

УДК 524.5+524.3-52

МАЗЕРЫ H_2O И ДИНАМИКА ПРОТОПЛАНЕТНОГО ДИСКА В IC 1396 N

© 2017 г. О. С. Баяндина^{1*}, И. Е. Вальтц¹, С. Е. Куртц², Г. М. Рудницкий³, А. В. Алакоз¹

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Астрокосмический центр, Москва, Россия

²Центр радиоастрономии и астрофизики Мексиканского национального автономного университета, Морелия, Мексика

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

Поступила в редакцию 06.09.2016 г.; принята в печать 27.12.2016 г.

Представлены наблюдения мазера H_2O в глобуле IC 1396 N на наземно-космическом интерферометре с 10-м радиотелескопом “Радиоастрон”. Отклик от источника не был обнаружен на проекциях баз >2.3 диаметров Земли, что указывает на нижний предел размера мазера $L > 0.03$ а.е. и на верхний предел яркостной температуры 6.25×10^{12} К. По данным наблюдений на наземной сети построены карты методом частоты интерференционных лепестков. Получены позиции мазерных пятен, скорости и значения плотностей потоков для мазерных деталей. Показано, что в спектре наблюдаются группы низкоскоростных деталей в интервале скоростей от -4.5 до $+0.7$ км/с и две высокоскоростные детали на скоростях $V_{\text{LSR}} = -9.4$ км/с и $V_{\text{LSR}} = +4.4$ км/с, удаленные от наиболее яркой центральной детали на скорости $\sim +0.3$ км/с на расстояния 157 и 70 а.е., соответственно. Мазерные компоненты центральной части спектра делятся на четыре группы по скоростям и на три по координатам. Три группы низкоскоростных мазерных компонентов 2014 г. выстраиваются на прямой линии протяженностью ~ 200 а.е., при этом две группы не наблюдались в 1996 г. и, возможно, являются джетами, сформировавшимися в период 18 лет между наблюдениями 1996 и 2014 гг. Возможно также, что за 18 лет, прошедших с предыдущих наблюдений, изменилось направление предполагаемых джетов. Это объясняется прецессией джетов под воздействием гравитационного поля окружающего вещества глобулы. Коллимация джетов может обеспечиваться околосредным протопланетным диском. На диаграмме “ V_{LSR} –прямое восхождение” прослеживается линейная зависимость между джетами и центральной группой пятен со скоростями $V_{\text{LSR}} \sim +0.3$ км/с, в то время как центральная группа с теми же координатами, но со скоростями $V_{\text{LSR}} \sim -3.4$ км/с, возможно, связана линейной зависимостью с высокоскоростными деталями, обнаруженными в 2014 г. Сопоставление расположения мазерных пятен 2014 г. и 1996 г. на диаграмме “ V_{LSR} –прямое восхождение” для низкоскоростных деталей показывает, что большая часть низкоскоростных деталей сохраняет свое пространственное положение на протяжении 18 лет.

DOI: 10.7868/S0004629917060020

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. Общие сведения

IC 1396 N — кометарная глобула на северной окраине зоны ионизованного водорода IC 1396, расположенной на расстоянии 750 пк [1]. В IC 1396 N наблюдается самый яркий из 25 источников IRAS, вкрапленных в туманность — его светимость в дальнем инфракрасном диапазоне составляет $440 L_{\odot}$ [2]. Это протозвезда промежуточной массы IRAS 21391+5802. По миллиметровому излучению в континууме в глобуле

было обнаружено несколько молодых звездных объектов (Young Stellar Objects, YSOs) на различных стадиях эволюции [3, 4]. Самый яркий источник на длине волны 3.1 мм — молекулярное ядро BIMA-2 — является центром нескольких bipolarных молекулярных потоков, наблюдавшихся в крыльях многих тепловых линий (см. [2, 3, 5, 6] и ссылки в этих работах).

1.2. Мазерные источники

Мазерное излучение H_2O в данной области было обнаружено в работе [7]. Мазерное излучение

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

ОН в окрестности IC 1396 N/VIMA-2 не наблюдается. В частности, оно не было обнаружено в наблюдениях на радиотелескопе Радиоастрономической станции Нансэ (Франция) в 2002–2003 гг. [8]. Наблюдения, выполненные на том же телескопе в 2007 г., показали, что плотность потока в линиях ОН на частотах 1665 и 1667 МГц в диапазоне $V_{LSR} = -35-35$ км/с не превышает 0.1 Ян по уровню 3σ . Не наблюдается и мазерное излучение метанола II класса на частоте 6.7 ГГц [9], которое, как считается, формируется в аккреционных дисках, но наблюдается мазерное излучение метанола I класса на частоте 44 ГГц [10], что свидетельствует о самой ранней стадии сжатия протозвездного вещества. Нет информации о возможной ассоциации с IRDC (Infrared Dark Clouds) [11], SDC (Spitzer Dark Clouds) [12] или с объектами EGO (Extended Green Objects) [13].

1.3. Исследования на VLA и VLBA

В 1992 г. было выполнено картографирование IC 1396 N в мазерной линии H_2O на VLA с угловым разрешением $0.1''$ [14]: найден компактный кластер из трех мазерных пятен размером $0.18''$ (135 а.е.) и один удаленный на $13.3''$ (10^4 а.е.) компонент. Мониторинг показал, что мазерное излучение H_2O сильно переменено по потоку, при этом спектральные детали появляются и исчезают на разных скоростях.

В июне 1996 г. в рамках предполетного обзора VSOP были проведены наблюдения мазеров H_2O в IC 1396 N на VLBA с угловым разрешением 0.3 миллисекунд дуги [15]. Данные наблюдений этого источника были обработаны отдельно в работе [16]. На изображении, полученном с диаграммой направленности 1.0×0.3 миллисекунд, была обнаружена упорядоченная цепь мазерных пятен, распределенных в пространстве в размере ~ 15 а.е. Самый сильный мазерный компонент на скорости около $V_{LSR} \simeq +0.5$ км/с не разрешался на самой короткой базе и имел плотность потока ~ 150 Ян. Такая плотность потока не наблюдалась в IC 1396 N с момента его открытия в 1988 г. [7]. В наблюдениях на VLBA были обнаружены две высокоскоростные детали на расстояниях 410 а.е. и 10 000 а.е. от центра скопления, имеющие скорости -14.1 км/с и 9.3 км/с, соответственно.

Авторы [16] предложили три модели источника: 1) кеплеровский диск; 2) звездный ветер и 3) молекулярный поток. Совокупность всех этих моделей также обсуждается в [16]. Мазерные пятна на низких скоростях возникают в кеплеровском диске, и мазерное излучение возбуждается ударными волнами, в то время как пятна на высоких скоростях возникают в основании молекулярного

потока, исходящего от центрального молодой звезды или протозвездного объекта массой $4 M_{\odot}$. Масса диска и угловой момент похожи на те, которые имеет Солнечная система, т.е. предположительно, наблюдается межзвездный аккреционный диск, аккумулирующий угловой момент коллапсирующего молекулярного ядра, что может дать начало процессу формирования протопланетной системы.

