соответствует линейному размеру около 15 а.е.

Результаты исследования тонкой пространственной структуры мазера  $H_2O$  в IC 1396 N не выносятся на защиту, но представляют собой квалификационную часть, выполненную в соответствии с утвержденным планом работы над диссертацией.

**В Заключение** суммируются результаты работы, основные положения, которые выносятся на защиту, и формулируются перспективные направления для дальнейшей работы.

## Публикации по теме диссертации

1. **О. С. Баяндина**, А. В. Алакоз, И. Е. Вальтц.  
*«Исследование тонкой пространственной структуры мазера  $H_2O$  в глобуле IC 1396 N»*  
45-ая Международная студенческой научной конференции «Физика Космоса»,  
**2016**, 1-5 февраля, Екатеринбург, Россия.  
Тезисы докладов, с. 242,  
URL: [http://astro.ins.ufrj.br/sites/default/files/school/y2016/ws\\_2016\\_proc.pdf](http://astro.ins.ufrj.br/sites/default/files/school/y2016/ws_2016_proc.pdf).
2. Г. М. Рудницкий, Е. Е. Лехт, **О. С. Баяндина**, И. Е. Вальтц, Э. Р. Хан.  
*«Наблюдения „протяжённых зелёных объектов“ в линии  $H_2O$  на волне*

- 1.35 см на радиотелескопе РТ-22 в Пуццино».  
2016, *Астрономический журнал*, 93, с. 121-136.  
DOI: 10.7868/S0004629916010023.
3. **О. С. Баяндина**, И. Е. Вальтц, С. Куртц.  
«Наблюдения „протяжённых зелёных объектов“ в линиях мазеров ОН с высоким пространственным разрешением».  
2015, *Астрономический журнал*, 92, с. 883–901.  
DOI: 10.7868/S000462991511002X.
4. G. M. Rudnitskij, E. E. Lekht, **O. S. Bayandina**, I. E. Val'tts, E. R. Khan.  
«Observations of  $H_2O$  masers toward Extended Green Objects».  
European Week of Astronomy and Space Science (EWASS-2015),  
2015, June 20–28, Tenerife, St. Cristobal de Laguna, Spain.  
Abstract 558,  
URL: [https://events.kuoni-dmc.com/ei9/images/EWASS15/Abstracts\\_2015/index.htm](https://events.kuoni-dmc.com/ei9/images/EWASS15/Abstracts_2015/index.htm).
5. **O. S. Bayandina**, S. E. Kurtz, I. E. Val'tts.  
«OH masers survey at the EVLA – subsample of EGOs».  
European Week of Astronomy and Space Science (EWASS-2015),  
2015, June 20–28, Tenerife, St. Cristobal de Laguna, Spain.  
Abstract 224,  
URL: [https://events.kuoni-dmc.com/ei9/images/EWASS15/Abstracts\\_2015/index.htm](https://events.kuoni-dmc.com/ei9/images/EWASS15/Abstracts_2015/index.htm).
6. **О. С. Баяндина**, И. Е. Вальтц, С. Куртц.  
«Эволюция молекулярных ядер в объектах Spitzer/EGOs».  
Научная конференция «Астрономия от ближнего космоса до космологических далей»,  
2015, 25–30 мая, ГАИШ МГУ, Москва, Россия.  
Сборник резюме докладов, с. 47,  
URL: [http://www.sai.msu.su/EAAS/rus/confs/abstr\\_book2.pdf](http://www.sai.msu.su/EAAS/rus/confs/abstr_book2.pdf).  
*Astronomical and Astrophysical Transactions*, volume 29, issue 2-3, in press.
7. Е. Е. Лехт, **О. С. Баяндина**, И. Е. Вальтц, Э. Р. Хан.  
«Наблюдения мазеров  $H_2O$  в направлении „протяжённых зелёных объектов“».  
XXXII Всероссийская конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии», симпозиум «Задачи обсерватории Миллиметрон»,  
2015, 20-23 апреля, Пуццино, Россия.  
Тезисы докладов, с. 54-55.

