

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

На правах рукописи

Щуров Михаил Аристотелевич

**ТЕПЛОВОЕ И МАЗЕРНОЕ СВЕЧЕНИЕ
МЕЖЗВЕЗДНОГО ГАЗА В ТЕМНЫХ
МОЛЕКУЛЯРНЫХ ОБЛАКАХ**

Специальность 01.03.02
астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в Астрокосмическом центре (АКЦ) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева (ФИАН) Российской Академии наук (РАН), г. Москва.

Научный руководитель:

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

Официальные оппоненты:

Зинченко Игорь Иванович
Заведующий отделом, д.ф.-м.н.,
(Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики
Российской академии наук)

Соболев Андрей Михайлович
старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.,
ведущий специалист (Коуровская
астрономическая обсерватория им. К.А.
Бархатовой, ведущий инженер)

Ведущая организация:

Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки «Крымская
астрофизическая обсерватория РАН»
(ФГБУН «КрАО РАН»)

Защита состоится 30 июня 2022 г. на заседании диссертационного совета Д002.023.01 Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН) в конференц-зале Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) по адресу: Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, ИКИ РАН, подъезд А2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН по адресу: г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, с авторефератом диссертации – по адресу на сайте <http://asc-lebedev.ru/index.php?dep=9&dissov=11>

Автореферат разослан 30.03.2022 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, кандидат физико-математических
наук

Н.Н. Шахворостова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы и анализ современного состояния исследований.

Звезды образуются в результате гравитационного коллапса и фрагментации молекулярных облаков (Walmsley 1991, Cesaroni et al. 1994, Kurtz et al. 2000). Основные сведения о процессах звездообразования изложены, например, в обзорах (Shu et al. 1987, Bergin & Tafalla 2007, McKee & Ostriker 2007, Zinnecker & Yorke 2007 и ссылки в этих работах).

Процесс зарождения звезд малой массы ($<1-2 M_{\odot}$) изучен детально: их много, они расположены в близких окрестностях солнечной системы, время существования в стадии «до главной последовательности» длительное: для звезд Т Tauri от $\sim 1-3 \times 10^6$ до $\sim 10^8$ лет (Shu et al. 1987, Bachiller 1996, Duvert et al. 2000, Evans et al. 2009). В образовании звезд промежуточной массы (IMYSO, $2-8 M_{\odot}$) имеется одновременно сходство и различие как с образованием мало-массивных звезд, так и массивных (Alonso-Albi et al. 2009, Crimier et al. 2010, de Villiers et al. 2014).

Формирование массивных ОБ-звезд ($>8 M_{\odot}$), несмотря на то, что в процессе своего развития они провоцируют зарождение и развитие менее массивных звезд, т.е. играют принципиальную роль в эволюции молекулярных облаков (Kurtz 2005a,b, Reiter et al. 2011, Zinnecker & Yorke 2007), изучено хуже по объективным причинам (см. обзор Bally et al. 2005). Они, как правило, более удаленные, поэтому их исследования необходимо проводить с высоким угловым разрешением, реже встречаются и глубоко погружены в турбулентные непрозрачные слои родительского облака.

Протозвезды большой массы быстро проходят стадию «до главной последовательности» (PMS) - за $<\sim 10^4$ лет (Shepherd 2005), иногда даже без оптической фазы, и попадают на начальную часть главной последовательности нулевого возраста (ZAMS), будучи еще погруженными в пыль и находясь в стадии аккреции (Palla et al. 2005).

Зачастую наличие процесса формирования массивной звезды в молекулярном облаке можно заметить только благодаря наличию такого крупномасштабного явления, как биполярное истечение вещества, которое наблюдается в линиях различных молекул при сбросе излишков материи, падающей на протозвездный аккрецирующий диск (Kim & Kurtz 2006).

В то же время эволюционное состояние среды, в которой формируются протозвезды можно оценить, исследуя излучение ее основных составляющих. В то же время эволюционное состояние среды, в которой формируются протозвезды можно оценить, исследуя излучение ее основных составляющих. Межзвездная среда – это пыль со сложным химическим составом, межзвездный газ, который содержит, в основном, смесь молекулярного и нейтрального водорода с примесью остальных элементов в атомарном и молекулярном состоянии и космические лучи, оказывающие влияние на эту среду в различных аспектах. Прогрев среды зарождающейся протозвездой способствует испарению молекул с поверхности пылинок и увеличивает количество свободных молекул, которые при распаде уровней, возбужденных тем же инфракрасным излучением от протозвезд и столкновениями с молекулярным водородом, излучают в разных диапазонах длин волн. В настоящее время в космосе обнаружено более 260 молекул (<https://cdms.astro.uni-koeln.de/classic/molecules> - Кёльнский каталог молекул, обнаруженных в космосе) – в основном, это результат работы космического проекта Spitzer (<https://www.spitzer.caltech.edu/> - сайт проекта Spitzer). Множество молекулярных линий остается неотожествленными. Информацию о состоянии межзвездной среды в окрестности протозвезд дает изучение излучения молекул, находящихся в состоянии

локального термодинамического равновесия (т.е. в устойчивых условиях, при которых не меняются макроскопические интегральные параметры системы - такие, как температура, плотность, давление. Особую роль в обнаружении этих молекул и изучении их свойств играют телескопы миллиметрового диапазона, в частности телескоп IRAM-30m - один из самых больших и чувствительных на сегодняшний день миллиметровых телескопов. Он оснащен гетеродинными приемниками и камерами континуума, которые работают в диапазонах 3, 2, 1 и 0,9 мм. Спектроскопия высокого разрешения позволяет изучать процессы образования звёзд и химических элементов в молекулярных облаках (подробнее см. главу 1).

При этом особую роль в идентификации наличия протозвезд любой массы в области звездообразования играет еще один признак, а именно, вкрапления в облако скоплений мазерных конденсаций, дающих молекулярное мазерное излучение. Космические мазеры формируются в наиболее плотных структурах гигантских облаков, в которых газ находится в молекулярном состоянии. Мазерное излучение на молекулах представляет собой одно из самых распространенных явлений в межзвездной среде.

Мазеры встречаются как на ранних стадиях развития молекулярных облаков, в которых при хаотическом сжатии образуются первичные сгустки (cores) и скопления материи (clumps) (Andre et al. 2000, S. Kurtz 2004a, Cesaroni 2005 и ссылки в этих работах), так и в процессе формирования более структурированных областей зарождения протозвезд и впоследствии - в атмосферах вокруг молодых звезд и непосредственно в оболочках самих звезд разных спектральных классов.

