

УДК 524.5, 524.52

СТРУКТУРА МАЗЕРА H_2O В NGC 2071 IRS 1 ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА НАЗЕМНО-КОСМИЧЕСКОМ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРЕ “РАДИОАСТРОН”

© 2021 г. М. А. Щуров^{1,*}, И. Е. Вальтц^{1,**}, Н. Н. Шахворостова^{1,***}

¹ Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

*E-mail: shaddowman@mail.ru

**E-mail: ivaltts@asc.rssi.ru

***E-mail: nadya@asc.rssi.ru

Поступила в редакцию 23.10.2020 г.

После доработки 25.02.2021 г.

Принята к публикации 28.02.2021 г.

В рамках выполнения научной программы наземно-космического интерферометра “Радиоастрон” проведена обработка данных наблюдений мазера H_2O на частоте 22.2280 ГГц в темной отражательной туманности NGC 2071 в направлении инфракрасного объекта IRS 1 на координатах наведения $\text{RA}(2000) = 05^{\text{h}}47^{\text{m}}04^{\text{s}}.758$, $\text{DEC}(2000) = 00^{\circ}21'42''700$. Длительность сеанса 11.01.2014 составила 70 мин. В наблюдениях принимали участие космический радиотелескоп (КРТ-10) и три радиотелескопа наземной сети: РТ-32 (Медицина, Италия), РТ-32 (Торунь, Польша) и РТ-64 (Калязин, РФ). Реализованы следующие параметры: угловое разрешение 70 мкс на наземно-космических базах при максимальных проекциях баз 3.1 ED (~40 000 км); синтезированная диаграмма направленности наземной части интерферометра $0.006'' \times 0.0006''$ (P.A. = -23°); спектральное разрешение 7.81 кГц (т.е. 0.11 км/с). Получена карта размером $\sim 100 \times 100$ mas (mas – угловая миллисекунда), что соответствует $\sim 40 \times 40$ а.е. при расстоянии до туманности 390 пк, распределения мазерных пятен, на которой присутствует 13 пространственных компонентов. Интервал скоростей на луче зрения этих компонентов составляет 4.7–20.5 км/с при ширине спектральных деталей 0.2–0.6 км/с, плотность коррелированного потока в максимуме линии варьируется в пределах от ~4 до ~29 Ян. Зафиксирован один пространственный компонент (имеющий лучевую скорость 14.3 км/с), для которого со сверхвысоким угловым разрешением на наземно-космических базах SRT-Tg и SRT-Mc наблюдается корреляция на уровне надежности более 6 σ . На основании анализа зависимости функции видности от величины проекций баз предложена двухкомпонентная модель пространственной структуры этого компонента с размерами протяженной и компактной составляющей в угловой мере 4 mas и 0.06 mas, т.е. 1.56 а.е. (с неопределенностью 10%) и 0.023 а.е. (с неопределенностью 50%) соответственно.

Ключевые слова: радионаблюдения, мазер H_2O , NGC 2071 IRS 1

DOI: 10.31857/S0004629921070057

1. ВВЕДЕНИЕ

Звезды образуются в результате гравитационного коллапса и фрагментации молекулярных облаков [1–3]. Основные сведения о процессах звездообразования изложены, например, в обзорах [4–7] (см. также ссылки в этих работах).

Процесс зарождения звезд малой массы ($M < (1-2) M_{\odot}$) 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 [4–10]. В образова-

нии звезд промежуточной массы (IMYSO, $\sim (2-8) M_{\odot}$) имеются одновременно сходство и различие как с образованием маломассивных звезд, так и массивных [11–13]. Формирование массивных OB-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 [7, 14–16], изучено хуже по объективным причинам (см. обзор [17]). Они, как правило, более удаленные, поэтому их исследование необходимо проводить с высоким угловым разрешением, реже встречаются звезды, глубоко

погруженные в турбулентные непрозрачные слои родительского облака. Протозвезды большой массы быстро проходят стадию “до главной последовательности” (PMS), за $<10^4$ лет [18], 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 [19]. 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 [20].

Особую роль в идентификации наличия протозвезд любой массы в области звездообразования играет еще один признак, а именно, молекулярное мазерное излучение и вкрапления в облако скоплений мазерных конденсаций. Космические мазеры формируются в наиболее плотных гигантских структурах 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 густки (cores) и скопления материи (clumps) [21–23] (см. также 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., напр., [24–26]).

Наиболее распространенные мазеры наблюдаются в линиях молекул воды H_2O , гидроксидов OH и метанола CH_3OH . Мазеры на молекулах воды самые мощные, $\sim 10^{27} - 10^{33}$ эрг/с, для сравнения: мазеры OH (на частотах 1665 и 1667 МГц) показывают мощность $\sim 10^{27} - 10^{30}$ эрг/с, CH_3OH — $\sim 10^{27}$ эрг/с [27]. H_2O -мазеры 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 ~ 1 а.е. [28]. Для сравнения: размер пространственных компонентов мазеров OH и метанольных мазеров II класса может быть около 3 а.е. [29], отдельных

пятен метанольных мазеров I класса — от 500 до 1000 а.е. [30].

Мазеры формируются под воздействием различных механизмов возбуждения уровней молекул. Например, накачка мазеров H_2O — столкновительная [31], осуществляется в конденсациях с повышенной плотностью вещества при столкновениях с молекулами и атомами окружающей среды, а также в атмосферах звезд. Накачка мазеров OH в главных линиях — радиативная под воздействием инфракрасного потока от протозвезд (см., напр., [32–34], 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 [35, 36].

Ширина наблюдаемых спектральных линий и переменность их интенсивности, а также размер области, в которой формируется и излучает мазер, 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 (напр., [37, 38]), и пространственная структура которых интенсивно исследуется на интерферометрических системах — от самых первых (напр., [39]) до самых современных (напр., [40]).

Важной особенностью мазеров H_2O , кроме их яркости, является то, что они высвечиваются 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 протообразований, соответствующие именно размерам протозвезд. Улучшение возможностей интерферометров достигается увеличением 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.

В данной работе представлено исследование области звездообразования NGC 2071. Это темная диффузная отражательная туманность, которая имеет сложную структуру: в ней содержится

множество разнообразных по степени эволюции сгустков межзвездной среды [41, 42] и наблюдается множество “молекулярных ядер”, аккреционных дисков и биполярных истечений. Наличие последних свидетельствует о том, что протозвезды в этой области (возможно, не одна) находятся на ранней стадии эволюции, подвержены периодически повторяющейся аккреции межзвездного вещества и сброса его излишков в процессе формирования околозвездного диска.

В северной части NGC 2071 были найдены скопление инфракрасных источников и три компактных источника радиоизлучения в континууме, каждый из которых пространственно ассоциируется с одним из трех источников инфракрасного излучения – IRS 1, 2 и 3 (см. [43] и ссылки в этой работе). Излучение мазера воды на частоте 22 ГГц и в континууме на длине волны 1.3 см хорошо изучено в NGC 2071 IRS 1 (наиболее сильный источник как в инфракрасном, так и в коротковолновом радиодиапазоне) и в NGC 2071 IRS 3. В обоих источниках на VLA наблюдается выброс вещества (радиоджет) [44, 45], на VLBA – крупномасштабный биполярный поток [46]. Кроме того, в обоих источниках как в наблюдениях на VLA [44, 45, 47], так и в наблюдениях на VLBA [46], прослеживается компактный протозвездный диск.

Область звездообразования NGC 2071 расположена в созвездии Ориона близко к Солнечной системе на расстоянии 390 пк [48], т.е. в этой области возможно успешное детализированное исследование тонкой пространственной структуры ее составляющих. По этой причине она считается одним из наиболее приоритетных объектов исследования межзвездных мазеров.

Основная цель данной работы – обнаружение со сверхвысоким угловым разрешением ультракомпактных структур в NGC 2071.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Сеанс наблюдений космических мазеров в туманности NGC 2071 длительностью 70 мин проводился 11 января 2014 г. с 17:00 до 18:00 UTC в рамках международной миссии¹ “Радиоастрон” на наземно-космическом радиоинтерферометре [49]. Условный код эксперимента – raks07ar.

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. [49]). Обсерватория работала в четырех 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 мкс дуги [50]. В январе 2019 г. обсерватория завершила свою работу².

10-метровый космический телескоп (Space Radio Telescope, SRT) был установлен на платформе “Навигатор”, разработанной в НПО им. Лавочкина³. В наблюдениях NGC 2071 использовалась наземная сеть с участием 64-м радиотелескопа в Калязине (К1), Московская область, Россия (ОКБ МЭИ), 32-м радиотелескопа (Tr) в г. Торунь (Торуньский Центр Астрономии университета им. Николая Коперника, Польша) и 32-м радиотелескопа (Mc) в г. Медичина, радиоастрономическая обсерватория Национального института астрофизики INAF (Италия). В табл. 1 приведены значения проекций баз и угловых разрешений для наземно-космического интерферометра.

Расстояние между Землей и точкой орбиты, в которой находился спутник, на момент наблюдений составляло величину от 15.5 диаметров Земли (ED) (или 197 760.5 км) до 20.1 диаметров Земли (или 255 499.4 км).

В качестве координат источника были приняты координаты одной из самых молодых областей звездообразования в этой туманности NGC 2071 IRS 1 RA(2000) = 05^h47^m04^s.758, DEC(2000) = 00°21′42″700. Наблюдения проводились в диапазоне K с центральной частотой 22.22800 ГГц. Данные и в левой, и правой поляризации записывались в полной полосе 32 МГц. Для обработки использовалась только верхняя боковая полоса 16 МГц (~215 км/с), в которую попадает исследуемая линия на частоте мазера.

В непрерывном спектре наблюдения проводились только в начале сессии (первые 10 мин) для квазара TXS0536+145 (RA(J2000) = 5^h39^m42^s.366, DEC(J2000) = 14°33′45″562, Texas Survey [51]), который находится на расстоянии 14° по склонению от точки наведения на исследуемый источник. Этот яркий квазар был выбран в качестве “fringe finder/clock offset” калибратора с целью коррекции задержек между телескопами, в соответствии с рекомендациями по планированию интерферометрических наблюдений⁴. Одновременно с мазером квазар не наблюдался. Синтезированная диаграмма направленности наземного интерферометра (synthesized beam или convolved

² http://www.asc.rssi.ru/radioastron/news/news1/ru/news1_36_ru.pdf

³ <https://link.springer.com/content/pdf/10.1134/S0038094612070143.pdf>

⁴ <https://www.evn.com.vn/>

¹ <http://www.asc.rssi.ru/radioastron/index.html>

Таблица 1. Значения проекций баз и соответствующих угловых разрешений для наземно-космического интерферометра

База интерферометра	Минимальная и максимальная проекция базы			Угловое разрешение, mas
	Мλ	ED	км	
Ra–Mc	2853.21–2942.55	3.0229–3.1176	38 518.34–39 724.43	0.070–0.072
Ra–Tr	2814.26–2902.35	2.9817–3.0750	37 992.51–39 181.73	0.071–0.073
Ra–Kl	2752.93–2832.52	2.9167–3.0010	37 164.56–38 239.02	0.073–0.075
Mc–Tr	78.92–79.93	0.0836–0.0847	1065.42–1079.06	2.581–2.614
Mc–Kl	155.41–165.11	0.1647–0.1749	2098.04–2228.99	1.249–1.327
Tr–Kl	79.44–88.57	0.0842–0.0938	1072.44–1195.70	2.329–2.596

size), в среднем (для позиционного угла $\sim -23^\circ$), составляла $0.006'' \times 0.0006''$. Покрывание uv-плоскости, реализованное в данном сеансе, представлено на рис. 1.