В работе [17] мазеры H_2O исследовались как на одиночных антеннах, так и на интерферометрах. В наблюдениях на VLBA угловое разрешение составило 0.8×0.4 миллисекунд (0.6×0.3 а.е.). Этот обзор был выполнен в 1996 г. в трех эпохах — в марте, апреле и мае с интервалом 1 месяц, т.е. непосредственно перед наблюдениями [15, 16], хотя работа [17] опубликована позже работы [16]. Авторы обнаружили средние собственные движения мазеров 2 миллисекунды в год и нашли петлю расширяющихся мазеров размером 1 а.е. с несколькими более высокоскоростными мазерными пятнами, движущимися от петли. Они интерпретировали эту наблюдаемую картину как радиальный поток, а не как диск, хотя модель диска предположили приемлемой для пятен более близких к центральной протозвезде, и пришли к выводу, что дополнительные наблюдения могут выявить некоторое вращение или даже падение вещества на центральный источник. В работе [17] также была обнаружена сильная переменность мазера в 1995–1996 гг.

Особый интерес представляет также модель, предложенная в работах [18–20], в которой можно обнаружить “изогнутые” и “закрученные” филаменты мазеров H_2O , формирующиеся в результате прецессии околозвездного протопланетного диска. В этой модели предполагается, что небольшой газопылевой диск окружен массивным околозвездным тором, который остается от протозвездного скопления и из которого формируется звезда. Ось диска наклонена под некоторым углом к тору, заставляя диск прецессировать. Отток вещества коллимируется диском и увлекает материал с внутренних стенок тора, возбуждая излучение мазера там, где этот материал ударяется о стенки тора. Крупномасштабный биполярный поток направляется через полярные области. Примером реализации этой модели может служить туманность спиральной формы NGC 2261 (Туманность Хаббла) [21].

Используя модель прецессирующего диска и предполагаемый размер и массу системы, можно показать, что период прецессии будет порядка десятилетий. Под действием ударной волны собственные движения мазерных пятен могут достигать 1–2 миллисекунд в год и проследиваться на коротких временных интервалах при наблюдениях с разрешением ($0.1-0.01$) миллисекунд дуги.

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

Мы проводили мониторинг этих H₂O мазеров в IC 1396 N на радиотелескопе РТ-22 в Пущино (Московская область) более двадцати лет. Хотя наши наблюдения не могут “разрешить” пространственную структуру мазеров, они обеспечивают многолетнюю историю их спектрального поведения. Наши наблюдения показали, что пик плотности потока может достигать значения 100 Ян, при этом мы также отмечали, что спектральные детали появляются и исчезают на различных лучевых скоростях. Такие колебания означают, что любые исследования собственных движений мазерных пятен должны проводиться на относительно коротких временных интервалах, чтобы гарантировать, что наблюдения ведутся за одними и теми же мазерными деталями.

Положения компонентов мазеров H₂O с большой точностью и в нескольких периодах экспозиции могут быть получены в наблюдениях с высоким разрешением на базах, превышающих диаметр Земли. С этой целью был поставлен эксперимент с использованием космического радиотелескопа “Радиоастрон” и сети наземных радиотелескопов, о результатах которого сообщается в данной работе. В таких наблюдениях можно обнаружить собственные движения на коротких временных масштабах, более подробно проследить пространственную структуру и динамику области и сравнить с теми, о которых сообщается в работах [16, 17], чтобы понять, есть ли тенденция к изменениям спустя 20 лет. Кроме того, наблюдения на “Радиоастроне” с высоким разрешением могут дать новую разнообразную информацию о поле скоростей на масштабах <1 а.е. вокруг центрального YSO. Отметим, что в проекте “Радиоастрон” детектирование сигнала от водяных мазеров в областях звездообразования Oгion KL и W49 N было получено на проекциях наземно-космических баз ~3.5 и ~9.7 диаметров Земли, соответственно (подробнее см. [22]).

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения мазера H₂O в глобуле IC 1396 N выполнялись в период с июля по декабрь 2014 г. на наземно-космическом интерферометре, в состав которого входит 10-м космический телескоп “Радиоастрон” и сеть наземных радиотелескопов. “Радиоастрон” был выведен на орбиту 18 июля 2011 г. с космодрома Байконур на ракете космического назначения “Зенит-3F” с

разгонным блоком “Фрегат-СБ”. Это первый в мире наземно-космический радиоинтерферометр, работающий в четырех диапазонах от метровых до сантиметровых волн и обеспечивающий наивысшее угловое разрешение около 10 микросекунд дуги. Основные параметры интерферометра описаны в работе [23] и представлены на сайте проекта по адресу <http://www.asc.rssi.ru/radioastron/rus/index.html>.

Наблюдения выполнялись на частоте 22.2280 ГГц с разрешением по частоте 7.81 кГц, т.е. с разрешением по скорости 0.11 км/с, с координатами наведения на источник RA(2000) = 21^h40^m41.75^s, DEC(2000) = +58°16′11.9″. Для космического телескопа “Радиоастрон” на длине волны 1.35 см эквивалентная спектральная плотность потока шумового излучения системы (System Equivalent Flux Density, SEFD) составляет 37 кЯн [24].

В процессе наблюдений мазера в IC 1396 N была проведена серия из пяти последовательных сеансов, которые можно разделить на три категории по размерам наземно-космических баз: короткие базы — до ~2.3 диаметров Земли (июль), средние базы — ~3.8 диаметров Земли (один сеанс в октябре и один в декабре) и длинные базы — ~5.9 и ~5.1 диаметра Земли (в ноябре и в декабре, соответственно). Соответствующие значения эффективных угловых разрешений для этих средних значений проекций баз приведены в табл. 1. В табл. 2 перечислены даты выполнения наблюдательных сеансов, участвовавшие в них телескопы и наблюдавшиеся плотности потока детали $V_{LSR} = -9.4$ км/с.

Наблюдения на коротких базах обеспечивают наибольшую вероятность детектирования сигнала от источника на наземно-космических базах. Также по их результатам можно оценить нижнюю границу размера мазера и верхнюю границу яркостной температуры, в случае разрешенного источника. Включение средних баз позволяет улучшить пространственное разрешение и качество изображений в сравнении с полученными на коротких базах. В наблюдениях с длинными базами могут быть измерены размеры мазерных пятен.

Для каждой из трех категорий на рис. 1 представлены реализованные покрытия *uv*-плоскости для наземно-космических баз (данные для всех телескопов, участвовавших в наблюдениях), на рис. 2 — только для наземных баз (данные только для одной базы, на которой было получено детектирование сигнала в каждом наблюдательном сеансе — эти базы указаны на рис. 5).

Таблица 1. Размеры баз и эффективное разрешение, реализованное в процессе наблюдений с наземно-космическими базами

Номер сеанса	Месяц	Средний размер проекций базы, "диаметр Земли"	Средний размер проекций базы, км	Средний размер проекций базы, $10^9 \lambda$	Эффективное разрешение, 10^{-9} радиан	Эффективное разрешение, мсд
1	Июль	2.3	29310	2.2	0.46	95
2	Октябрь	3.8	48420	3.6	0.28	58
3	Ноябрь	5.9	75178	5.6	0.18	37
4	Декабрь	5.1	64984	4.8	0.21	43
5	Декабрь	3.8	48420	3.6	0.28	58

Таблица 2. Список радиотелескопов, которые принимали участие в наблюдениях мазера H_2O в источнике IC 1396 N в 2014 г.