8. **O. S. Bayandina**, S. E. Kurtz, A. V. Alakoz, I. E. Val'tts, S. V. Kalenskii, G. M. Rudnitskij.  
*«A teeny-tiny protoplanetary disk IC 1396 N as seen in maser H<sub>2</sub>O lines with space mission RADIOASTRON and ground VLBI».*  
Young Scientific School-Conference in the frames of 40-th COSPAR Assembly, **2014**, August 2–10, Moscow, Russia.  
Abstract book, p. 39,  
URL: [http://space.msu.ru/?wpfb\\_dl=2](http://space.msu.ru/?wpfb_dl=2).
9. **О. С. Баяндина**, А. В. Алакоз, И. Е. Вальтц.  
*«Магнитные поля в метанольных лазерных конденсациях по данным исследования сопряженных областей. Астрофизические параметры».*  
**2014**, *Астрономический журнал*, 91, с. 540-549.  
DOI: 10.7868/S0004629914070020.
10. **О. С. Баяндина**, С. Куртц, А. В. Алакоз, И. Е. Вальтц, С. В. Каленский, Г. М. Рудницкий.  
*«РАДИОАСТРОН в системе космической РСДБ: исследование мазера H<sub>2</sub>O в протопланетном диске IC 1396 N».*  
XI Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования»,  
**2014**, 9–11 апреля, ИКИ РАН, Москва, Россия.  
Тезисы докладов, с. 31-36,  
URL: [http://www.iki.rssi.ru/books/2014kmu\\_2.pdf](http://www.iki.rssi.ru/books/2014kmu_2.pdf),  
а также: «Механика, управление и информатика», Т. 6, № 7 (52), с. 31-36 (2014).
11. **О. С. Баяндина**, И. Е. Вальтц, С. Куртц.  
*«Обзор метанольных лазеров на EVLA (NRAO, USA) на 18 см: первые результаты наблюдений».*  
XI Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования»,  
**2014**, 9–11 апреля, ИКИ РАН, Москва, Россия.  
Тезисы докладов, с. 24-30,  
URL: [http://www.iki.rssi.ru/books/2014kmu\\_2.pdf](http://www.iki.rssi.ru/books/2014kmu_2.pdf),  
а также: «Механика, управление и информатика», Т. 6, № 7 (52), с. 24-30 (2014).
12. **О. С. Баяндина**, А. В. Алакоз, И. Е. Вальтц.  
*«Магнитные поля в метанольных лазерных конденсациях по данным исследования сопряженных областей. Наблюдательные параметры».*  
**2013**, *Астрономический журнал*, 90, с. 967-982.  
DOI: 10.7868/S0004629913120013.

13. **О. С. Баяндина**, А. В. Алакоз, И. Е. Вальтц.  
«Магнитные поля в молекулярных газо-пылевых конденсациях и параметры межзвездной среды».  
Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2013 «Многоликая Вселенная»,  
**2013**, 23-27 сентября, Санкт-Петербург, Россия.  
Тезисы докладов, с. 24.
14. **O. S. Bayandina**, A. V. Alakoz, I. E. Val'tts.  
«*Magnetic Fields in 7 Young Stellar Objects Observed with Nancaiy Radio Telescope*».  
**2013**, Proceedings of the International Astronomical Union / Volume 9 / Symposium S302 / August 2013, pp 38-39. Published online: 07 August 2014 in Cambridge Journals Online.  
DOI: 10.1017/S1743921314001665.
15. **O. S. Bayandina**, I. E. Val'tts.  
«*The similarities and differences in the formation of masers on methanol and OH according to data from radio astronomy observations*».  
XLII Young European Radio Astronomers Conference,  
**2012**, September 18–21, Pushchino Radio Astronomical of ASC LPI, Pushchino, Russia.  
Abstract Book, p.3,  
URL: <http://www.prao.ru/conf/yerac2012/presentations/Abstracts.pdf>.
16. 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, с. 593-610.  
DOI: 10.1134/S1063772912060042.
17. **O. S. Bayandina**, I. E. Val'tts, G. M. Larionov.  
«*VizieR Online Data Catalog: Class I methanol maser catalog*».  
**2012**, VizieR On-line Data Catalog,  
URL: <http://vizier.cfa.harvard.edu/viz-bin/VizieR?-source=J/AZh/89/611>.
18. **О. С. Баяндина**, И. Е. Вальтц, Г. М. Ларионов.  
«Метанольное мазерное свечение I класса в инфракрасных облаках и третья версия каталога sIMM/SFR».  
**2012**, Астрономический журнал, 89, с. 611-623.  
DOI: 10.1134/S1063772912060042.