До сегодняшнего момента на интерферометрах для записи и воспроизведения данных астрономических наблюдений используются специализированные цифровые магнитофоны (СЦМ), записывающие информацию на магнитные ленты. СЦМ имеют большую емкость и скорость ввода, однако их минусами можно считать дороговизну и сложность в исполнении. Однако имеется возможность производить запись измерений в научных наблюдениях на массив жестких дисков при помощи высокоскоростной шины. Основным преимуществом этой технологии является использование серийных комплектующих, что снижает стоимость, сохраняя надежность изделия при сохранении таких основных характеристик, как скорость записи и объем.

Данные с космического телескопа передавались на наземную станцию слежения (г. Пушкино, Московская область, РФ) в реальном времени и записывались при помощи декодера РДР (Регистратор данных “Радиоастрон”)⁵. Синхронизация записи на РДР осуществлялась короткими импульсами с периодом 1 с на основе опорного сигнала частотой 5 МГц от водородного стандарта наземной станции слежения в начале каждой записи. На наибольшей скорости максимальная продолжительность записи для сеанса наблюдений в реальном времени составляет от 6 до 9 ч. Управление регистратором осуществляется либо непосредственно, либо по каналу Ethernet с удаленным доступом. Регистратор в составе наземной станции комплектуется специальным программным обеспечением для управления.

⁵ <http://asc-lebedev.ru/index.php?dep=6&page=5>

3. ОБРАБОТКА ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. Кросс-корреляционная обработка исходных данных

Первичная обработка выполнялась на корреляторе АКЦ ФИАН [52].

Коррелятор – это специализированное устройство для автоматического вычисления авто- и кросс-корреляционных функций различных процессов. Для ускорения обработки РСДБ наблюдений проекта “Радиоастрон” в АКЦ ФИАН был создан свой коррелятор. Процедура корреляции является важной частью проекта “Радиоастрон”. Около 95% данных наблюдений, выполненных на радиоинтерферометре “Радиоастрон”, обработаны на корреляторе АКЦ.

Коррелятор АКЦ реализован по схеме программного FX-коррелятора (Фурье-преобразование, перемножение спектров). На нем выполняется корреляционная обработка данных многостанционных РСДБ сетей с наземными и наземно-космическими базами. Коррелятор АКЦ построен по схеме “станция-интерферометр”, т.е. для сигналов с каждого телескопа интерферометра происходит расчет геометрической задержки относительно центра Земли. Важным отличием этого коррелятора от других, например, коррелятора DifX, является присутствие в расчетах геометрической задержки сигнала дополнительных уточняющих возможностей, связанных с учетом неравномерного движения и ускорения космического радиотелескопа на эллиптической орбите относительно центра Земли. Подробнее про работу коррелятора АКЦ см. [53].

Особенность обработки спектральных линий на корреляторах заключается в том, что корреляционный отклик наблюдается не во всей частотной полосе, как это происходит при обработке излучения в непрерывном спектре, а только в интервалах присутствия мазерного излучения, т.е., например, линий молекул воды (H_2O , ~ 22 ГГц)

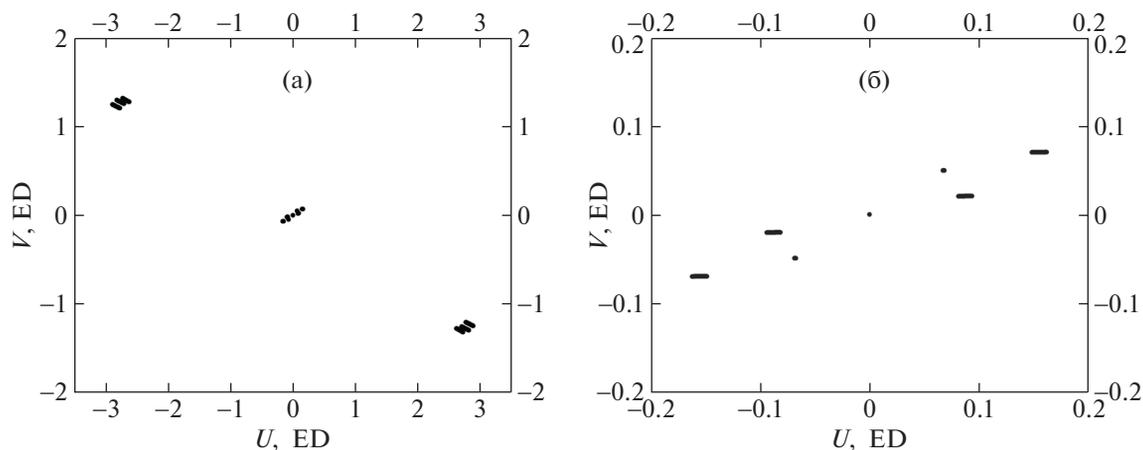


Рис. 1. Реализованные покрытия uv -плоскости в наблюдениях от 11.01.2014 мазера H₂O в области звездообразования NGC 2071 IRS 1 за весь сеанс наблюдений от 17:00 до 18:00 UTC: а) наземно-космические базы; б) наземные базы в увеличенном масштабе. Приведены данные с телескопов: 10-метров Ra (SRT), 32-метра Mc, 32-метра Tr, 64-метра Kl.

или гидроксила (OH, ~ 1.6 ГГц). Для успешной идентификации линий мазерного излучения на близких частотах необходимо повышать спектральное разрешение, т.е. увеличивать количество спектральных каналов. С другой стороны, это приводит к потере чувствительности и, как следствие, к потере кросс-корреляционного отклика. Для решения этой проблемы производится расчет нескольких файлов с различным числом спектральных каналов и интервалов частот, из которых выбирается файл с наилучшими показателями отношения “сигнал/шум” (SNR, signal-noise ratio) при максимальном спектральном разрешении. Для поиска и правильного выбора такого промежутка частот используется специальная программа LineViewer [54].

Интерферометр измеряет функцию видности, которая связана с распределением яркости по источнику преобразованием Фурье. В результате корреляции со всеми вышеперечисленными особенностями и путем дополнительного анализа на выходе коррелятора будет получена зависимость амплитуды функции видности от проекции вектора базы на координаты картинной плоскости (вектор базы — это расстояние между парой радиотелескопов).

Поскольку сигнал от источника приходит на разные телескопы сети интерферометра не одновременно, для каждого телескопа необходимо рассчитывать геометрическую задержку сигнала.

Вычисление задержки на наземно-космической базе отличается от наземно-наземной из-за необходимости учитывать время прихода сигнала на станцию слежения и сдвига частоты H-мазера SRT, обусловленного скоростью SRT и движением космического телескопа в неоднородном гравитационном поле Земли по высокоэллиптической

орбите. H-мазер, или водородный стандарт частоты — это прибор с высокой кратковременной и долговременной стабильностью частоты выходного сигнала. На борту SRT он используется в качестве высокоточных часов.

Кроме того, точность вычисления задержки на наземно-космической базе напрямую связана с точностью вычисления орбиты, что является критически важным параметром для получения корреляции в космических РСДБ наблюдениях. Орбита для космического радиотелескопа (в дальнейшем SRT) “Радиоастрон” вычислялась Баллистическим центром Института прикладной математики им. М.В. Келдыша с точностью ~ 200 м по координатам и ~ 2 см/с по скорости [55].

3.2. Обработка данных наблюдений на наземных базах. Автокорреляционные спектры и амплитудная калибровка

Обработка спектров для наземных наблюдений проводилась в пакете программ AIPS (Astronomical Image Processing System)⁶, который предназначен для калибровки, анализа данных, построения изображений и построения графиков. Пакет разработан в Национальной радиоастрономической обсерватории США (NRAO, USA).

Первичная обработка (корреляция) производилась с разбиением частотной полосы на 2048 каналов, что соответствует спектральному разрешению 7.81 кГц (т.е. 0.11 км/с). На рис. 2а приведены исходные некалиброванные автокорреляционные спектры (total power spectra) в полной полосе регистрации 16 МГц, на рис. 2б — те же спектры после применения данных из штатных