Номер сеанса	Дата	Продолжительность сеанса, часы	Телескопы*	Начало сеанса наблюдений	Окончание сеанса наблюдений	Плотность потока**, Ян
1	2014-07-26	3	Ys, Nt, Sr, Tr, Kl, RA	04:00:00	07:00:00	4.8 ± 0.2
2	2014-10-10	4	Ys, Kl, Ef, Tr, RA	20:30:00	00:30:00	12.2 ± 0.8
3	2014-11-23	1	Ef, Tr, Kl, Sv, RA	05:00:00	06:00:00	20.2 ± 0.8
4	2014-12-01	1	Ef, Sr, Kl, RA	21:00:00	22:00:00	51.3 ± 0.8
5	2014-12-10	1	Sr, Tr, Sv, Zc, RA	10:00:00	11:00:00	28.4 ± 0.8

Примечание. * Расшифровка аббревиатур: RA — космический радиотелескоп "Радиоастрон" (международный проект); Ef — Эффельсберг (ФРГ), 100-м; Sr — Сардиния (Италия), 65-м; Kl — Калязин, Московская область (Россия), 64-м; Ys — Йебес (Испания), 40-м; Nt — Ното, Сицилия (Италия), 32-м; Tr — Торунь (Польша), 32-м; Sv — Светлое, Ленинградская область (Россия), 32-м; Sc — Зеленчук, Карачаево-Черкесская АО (Россия), 32-м.

** Калиброванные значения плотности потока в самой сильной детали спектра на скорости -9.4 км/с, полученные по данным автоспектров с отдельных телескопов, пояснения см. в разделе "Обсуждение".

3. ОБРАБОТКА ДАННЫХ И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Первичная обработка данных выполнялась на программном корреляторе АКЦ ФИАН [25]. Поиск интерферометрического отклика для наземно-космических баз выполнялся в программном пакете PIMA¹. Для дальнейшей работы с FITS-файлами использовался программный пакет AIPS². Амплитудная калибровка данных выполнялась с помощью задачи ANTAB с использованием калибровочных таблиц, содержащих информацию об измерениях шумовой температуры антенн на протяжении всего времени наблюдений. В силу технических проблем записать калибровочных таблиц для телескопов Ys, Sr и Nt (см. расшифровку аббревиатур в табл. 2) не была выполнена. В этом случае использовались стандартные значения шумовых температур, рассчитанные из известных параметров антенн³.

Квazar J2137+510 ($RA(2000) = 21^h37^m01.0015^s$, $DEC(2000) = +51^\circ01'36.079''$) использовался как калибровочный источник и наблюдался в течение пяти минут на всех наземных телескопах в каждом сеансе наблюдений. Первичная калибровка групповой задержки сигнала и частоты интерференции (задача FRING) выполнялась по калибровочному источнику. Также калибровочный источник использовался для калибровки полосы пропускания. Абсолютные координаты ($RA(2000) = 21^h40^m41.81^s$, $DEC(2000) = +58^\circ16'12.0''$) самой яркой мазерной детали на скорости $V_{LSR} = -9.4$ км/с, по которой в дальнейшем выполнялась самокалибровка, были определены по картам, построенным методом анализа частоты интерференции (задача FRMAP). Частота интерференции (т.е. разность доплеровских частот сигналов, принимаемых в разнесенных точках приема интерферометра), является функцией координат источника и для отдельной спектральной линии, полученной на одной базе, описывается уравнением прямой. Пересечение нескольких таких прямых от разных баз указывает на положение мазерного

¹<http://astrogeo.org/pima/>

²<http://www.aips.nrao.edu>

³http://www.evlnbi.org/user_guide/EVNstatus.txt

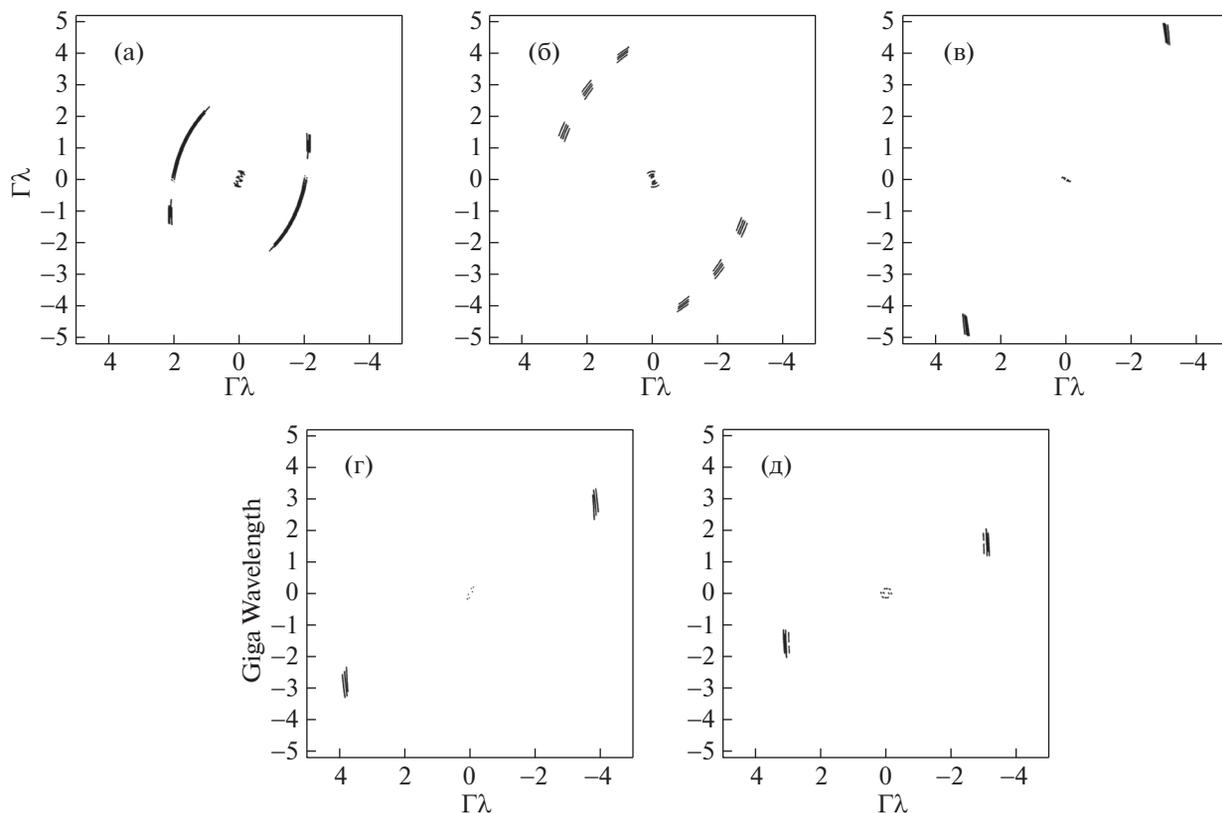


Рис. 1. Реализованные покрытия uv -плоскости для наземно-космических баз в наблюдениях 2014 г. (данные для всех телескопов, принимавших участие в наблюдениях): а) июль, короткие базы, длительность сеанса 3 часа (сеанс № 1 в таблицах 1 и 2); б) октябрь, средние базы, 4 часа (сеанс № 2); в) декабрь, средние базы, 1 час (сеанс № 3); г) ноябрь, длинные базы, 1 час (сеанс № 4); д) декабрь, длинные базы, 1 час (сеанс № 5).

источника на карте (метод подробно описывается в работах [26, 27]).

На рис. 3 для каждого сеанса представлены первичные некалиброванные (плотность потока в условных единицах) автокорреляционные спектры, т.е. спектры, полученные на каждой антенне, принимавшей участие в наблюдениях. Эти спектры используются для диагностики наличия сигнала, оценки работоспособности приемной аппаратуры и качества первичных данных. На рис. 4 показаны калиброванные (плотность потока в Янских) автокорреляционные спектры для отдельных телескопов, которые использовались для определения потока источника в каждом сеансе наблюдений. Кросскорреляционные спектры (т.е. результат перемножения комплексных спектров, полученных на отдельных телескопах) для одной базы, на которой в данном сеансе наблюдений был детектирован сигнал от источника, представлены на рис. 5. Все спектры были получены с использованием задачи POSSM, калиброванные спектры масштабировались с помощью задачи SETJY.