19. 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 Northern Class I Methanol Masers».*  
**2012**, Proceedings of the International Astronomical Union / Volume 8 / Symposium S287 / January 2012, pp 294–295. Published online: 24 July 2012 in Cambridge Journals Online.  
 DOI: 10.1017/S174392131200720X.
20. **O. S. Bayandina**, G. M. Larionov, I. E. Val'tts.  
*«Identification of Class I Methanol Masers with Objects of Near and Mid-Infrared Bands and the Third Version of Class I Methanol Maser Catalog».*  
**2012**, Proceedings of the International Astronomical Union / Volume 8 / Symposium S287 / January 2012, pp 280–281. Published online: 24 July 2012 in Cambridge Journals Online.  
 DOI: 10.1017/S1743921312007132.
21. 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».*  
 IAU Symposium №280 «The Molecular Universe»,  
**2011**, May 30 – June 3, Toledo, Spain.  
 Abstract book, p. 39.  
 URL: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2011IAUS..280P.227L>.
22. 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 сателлита OH(1720 МГц) на 70-м радиотелескопе НАНУ (Украина)».*  
 40-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса»,  
**2011**, 31 января – 4 февраля, Коуровка, Россия.  
 Труды конференции, Уральский государственный университет, с. 302,  
 URL: [http://astro.ins.uifu.ru/sites/default/files/school/y2011/sb/ws\\_40.pdf](http://astro.ins.uifu.ru/sites/default/files/school/y2011/sb/ws_40.pdf).
23. И. Д. Литовченко, А. В. Алакоз, **О. С. Баяндина**, И. Е. Вальтц.  
*«Наблюдения мазерного сателлита OH на частоте 1720 МГц в полной выборке метанольных мазеров I класса».*  
 Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2010 «От эпохи Галилея до наших дней»,

2010, 12–19 сентября, САО, Нижний Архыз, Россия.  
Тезисы докладов,  
URL: [http://agora.guru.ru/VAK-2010/files/570\\_litov\\_2010.doc](http://agora.guru.ru/VAK-2010/files/570_litov_2010.doc).

24. Г. М. Ларионов, И. Е. Вальтц, **О. С. Баяндина**.  
«*Инфракрасные статистические характеристики метанольных мазеров I класса*».  
Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2010 «От эпохи Галилея до наших дней»,  
2010, 12–19 сентября, САО, Нижний Архыз, Россия.  
Тезисы докладов,  
URL: [http://agora.guru.ru/VAK-2010/files/260\\_bayandina.doc](http://agora.guru.ru/VAK-2010/files/260_bayandina.doc).
25. I. E. Val'tts, G. M. Larionov, **O. S. Bayandina**.  
«*Revised version of the class I methanol maser catalog*».  
2010, Archive of electronic publishing of scientific articles,  
URL: <http://arxiv.org/abs/1005.3715>.