В настоящее время существуют достаточно надежно обоснованные варианты построения соответствия эволюционной шкалы развития областей звездообразования и оценок времени жизни мазеров (см., например, Ellingsen et al. 2007, Ellingsen et al. 2012, Breen & Ellingsen 2012).

Наиболее распространенные мазеры наблюдаются в линиях молекул воды H_2O , гидроксила OH и метанола CH_3OH . Мазеры на молекулах воды - самые мощные: $H_2O \sim 10^{27}-10^{33}$ эрг/с, для сравнения: OH (на частотах 1665 и 1667 МГц) $\sim 10^{27}-10^{30}$ эрг/с, $CH_3OH \sim 10^{27}$ эрг/с (Варшалович 1986). Соответственно, в единицах спектральной плотности потока: например, в мазерах H_2O : W3 (OH) 4000 Ян, Ori KL 3000 Ян, Sgr B2 1000 Ян, W 49 N 100000 Ян, W 49 S 550 Ян, W 51 M 3000 Ян, Cep A 4700 Ян (см. каталог Cesaroni et al. 1988); в мазерах OH в отдельных пространственных компонентах: W 49 S на 1665R 230 Ян, W 49 N на 1665L 110 Ян, W 51 M 1665R 167 Ян, W3 (OH) 1665R 200 Ян, NGC 6334 F 1665L 182 Ян, G 351.775-0.538 1665L 777 Ян (обзор на VLA для $\delta > -45$ град, Argon et al. 2000), DR 21 (OH) 237 Ян (Kurtz et al. 2004). В самом мощном метанольном мазере I класса наблюдается около 500 Ян в M 8 E (Slysh et al. 1994), в самых мощных метанольных мазерах II класса - 3880 в W3 (OH) 3880 Ян, 3910 Ян в NGC 6334 F и 4870 Ян в G 9.62+0.19 (Menten 1991).

Мазеры на молекулах воды встречаются на всех стадиях эволюции областей звездообразования и, как правило, имеют наибольшее число пространственных компонентов (мазерных пятен) в любой исследуемой области и наибольшее число деталей в наблюдаемых спектрах. Кроме того, они имеют очень маленький размер – могут быть около 1 а.е. (Hollenbach et al. 2013), для сравнения: размер пространственных компонентов мазеров OH и метанольных мазеров II класса может быть около 3 а.е. (Menten et al. 1992), отдельных пятен метанольных мазеров I класса - от 500 до 1 000 а.е. (Kogan and Slysh 1998).

Мазеры формируются под воздействием различных механизмов возбуждения уровней молекул. Например, накачка мазеров H_2O – столкновительная (Beuther et al. 2002), осуществляется в конденсациях с повышенной плотностью вещества при столкновениях с молекулами и атомами окружающей среды, а также в атмосферах звезд, мазеров. Накачка мазеров OH в главных линиях – радиативная под воздействием инфракрасного потока от протозвезд (см, например, Moore et al. 1998, Slysh et al. 1994b,

1997, а также обсуждения и ссылки в этих работах). Накачка мазеров метанола в среде, окружающей протозвезду – радиативно-столкновительная (метанольные мазеры II-го класса), в областях, более удаленных от протозвезд - чисто столкновительная (метанольные мазеры I-го класса). (Batra et al. 1987, Menten 1991).

Ширина наблюдаемых спектральных линий и переменность их интенсивности, а также размер области, в которой формируется и излучает мазер, и размеры его пространственных составляющих являются прямым указанием на то, с каким типом объекта и окружающей его среды или с каким размером и типом уже существующей или будущей протозвезды связана исследуемая мазерная область. По этой причине мазерные источники являются, в частности, одними из основных объектов, для которых осуществляется длительный систематический мониторинг на одиночных телескопах (см., например, Felli et al. 2007, Lekht et al. 2011) и пространственная структура которых интенсивно исследуется на интерферометрических системах – от самых первых (см., например, Migenes et al. 1999) до самых современных (см., например, Bayandina et al. 2019).

Важной особенностью мазеров H_2O , кроме их яркости, является то, что они вывечиваются в наиболее приемлемом для наблюдений с Земли диапазоне сантиметровых длин волн, которому не мешает земная атмосфера. Тем не менее, предпочтительнее проводить такие наблюдения в высокогорных районах, но особым преимуществом обладают исследования с космическими аппаратами. Такие наблюдения обеспечивают высокое угловое разрешение и выявляют структуры, позволяющие установить размеры коллапсирующих прото-образований, соответствующие именно размерам протозвезд.

Улучшение возможностей интерферометров достигается как за счёт увеличения чувствительности самих телескопов, так и за счёт увеличения расстояния между элементами интерферометра, что напрямую связано с их разрешающей способностью. Наилучшие результаты возможны при сочетании хорошо разнесенной по широте и долготе наземной сети телескопов с телескопом, находящимся на космической орбите.

Именно таким телескопом является космический радиотелескоп миссии «РадиоАстрон» (<http://www.asc.rssi.ru/radioastron/index.html>). Орбитальная космическая обсерватория «РадиоАстрон» была запущена 18 июля 2011 г. с космодрома «Байконур» (Республика Казахстан) для изучения астрономических объектов различных типов с беспрецедентно высоким угловым разрешением (см. Kardashev et al. 2013). Обсерватория работала в четырёх диапазонах от метровых до сантиметровых длин волн: P – 92 см, L – 18 см, C – 6.2 см, K – 1.3 см (информация с веб-сайта миссии «РадиоАстрон») и в сочетании с наземными телескопами позволяла проводить измерения с предельно высоким угловым разрешением до 7 мксек дуги (Baan et al. 2017). 10-м космический телескоп (Space Radio Telescope, SRT) был установлен на платформе «Навигатор», разработанной в НПО им. Лавочкина
[\urlhttps://link.springer.com/content/pdf/10.1134/S0038094612070143.pdf](https://link.springer.com/content/pdf/10.1134/S0038094612070143.pdf). В январе 2019 г. обсерватория завершила свою работу -
[\urlhttp://www.asc.rssi.ru/radioastron/news/news1/ru/news1_36_ru.pdf](http://www.asc.rssi.ru/radioastron/news/news1/ru/news1_36_ru.pdf).