Положения мазерных пятен относительно опорной детали ($V_{\text{LSR}} = -9.4$ км/с) и значения потоков были определены из карт, построенных ме-

тодом частоты интерференционных лепестков (задача FRMAP). Во всех сеансах наблюдений был надежно детектирован сигнал на наземных базах для двух высокоскоростных ($V_{\text{LSR}} = -9.4$ км/с и $V_{\text{LSR}} = +4.4$ км/с) мазерных деталей, и получены соответствующие параметры. Для низкоскоростных деталей детектирование на уровне 4σ и выше было получено только во втором сеансе наблюдений (октябрь).

На рис. 6 приводятся карты самых ярких спектральных деталей, наблюдавшихся во втором, наиболее длительном сеансе, в каждой из четырех групп, объединяющих близкие по координатам мазерные пятна (см. координаты в табл. 3 и описание групп в разделе “Обсуждение”). Рисунок иллюстрирует сходимость решений, полученных методом анализа частоты интерференционных лепестков. В табл. 3 для центральной части спектра (выведена как пример на рис. 7 в каналах и в скоростях для второго сеанса) приводятся соответствующие параметры для каждого спектрального канала, в котором обнаружено детектирование с отношением сигнала к шуму на уровне выше 4σ .

Таблица 3. Параметры мазерных компонентов, полученные при обработке карт (построенных методом частоты интерференционных лепестков) для каждого отдельного канала центральной части спектра H_2O в IC 1396 N, наблюдавшегося во втором сеансе 2014 г. (длительность 4 часа)*

Номер спектральной детали	Номер группы компонентов	Номер спектрального канала	Скорость в спектральном канале, км/с	ΔRA , мс	ΔDec , мс	Плотность потока, мЯн
1	1	115	0.7	75.9 ± 1.5	-59.1 ± 2.1	0.3
2		116	0.6	85.6 ± 2.2	-50.8 ± 2.9	0.5
3		117	0.5	74.9 ± 1.4	-59.2 ± 2.0	0.7
4		118	0.3	79.0 ± 0.6	-49.6 ± 0.9	0.8
5		119	0.2	76.7 ± 0.3	-58.8 ± 0.4	0.7
6		120	0.1	87.4 ± 1.2	-55.9 ± 1.8	0.6
7		121	0.0	84.1 ± 1.0	-61.6 ± 1.6	0.5
8		122	-0.1	81.6 ± 0.5	-49.4 ± 0.9	0.5
9		123	-0.2	82.9 ± 0.8	-50.7 ± 1.2	0.5
10		124	-0.3	81.0 ± 0.4	-57.9 ± 0.6	0.4
11	2	133	-1.2	163.1 ± 1.3	-23.5 ± 1.8	0.5
12		134	-1.3	163.0 ± 0.2	-14.6 ± 0.3	0.5
13		135	-1.4	166.1 ± 0.3	-14.8 ± 0.5	0.6
14		136	-1.5	170.6 ± 1.4	-13.8 ± 1.8	0.7
15		137	-1.7	170.0 ± 1.0	-17.5 ± 1.4	0.6
16		138	-1.8	173.2 ± 0.4	-11.3 ± 0.5	0.5
17		139	-1.9	175.6 ± 0.5	-13.2 ± 0.7	0.4
18	3	142	-2.1	297.5 ± 1.2	79.3 ± 1.6	0.3
19		143	-2.3	293.2 ± 0.8	85.4 ± 1.2	0.4
20		144	-2.4	292.8 ± 0.3	77.8 ± 0.3	0.5
21		145	-2.5	288.4 ± 1.3	76.5 ± 1.9	0.4
22	4	150	-3.0	72.8 ± 0.5	-52.6 ± 0.6	0.4
23		151	-3.1	73.0 ± 1.3	-55.6 ± 1.4	0.5
24		152	-3.2	74.7 ± 1.1	-54.6 ± 1.4	0.6
25		153	-3.3	79.4 ± 0.7	-43.5 ± 0.8	0.5
26		154	-3.4	71.8 ± 0.4	-59.1 ± 0.5	0.5
27		155	-3.6	75.9 ± 0.5	-53.5 ± 0.7	0.4
28		156	-3.7	83.2 ± 1.3	-48.1 ± 1.6	0.4
29		163	-4.4	84.1 ± 0.8	-43.8 ± 0.9	0.3
30		164	-4.5	75.9 ± 5.3	-56.1 ± 7.6	0.3

Примечание. * Опорной является высокоскоростная деталь ($\Delta\text{RA} = 0$, $\Delta\text{Dec} = 0$) на скорости $V_{\text{LSR}} = -9.4$ км/с с плотностью потока 5.5 Ян. Вторая высокоскоростная деталь на скорости $V_{\text{LSR}} = +4.4$ км/с с плотностью потока 1.7 Ян обнаружена на координатах $\Delta\text{RA} = 153.2$, $\Delta\text{Dec} = 146.3$.

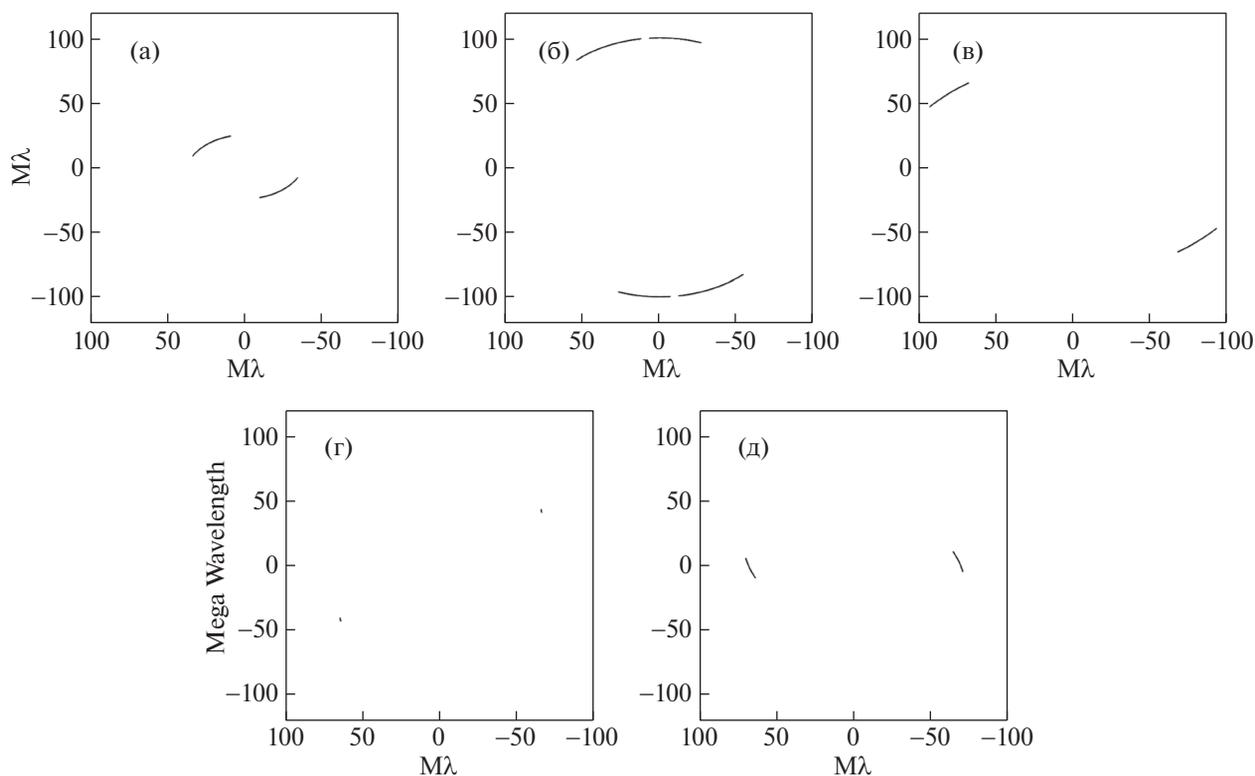


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для наземных баз (данные только для одной базы в каждом сеансе наблюдений, на которой было получено детектирование сигнала от источника, — данные базы отмечены на рис. 5).