## Цитированная литература

- [1] C. F. McKee and E. C. Ostriker, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **45**, 565 (2007).
- [2] C. J. Lada and E. A. Lada, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **41**, 57 (2003).
- [3] F. H. Shu, F. C. Adams, S. Lizano, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **25**, 23 (1987).
- [4] S. Kurtz, R. Cesaroni, E. Churchwell, P. Hofner, et al., in *Protostars and Planets IV* (Book – Tucson: University of Arizona Press; eds Mannings, V., Boss, A.P., Russell, S. S.), p. 299 (2000).
- [5] E. Churchwell, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **40**, 27 (2002).
- [6] F. C. Adams, C. J. Lada and F. H. Shu, *Astrophys. J.* **312**, 788 (1987).
- [7] J. Bally and C. J. Lada, *Astrophys. J.* **265**, 824 (1983).
- [8] S. P. Ellingsen, S. L. Breen, M. A. Voronkov, J. L. Caswell et al., in *Proceedings "Science with Parkes @ 50 Years Young* Ed. R. Braun, p.1, arXiv:1210.2139 [astro-ph.GA] (2012).
- [9] S. P. Ellingsen, M. A. Voronkov, D. M. Cragg, A. M. Sobolev, et al., in *Astrophysical Masers and their Environment*, eds. J. M. Chapman and W. A. Baan, *Proc. IAU Symp.* 242, 213 (2007).
- [10] S. L. Breen and S. P. Ellingsen, in *Cosmic Masers – from OH to H<sub>0</sub>*, eds. R. S. Booth, E.M.L. Humphreys and W.H. T. Vlemmings, *Proc. IAU Symp.* 287, 156 (2012).
- [11] K. Menten, in *Cosmic Masers – from OH to H<sub>0</sub>*, eds. R. S. Booth, E.M.L. Humphreys and W.H. T. Vlemmings, *Proc. IAU Symp.* 287, 506 (2012).
- [12] W. Batrla, H. E. Matthews, K. M. Menten, and C. M. Walmsley, *Nature* **326**, 49 (1987).



- [13] K. M. Menten, in Proc. of the Third Haystack Observatory Meeting "Sky lines Eds. A.D. Haschick & P.T.P. Ho, 119 (1991).
- [14] K. M. Menten, *Astrophys. J.* **380**, L75 (1991).
- [15] D. M. Cragg, K. P. Johns, and P. D. Godfrey, et al., *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **259**, 203 (1992).
- [16] М. А. Воронков, Письма в «Астрон. журн.» **25**, 149 (1999).
- [17] M. A. Voronkov, A. M. Sobolev, S. P. Ellingsen, A. B. Ostrovskii, and A. V. Alakoz, *Astrophys. and Space Sci.* **295**, 217 (2005).
- [18] M. Szymczak, T. Pillai, and K. M. Menten, *Astron. and Astrophys.* **434**, 613 (2005).
- [19] S. L. Breen, S. P. Ellingsen, J. L. Caswell, and B. E. Lewis, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **401**, 2219 (2010).
- [20] S. L. Breen, S. P. Ellingsen, J. L. Caswell, J. A. Green, et al., *Astrophys. J.* **733**, 80 (2011).
- [21] J. L. Caswell, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **289**, 203 (1997).
- [22] M. A. Voronkov, J. L. Caswell, S. P. Ellingsen, and A. M. Sobolev, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **405**, 2471 (2010).
- [23] J. R. Forster and J. L. Caswell, *Astron. and Astrophys.* **213**, 339 (1989).
- [24] M. Felli, F., Palagi, and G. Tofani, *Astron. and Astrophys.* **255**, 293(1992).
- [25] T. K. Sridharan, H. Buether, P. Schike, K. M. Menten, et al., *Astrophys. J.* **566**, 931 (2002).
- [26] S. L. Breen, J. L. Caswell, S. P. Ellingsen, and C. J. Phillips, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **406**, 1487 (2010).
- [27] V. I. Slysh, S. V. Kalenskii, I. E. Val'tts, and R. Otrupcek, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **268**, 464 (1994).
- [28] S. P. Ellingsen, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **359**, 1498 (2005).
- [29] О. С. Баяндина, И. Е. Вальтц, Г. М. Ларионов, *Астрон. журн.* **89**, 611 (2012).
- [30] S. Kurtz, P. Hofner, and C. V. Álvarez, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **155**, 149 (2004).
- [31] О. С. Баяндина, А. В. Алакоз, И. Е. Вальтц, *Астрон. журн.* **91**, 540 (2014).
- [32] V. I. Slysh, I. E. Val'tts, V. Migenes, E. Fomalont, et al., *Astrophys. J.* **526**, 236 (1999).
- [33] В. И. Слыш, М. А. Воронков, И. Е. Вальтц, В. Мигенес и др., *Астрон. журн.* **79**, 1074 (2002).
- [34] L. Kogan and V. Slysh, *Astrophys. J.* **497**, 800 (1998).
- [35] A. Bartkiewicz, M. Szymczak, Y. M. Pihlström, H. J. van Langevelde, et al., *Astron. and Astrophys.* **525**, 120 (2011).
- [36] K. M. Menten, M. J. Reid, P. Pratap, and J. M. Moran, *Astrophys. J.* **401**, L39 (1992).
- [37] D. Hollenbach, M. Elitzur, and C. F. McKee, *Astrophys. J.* **773**, 70 (2013).