Цель работы

Целью данной работы является исследование двух темных облаков – L379 - для более полного, чем это было сделано ранее, определения молекулярного состава и физических параметров газа в области L379 IRS1, основываясь на особенностях излучения молекул в тепловых линиях в этом источнике, и темной отражательной туманности 2071 – для изучения тонкой пространственной структуры распределения мазерных сгустков и более глубокого понимания строения области NGC 2071 IRS1,

используя возможности сверхвысокого пространственного разрешения, которое достигается на наземно-космическом интерферометре «РадиоАстрон».

Конкретные задачи и методы исследований

- 1) Определение молекулярного состава газо-пылевого облака L379 IRS1 по данным наблюдений на международном радиотелескопе Института Миллиметровой Астрономии (IRAM) в трех высокочастотных диапазонах - для эпох 2003 и 2007 гг.;
- 2) Изучение области L379 IRS1 в различных направлениях методами вращательных диаграмм и большого градиента скорости;
- 3) Сравнение параметров горячего и холодного газа в исследуемой области с аналогичными параметрами в других областях звездообразования;
- 4) Корреляционная обработка данных интерферометрических наблюдений мазера H₂O на частоте 22.2280 ГГц в источнике NGC 2071 IRS1, полученных в рамках работы наземно-космического интерферометра «РадиоАстрон» на FX-корреляторе АКЦ ФИАН с использованием собственной программы LineViewer, позволяющей оптимизировать и сократить время обработки сеансов мазерных интерферометрических наблюдений;
- 5) Получение, калибровка и анализ автокорреляционных и кросс-корреляционных спектров наблюдений области NGC 2071 IRS1 с помощью стандартных задач пакета AIPS;
- 6) Построение карты распределения мазерных пятен исследуемого источника NGC 2071 IRS1 и анализ полученных данных.

Научная новизна работы

- 1) Новизна работы состоит в том, что в широком диапазоне частот впервые были определены химические и уточнены физические параметры в области звездообразования L379 IRS1, что позволило уточнить пространственную структуру данной области, а также её возраст.
- 2) Новизна и уникальность исследований мазерной области в туманности NGC 2071 связана с тем, что для нее впервые в мире представлена обработка данных для мазерных компонентов в источнике NGC 2071 IRS1, полученных на наземно-космических базах со сверхвысоким угловым разрешением, которое обеспечил радиоинтерферометр «РадиоАстрон».
- 3) Новизна программы «LineViewer» состоит в том, что на данный момент это единственная программа, пригодная для обработки файлов формата коррелятора АКЦ, которая позволяет провести наглядный анализ промежуточного результата и его корректировку в процессе обработки данных наблюдений в проекте «РадиоАстрон», чтобы получить релевантные параметры для улучшения или обнаружения корреляции в спектральных линиях.

Практическая ценность работы

- 1) Составленный каталог зафиксированных в L379 IRS1 линий излучения различных молекул для всех наблюдавшихся направлений имеет важную практическую ценность: он позволит использовать полученные результаты для уточнения модели источника и будущих наблюдений.
- 2) Получена новая информация о тонкой пространственной структуре источника NGC 2071 IRS1, впервые - с использованием наземно-космической РСДБ. Несомненная практическая ценность работы заключается в том, что соискатель сумел отработать методику обработки сильно искажённых данных спектральных измерений, полученных на 64-м Калязинском радиотелескопе (РФ), доказать и наглядно продемонстрировать возможность его (и подобных ему телескопов) полноценного участия в исследовании астрономических объектов дальнего космоса.

На защиту выносятся следующие основные положения:

- 1) **При исследовании химического состава источника L379 IRS1 в тепловых линиях на 30-м радиотелескопе IRAM в диапазонах длин волн 1-3 мм получены следующие результаты:**
 - 1.1) **Обнаружено излучение в линиях 24-х молекул и определена кинетическая температура газа исследуемой области по линиям молекул метанола и метилцианида, она составила 40-50 К. Обнаружено, что кроме «теплого» газа с температурой 40-50 К, в L379 IRS1 существует более «горячий» компонент, который проявляется наличием высоковозбужденных линий метанола и метилцианида. Показано, что обилие метанола и метилцианида составило 10^{-9} и 10^{-11} , соответственно;**
 - 1.2) **Показано, что молекулярный состав спокойного газа очень близок к составу другой области образования звезд большой массы - DR21(OH), однако лучевая концентрация двуокиси серы в L379 IRS1, по крайней мере, в 20 раз меньше, чем в DR21(OH). Отношения содержаний SO_2/CS и SO_2/OCS , которые можно использовать в качестве химических часов, в L379 IRS1 оказались намного меньше, чем в DR21(OH). Таким образом, область звездообразования L379 IRS1 вероятно моложе, чем DR21(OH) (менее 10^5 лет);**
- 2) В рамках выполнения научной программы наземно-космического интерферометра «РадиоАстрон» **создана специализированная программа «LineViewer»**, предназначенная для оптимизации процесса корреляционной и посткорреляционной обработки на всех этапах в сеансах **мазерных интерферометрических наблюдений**, и, как следствие, **ускорения доступа для научного сообщества к научным данным**. При обработке сеанса наблюдений источника NGC2071 с её помощью:
 - 2.1) **Уточнены геометрические задержки телескопов (1 и 2 производные), выявлены кросс-корреляционные отклики на наземных базах, зафиксирован кросс-корреляционный отклик на наземно-космических базах, найдено оптимальное время когерентности для дальнейшей обработки сеанса;**

- 2.2) **Найдено оптимальное спектральное разрешение; получена информация о количестве спектральных компонентов** на этапе предварительной обработки, их положение, ширина, амплитуда, SNR, скорости на луче зрения как в авто-так и в кросс-спектрах;
- 3) **Проведена полная обработка данных наблюдений мазера H₂O на частоте 22.2280 ГГц в темной отражательной туманности NGC 2071 в направлении инфракрасного объекта IRS1 на наземно-космическом интерферометре «Радио-Астрон».** На основании корреляционного анализа получены следующие результаты:
- 3.1) **Построена карта распределения мазерных пятен, на которой в размере ~(100 x 100) мсек дуги, т.е. ~(40 x 40) а.е. при расстоянии до туманности 390 пк, присутствует 13 пространственных компонентов. Интервал скоростей на луче зрения этих компонентов составляет (4.7 - 20.5) км/с при ширине спектральных деталей по половине мощности интенсивности FWHM = (0.2 - 0.6 км/с), плотность потока F_η варьируется в пределах от ~4 Ян до ~29 Ян. Лестки обнаружены на всех наземных базах;**
- 3.2) **Для одного пространственного компонента, имеющего лучевую скорость 14.3 км/с, обнаружен интерференционный отклик на наземно-космических базах на уровне надежности 6σ. На основании анализа зависимости функции видности от величины проекций баз предложена двухкомпонентная модель пространственной структуры этого объекта с размерами протяженной и компактной составляющей в угловой мере 4 мсек и 0.06 мсек, т.е. 1.56 а.е. (с неопределенностью 10%) и 0.023 а.е. (с неопределенностью 50%), соответственно.**