4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На наземно-космических базах интерферометрический отклик от источника IC 1396 N не был детектирован ни в одном сеансе наблюдений, что может быть вызвано двумя причинами: или чувствительность телескопов была недостаточна, или размер источника больше того, который можно зафиксировать с реализуемым разрешением системы. Ниже мы рассмотрим обе возможности.

Обсудим калибровку данных по потоку и полученные значения плотности потока мазеров. В трех сеансах наблюдений (второй, третий и четвертый) принимал участие Эффельсбергский 100-м радиотелескоп (Ef). Более того, были получены таблицы ANTAB, содержащие информацию о измеренных системных температурах и кривых усиления антенн, т.е. было возможно выполнение точной калибровки потока. В первом сеансе детектирование сигнала было получено только на 65-м телескопе в Сардинии (Sr). Для этого телескопа нет таблиц ANTAB с реальными измерениями, поэтому использовались стандартные значения SEFD. В пятом сеансе интерферометрический отклик от источника был получен на нескольких телескопах, самым крупным из которых был 65-м телескоп в Сардинии. Однако калиброванный автокорреляционный спектр представлен для 32-м телескопа в Торунни (Tr), так как для него есть таблица ANTAB,

и, значит, поток определен более надежно, чем для телескопа в Сардинии.

Для каждого сеанса наблюдений в табл. 2 представлен поток в самой сильной детали спектра на скорости -9.4 км/с, определенный из автокорреляционных спектров (см. рис. 4). Плотности потока определялись с использованием пакета ORIGIN⁴ с помощью специальной функции программы Fit Gaussian.

Из автокорреляционных спектров (рис. 4) видна сильная переменность источника. Самый сильный поток ~ 51 Ян был обнаружен во время четвертого сеанса наблюдений (рис. 4г), самый слабый (~ 5 Ян) — во время первого (рис. 4а).

Принимая 5 Ян как нижний предел плотности потока от источника, отсутствие детектирования с космическим телескопом означает, что яркостная температура источника на момент наблюдений была меньше 6.25×10^{12} К. Отсутствие детектирования на малой базе размером 2.3 диаметров Земли означает, что линейный размер источника $L > 0.03$ а.е.

В каждом сеансе наблюдений детектирование сигнала от источника было получено только на одной наземной базе, как показано на рис. 5.

⁴<http://www.originlab.com/>

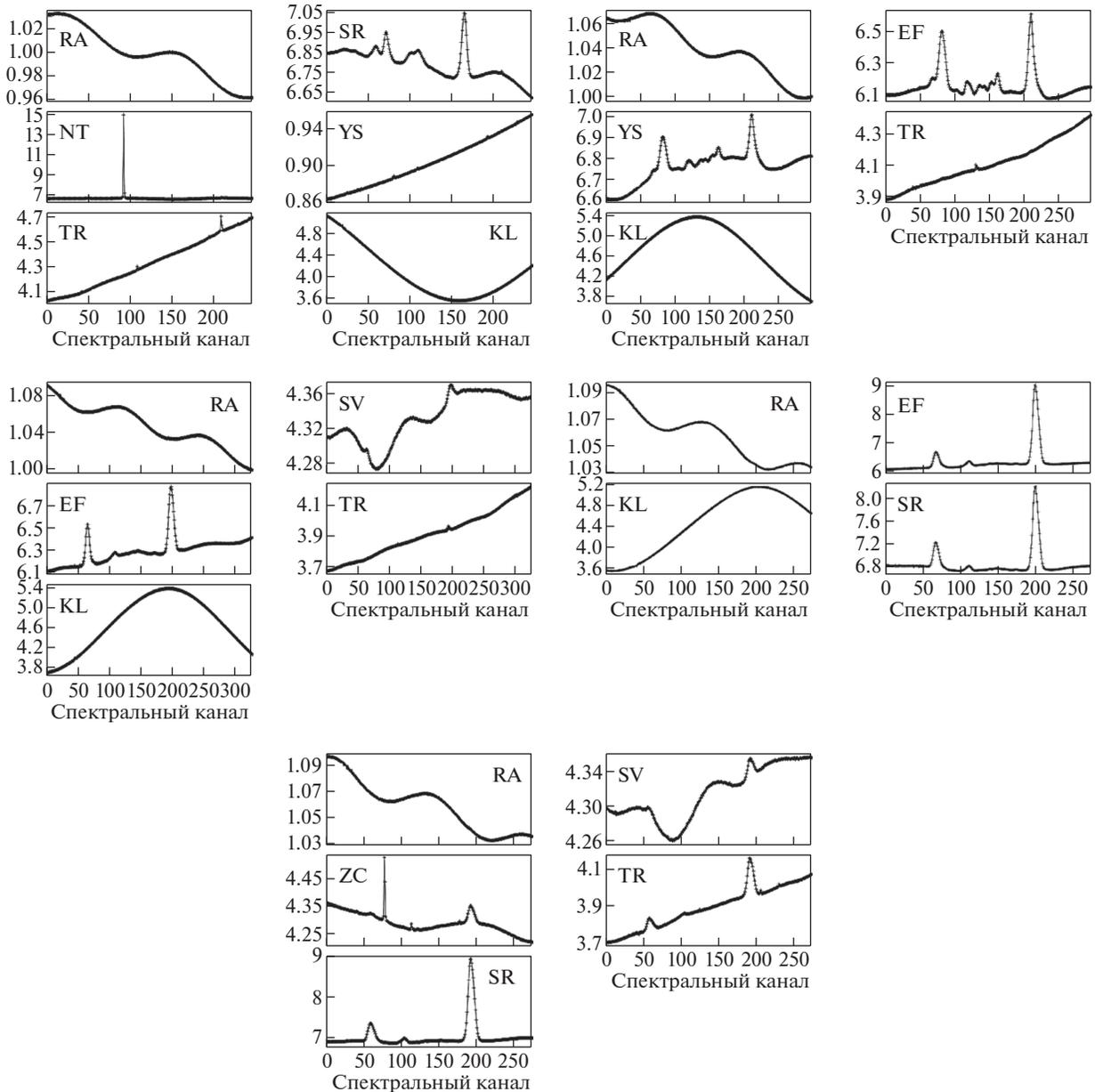


Рис. 3. Первичные некалиброванные автокорреляционные спектры для всех телескопов, принимавших участие в пяти сеансах наблюдений). Расшифровку аббревиатур см. в примечании к табл. 2.