⁶ <http://www.aips.nrao.edu>

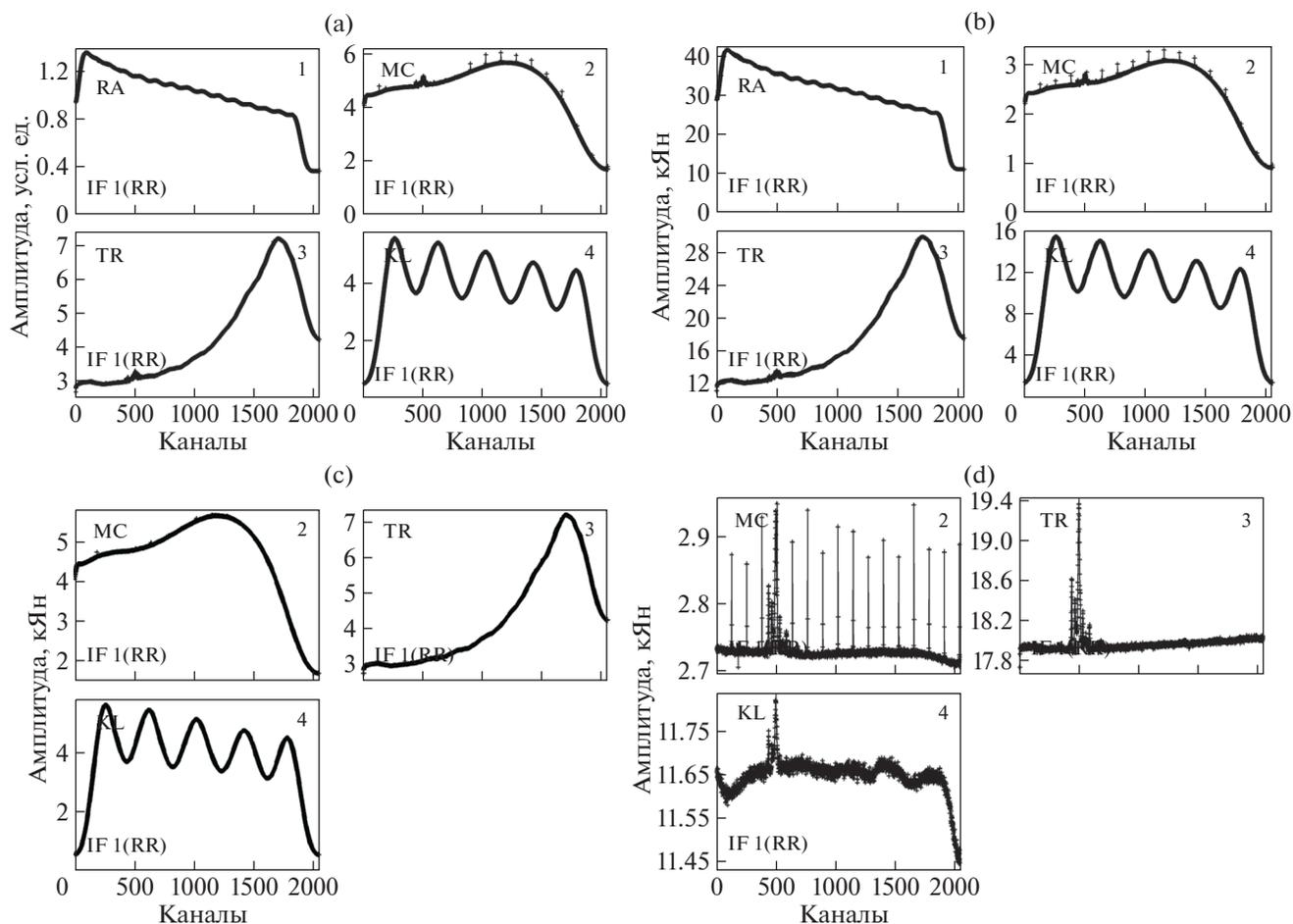


Рис. 2. а) Первичные некалиброванные автокорреляционные спектры мазера H_2O в источнике NGC 2071 IRS 1 в полной полосе регистрации 16 МГц; б) те же спектры после применения данных из штатных калибровочных таблиц; в) вид полосы пропускания при наблюдениях калибровочного квазара на антеннах наземной сети; д) автокорреляционные спектры мазера при наблюдениях на наземных телескопах с применением корректировки полосы пропускания по квазару. Представлены наблюдения только на 3 наземных антеннах, в наблюдениях квазара SRT не участвовал (см. текст).

калибровочных таблиц (см. комментарий программы AIPS в верхней легенде рисунков), которые предоставляют обсерватории. На рис. 2с показан вид полосы пропускания при калиброванных наблюдениях квазара на антеннах наземной сети. На рис. 2д – автокорреляционные спектры мазера при наблюдениях на наземных телескопах с применением корректировки полосы пропускания по квазару.

К автокорреляционным спектрам мазера, полученным на наземных телескопах, после корректировки полосы пропускания по квазару дополнительно применяется еще одна корректировка, поскольку во всех автокорреляционных спектрах присутствует ненулевая составляющая, соответствующая SEFD (system equivalent flux density – плотность потока на радиотелескопе в Ян, эквивалентная потоку в К). Для частей спектра, не содержащих мазерные линии, задача

UV-BAS вычисляет среднее значение потока и вычитает его из всего автоспектра.

Кроме того, поскольку шкала потоков создается в соответствии с собственными данными измерений температуры системы на каждом телескопе, для возможного сравнения автокорреляционных спектров нужно привести значения потоков к одной общей величине, т.е. откалибровать эти шкалы. Для этого выполняется следующая процедура: выбирается промежуток автокорреляционного спектра “опорного” телескопа, т.е. промежуток каналов, содержащий группу линий с максимумом по потоку, для которого AIPS (задача ACFIT) подбирает “модель”, производит расчеты и по методу наименьших квадратов вписывает в данный промежуток спектра оптимальное количество Гауссиан, а затем корректирует автокорреляционные спектры других телескопов по

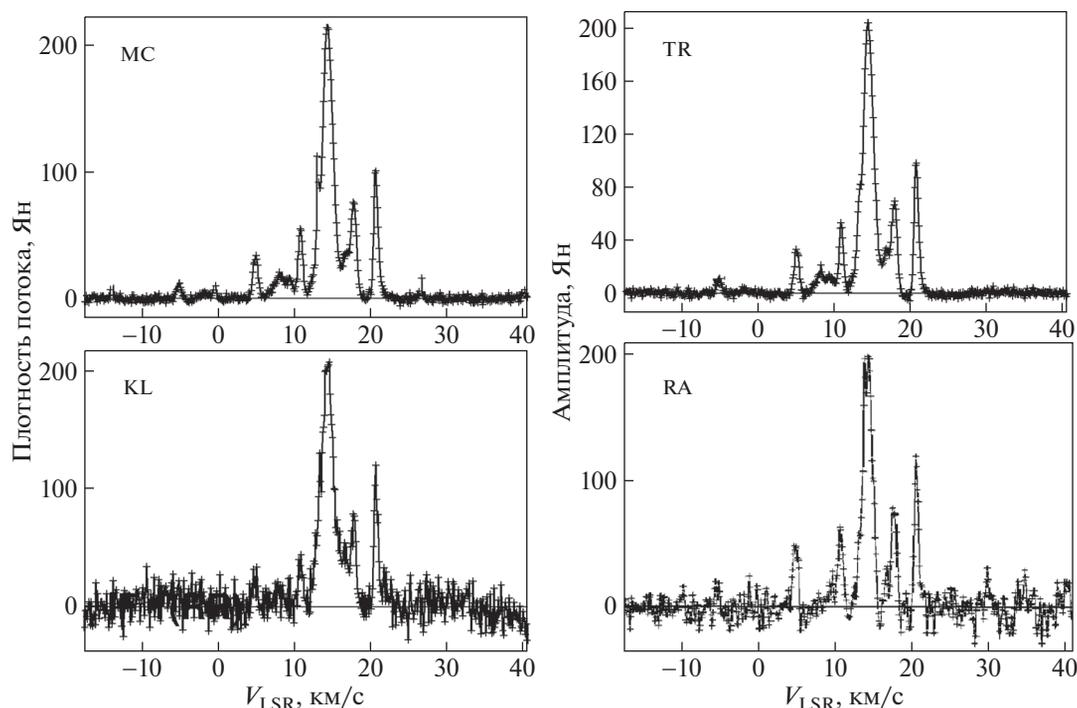


Рис. 3. Автокорреляционные спектры мазера H₂O в источнике NGC 2071 IRS 1 с полной амплитудной калибровкой; по оси X отложены скорости спектральных деталей, по оси Y – калиброванный поток в Янских.

данной модели. В нашем случае в качестве “опорного” был выбран телескоп в Медине.

Окончательный вариант автокорреляционных спектров приведен на рис. 3.

3.3. Обработка данных наблюдений на наземных базах. Кросс-корреляционные спектры и фазовая калибровка

На рис. 4а, б показаны кросс-корреляционные спектры мазера H₂O в NGC 2071 IRS 1 на наземной сети после амплитудной, но до фазовой калибровки.

Обычно фазы калибруются относительно какого-либо квазара. Если квазар не использовался, выбирается деталь кросс-корреляционного спектра в качестве опорной и координаты остальных мазерных деталей определяются относительно этой опорной детали. Такой процесс называется самокалибровкой. Нами в качестве опорной выбрана деталь № 1 (см. рис. 4), поскольку она имеет достаточно большой поток в максимуме линии, отстоит от центральной части спектра, в которой плотно собрано большинство основных мазерных деталей, и имеет правильный профиль линии, т.е. в этот профиль, вероятно, нет вклада дополнительных мазерных компонентов.

С помощью стандартной процедуры обработки данных в AIPS (задачи FRING, FRMAP [56]) для

выбранной по кросс-корреляционному спектру калибровочной детали была создана калибровочная таблица для корректировки фаз, которую мы применили к остальным спектральным деталям.

На рис. 5 приведена карта калибровочной детали для суммы девяти каналов. Координаты фазового центра, который использовался в корреляторе при обработке данных, совпадают с координатами наведения. Карта выполнена задачей IMAGR.

Для картографирования всех мазерных деталей, представленных в полном кросс-корреляционном спектре источника, таблица фазовых калибровок, полученная задачей FRING по калибровочному каналу, копируется в исходный файл, и для этого исходного файла формируется новая полная калибровочная таблица (амплитуды и фазы). Результат приведен на рис. 6.

3.4. Обработка данных наблюдений на наземных базах. Картографирование пространственных компонентов мазера

Полная развернутая карта для той части спектра, в которой присутствуют линии, – в нашем случае это интервал спектра примерно от канала 180 до канала 260 – сначала строилась для совокупности всех каналов в двумерном изображении с координатами по прямому восхождению RA по

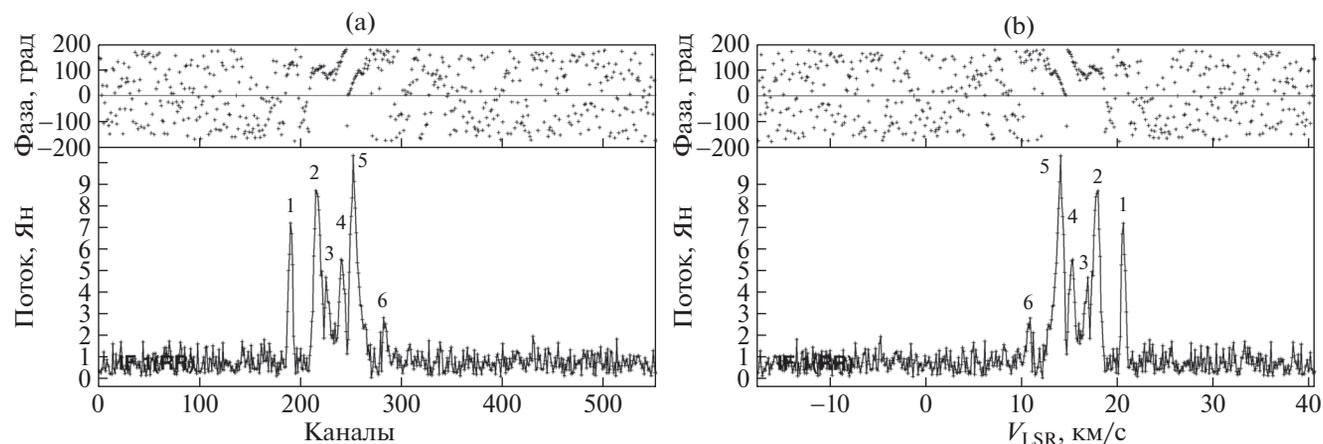


Рис. 4. а) Кросс-корреляционный спектр мазера H_2O в NGC 2071 IRS 1 на наземной сети в каналах с полной амплитудной калибровкой до исправления фазы по калибровочному каналу (соответствующая спектральная деталь отмечена как № 1); б) тот же спектр в скоростях.