Личный вклад автора

- 1) Соискатель самостоятельно провёл полную обработку данных наблюдений источника L379 IRS1, выполненных в 2003 и 2007 г.г. на международном 30-м телескопе IRAM в программе CLASS программного пакета GILDAS. Соискатель написал на языке C++ программный код, который, используя данные, полученные в результате обработки в CLASS, рассчитывает лучевые концентрации молекул. С его помощью были рассчитаны все лучевые концентрации для всех 24-х молекул, наблюдавшихся в этих сессиях. Дополнительно на языке C++ была написана утилита, составляющая для программы представления спектров GREG (GILDAS) скрипты для построения вращательных диаграмм. По результатам обработки в CLASS соискатель построил в GREG вращательные диаграммы для линий метанола и метилцианида.
- 2) Соискатель разработал алгоритм и написал программный код для утилиты «LineViewer», предназначенной для упрощения и ускорения процедуры получения корреляции в мазерных интерферометрических наблюдениях.
- 3) Несмотря на малую длительность эксперимента и недостаточное заполнение UV-плоскости, тщательным подбором параметров корреляционной и посткорреляционной обработки, соискатель получил полноценный научный материал с набором всех требуемых для дальнейшего астрофизического

анализа параметров пространственного распределения мазерных деталей и их моделей.

Достоверность результатов

Основные результаты, которые выносятся на защиту, представлены в Заключении. 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.

Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы

- 1) **Щуров М.А.**, Каленский С.В.
Исследование области образования звезд большой массы L379 IRS1 в радиолиниях метанола и других молекул
Международная Конференция Научного Совета общей физики и Астрономии АКЦ ФИАН «Звздообразование и планетообразование. Наблюдения, теория, численный эксперимент»
12 – 13 ноября 2019 г., Россия, Москва, АКЦ ФИАН \ \ Устный доклад
- 2) **Щуров М.А.**, Вальтц И.Е., Шахворостова Н.Н.
РадиоАстрон. Мазерные линии H₂O и протопланетная система в темной отражательной туманности NGC 2071
XVII Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», посвященная Дню космонавтики
30 сентября – 02 октября 2020 г., Россия, Москва, ИКИ РАН \ \ Устный доклад
- 3) **Щуров М.А.**, Рудницкий А.Г.
Программа «LineViewer»: первичная обработка данных наблюдений космических мазеров в проекте «РадиоАстрон»
Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2020»
10 – 27 ноября 2020 г., Россия, Москва, МГУ \ \ Устный доклад
- 4) **Щуров М.А.**, Вальтц И.Е., Шахворостова Н. Н.
VLBI исследования в проекте «Радиоастрон»: структура мазера H₂O в NGC 2071 IRS 1
Международная Конференция Научного Совета общей физики и Астрономии АКЦ ФИАН «Звздообразование и планетообразование. Наблюдения, теория, численный эксперимент»
10 – 11 ноября 2020 г., Россия, Москва, АКЦ ФИАН \ \ Устный доклад
- 5) **Щуров М.А.**, Рудницкий А.Г.
Экспресс-программа «LineViewer» для первичной обработки интерферометрических данных в проекте «РадиоАстрон»

Международная Конференция Научного Совета общей физики и Астрономии АКЦ ФИАН «Звездообразование и планетообразование. Наблюдения, теория, численный эксперимент»
10 – 11 ноября 2020 г., Россия, Москва, АКЦ ФИАН \ \ Устный доклад

- 6) **Щуров М.А.**, Вальтц И.Е., Шахворостова Н.Н.
NGC 2071 в космическом проекте «РадиоАстрон»: пространственное распределение мазерных пятен H₂O '
49-я студенческая научная конференция «Физика Космоса»
27 - 31 января 2021 г., Россия, Екатеринбург, УРФУ \ \ Устный доклад
- 7) **Щуров М.А.**, Рудницкий А.Г.
Программа LineViewer пакета Astro Space Locator (ASL) для построения и обработки усредненных спектров
49-я студенческая научная конференция «Физика Космоса»
27 - 31 января 2021 г., Россия, Екатеринбург, УРФУ \ \ Постерный доклад
- 8) **Щуров М. А.**, Каленский С. В.
Исследование области звездообразования L379 по радиолиниям метанола и других молекул
Конференция «Идеи С.Б. Пикельнера и С.А. Каплана и современная астрофизика»
8-12 февраля 2021, Россия, Москва, ГАИШ МГУ \ \ Устный доклад

Публикации

Все результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК, и в российских и зарубежных международных конференциях. Всего опубликовано 4 научных работы.

Публикации:

- 1) С. В. Каленский, **М. А. Щуров**
Исследование области образования звезд большой массы L379IRS1 в радиолиниях метанола и других молекул
Астрономический журнал. - 2016. - Т. 93, № 4. – стр. 409-432.
- 2) **М. А. Щуров**, И. Е. Вальтц, Н. Н. Шахворостова
Структура мазера H₂O в NGC 2071 IRS 1 по наблюдениям на наземно-космическом радиоинтерферометре “Радиоастрон”
Астрономический журнал, 2021, Т. 98, № 7, стр. 531-549
- 3) **Щуров М.А.**, Авдеев В.Ю., Гирин И.А., Костенко В.И., Лихачёв С.Ф., Лодыгин В.А., Рудницкий А.Г., Шайхутдинов А.Р.
Программа Lineviewer пакета Astro space locator (ASL) для построения и обработки усреднённых спектров
Краткие сообщения по физике Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук, 2019. - № 4. - стр. 38-45.
- 4) S. F. Likhachev, I. A. Girin, V. Yu. Avdeev, A. S. Andrianov, M. N. Andrianov, V. I. Kostenko, V. A. Lodigin, A. O. Lyakhovets, I. D. Litovchenko, A. G. Rudnitskiy, **M. A. Shchurov**, N. D. Utkin, V. A. Zuga

Объём и структура работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и двух приложений. Полный объём диссертации составляет 167 страниц, включая 28 рисунков и 8 таблиц. Список литературы содержит 104 наименования. В главах 1–3 последовательно представлены работы, соответствующие направлениям исследования, которые представлены выше.