Телескопы, на которых не был получен интерферометрический отклик от источника, были исключены из дальнейшей обработки данных задачей FRMAP. В наших наблюдениях мазерная эмиссия H_2O на уровне больше 4σ присутствует в интервале скоростей примерно от -10 до $+5$ км/с. Отсутствуют высокоскоростная деталь в голубой части спектра ($V_{\text{LSR}} = -14.1$ км/с [16] или $V_{\text{LSR}} = -14.6$ км/с [17]) и деталь в красной части спектра на скорости $V_{\text{LSR}} = +9.3$ км/с, которая наблюдалась в работе [16]. При этом наблюдаются две новых яркие детали — голубая на $V_{\text{LSR}} = -9.4$ км/с и красная на $V_{\text{LSR}} = +4.4$ км/с.

Центральная часть спектра с низкоскоростными деталями существенно слабее, чем в наблюдениях [16], но занимает более широкий интервал — от $V_{\text{LSR}} = -4.5$ км/с до $V_{\text{LSR}} = +0.7$ км/с. Деталь на скорости $+1.32$ км/с, выбранная для самокалибровки в работе [16], в нашем спектре отсутствует.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

5.1. Анализ карт и диаграмм “скорость–позиция”

На рис. 8 представлены карты компонентов мазера H_2O для центральной части спектра в интервале скоростей от -4.5 до $+0.7$ км/с и двух

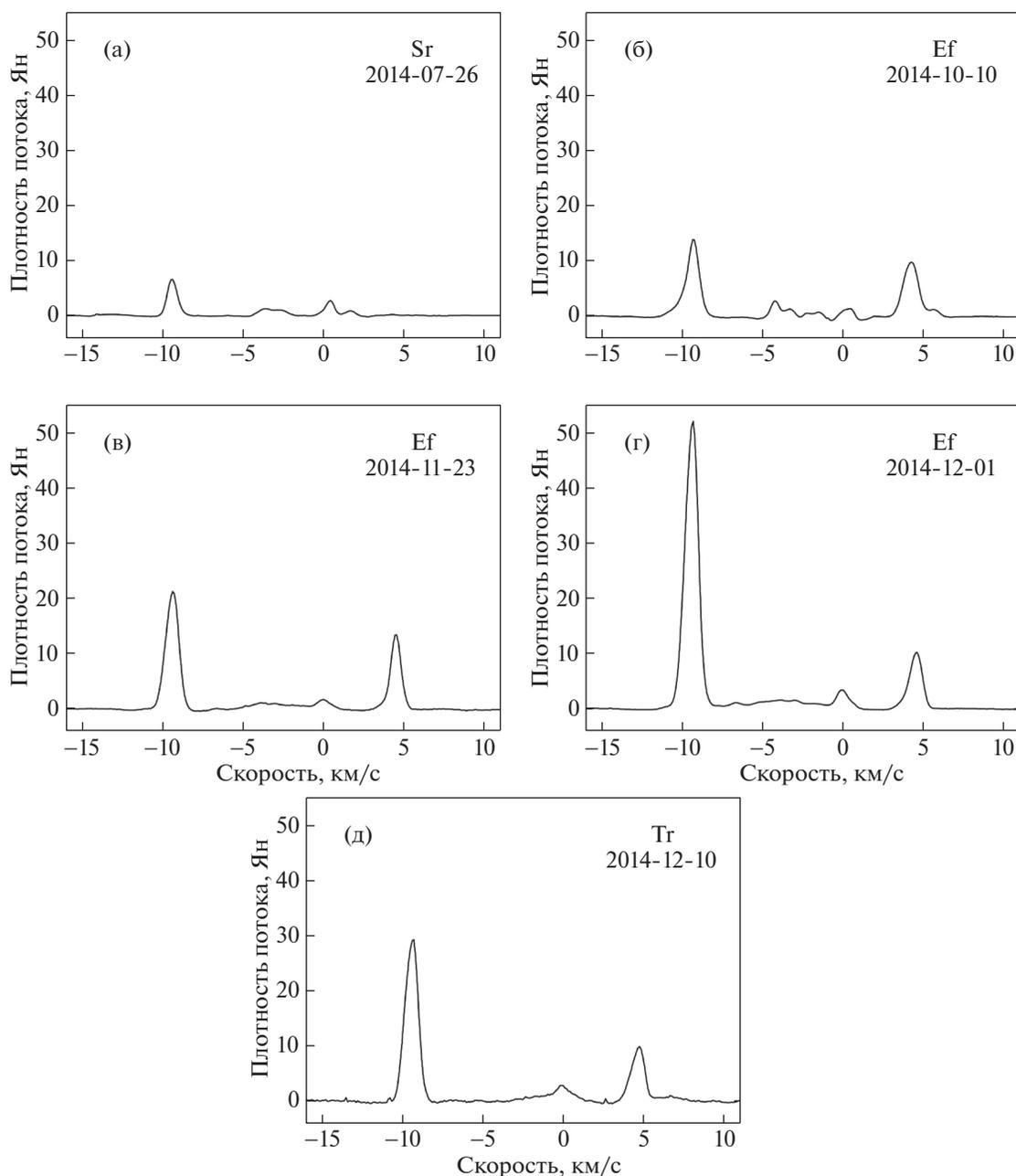


Рис. 4. Калиброванные автокорреляционные спектры для отдельных телескопов, которые использовались для определения потока источника в каждом сеансе наблюдений. Телескоп и дата наблюдений обозначены в правом верхнем углу.

высокоскоростных деталей на скоростях $V_{\text{LSR}} = -9.4$ км/с и $V_{\text{LSR}} = +4.4$ км/с. Позиции мазерных деталей, полученные отдельно для каждого спектрального канала, приведены в табл. 3. Карты построены по данным, полученным во втором сеансе наблюдений 2014 г. На картах приводятся смещения мазерных деталей относительно опорной высокоскоростной детали в голубой части спектра на скорости $V_{\text{LSR}} = -9.4$ км/с (рис. 8а) и опорной детали на скорости $V_{\text{LSR}} = +0.3$ км/с (рис. 8б, см. пояснения ниже).

Мазерные компоненты центральной части спектра, параметры которых приведены в табл. 3, по скоростям делятся на четыре группы. По координатам 1-я и 4-я группы очень близки (см. рис. 8); таким образом *динамически* наблюдаются четыре группы, но *пространственно* — только три. Центральный пространственный кластер имеет размеры менее 20 миллисекунд дуги и включает в себя 1-ю и 4-ю мазерные группы со скоростями в диапазоне от -4.5 до $+0.7$ км/с. Два других пространственных кластера — 2-я и 3-я мазерные