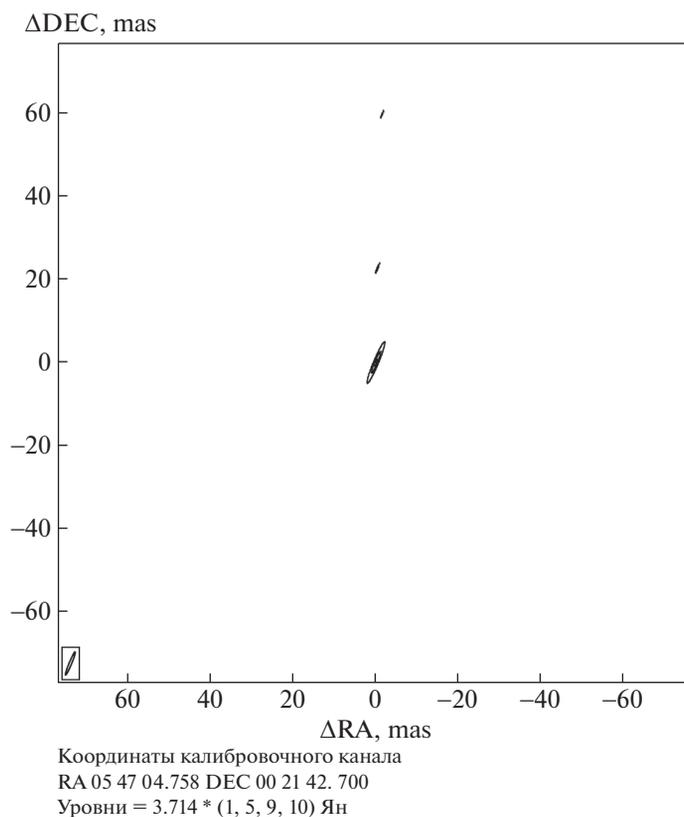


Рис. 5. Карта калибровочной детали для суммы девяти каналов, выполненная задачей IMAGR. Размер карты 512×512 пикселей, или 150×150 mas.

оси X и по склонению DEC по оси Y (см. совокупность всех изображений на рисунке⁷).

⁷ http://www.asc.rssi.ru/shadow/IMAGE1_NGC2071_180-260_512.jpg

Карта каждой спектральной детали, которая не разрешается с диаграммой интерферометра Mc-Tr-KI, строилась на основе анализа и сравнения изображений в соответствующих этой детали каналах на развернутой карте. Процедура

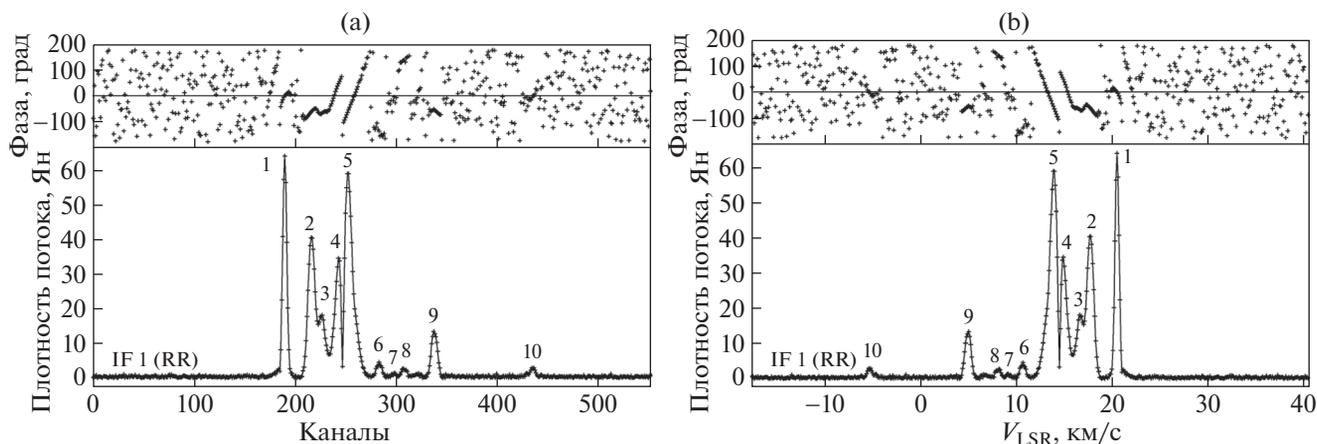


Рис. 6. а) Кросс-корреляционный спектр мазера H₂O в источнике NGC 2071 IRS 1 в каналах после применения фазовой калибровки по калибровочному каналу (деталь № 1); б) кросс-корреляционный спектр мазера H₂O в источнике NGC 2071 IRS 1 в скоростях после применения фазовой калибровки по калибровочному каналу (деталь № 1).

выполнялась в совокупности с поканальным анализом спектра этой детали вписыванием Гауссиан с использованием программы CLASS⁸, подробности см. ниже в конкретных примерах.

Комбинированная карта всех компонентов мазера H₂O в источнике NGC 2071 IRS 1 показана на рис. 7. Пространственное изображение для каждой спектральной детали выполнено задачей IMAGR в размере $\sim 150 \times 150$ mas (mas – milli arc second – угловая миллисекунда дуги), на рисунке приведена центральная часть размером 100×100 mas. На карте приведены номера вписанных Гауссиан, составляющих профили деталей, и соответствующие скорости их максимумов (см. табл. 2).

Специальная задача AIPS (SAD) методом наименьших квадратов вписывает трехмерную Гауссиану в пространственный профиль мазерной детали и определяет ее размер. Результат обработки изображений всех деталей приведен в табл. 2.

В столбцах 1–9 табл. 2 представлены параметры пространственных компонентов полной карты мазера NGC 2071 IRS 1, полученные при помощи задачи SAD.

1. Номера каналов, в которых присутствует рассмотренная мазерная деталь.

2. Номер компонента мазерной детали. Первая цифра соответствует номеру спектральной детали (см. рис. 6 с кросс-корреляционным спектром), к которой относится данный компонент, вторая – порядковый номер данного компонента внутри данной спектральной детали.

3. Пиковое значение яркости компонента.

⁸ <https://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS/>

4. Пространственный интеграл потока по размерам пятна.

5. Относительная координата компонента по прямому восхождению.

6. Относительная координата компонента по склонению.

7. Размер компонента по главной оси эллипса сечения диаграммы направленности интерферометра.

8. Размер компонента по малой оси эллипса сечения диаграммы направленности интерферометра.

9. Позиционный угол компонента.

В столбцах 10 и 11 приведены скорость на луче зрения и ширина линии на половине максимума интенсивности, полученные в результате аппроксимации профилей линий в программе CLASS.

Порядок построения изображений мазерных компонентов включает в себя следующие шаги. Исследуемая область неба, в направлении которой наблюдается спектр, разбивается на одинаковые по размеру квадраты (IMSIZE, условно говоря, аналог объектива), например, 256×256 пикселей (или 512×512 , 1024×1024 , 2048×2048 , 4096×4096). Каждый квадрат покрывается сеткой ячеек. Размер ячеек сетки (CELLSIZE) определяет, сколько элементов изображения будет на итоговой карте. Размеры CELLSIZE и IMSIZE выбираются из следующих соображений. Программа AIPS рассчитывает область построения карты с размером M следующим образом:

$$M = \text{CELLSIZE} \times \text{IMSIZE}.$$

То есть при установке, например, параметров, принятых в данном эксперименте, CELLSIZE = $0.0003'' \times 0.0003''$, IMSIZE = 512×512 , получен-

ное изображение будет покрывать область неба размерами $M = 0.1536'' \times 0.1536''$, или $\approx 154 \times 154$ mas.

Диаграмма направленности искажает истинное изображение. Поэтому для его восстановления и правильной оценки его размеров выполняется так называемая процедура “обратной свертки” с диаграммой направленности (другие названия – развертка, деконволюция). Размеры мазерных деталей, которые приведены в табл. 2, получены до процедуры деконволюции: как указывалось выше, диаграмма нашего интерферометра, в среднем, до деконволюции (так называемый “грязный луч”) имеет размеры $0.00598'' \times 0.00059''$. С учетом позиционного угла -23° (или $+157^\circ$) большая полуось эллипса соответствует склонению, малая – прямому восхождению. В такой диаграмме при размере $CELLSIZE = 0.0003''$ для оси Y (склонение, менее качественное разрешение) в каждом квадрате будет исследовано 20 точек.

Вообще говоря, такое количество точек является избыточным, поскольку при 20 точках область на расстоянии 390 пк исследуется через каждые 0.1 а.е., при ожидаемом размере мазерного пятна $H_2O \sim 1$ а.е. [28]. Кроме того, подобная избыточность может быть неприемлема при ограничении использования времени работы компьютеров, занятых в обработке экспериментов: при наличии собственного коррелятора это имеет меньшее значение. С другой стороны, большое количество пробных точек может быть полезным для задачи SAD и определения размеров мазерного пятна.

3.5. Обработка данных наблюдений на наземно-космических базах

Из 13 пространственных деталей, представленных на карте (рис. 7) и в табл. 2, имеется только одна деталь, для которой на наземно-космических базах SRT-Tr и SRT-Mc наблюдается корреляция (№ 5_1 на скорости 14.3 км/с). Для этой детали на рис. 8 показаны амплитуда (нижняя панель) и фаза (верхняя панель) корреляции на базе SRT-Mc (один 15-минутный скан) и на базе SRT-Tr (два 15-минутных скана). Представлены данные в правой поляризации.

Для поиска корреляций на наземно-космических базах использовалась программа PIMA⁹ (подробнее см. в [57]), предназначенная для калибровки VLBI данных и уже успешно применявшаяся для калибровки мазерных экспериментов в проекте “Радиоастрон” (см., напр., [58]). Алгоритм поиска лепестка в программе PIMA позволяет осуществлять коррекцию остаточной за-

⁹ <http://astrgeo.org/pima/>

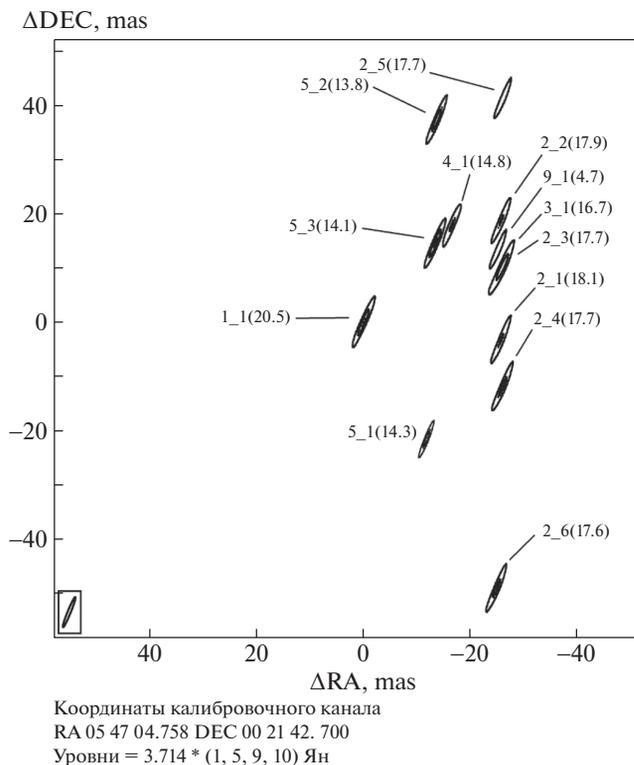


Рис. 7. Комбинированная карта всех компонентов мазера H_2O в источнике NGC 2071 IRS 1. Размер карты 512×512 пикселей или $\sim 150 \times 150$ mas, на рисунке приведена центральная часть размером 100×100 mas. Указаны номера пространственных компонентов, в скобках – скорости на луче зрения соответствующих спектральных деталей.