Краткое содержание диссертации

Глава I. Исследование области образования звезд большой массы L379 IRS 1 в радиотелескопах метанола и других молекул.

Представлены результаты спектральных наблюдений области образования звезд большой массы L379 IRS1 (IRAS18265–1517), проведенные на международном 30-м радиотелескопе (IRAM) в семи полосах частот в диапазонах длин волн 1 мм, 2 мм и 3 мм.

По результатам обработки в программе CLASS (Continuum and Line Analysis Single-dish Software, входит в программный пакет GILDAS, разработанного в IRAM для анализа спектральных наблюдений на одиночных телескопах

(<https://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS/>) и при помощи самостоятельно написанной автором на языке C++ программы RCP были рассчитаны лучевые концентрации всех обнаруженных соединений (24 молекулы). Для нескольких из них (CH₃OH – метанол, CH₃CN – метилцианид, CH₃OCH₃ - диметилэфир) дополнительно были построены вращательные диаграммы, которые позволили точнее определить температуру спокойного «тёплого» газа в значении лучевых концентраций этих молекул и уточнить физические параметры в исследуемом источнике.

Наиболее богатый молекулярный состав зафиксирован в направлении -4'', +20'' относительно координат IRAS18265–1517 (RA(2000) = 18:29:24.8, DEC(2000) = -15:15:49.0). Здесь обнаружены линии 21-ой молекулы. Данное направление соответствует пику излучения на длине волны 800 мкм. Излучение 19 молекул найдено в направлениях -10'', +15'' и -8'', -15''. Согласно более ранним работам, именно в этих трёх направлениях находится наиболее горячий газ.

Для метанола вращательные диаграммы строились для трёх серий линий на частотах 145, 157 и 241 ГГц в двенадцати направлениях. Анализируя полученные при помощи вращательных диаграмм данные, для этих направлений были определены вращательная температура метанола, кинетическая температура газа, его плотность, а также обилие метанола.

Поскольку энергия основного электронного уровня E-метанола несколько выше, чем у A-метанола, его, как правило, образуется несколько меньше ($[E]/[A] \sim 0.7$). Мы пытались оценить величину $[E]/[A]$ в L379 IRS1 при помощи программы RADEX (часть Лейденской атомной и молекулярной базы данных LAMDA (<https://home.strw.leidenuniv.nl/~moldata/radex.html>)) методом большого градиента скорости. Согласно нашим наблюдениям, в направлении -20'', +38'' эта величина составила $[E]/[A] \sim 1$ для переходов 5_k – 4_k и 3_k – 2_k на частотах 241 ГГц и 145 ГГц, соответственно. Превышение указанного соотношения можно объяснить погрешностями наблюдений (недостаточностью спектрального разрешения) при рассмотрении линий переходов 3₀-2₀A⁺ и 3₋₁-2₋₁E, однако данный вопрос нужно исследовать детальнее.

Метилцианид является одним из основных инструментов поиска горячих ядер, поскольку вокруг молодых протозвезд его содержание повышается за счёт различных

реакций (испарение с мантий пылинок и т.д.), проходящих при высоких температурах (>100 К). Вращательные диаграммы, построенные по линиям метилцианида, показали, что вращательная температура спокойного газа меняется в пределах 43-55 К, что соответствует температуре, определённой по линиям метанола. Это значение совпадает с результатами более ранних работ. Очевидно, что узкие линии метилцианида отслеживают тот же газ, что и линии метанола. Компонент, ответственный за широкие линии, которые наблюдались в переходах 8₆-7₆ и 8₇-7₇, должен иметь более высокую температуру, чтобы возбуждать такие уровни. Нами обнаружено излучение для одной из этих линий в направлениях 0'', +30'' и -4'', +20'' и для обеих линий в направлениях 0'', -15'' и -8'', -15''. Это является свидетельством того, что в данных направлениях могут присутствовать компактные горячие ядра.

Существование горячего газа подтверждает наличие в спектрах линий молекул, возникающих в горячих областях (например, CH₃OCH₃ - диметилэфир), мазерного излучения на молекулах воды (см., например, Пащенко и др. 1994, Пащенко и др. 2005) и метанольных мазеров II класса на частоте 6.7 ГГц (Walsh et al. 1998).

В спектрах обнаружены бленды линий излучения диметилэфира по направлениям -8'', -15'' и -4'', +20''. Для каждого из этих направлений была построена вращательная диаграмма, по которым была определена температура газа 44 К и 33 К, соответственно. Такая низкая вращательная температура может объясняться как вкладом в излучение от спокойного газа, так и тем, что кинетическая температура газа может быть значительно выше вращательной.

Анализ химического состава, лучевых концентраций C¹⁸O и обнаруженных в L379IRS1 молекул показывает хорошее совпадение со значениями, полученными при более раннем исследовании другой области - DR21(OH), за исключением молекулы двуокиси серы. В L379 IRS1 её концентрация значительно (~ 20 раз) ниже, чем в DR21(OH). В то же время концентрация других серосодержащих молекул (напр. CS, OCS и т.д.) отличается всего вдвое, то есть источник L379 IRS1 может быть химически моложе, чем DR21(OH), и его возраст составляет $<10^5$ лет.

Глава II. NGC 2071 (IRS1) в проекте Радиоастрон: Пространственное распределение мазерных пятен H₂O.

Область звездообразования NGC 2071 в созвездии Ориона была одной из главных целей исследования межзвездных мазеров H₂O в рамках международной космической миссии «РадиоАстрон» (<http://www.asc.rssi.ru/radioastron/index.html>). Она содержит два скопления вокруг молодых источников NGC 2071 IRS 1 (более развитый) и NGC 2071 IRS 3 (менее развитый), которые ранее наблюдались на частоте 22 ГГц в радиоконтинууме и в излучении вращательного перехода между уровнями (6_{1,6} - 5_{2,3}) молекулы H₂O. Мазеры на молекулах воды, радиоджеты, крупномасштабные исходящие потоки и компактный протозвездный диск прослеживаются в обоих источниках (см., например, Trinidad et al. 2009, ApJ 706, 244 и ссылки в этой работе).