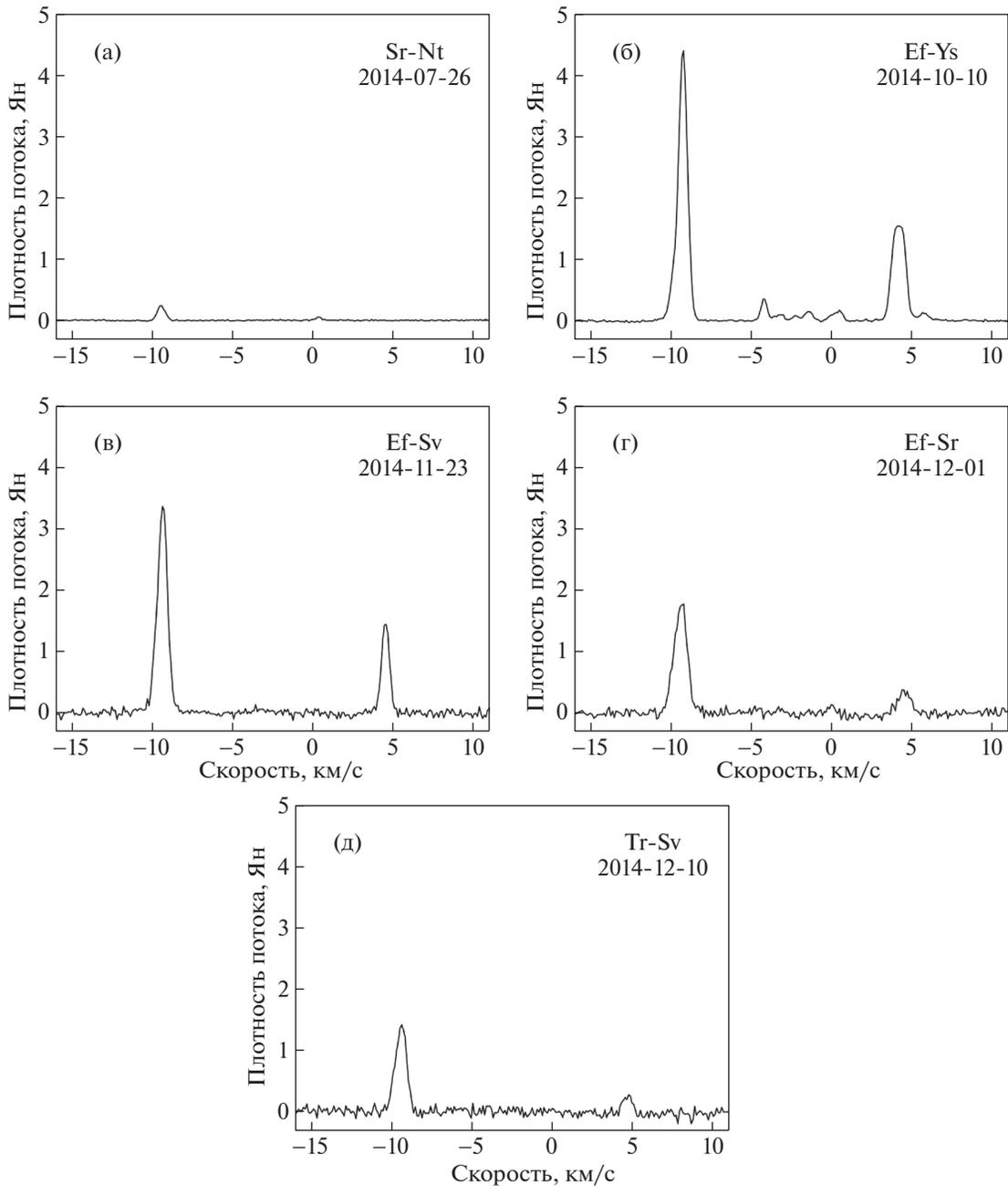


Рис. 5. Калиброванные кросскорреляционные спектры (параметр Стокса I) для одной наземной базы (указана в правом верхнем углу на спектрах) в каждом сеансе наблюдений, на которой было получено детектирование сигнала от источника.

группы — также размерами 20 миллисекнд дуги каждая, имеют скорости в диапазоне от -2.5 до -1.2 км/с. Две высокоскоростные мазерные детали обособлены в своих положениях и обнаруживаются на расстояниях 157 и 70 а.е., соответственно, от центрального пространственного кластера. Три мазерные группы выстраиваются на прямой линии (в размере порядка 200 а.е., см. рис. 8).

В анализе наблюдений, приведенных в работе [17], все группы деталей привязаны к высокоскоростному компоненту в голубой части спек-

тра на скорости $V_{LSR} = -14.6$ км/с. С разницей в ~ 0.5 км/с этот компонент присутствовал и в наблюдениях [16], но в работе [16] привязка была сделана к детали на скорости $V_{LSR} = +1.32$ км/с в центральной части спектра. При этом приводятся координаты компонента на скорости $V_{LSR} = -14.1$ км/с относительно этой детали, что дает возможность пересчитать относительные координаты компонентов из работы [16] для привязки к детали на скорости $V_{LSR} = -14.6$ км/с и сравнения

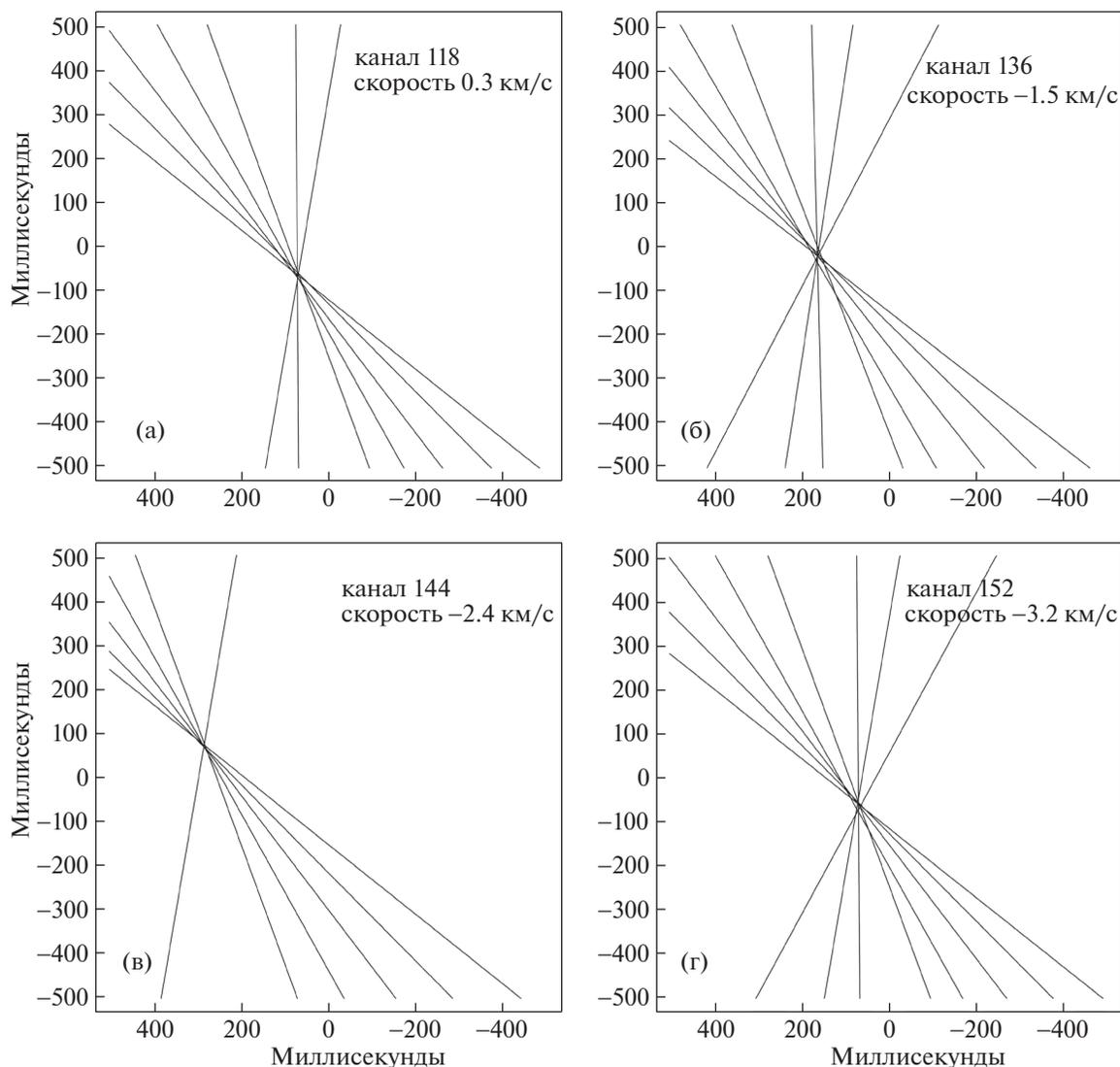


Рис. 6. Карты, построенные методом интерференционных лепестков (задача FRMAP) для самых ярких спектральных деталей, наблюдавшихся во втором сеансе, в каждой из четырех групп, объединяющих близкие по координатам низкоскоростные мазерные пятна (см. табл. 3 и описание групп в разделе “Обсуждение”). В правом верхнем углу приведены номер канала и скорость на луче зрения.