держки и частоты интерференции, а также скорости изменения частоты интерференции, что является существенным при обработке данных с участием космического телескопа, движущегося по орбите вокруг Земли. Таким образом, первичная обработка данных в пакете PIMA позволяет обнаружить относительно слабый отклик космического интерферометра, что имеет место в большинстве экспериментов в проекте “Радиоастрон”, и выявить поправки к упомянутым величинам, необходимые для повторной корреляции данных с их учетом.

В результате калибровки данных наблюдений источника NGC 2071 в программе PIMA была выявлена корреляция для детали № 5_1 (14.3 км/с) на наземно-космических базах SRT-Mc и SRT-Tr, длина проекции базы составила 3 диаметра Земли. Отношение сигнала к шуму для амплитуды интерферометрического лепестка в PIMA составило $SNR = 6$, что может рассматриваться как достоверное обнаружение сигнала с вероятностью более 0.9999 [59].

Таблица 2. Параметры пространственных компонентов полной карты мазера NGC 2071 IRS 1, полученные при помощи задачи SAD в программе AIPS

№(1)	№(2)	Peak, Ян	Flux, Ян/диаг.	$\Delta\alpha$, mas	$\Delta\delta$, mas	a , мс	b , мс	P.A., град	V_{LSR} , км/с	ΔV , км/с
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
189–190	1–1	29.2	29.1	–0.00	0.00	6.02	0.59	157.2	20.5	0.4
212–213	2–1	6.0	6.0	–25.81	–2.98	6.00	0.59	157.3	18.1	0.3
215–217	2–2	16.2	16.1	–25.80	18.91	6.14	0.58	157.4	17.8	0.6
216–218	2–3	13.5	13.5	–26.40	10.79	6.03	0.59	157.2	17.7	0.6
216–218	2–4	12.8	12.8	–26.10	–11.71	6.03	0.59	157.2	17.7	0.6
216–218	2–5	4.4	4.3	–26.10	41.39	5.99	0.58	157.2	17.7	0.6
218–221	2–6	20.9	20.9	–24.90	–48.90	6.02	0.59	157.2	17.6	0.6
227–229	3–1	11.1	11.0	–25.50	9.60	6.02	0.59	157.2	16.7	0.6
245–246	4–1	12.5	12.4	–16.51	17.72	6.02	0.59	157.2	14.8	0.4
249–250	5–1	16.6	16.5	–12.30	–22.19	6.29	0.56	158.1	14.3	0.2
251–252	5–2	25.8	24.8	–13.78	37.43	5.89	0.58	156.9	14.1	0.3
253–256	5–3	27.3	27.1	–13.50	14.70	6.00	0.59	157.2	13.8	0.5
340–341	9–1	5.0	5.1	–25.39	13.84	6.15	0.59	157.7	4.7	0.4

Примечание. В столбцах приведены: №(1) – номер канала на кроссспектре (1); №(2) – номер компонента на карте (2); Peak – поток в пике в Янских (3); Flux – интегральный поток в размере пятна (4); погрешности определения координат ~ 0.001 mas для прямого восхождения $\Delta\alpha$ (5) и ≈ 0.01 mas для склонения $\Delta\delta$ (6); в столбцах (7) и (8) даны размеры большой (a) и малой (b) осей эллипса для каждого компонента до деконволюции для позиционного угла $\sim +157^\circ$; (9) P.A. – позиционный угол. В столбцах 10 и 11 представлены скорость и ширина линии на половине максимума интенсивности, полученные в результате аппроксимации профилей линий в программе CLASS.

Деталь № 5_1 попадает в диапазон скоростей и в профиль детали № 5. Полный спектральный профиль детали № 5 образует сложную форму. С помощью специальных программ, предназначенных для обработки спектральных линий – CLASS или Origin¹⁰, можно разделить профиль линии № 5 на составляющие профили, имеющие Гауссову форму. Для профиля детали № 5 такая аппроксимация представлена на рис. 9а.

Комбинированная карта пространственных деталей, относящихся к спектральной детали № 5, представлена на рис. 9б. Как и на рис. 8, на карте приведены номера вписанных Гауссиан, составляющих профиль детали № 5 (деталь на скорости ~ 13.2 км/с, входящая в полный профиль детали № 5, разрешается) и соответствующие скорости их максимумов.

Несмотря на то, что в данных наблюдениях поток в детали на 14.3 км/с был достаточно слабым по сравнению с потоками в других деталях спектра этого источника, нужно учитывать, она является очень переменной (см., напр., [38]).

¹⁰<https://www.originlab.com/>

Следует отметить, что, например, в наблюдениях на VLBI неопределенность в точности измерения потока на антеннах составляет $\sim 30\%$ (см., напр., [46]).

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Главная задача для любого интерферометра – получение координат и размеров компонентов исследуемого источника.

У данного эксперимента, проведенного для исследования структуры источника NGC 2071 IRS 1, имеется несомненное достоинство, а именно, использование 3 наземных телескопов, взаимное расположение которых создает одну короткую и две длинных базы, что позволяет даже при простом визуальном сравнении спектров оценить изменение потока и размеров исследуемых компонентов при изменении размера диаграммы направленности.

Размер проекции длинной базы Mc–K1 составляет ~ 0.16 ED (при расстоянии между телескопами ~ 1920 км) и обеспечивает пространственное разрешение ~ 1.2 mas, что сравнимо с разрешением на VLBA или на EVN.

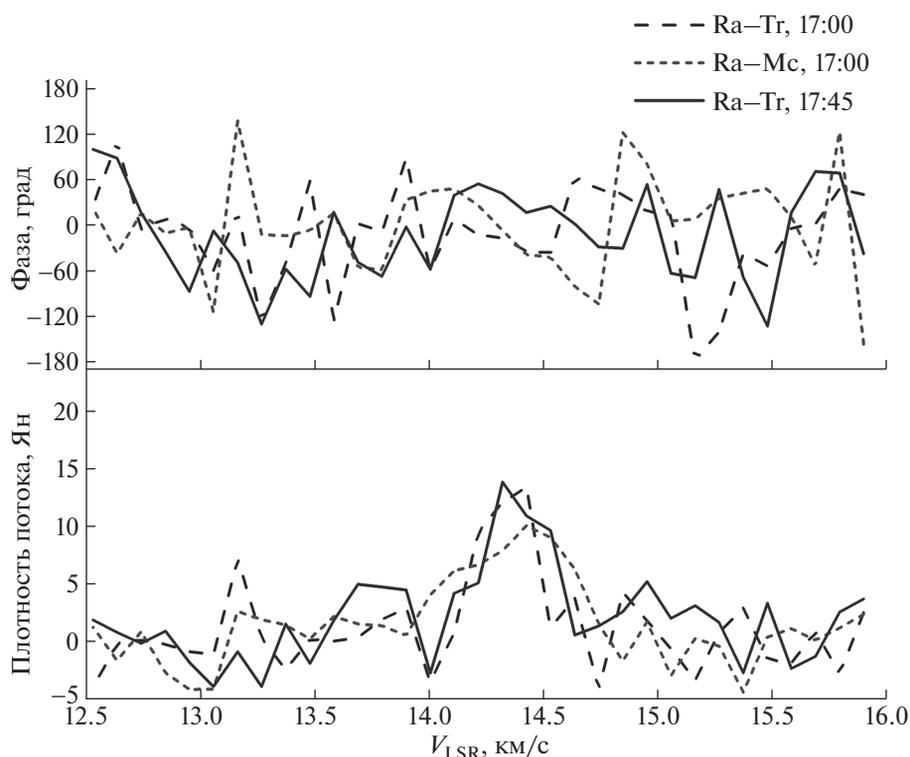


Рис. 8. Амплитуда (нижняя панель) и фаза (верхняя панель) корреляции на базе SRT–Mc (один 15-мин скан) и на базе SRT–Tr (два 15-мин скана), соответствующая спектральной детали № 5_1 на скорости 14.3 км/с. Представлены данные в правой поляризации.

Улучшение пространственной разрешающей способности интерферометров напрямую связано с увеличением расстояния между его элементами. На близких антеннах диаграмма шире (ближе к диаграмме одиночного радиотелескопа), с подсоединением далекой антенны она сужается, т.е. увеличивается разрешающая способность, но чувствительность на длинных базах падает.

В конфигурации интерферометра с двумя относительно близкими антеннами (Mc–Tr) и одной очень далекой (Mc–K1 или Tr–K1) даже простое визуальное сравнение калиброванных по амплитуде кросс-корреляционных спектров на малой и больших базах позволяет провести анализ изменения потоков и ширины линий в спектральных деталях и сделать предварительный вывод о возможных размерах соответствующих пространственных компонентов. Сохранение величины потока в какой-либо спектральной детали на длинной базе, например, Mc–K1 по сравнению с потоком на короткой базе Mc–Tr означает, что угловой размер соответствующей пространственной детали, по крайней мере, сравним с диаграммой самой большой базы используемого интерферометра, т.е. источник является точечным в рамках данного эксперимента. В нашем

эксперименте такой вывод можно сделать, например, в отношении детали № 4 (см. рис. 10).

В то же время следует отметить основные технические трудности данного эксперимента. В-первых, короткий отрезок времени 70 мин, в течение которого проводился эксперимент, не позволил получить достаточное заполнение uv-плоскости. Во-вторых, по причине небольшого различия в расположении наземных телескопов по географической широте реализовалось слабое разрешение по склонению, что существенно снижает точность полученных координат. Кроме того, не наблюдались калибровочные источники. Обычно для такой цели используются квазары, но в данном случае, как указывалось выше, наблюдения квазара были выполнены только в начале сеанса до наблюдений мазера и только с целью получения задержек в первичной корреляционной обработке данных и корректировки формы полосы регистрации сигнала.