70-минутный сеанс наблюдений проводился 11 января 2014 года с использованием 10-метрового космического радиотелескопа (SRT) и в качестве наземной сети 64-метрового радиотелескопа в г. Калязин (Московская область, Россия), 32-метрового радиотелескопа в г. Торунь (Польша) и 32-м радиотелескопа в г. Медичина (Италия). Наблюдения проводились на частоте мазера H₂O 22.2280 ГГц с шириной полосы записи 16 МГц (~ 215 км/с). Данные обрабатывались программным коррелятором в Астрокосмическом центре Физического института им. Лебедева (АКЦ ФИАН, Москва, Россия) с использованием специализированной программы LineViewer в полосе из 2048 каналов, что обеспечило разрешение по частоте 7.81 кГц (т.е. 0,11 км с⁻¹). Синтезированная диаграмма наземной сети составляла (0.006 x 0.0006) угловых секунд. Координаты источника NGC 2071 IRS1 RA (2000) = 0^h47^m04^s.758, DEC (2000) = 00°21'42".700 были использованы в качестве фазового центра.

Корреляция в рассмотренных наблюдениях была обнаружена на всех проекциях баз. Анализ структуры источника, наблюдаемой с помощью наземной сети (калибровка и визуализация), выполнялся с помощью стандартных задач AIPS (<http://www.aips.nrao.edu>) и программы CLASS, которая использовалась для аппроксимации профиля спектральной линии функцией Гаусса (<http://www.iram.fr/~gildas/dist/index.html>). Амплитудно-калиброванные авто- и кросскорреляционные спектры, были получены с помощью задачи ANTAB (по данным о температурах системы антенн, предоставленных обсерваториями). Фазовая калибровка была выполнена при помощи задачи FRING относительно одной из самых ярких и наиболее удаленных от центральной части спектра детали на скорости 20.5 км с^{-1} . Изображения были получены для 13 мазерных пятен в 6 деталях кросскорреляционного спектра.

Для обнаружения сверхкомпактных структур со сверхвысоким угловым разрешением, обеспечиваемым наземно-космической проекцией баз, коррелированные данные были проанализированы также с использованием программного пакета PIMA (<http://astrogeo.org/pima/>). Слабая корреляция была обнаружена на проекции базы 2.9 ED между радиотелескопами SRT-Медицина и SRT-Торунь только для одной детали на $V_{\text{LSR}} = 14.3 \text{ км с}^{-1}$.

Анализируя поведение зависимости величины амплитуды функции видности от величины проекции базы для этого мазерного пятна на $V_{\text{LSR}} = 14.3 \text{ км / с}$, было показано, что наилучшее приближение достигается в двухкомпонентной модели, состоящей из протяжённого и компактного компонентов мазерного излучения. Получены оценки размеров этих компонентов, соответственно: 1.56 а.е. (что сопоставимо с размером орбиты Земли) с погрешностью 30% и 0.023 а.е. (приблизительно размер звезды) с погрешностью 50 %. Столь большая ошибка в определении размера компактного компонента объясняется малым временем наблюдения и отсутствием промежуточных баз.

Параметры и результаты обработки представлены в виде спектров, карт и суммированы в таблице.

Глава III. Программа «LineViewer»: Программа LineViewer пакета astro space locator (ASL) для построения и обработки усреднённых спектров

Представлена работа экспресс-программы «LineViewer», ориентированной на первичную обработку спектров галактических и внегалактических мазеров и визуализации данных наблюдений, полученных с участием космического радиотелескопа SRT-10 (проект «Радиоастрон»). Программа создана в рамках специального пакета ASL («Astro Space Locator») в числе подпрограмм, разработанных в АКЦ ФИАН с целью организации наиболее оптимальной работы собственного коррелятора, обслуживающего проект.

LineViewer написана на языке C++ и предназначена:

- 1) для корректировки полосы пропускания сигнала,
- 2) для построения и анализа усреднённых по времени и частоте интерференции спектров мазерных источников.
- 3) отождествления мазерных спектральных линий и поиска корреляции сигналов.

Необходимость корректировки полосы связана с тем, что в процессе корреляции именно мазерных наблюдений для ускорения процесса обработки важно иметь информацию о том, какую часть полосы следует коррелировать. Поскольку корреляционный отклик даёт только та часть полосы, которая содержит мазерные линии, уширение полосы «шумовыми» данными ухудшает корреляционный отклик, что критично для наблюдений с низким соотношением «сигнал / шум» и характерно для 10-м орбитального радиотелескопа. Поиск «корреляционного лепестка» в мазерных данных значительно упрощается при выборе нужного участка полосы наблюдений. Для ускорения работы необходимо, чтобы соответствующая процедура проводилась быстро и наглядно, в

удобном графическом интерфейсе с использованием непосредственного визуального анализа корректности проведения этой процедуры в интерактивном режиме.

Корректировка формы полосы в рамках разработанной программы может производиться различными способами, например, при помощи шумового спектра или полинома заданной степени в указанном диапазоне частот. Для улучшения возможностей в отождествлении спектральных линий дополнительно выполняется нормировка спектра, аппроксимация спектральных линий суммой функций Гаусса в количестве не более указанного максимального числа компонентов и расчёт скоростей спектральных линий на луче зрения V_{LSR} с точностью не хуже 60 м/сек.

Для анализа усреднённых спектров, т.е. скалярного и векторного усреднения спектров по частоте интерференции или времени «LineViewer» предоставляет возможность производить поиск интерференционного отклика на двумерной диаграмме «Fringe Rate - Frequency» («Частота интерференции - частота») как визуально, так и программными методами. Можно выбрать на этой диаграмме область, для которой будет построен усреднённый авто- или кросскорреляционный спектр для дальнейшего анализа.

Важным достоинством и очевидным успехом использования данной программы стало существенное сокращение количества промежуточных циклов запуска коррелятора, что обеспечило более быстрый доступ пользователей к анализу астрофизических результатов. Она была успешно применена на практике при обработке сеансов наблюдений в рамках проекта «Радиоастрон» на корреляторе АКЦ ФИАН, в ходе которой для ряда мазерных сеансов с ее помощью визуально оценивалось качество поправок, определялось соотношение «сигнал / шум», фаза сигнала (т.е. присутствие корреляции), и была найдена корреляция как на наземных, так и на наземно-космических базах. Соответствующие примеры демонстрируются в тексте диссертации.