- [38] В. И. Слыш, И. Е. Вальтц, С. В. Каленский, В. В. Голубев, *Астрон. журн.* **76**, 892 (1999).
- [39] В. И. Слыш, И. Е. Вальтц, С. В. Каленский, Г. М. Ларионов, *Астрон. журн.* **76**, 751 (1999).
- [40] C. Goddi, L. Moscadelli, A. Sanna, R. Cesaroni, et al., *Astron. and Astrophys.* **461**, 1027 (2007).
- [41] S. Leurini, P. Schilke, K. M. Menten, D. R. Flower, et al. , *Astron. and Astrophys.* **422**, 573 (2004).
- [42] S. Leurini, P. Schilke, F. Wyrowski, K. M. Menten, *Astron. and Astrophys.* **466**, 15 (2007).
- [43] P. Pratap, P. A. Shute, T. C. Keane, C. Battersby, et al., *Astronomical J.* **135**, 1718 (2008).
- [44] B. C. McEwen, Y. M. Pihlström, and L. O. Sjouwerman, *Astrophys. J.* **793**, 133 (2014).
- [45] Y. M. Pihlström, L. O. Sjouwerman, D. A. Frail, M. J. Claussen, et al., *Astronomical J.* **147**, 73 (2014).
- [46] D.M. Cragg, A.M. Sobolev, and P. D. Godfrey, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **360**, 533 (2005).
- [47] Y. M. Pihlström, L. O. Sjouwerman, and V. L. Fish, *Astrophys. J.* **739**, L21 (2011).
- [48] S. D. Price, M. P. Egan, S. J. Carey, et al., *Astron. J.* **121**, 2819 (2001).
- [49] C. J. Cyganowski, B. A. Whitney, E. Holden, E. Braden, C. L. Brogan, E. Churchwell, R. Indebetouw, D. F. Watson, B. L. Babler, R. Benjamin, M. Gomez, M. R. Meade, M. S. Povich, T. P. Robitaille, and C. Watson, *Astron. J.* **136**, 2391 (2008).
- [50] R. M. Crutcher, in *Proc. of the IAU Symp. 227 "Massive Star Birth: a Crossroads of Astrophysics"*, Eds. R. Cesaroni, M. Felli, E. Churchwell and M. Walmsley, Cambridge Univ. Press, p. 98 (2005).
- [51] C. J. Cyganowski, C. Brogan, T. R. Hunter, and E. Churchwell, *Astrophys. J.* **702**, 1615 (2009).
- [52] C. J. Cyganowski, J. Koda, E. Rosolowsky, S. Towers, J. D. Meyer, F. Egusa, R. Momose, and T. P. Robitaille, *Astrophys. J.* **764**, 61 (2013).
- [53] X. Chen, C.-G. Gan, S. P. Ellingsen, J.-H. He, Z.-Q. Shen, and A. Titmarsh, *Astrophys. J.* **206**, 9 (2013).
- [54] I. D. Litovchenko, O. S. Bayandina, A. V. Alakoz, I. E. Val'tts, 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, *Astron. Rep.* **56**, 536 (2012).
- [55] C. J. Cyganowski, C. L. Brogan, T. R. Hunter, and E. Churchwell, *Astrophys. J.* **743**, 56 (2011).
- [56] J. X. Ge, J. H. He, X. Chen, and S. Takahashi, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **445**, 1170 (2014).
- [57] H. Beuther, P. Schilke, T. K. Sridharan, K. M. Menten, C. M. Walmsley, and F. Wyrowski, *Astron. Astrophys.* **383**, 892 (2002).