Проблема связана, в частности, с условиями работы космического радиотелескопа, установленного на спутнике. Переустановка телескопа при повороте и наведении на координаты различных источников занимает много времени, зачастую более получаса, в то время как собственно время наблюдения источника в экспериментах

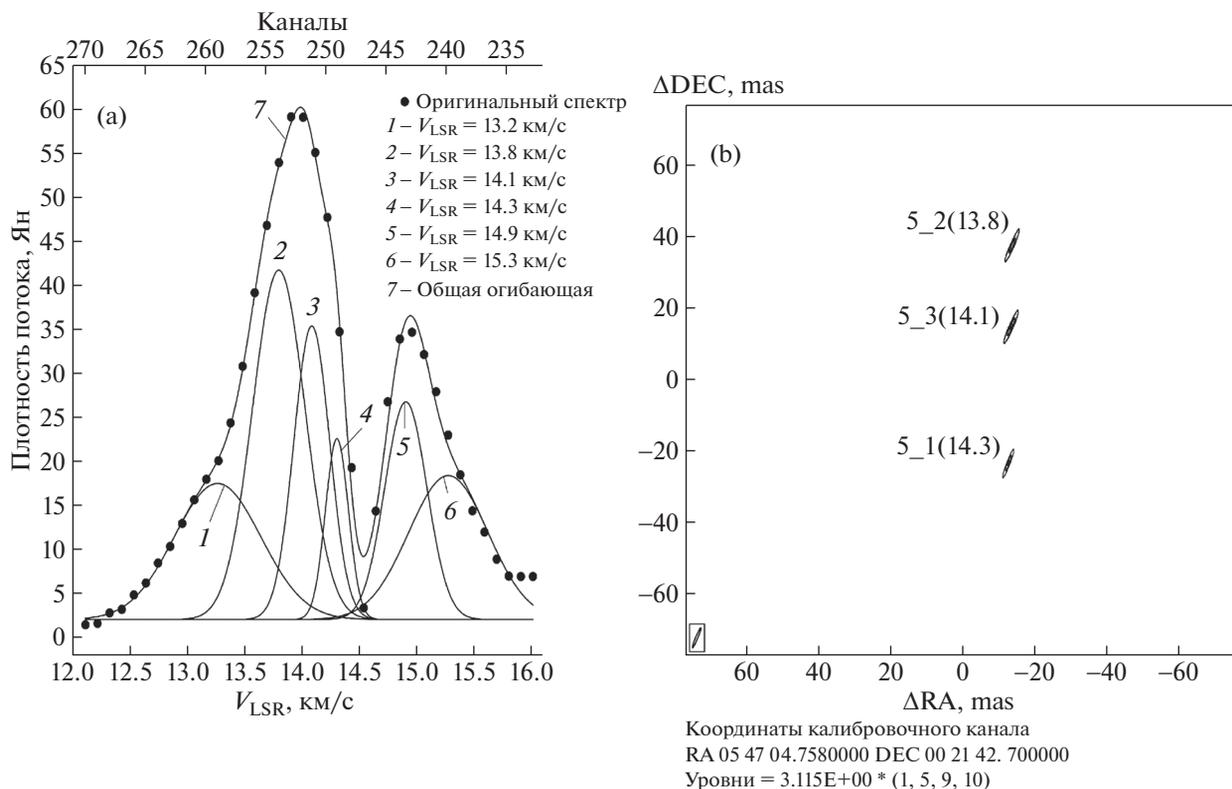


Рис. 9. а) Аппроксимация суммой Гауссиан участка спектра для скоростей 12.0–16.0 км/с (каналы № 233–270, спектральные детали № 4–5, выполнено в программе ORIGIN; б) комбинированная карта для компонентов с максимумами на скоростях 13.8, 14.1 и 14.3 км/с – спектральная деталь № 5. Размер карты 512 × 512 пикселей.

этого проекта иногда не превышает 50–60 мин. Из-за этого практически не остается времени на отведение телескопа на фазовый калибратор, который, вообще говоря, должен наблюдаться 1–4 мин через каждые 8–10 мин наблюдений целевого источника. Такие переустановки для SRT практически невозможны, не говоря уже о том, что отведение телескопа с целевого источника значительно уменьшает площадь покрытия и плоскости.

Подобные условия имеют важное значение при обработке полученных материалов и сказываются на их качестве. Поэтому для обработки данных наземно-космических наблюдений пришлось использовать дополнительные экспресс-программы, позволяющие учесть и в дальнейшем компенсировать отсутствие наблюдений калибраторов – как амплитудных, так и фазовых, как продемонстрировано в предыдущих параграфах. При этом следует отметить, что отсутствие калибраторов компенсируется наличием прикрепленных к файлам калибровочных таблиц, созданных штатно в обсерваториях, и использованием стандартного метода анализа частоты интерферен-

ционных лепестков для определения фаз опорной детали и ее самокалибровки (AIPS, задача FRING) с последующим применением полученных при этом результатов для определения различия в фазах сигналов остальных спектральных деталей и их пространственных координат.

Анализ кросс-корреляционных спектров в полной калибровке по амплитуде и фазе позволяет получить следующие результаты.

Картографировать удалось 13 спектральных деталей, часть спектральных деталей № 6, 7 и 8 (см. рис. 7) оказались по размеру больше диаграммы направленности и разрешились при картографировании. Наблюдаемый максимальный кросс-корреляционный поток в этих спектральных деталях составляет 29.1 Ян, минимальный 4.4 Ян (см. табл. 2). Во всех случаях плотность потока в максимуме линии (Peak, Jy) и пространственный интеграл потока в размерах пятна (Flux, Jy/beam) совпадают, т.е. размеры пространственных компонентов с учетом незначительных различий в позиционных углах одинаковы и равны диаграмме направленности (или меньше). Это означает, что все пространственные детали в рам-

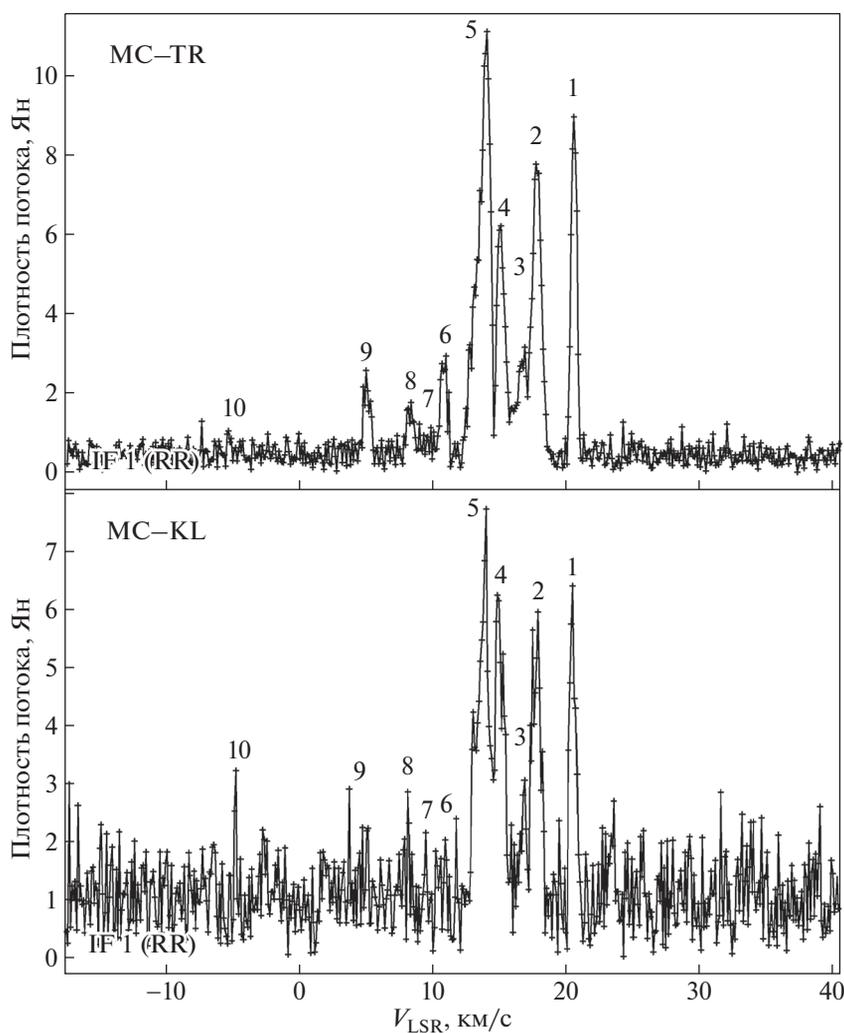


Рис. 10. Кросс-корреляционный спектр источника NGC 2071 IRS 1 (в скоростях): сверху — на короткой базе интерферометра MC-TR; внизу — на длинной базе интерферометра MC-KL. Нумерация спектральных деталей приведена в соответствии с кросс-корреляционным спектром в каналах, см. рис. 6.

ках данного эксперимента представляют собой точечные источники.

Совокупный анализ результатов, полученных на наземных и наземно-космических базах, можно проиллюстрировать, если построить зависимость функции видности от величины проекции базы. В результате выполнения всех необходимых задач AIPS были получены калиброванные по амплитуде автокорреляционные спектры мазера H_2O с одинаковым максимальным потоком ~ 200 Ян для каждого наземного телескопа (см. рис. 4).

В табл. 3 приведены значения проекций баз и значения амплитуды функции видности для спектральной детали № 5_1 на скорости 14.3 км/с для сканов с интервалом в 15 мин, полученные в анализе кросс-корреляционных спектров для на-

земно-космических баз (с применением программы PIMA) и наземных баз. Соответствующие кросс-корреляционные потоки приведены к величине потока 200 Ян на нулевой базе в наземных наблюдениях по данным обработки в пакете AIPS. Такой подход позволяет провести анализ для всех полученных данных в совокупности.

На рис. 11 приведена зависимость функции видности V от величины базы x , которая наилучшим образом аппроксимируется совокупностью двух Гауссиан.

Эта аппроксимация может соответствовать двум пространственным физическим составляющим — протяженной и компактной. В простом предположении о сферически симметричной структуре мазерных компонентов с Гауссовым распределением яркости зависимость функции

Таблица 3. Амплитуда функции видности (RCP) для наземных и наземно-космических баз для спектральной детали № 5_1 на скорости 14.3 км/с

<i>t</i> , часы, UT	База	Проекция (Mλ/ED)	<i>A</i> (PIMA)	Плотность, Ян
	0.0			200
17:00	Ra–Mc	2853.21/3.1	0.00158	16.04
17:00	Ra–Tr	2814.26/3.0	0.00190	18.3
17:45	Ra–Tr	2902.35/3.0	0.00195	18.7
17:00	Mc–Tr	78.92/0.1	0.02017	53.3
17:15	Mc–Tr	79.48/0.1	0.02404	63.58
17:30	Mc–Tr	79.82/0.1	0.01800	47.6
17:45	Mc–Tr	79.93/0.1	0.02086	55.17
17:00	Tr–Kl	79.44/0.1	0.00723	45.6
17:15	Tr–Kl	82.72/0.1	0.00953	61.4
17:30	Tr–Kl	85.87/0.1	0.01065	68.2
17:45	Tr–Kl	88.57/0.1	0.00978	63.02
17:00	Mc–Kl	155.41/0.2	0.00354	23.4
17:15	Mc–Kl	159.20/0.2	0.00473	31.26
17:30	Mc–Kl	162.45/0.2	0.00438	28.9
17:45	Mc–Kl	165.11/0.2	0.00475	31.4

Примечание. В столбцах приведены: *t* – время начала скана (1); база РТ(1)–РТ(2) (2); проекция базы (3); *A* – амплитуда видности кросс-корреляции в PIMA (4); плотность коррелированного потока (5).

видности *V* от величины базы *x* можно представить следующим выражением:

$$V(x) = a_1 \exp\left(-\frac{x^2}{b_1}\right) + a_2 \exp\left(-\frac{x^2}{b_2}\right),$$

где *V*(*x*) – амплитуда функции видности в Ян, *x* – величина проекции базы, выраженная в миллионах длин волн, коэффициенты *a*₁ и *a*₂ определяют вклад пространственных составляющих в амплитуду, параметры *b*₁ и *b*₂ характеризуют ширину Гауссиан, входящих в функцию *V*(*x*).

Обозначим полуширину Гауссианы как *W*, тогда из этой формулы следует, что при некотором значении *x* (проекция базы) наблюдаемый поток уменьшается в 2 раза, до уровня полуширины функции *V*, т.е. при $W = \sqrt{b \ln 2}$.