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

Литература:

- [1] Walmsley M.
“Physical and Chemical Parameters in Dense Cores. Fragmentation of Molecular Clouds and Star Formation”.
Vol. 147 of IAU Symposium, 1991, P. 161.
- [2] R. Cesaroni, E. Churchwell, P. Hofner et al.
“Hot ammonia towards compact HII regions”.
Astronomy and Astrophysics, 1994, 9, Vol. 288, Pp. 903--920.
- [3] Kurtz S. E.
“Astrophysical Plasmas: Codes, Models, and Observations”.
Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series. Vol. 9 of Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series, 2000, Pp. 166--169.
- [4] Shu Frank H., Adams Fred C., Lizano Susana
“Star formation in molecular clouds: observation and theory”.
Annual Review of Astron and Astrophys, 1987, Vol. 25, Pp. 23--81.
- [5] Bergin Edwin A., Tafalla Mario
“Cold Dark Clouds: The Initial conditions for Star Formation”.
Annual Review of Astron and Astrophys, 2007, 9, Vol. 45, №1, Pp. 339--396.

- [6] McKee Christopher F., Ostriker Eve C.
 “Theory of Star Formation”.
 Annual Review of Astron and Astrophys, 2007, 9, Vol. 45, no. 1, Pp. 565--687.
- [7] Zinnecker Hans, Yorke Harold W. Toward
 “Understanding Massive Star Formation”.
 Annual Review of Astron and Astrophys, 2007, 9, Vol. 45, no. 1, Pp. 481--563.
- [8] Bachiller Rafael
 “Bipolar Molecular Outflows from Young Stars and Protostars”.
 Annual Review of Astron and Astrophys, 1996, 1, Vol. 34, Pp. 111--154.
- [9] G. Duvert, S. Guilloteau, F. Ménard et al.
 “A search for extended disks around weak-lined T Tauri stars”.
 Astronomy and Astrophysics, 2000, 3, Vol. 355, Pp. 165--170.
- [10] Evans, Neal J., Michael M. Dunham, Jes K. Jørgensen et al.
 “The Spitzer c2d Legacy Results: Star-Formation Rates and Efficiencies; Evolution and Lifetimes II”.
 Astrophysical Journal, Supplement, 2009, 4, Vol. 181, no. 2, Pp. 321--350.
- [11] T. Alonso-Albi, A. Fuente, R. Bachiller et al.
 “Circumstellar disks around Herbig Be stars”.
 Astronomy and Astrophysics, 2009, 4, Vol. 497, no. 1, Pp. 117--136.
- [12] N. Crimier, C. Ceccarelli, T. Alonso-Albi et al.
 “Physical structure of the envelopes of intermediate-mass protostars”.
 Astronomy and Astrophysics, 2010, 1, Vol. 516, P. A102.
- [13] H. M. de Villiers, A. Chrysostomou, M. A. Thompson et al.
 “Methanol maser associated outflows: detection statistics and properties”.
 Monthly Notices of the RAS, 2014, 10, Vol. 444, no. 1, Pp. 566--585.
- [14] Kurtz Stan.
 “Hypercompact HII regions // Massive Star Birth: A Crossroads of Astrophysics”.
 Vol. 227 of IAU Symposium, Ed. by R. Cesaroni, M. Felli, E. Churchwell, M. Walmsley, 2005,
 1, Pp. 111--119.
- [15] Kurtz Stan.
 “The Young Massive Star Environment”.
 Astrochemistry: Recent Successes and Current Challenges Ed. by Dariusz C. Lis, Geoffrey A.
 Blake, Eric Herbst, Vol. 231, 2005, 8, Pp. 47--56.
- [16] Megan Reiter, Yancy L. Shirley, Jingwen Wu et al.
 “The Physical Properties of High-mass Star-forming Clumps: A Systematic Comparison of
 Molecular Tracers”.
 Astrophysical Journal, Supplement, 2011, 7, Vol. 195, no. 1, P. 1.
- [17] John Bally, Nathaniel Cunningham, Nickolas Moeckel, Nathan Smith.
 “Nearby regions of massive star formation”.

Massive Star Birth: A Crossroads of Astrophysics Ed. by R. Cesaroni, M. Felli, E. Churchwell, M. Walmsley, Vol. 227 of IAU Symposium, 2005, 1, Pp. 12--22.

[18] Shepherd Debra.

“Massive star outflows”.

Massive Star Birth: A Crossroads of Astrophysics Ed. by R. Cesaroni, M. Felli, E. Churchwell, M. Walmsley, Vol. 227 of IAU Symposium, 2005, 1, Pp. 237--246.

[19] Palla Francesco.

“Stellar evolution before the ZAMS”.

Massive Star Birth: A Crossroads of Astrophysics Ed. by R. Cesaroni, M. Felli, E. Churchwell, M. Walmsley, Vol. 227 of IAU Symposium, 2005, 1, Pp. 196--205.

[20] Kim Kee-Tae, Kurtz S. E.

“Occurrence Frequency of CO Outflows in Massive Protostellar Candidates”.

Astrophysical Journal, 2006, 6, Vol. 643, no. 2, Pp. 978--984.

[21] Andre P., Ward-Thompson D., Barsony M.

“From Prestellar Cores to Protostars: the Initial Conditions of Star Formation”.

Protostars and Planets IV / Ed. by V. Mannings, A. P. Boss, S. S. Russell, 2000, 5, P. 59.

[22] Kurtz S.

“Hot, Warm, and Cold Cores: Goldilocks Meets Massive Star Formation”.

Journal of Korean Astronomical Society, 2004, 12, Vol. 37, no. 4, Pp. 265--268.

[23] Cesaroni Riccardo.

“Hot molecular cores”.

Massive Star Birth: A Crossroads of Astrophysics Ed. by R. Cesaroni, M. Felli, E. Churchwell, M. Walmsley, Vol. 227 of IAU Symposium, 2005, 1, Pp. 59--69.

[24] S. P. Ellingsen, M. A. Voronkov, D. M. Cragg et al.

“Investigating high-mass star formation through maser surveys”.

Astrophysical Masers and their Environments Ed. by Jessica M. Chapman, Willem A. Baan, Vol. 242 of IAU Symposium, 2007, 3, Pp. 213--217.

[25] S. P. Ellingsen, S. L. Breen, M. A. Voronkov et al.