- [58] S. Kurtz, IAU Symp. 227, Massive Star Birth: A Crossroads of Astrophysics, ed. R. Cesaroni, M. Felli, E. Churchwell & M. Walmsley (Cambridge: Cambridge Univ. Press), 111 (2005).
- [59] S. Kurtz, Journal of the Korean Astronomical Society, vol. **37**, 265 (2004).
- [60] K. M. Menten, in Skylines, Proceedings of the Third Haystack Observatory Meeting, ed. A. D. Haschick & P. T. P. Ho (San Francisco: ASP), 119 (1991).
- [61] S. P. Ellingsen, S. L. Breen, M. A. Voronkov, J. L. Caswell, X. Chen, and A. Titmarsh, 2012, in Proceedings "Science with Parkes @ 50 Years Young 31st October – 4th November 2012, Parkes, NSW, ed. R. Braun, pp. 1-4 (2012)  
<http://www.atnf.csiro.au/research/conferences/Parkes50th/ProcPapers/ellingsen.pdf>.
- [62] C. J. Lada, T. R. Gull, C. A. Gottlieb, and E. W. Gottlieb, *Astrophys. J.* **203**, 159 (1976).
- [63] S. Deguchi, D. Tafoya, and N. Shino, *Publ. Astron. Soc. Japan* **64**, 28 (2012).
- [64] Г. М. Рудницкий, Е. Е. Лехт, **О. С. Баяндина**, И. Е. Вальтц, Э.Р. Хан, *Астрономический журнал*, **93**, с. 121-136 (2016).
- [65] C. J. Cesarsky, D. A. Cesarsky, E. Churchwell, and J. Lequeux, *Astron. and Astrophys.* **78**, 33 (1978).
- [66] K. Sugitani, Y. Fukui, A. Mizuni, and N. Ohashi, *Astrophys. J.* **342**, L87 (1989).
- [67] B. A. Wilking, R. D. Schwartz, L. G. Mundy, and A. S. B. Schultz, *Astron. J.* **99**, 344 (1990).
- [68] M. T. Beltrán, J. M. Girart, R. Estalella, P. T. P. Ho, and A. Palau, *Astrophys. J.* **573**, 246 (2002).
- [69] A. Fuente, T. Castro-Carrizo, T. Alonso-Albi, M. T. Beltrán, C. Ceccarelli, B. Lefloch, C. Codella, and P. Caselli, *Astron. and Astroph.* **507**, 1475 (2009).
- [70] M. T. Beltrán, F. Massi, F. Fontani, C. Codella, and R. López *Astron. and Astroph.* **542**, L26 (2012).
- [71] A. L. Gyulbudaghian, L. F. Rodríguez, and S. Curiel, *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica* **20**, 51 (1990).
- [72] G. Tofani, M. Felli, G. B. Taylor, and T. R. Hunter, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **112**, 299 (1995).
- [73] V. Migenes, S. Horiuchi, V. I. Slysh, I. E. Val'tts, V. Golubev, P. G. Edwards, E. B. Fomalont, R. Okayasu, P. J. Diamond, T. Umemoto, and M. Inoue, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **123**, 487 (1999).
- [74] V. Slysh, I. Val'tts, V. Migenes, E. Fomalont, H. Hirabayashi, M. Inoue, and T. Umemoto, *Astrophys. J.* **526**, 236 (1999).
- [75] N. A. Patel, L. J. Greenhill, J. Herrnstein, et al. *Astrophys. J.* **538**, 268 (2000).