В результате аппроксимации измерений *V*(*x*), представленных на рис. 11, были получены следующие значения коэффициентов: *a*₁ = 169, *a*₂ = 30, *b*₁ = 3600 ± 400, *b*₂ = (1.53 ± 0.9) × 10⁷, согласно которым вклад протяженной составляющей в общее излучение обеспечивает 85% (169 Ян) потока, а на

долю компактного компонента остается 15% (30 Ян).

Полуширина Гауссиан *W* в функции *V*(*x*) равна 5 × 10⁷ и 3.3 × 10⁹ длин волн для протяженной и компактной составляющей соответственно. Обратные величины дают для характерных размеров этих компонентов значения $\theta = 2 \times 10^{-8}$ и $\theta = 3 \times 10^{-10}$ радиан, или в угловой мере 4 и 0.06 mas.

В линейной мере на расстоянии 390 пк протяженная составляющая имеет размер 1.56 а.е. (4 mas), т.е. примерно размер орбиты Земли, размер компактной составляющей – 0.023 а.е. (0.06 mas), что в 2 раза больше размера Солнца. Неопределенность этих оценок составляет 10% для протяженной составляющей и почти 50% для компактной, что связано с наличием в данных наблюдениях наземно-космической базы только одного размера. Таким образом, эксперимент, поставленный на наземно-космическом интерферометре “Радиоастрон”, выявил только одну деталь, размер которой указывает на то, что мы имеем дело с очень малым небесным телом. Следует отметить, что структура источника излучения может быть более сложной, и для ее исследования нужны измерения на промежуточных базах, которые в нашем эксперименте отсутствуют.

По оценкам размеров 13 компонентов, полученных при обработке данных в AIPS и представленных в табл. 2, их значения примерно одинаковы, соответствуют форме и размеру диаграммы интерферометра, т.е. равны или меньше по склонению и прямому восхождению 6 × 0.6 mas (большая и малая ось эллипса соответственно), или ~2 × 0.2 а.е. на расстоянии 390 пк. Полный размер карты всех компонентов на рис. 7 составляет примерно ~100 × 100 mas, или ~40 × 40 а.е. Эта карта совмещена с картой, полученной на VLBA в 1996 г. [46] (см. IMAGE2¹¹). Точность положения центра карт в работе [46] составляет 50 mas по обеим координатам.

NGC 2071 считается областью образования звезд промежуточной и малой массы [47, 45]. При этом следует иметь в виду, что, как отмечается в обзоре мазеров на молекулах воды и метанола [60], в окрестностях маломассивных звезд мазеры H₂O наблюдаются редко.

Кроме того, в отношении области NGC 2071, учитывая наличие мазеров H₂O, стоит обратить внимание на другую точку зрения, представленную в работах [62, 61], в которых высказано и обсуждается предположение о том, что две туманности NGC 2071 и NGC 2068 являются гигантскими областями образования массивных звезд. В северо-западной части NGC 2071 формируется

¹¹http://www.asc.rssi.ru/shaddow/IMAGE2_Seth-map_with_2014.jpg

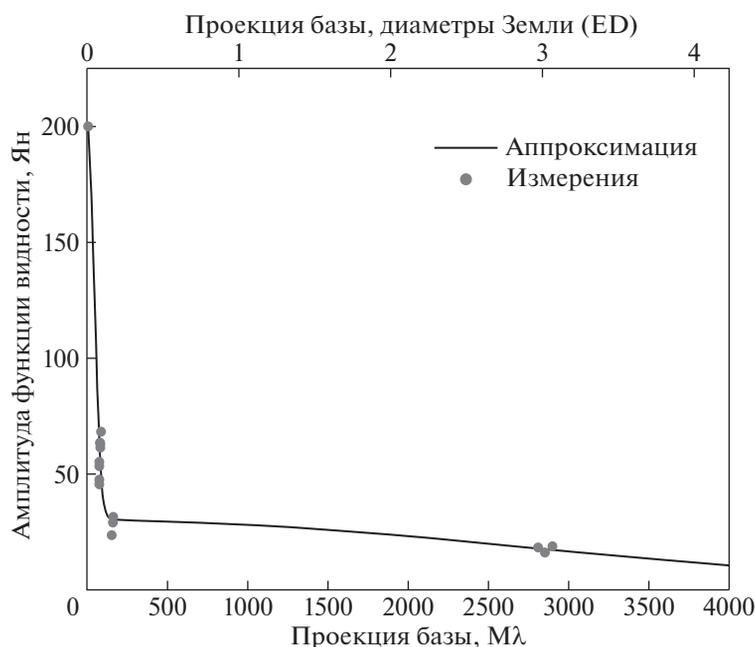


Рис. 11. Зависимость амплитуды функции видности от проекции базы для спектральной детали № 5_1 на скорости 14.3 км/с. Точками обозначены измерения для сеанса наблюдений gaks07ag источника NGC 2071 IRS 1 от 11.01.2014.

обширный молекулярный поток, наблюдаемый в линиях молекулы CO, триггером которого, по мнению авторов этих работ, могут быть именно массивные звезды. Зафиксированный нами небольшой объект находится в центре этого потока и, при этом, в центре интервала скоростей 5–15 км/с, который является также центром скоростей этого гигантского молекулярного потока, наблюдаемого в линии ^{13}CO ($J = 2-1$) (см. IMAGE3¹², заимствовано из работы [61]). Механизм формирования и складывающейся в конечном итоге картины этих двух туманностей и входящих в их состав областей звездообразования описывается в рамках модели столкновения молекулярных облаков Cloud-Cloud Collision (CCC). Отметим, что явление CCC обсуждалось как причина мощной вспышки в мазерном источнике Orion-KL (3.5×10^6 Ян [63]).

Как указывалось выше, мазер H_2O в области NGC 2071 переменный [38, 64], и хотя в нем не была зафиксирована столь мощная вспышечная активность, как в Orion-KL, очевидно, что в рамках высказанных выше предположений эта область заслуживает внимания и тщательного мониторинга. Возможно, центральную часть гигантского молекулярного потока следует поставить в один ряд с теми областями, в которых можно ожидать сильную вспышку в мазерных

объектах и абсолютно новую картину образования и расположения мазерных пятен.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнена обработка данных наблюдений мазера H_2O на частоте 22.2280 ГГц в темной отражательной туманности NGC 2071 в направлении области звездообразования IRS 1, полученных в рамках работы наземно-космического международного интерферометра «Радиоастрон». 70-мин сессия проводилась на 10-м космическом радиотелескопе (SRT-10) и на наземной сети в составе трех радиотелескопов: РТ-32 (Медицина, Италия), РТ-32 (Торунь, Польша) и РТ-64 (Калязин, РФ) 11.01.2014 в период от 17:00 до 18:00 UTC на координатах наведения $\text{RA}(2000) = 05^{\text{h}}47^{\text{m}}04.^{\text{s}}758$, $\text{DEC}(2000) = 00^{\circ}21'42''700$.

2. Угловое разрешение в наблюдениях на наземно-космических базах составляло 0.07 mas при максимальных проекциях баз 3.1 ED (~40 000 км). Синтезированная диаграмма наземной части интерферометра составляла $0.006'' \times 0.0006''$ (P.A. = -23°).

3. Первичная обработка данных проводилась на FX-корреляторе АКЦ ФИАН в полосе 16 МГц (~215 км/с). Использовались 2048 каналов, что обеспечило спектральное разрешение 7.81 кГц (т.е. 0.11 км/с).

4. Получены автокорреляционные и кросс-корреляционные спектры. Все данные обработа-

¹²http://www.asc.rssi.ru/shaddow/IMAGE3_Tsutsumi_with_2014.jpg

ны стандартными задачами пакета AIPS. Амплитудная калибровка выполнялась задачей ANTAB, фазовая – только задачей FRING относительно спектральной детали, одной из наиболее сильных и наиболее удаленных от центральной части спектра.

5. В автокорреляционном спектре в спектральной детали на скорости $V_{\text{LSR}} = 20.5$ км/с зафиксирован сильный поток ~ 100 Ян. В более ранних наблюдениях такой сильный поток не наблюдался [64].

6. Получена карта мазерных пятен, на которой по результатам обработки в пакете программ AIPS присутствуют 13 пространственных компонентов, в совокупности имеющих конфигурацию, вытянутую в направлении “север-юг”. Размер области, занимаемый этими компонентами, составляет $\sim 100 \times 100$ mas, или $\sim 40 \times 40$ а.е. при расстоянии до туманности 390 пк, т.е. это примерно размер Солнечной системы. Плотность коррелированного потока F_v варьируется от ~ 4 до ~ 29 Ян и для всех компонентов совпадает с величиной F_v/beam , т.е. все компоненты точечные в пределах диаграммы. Интервал скоростей пространственных компонентов, для которых получены изображения, составляет (4.7–20.5) км/с при ширине спектральных деталей по половине мощности интенсивности 0.2–0.6 км/с.

7. Зафиксирован один пространственный компонент, имеющий лучевую скорость 14.3 км/с, для которого со сверхвысоким угловым разрешением на наземно-космических базах SRT–Tr и SRT–Mc (~ 3 диаметра Земли) наблюдается корреляция на уровне надежности 6σ , обнаруженная с использованием поканального экспресс-анализа, выполненного в программе PIMA.

8. С использованием значений потоков на наземно-космических и наземных базах для этого компонента построена зависимость величины потока от величины проекции базы, которая наилучшим образом аппроксимируется двумя составляющими Гауссовой формы в предположении сферически симметричной структуры пространственных компонентов.

9. На основании анализа функции видности для этого компонента показано, что эти две составные части могут интерпретироваться как протяженная и компактная составляющие. Получены оценки их размеров в угловой мере 4 и 0.06 mas соответственно. В линейной мере на расстоянии 390 пк протяженная составляющая имеет размер 1.56 а.е., т.е. примерно размер орбиты Земли, размер компактной составляющей – 0.023 а.е., всего в 2 раза превышает размер Солнца. Неопределенность этих оценок составляет 10% для протяженной составляющей и почти 50% для компактной составляющей, что связано с от-

сутствием промежуточных наземно-космических баз.

Проект “Радиоастрон” осуществляется Астро-космическим центром Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук и Научно-производственным объединением им. С.А. Лавочкина по контракту с Госкорпорацией “РОСКОСМОС” совместно с многими научно-техническими организациями в России и других странах.

В работе были использованы наблюдения на радиотелескопе в г. Медичина, радиоастрономической обсерватория Национального института астрофизики INAF (Италия).

Эта работа частично основана на наблюдениях, выполненных с помощью 32-метрового радиотелескопа (Tr) в г. Торунь (Торуньский Центр Астрономии университета им. Николая Коперника, Польша) при поддержке гранта Польского Министерства науки и высшего образования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят штат сотрудников Калязинского радиотелескопа (ОКБ МЭИ, Москва, РФ) за высокое качество проведенных наблюдений.