“An Evolutionary Timeline for High-mass Star Formation”.

arxiv, 2012.

[26] Breen Shari L., Ellingsen Simon P.

“Masers as evolutionary tracers of high-mass star formation”.

Proceedings of the International Astronomical Union, 2012, Vol. 8, no. S287, P. 156--160.

[27] Варшалович Д. А.

Советская энциклопедия, 2е изд, 1986, Vol. 113, Pp. 376--378.

[28] R. Cesaroni, F. Palagi, M. Felli et al.

“A catalogue of H₂O maser sources north of delta = -30”.

Astronomy and Astrophysics, Supplement, 1988, 12, Vol. 76, Pp. 445--458.

[29] Argon A. L., Reid M. J., Menten Karl M.

“Interstellar Hydroxyl Masers in the Galaxy. I. The VLA Survey”.

Astrophysical Journal, Supplement, 2000, 7, Vol. 129, no. 1, Pp. 159--227.

[30] Kurtz Stan, Hofner Peter, Álvarez Carlos Vargas.
“A Catalog of CH₃OH 7₀-6₁ A⁺ Maser Sources in Massive Star-forming Regions”.
Astrophysical Journal, Supplement, 2004, 11, Vol. 155, no. 1, Pp. 149--165.

[31] V. I. Slysh, S. V. Kalenskii, I. E. Val'ts, R. Otrupcek.
“The Parkes Survey of Methanol Masers at 44.07-GHz”.
Monthly Notices of the RAS, 1994, 5, Vol. 268, P. 464.

[32] Menten Karl M.
“The Discovery of a New, Very Strong, and Widespread Interstellar Methanol Maser Line”.
Astrophysical Journal, Letters, 1991, 10, Vol. 380, P. L75.

[33] Hollenbach David, Elitzur Moshe, McKee Christopher F.
“Interstellar H₂O Masers from J Shocks”.
Astrophysical Journal, 2013, 8, Vol. 773, no. 1, P. 70.

[34] K. M. Menten, M. J. Reid, P. Pratap et al.
“VLBI Observations of the 6.7 GHz Methanol Masers toward W3(OH)”.
Astrophysical Journal, Letters, 1992, 12, Vol. 401, P. L39.

[35] Kogan L., Slysh V.
“VLA Imaging of Class I Methanol Masers at 7 Millimeters with Angular Resolution approximately 0.2 Arcseconds”.
The Astrophysical Journal, 1998, 4, Vol. 497, no. 2, Pp. 800--806.

[36] H. Beuther, A. Walsh, P. Schilke et al.
“CH₃OH and H₂O masers in high-mass star-forming regions”.
Astronomy and Astrophysics, 2002, 7, Vol. 390, Pp. 289--298.

[37] Moore T. J. T., Cohen R. J., Mountain C. M.
“Mainline OH masers near young H II regions - A correlation with IRAS far-infrared flux density”.
Monthly Notices of the RAS, 1988, 4, Vol. 231, Pp. 887--895.

[38] V. I. Slysh, A. M. Dzura, I. E. Val'ts, E. Gerard.
“A search for OH emission from IRAS sources at high galactic latitudes”.
Astronomy and Astrophysics, Supplement, 1994, 7, Vol. 106, Pp. 87--101.

[39] V. I. Slysh, A. M. Dzura, I. E. Val'ts, E. Gerard.
“Further search for OH emission from IRAS sources”.
Astronomy and Astrophysics, Supplement, 1997, 7, Vol. 124, Pp. 85--108.

[40] W. Bartla, H. E. Matthews, K. M. Menten, C. M. Walmsley.
“Detection of strong methanol masers towards galactic H II regions”.
Nature, 1987, 3, Vol. 326, Pp. 49--51.

[41] Menten M. Karl.
“Methanol Masers and Submillimeter Wavelength. Water Masers in Star-Forming Regions”.
Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 1991, Vol. 16, P. 119.

- [42] Felli, M., Brand, J., Cesaroni, R. et al.
“Water maser variability over 20 years in a large sample of star-forming regions: the complete database*”.
Astronomy and Astrophysics, 2007, Vol. 476, no. 1, Pp. 373--664.
- [43] E. E. Lekht, V. A. Munitsyn, A. M. Tolmachev, V. V. Krasnov.
“Cyclic activity of the H₂O maser emission towards NGC 2071”.
Astronomy Reports, 2011, 10, Vol. 55, no. 10, Pp. 857--866.
- [44] Victor Migenes, Shinji Horiuchi, Vyacheslav I. Slysh et al.
“The VSOP Prelaunch H₂O Maser Survey. I. VLBA Observations”.
The Astrophysical Journal Supplement Series, 1999, 8, Vol. 123, no. 2, Pp. 487--513.
- [45] O. S. Bayandina, R. A. Burns, S. E. Kurtz et al.
“VLA Overview of the Bursting H₂O Maser Source G25.65+1.05”.
Astrophysical Journal, 2019, 10, Vol. 884, no. 2, P. 140.
- [46] N. S. Kardashev, V. V. Khartov, V. V. Abramov et al.
“«RadioAstron»-A telescope with a size of 300 000 km: Main parameters and first observational results”.
Astronomy Reports, 2013, 3, Vol. 57, no. 3, Pp. 153--194.
- [47] Willem Baan, Alexey Alakoz, Tao An et al.
“H₂O MegaMasers: RadioAstron success story”.
Proceedings of the International Astronomical Union, 2017, Vol. 13, no. S336, P. 422--425.
- [48] M. I. Pashchenko, A. M. Le Squeren.
“Observations of cold IRAS sources in the 18-cm OH lines”.
Astronomy Letters, 1994, 1, Vol. 20, no. 1, Pp. 69--71.
- [49] M. I. Pashchenko, E. E. Lekht.
“Masers in the Cool Molecular Cloud L 379”.
Astronomy Reports, 2005, 8, Vol. 49, no. 8, Pp. 624--633.
- [50] A. J. Walsh, M. G. Burton, A. R. Hyland, G. Robinson.
“Studies of ultracompact H ii regions — II. High-resolution radio continuum and methanol maser survey”.
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1998, 12, Vol. 301, no. 3, Pp. 640--698.
- [51] Trinidad M. A., Rodriguez T., Rodriguez L. F.
“Radio Jets and Disks in the Intermediate-Mass Star-Forming Region NGC2071IR”.
Astrophysical Journal, 2009, 11, Vol. 706, no. 1, Pp. 244--251.