Благодарим А.В. Алакоза (АКЦ ФИАН) и О.С. Баяндину (JIVE) за полезные обсуждения и советы по обработке научных данных, полученных в проекте “Радиоастрон”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *M. Walmsley*, in *Fragmentation of Molecular Clouds and Star Formation*, Proc. IAU Symp **147**, held in Grenoble, France, June 12–16, 1990, edited by E. Falgarone, F. Boulanger, and G. Duvert (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991), p. 161.
2. *R. Cesaroni, E. Churchwell, P. Hofner, C. M. Walmsley, and S. Kurtz*, *Astron. and Astrophys.* **288**, 903 (1994).
3. *S. Kurtz*, *Revista Mexicana Astron. Astrof.* **9**, 166 (2000).
4. *F. H. Shu, F. C. Adams, and S. Lizano*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **25**, 23 (1987).
5. *E. A. Bergin and M. Tafalla*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **45**, 339 (2007).
6. *C. F. McKee and E. C. Ostriker*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **45**, 565 (2007).
7. *H. Zinnecker and H. W. Yorke*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **45**, 481 (2007).
8. *R. Bachiller*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **34**, 111 (1996).
9. *G. Duvert, S. Guilloteau, F. Ménard, M. Simon, and A. Dutrey*, *Astron. and Astrophys.* **355**, 165 (2000).
10. *N. J. Evans II, M. M. Dunham, J. K. Jurgensen, M. L. Enoch, et al.*, *Astrophys. J. Suppl.* **181**, 321 (2009).
11. *T. Alonso-Albi, A. Fuente, R. Bachiller, R. Neri, P. Planesas, L. Testi, O. Berné, and C. Joblin*, *Astron. and Astrophys.* **497**, 117 (2009).

12. *N. Crimier, C. Ceccarelli, T. Alonso-Albi, A. Fuente, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **516**, id. A102 (2010).
13. *H. M. de Villiers, A. Chrysostomou, M. A. Thompson, S. P. Ellingsen, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **444**, 566 (2014).
14. *S. Kurtz*, in *Massive Star Birth: A Crossroads of Astrophysics*, Proc. IAU Symp **227**, held 16–20 May, Italy, edited by R. Cesaroni, M. Felli, E. Churchwell, and M. Walmsley (Cambridge: Cambridge University Press, 2005), p. 111.
15. *S. Kurtz*, in *The Young Massive Star Environment*, Proc. IAU Symp **231**, held in Pacific Grove, California, USA, August 29–September 2, 2005, edited by C. Lis, A. Blake, and E. Herbst (Cambridge: Cambridge University Press, 2005), p. 47.
16. *M. Reiter, Y. L. Shirley, J. Wu, C. Brogan, A. Wootten, and K. Tatematsu*, *Astrophys. J. Suppl.* **195**, 1 (2011).
17. *J. Bally, N. Cunningham, N. Moeckel, and N. Smith*, in *Massive Star Birth: A Crossroads of Astrophysics*, Proc. IAU Symp **227**, held 16–20 May, Italy, edited by R. Cesaroni, M. Felli, E. Churchwell, and M. Walmsley (Cambridge: Cambridge University Press, 2005), p. 12.
18. *D. Shepherd*, in *Massive Star Birth: A Crossroads of Astrophysics*, Proc. IAU Symp **227**, held 16–20 May, Italy, edited by R. Cesaroni, M. Felli, E. Churchwell, and M. Walmsley (Cambridge: Cambridge University Press, 2005), p. 237.
19. *F. Palla*, in *Massive Star Birth: A Crossroads of Astrophysics*, Proc. IAU Symp **227**, held 16–20 May, Italy, edited by R. Cesaroni, M. Felli, E. Churchwell, and M. Walmsley (Cambridge: Cambridge University Press, 2005), p. 196.
20. *K.-T. Kim and S. E. Kurtz*, *Astrophys. J.* **643**, 978 (2006).
21. *P. Andre, D. Ward-Thompson, and M. Barsony*, *Protostars and Planets IV*, edited by *V. Mannings, A. P. Boss, and S. S. Russell* (Tucson: The University of Arizona Press, 2000), p. 59.
22. *S. Kurtz*, *J. Korean Astron. Soc.* **37**, 265 (2004).
23. *R. Cesaroni*, in *Massive Star Birth: A Crossroads of Astrophysics*, Proc. IAU Symp **227**, held 16–20 May, Italy, edited by R. Cesaroni, M. Felli, E. Churchwell, and M. Walmsley (Cambridge: Cambridge University Press, 2005), p. 59.
24. *S. P. Ellingsen, M. A. Voronkov, D. M. Cragg, A. M. Sobolev, S. L. Breen, and P. D. Godfrey*, in *Astrophysical Masers and their Environments*, Proc. IAU Symp **242**, edited by J. M. Chapman and W. A. Baan, p. 213 (2007).
25. *S. P. Ellingsen, S. L. Breen, M. A. Voronkov, J. L. Caswell, X. Chen, and A. Timmarsh*, arXiv:1210.2139 [astro-ph.GA] (2012).
26. *S. L. Breen and S. P. Ellingsen*, Proc. IAU Symp. **8**, 156 (2012).
27. *Д. А. Варшалович*, *Физика космоса*, 2е изд., статья: космические мазеры (М.: Сов. энциклопедия, 1986), 376.
28. *D. Hollenbach, M. Elitzur, and C. F. McKee*, *Astrophys. J.* **773**, id. 70 (2013).
29. *K. M. Menten, M. J. Reid, P. Pratap, J. M. Moran, and T. L. Wilson*, *Astrophys. J.* **401**, L39 (1992).
30. *L. Kogan and V. Slysh*, *Astrophys. J.* **497**, 800 (1998).
31. *H. Beuther, A. Walsh, P. Schilke, T. K. Sridharan, K. M. Menten, and F. Wyrowski*, *Astron. and Astrophys.* **390**, 289 (2002).
32. *T. J. T. Moore, R. J. Cohen, and C. M. Mountain*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **231**, 887 (1988).
33. *V. I. Slysh, A. M. Dzura, I. E. Val'tts, and E. Gerard*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **106**, 87 (1994).
34. *V. I. Slysh, A. M. Dzura, I. E. Val'tts, and E. Gerard*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **124**, 85 (1997).
35. *W. Batrla, H. E. Matthews, K. M. Menten, and C. M. Walmsley*, *Nature* **326**, 49 (1987).
36. *M. K. Menten*, *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.* **16**, 119 (1991).
37. *M. Felli, J. Brand, R. Cesaroni, C. Codella, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **476**, 373 (2007).
38. *Е. Е. Лехт, В. А. Муницин, А. М. Толмачев, В. В. Краснов*, *Астрон. журн.* **88**(10), 931 (2011).
39. *V. Migenes, S. Horiuchi, V. I. Slysh, I. E. Val'tts, et al.*, *Astrophys. J. Suppl.* **123**, 487 (1999).
40. *O. S. Bayandina, R. A. Burns, S. E. Kurtz, N. N. Shakhvorostova, and I. E. Val'tts*, *Astrophys. J.* **884**, id. 140 (2019).
41. *R. J. Parker*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **476**, 617 (2018).
42. *T. A. van Kempen, C. McCoe, S. Tisi, D. Johnstone, and M. Fich*, *Astron. and Astrophys.* **569**, id. A53 (2014).
43. *R. L. Snell and J. Bally*, *Astrophys. J.* **303**, 683 (1986).
44. *M. A. Trinidad, T. Rodríguez, and L. F. Rodríguez*, *Astrophys. J.* **706**, 244 (2009).
45. *C. Carrasco-González, M. Osorio, G. Anglada, P. D'Alesio, L. F. Rodríguez, J. F. Gómez, and J. M. Torrelles*, *Astrophys. J.* **746**, id. 71 (2012).
46. *A. C. Seth, L. J. Greenhill, and B. P. Holder*, *Astrophys. J.* **581**, 325 (2002).
47. *J. M. Torrelles, J. F. Gómez, L. F. Rodríguez, S. Curiel, G. Anglada, and P. T. P. Ho*, *Astrophys. J.* **505**, 756 (1998).
48. *B. J. Anthony-Twarog*, *Astron. J.* **87**, 1213 (1982).
49. *N. S. Kardashev, V. V. Khartov, V. V. Abramov, V. Yu. Avdeev, et al.*, *Astron. Rep.* **57**(3), 153 (2013).
50. *W. Baan, A. Alakoz, T. An, S. Ellingsen, et al.*, in *Astrophysical Masers: Unlocking the Mysteries of the Universe*, Proc. IAU Symp. **336**, 422 (2018).
51. *J. N. Douglas, F. N. Bash, F. A. Bozayan, G. W. Torrence and C. Wolfe*, *Astron. J.* **111**, 1945 (1996).
52. *S. Likhachev, V. Kostenko, I. Girin, A. Andrianov, V. Jarov, and A. Rudnitskiy*, *J. Astron. Instrument.* **6**(3), id. 1750004 (2017).
53. *А. С. Андрианов, И. А. Гурин, В. Е. Жаров, В. И. Костенко, С. Ф. Лихачев, М. В. Шацкая*, *Вестн. ФГУП НПО Лавочкина* **3**(24), 55 (2014).
54. *М. А. Щуров, В. Ю. Авдеев, И. А. Гурин, В. И. Костенко, С. Ф. Лихачев, В. А. Лодыгин, А. Г. Рудницкий и А. Р. Шайхутдинов*, *Краткие сообщения по физике* **38–45**, 133 (2019).

55. *A. С. Андрианов, Исследование структуры локальной межзвездной плазмы наземно-космическим интерферометром “Радиоастрон”, кандидатская диссертация, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (2017).*
56. *L. Kogan, in Astronomical Data Analysis Software and Systems V, edited by G. H. Jacoby and J. Barnes, ASP Conf. Ser. 101, 175 (1996).*
57. *L. Petrov, Y. Y. Kovalev, E. B. Fomalont, and D. Gordon, Astron. J. 142, 35 (2011).*
58. *N. Shakhvorostova, A. Sobolev, J. Moran, A. Alakoz, H. Imai, and V. Avdeev, Adv. Space Research 65, 772 (2020).*
59. *Y. Y. Kovalev, N. S. Kardashev, K. V. Sokolovsky, and P. A. Voitsik, Adv. Space Research 65, 705 (2020).*
60. *M. Kang, J.-E. Lee, M. Choi, Y. Choi, K.-T. Kim, J. Francesco, and Y.-S. Park, Astrophys. J. Suppl. 209, id. 25 (2013).*
61. *D. Tsutsumi, A. Ohama, K. Okawa, M. Kohno, et al., <https://arxiv.org/pdf/1706.05664v1.pdf> (2017).*
62. *S. Fujita, D. Tsutsumi, A. Ohama, A. Habe, et al., Publ. Astron. Soc. Japan, 73(1), S273 (2021).*
63. *T. Omodaka, T. Maeda, M. Miyoshi, A. Okudaira, et al., Publ. Astron. Soc. Japan 51, 333 (1999).*
64. *Н. Т. Ашимбаева, П. Колом, В. В. Краснов, Е. Е. Лехт, М. И. Пащенко, Г. М. Рудницкий, А. М. Толмачев, Астрон. журн. 97, 564 (2020).*