данных этих наблюдений. Такой пересчет показывает, что разница в скоростях и относительных координатах мазерных компонентов не превышает допустимые значения ошибок в обоих наблюдениях: группа деталей, наблюдавшихся в работе [16], совпадает с группой “В” в обозначениях [17], в которой, согласно выводу [16], 8 компонентов объединяются в диск размером 15 а.е., в то время как по мнению авторов [17] в центральной части “L” этой группы мазерные пятна образуют петлю размером ≤ 1 а.е. Высказывалось предположение, что петля ассоциируется с околозвездной оболочкой, образованной веществом звездного ветра.

Аналогичный пересчет можно сделать для координат деталей, полученных в наших наблюдениях, от привязки к скорости $V_{LSR} = -9.4$ км/с на ско-

рость $+0.3$ км/с (см. рис. 8б), которая присутствует и в нашем спектре, и в спектрах [17] и [16], что позволяет соединить все данные и сделать выводы более корректными. Несмотря на то что кроме детали на скорости $+0.3$ км/с, другие детали, детектированные в работах [17] и [16] в 1996 г., на эпоху наблюдений 2014 г. уже не существовали, мы соединили их с нашими результатами.

На рис. 9 представлены позиции мазеров, полученные во всех трех эпохах (данная статья, [16], [17]) и пересчитанные относительно координат опорной детали на скорости $+0.3$ км/с. В карту включены позиции мазеров из центральной части спектра, а также высокоскоростные детали. В наших наблюдениях позиции мазерных деталей получены во втором сеансе наблюдений в 2014 г.

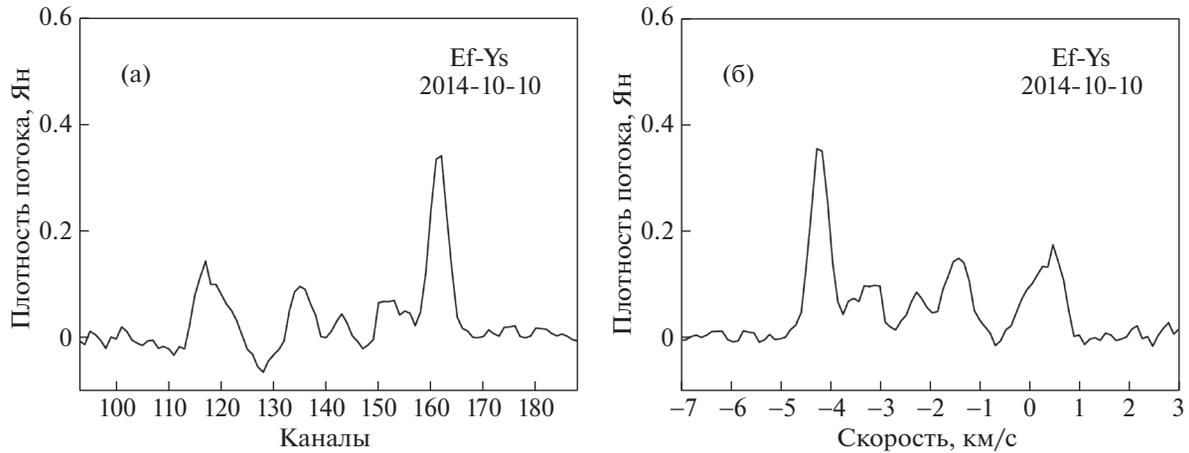


Рис. 7. Центральная часть кросскорреляционного спектра во втором сеансе наблюдений. По оси Y — калиброванный поток, по оси X слева (а) — каналы, справа (б) — скорость на луче зрения.

и на карте представлены в виде синих кружков (номера на карте соответствуют номерам мазерных групп из табл. 3). Детали из работы [17] с учетом самой далекой детали “А” (буквы на рис. 9 соответствуют названиям мазерных групп из [17]) на скорости $V_{\text{LSR}} = -14.6$ км/с представлены зелеными кружками. Наконец, мазеры из [16], с учетом далекой детали на скорости $V_{\text{LSR}} = -14.1$ км/с, но без учета далекой красной детали на скорости $V_{\text{LSR}} = +9.3$ км/с, обозначены на карте красными кружками.

На рис. 10а с привязкой к скорости $+0.3$ км/с представлены диаграммы скорость—прямое восхождение ($V_{\text{LSR}}-RA$) во втором сеансе наших наблюдений 2014 г. для центральной части спектра и двух далеких деталей на скоростях $V_{\text{LSR}} = -9.4$ км/с и $V_{\text{LSR}} = +4.4$ км/с. Две цепочки мазерных пятен на рис. 10а хорошо аппроксимируются прямой линией — одна соединяет детали в центральной части спектра на скорости около $+0.3$ км/с (первая, вторая и третья группы, см. таблицу 3), вторая — две высокоскоростные детали и четвертую центральную группу на скорости около -3.4 км/с.

В суммарном распределении пятен, представленном на рис. 9 и 10б, можно выделить те же цепочки пятен, при этом петля, наблюдавшаяся в центре источника в 1996 г. в работе [17], и правильная структура, которая наблюдалась в работе [16] и интерпретировалась как кеплеровский диск (также 1996 г.), соответствуют группе мазерных деталей № 1, которая детектируется в наблюдениях 2014 г (см. табл. 3). Другими словами, на протяжении 18 лет пространственная структура мазера, которой соответствует центральная часть спектра с интервалом скорости примерно ± 1.5 км/с относительно $V_{\text{LSR}} = +0.3$ км/с, сохраняется на мас-

штабе менее 20 миллисекунд дуги, что на расстоянии 750 пк соответствует линейному размеру около 15 а.е.

5.2. Возможные модели источника

Слыш и др. [16] рассмотрели объединенные модели кеплеровского диска, расположенного ближе к звезде, и модель звездного ветра от центрального объекта; возможно, в образовании наблюдаемой структуры различные механизмы действуют одновременно.

Группы 2 и 3, пространственно удаленные от центрального скопления (группы 1 и 4), впервые наблюдались в 2014 г. Они могли возникнуть под действием высокоскоростного джета, возможно, исходящего из центрального объекта/кластера. Как видно из карты, группы 2 и 3 расположены практически вдоль прямой линии по отношению к центральному скоплению и простираются на расстояние до 200 а.е. (рис. 8б). Вероятный джет на рис. 8 сконцентрирован в узком интервале углов, не превышающем 5° . Эти удаленные детали не были обнаружены в [17] (см. комбинированную карту на рис. 9).

В то же время в [17] присутствуют две детали, которые не наблюдались в 2014 г. Два зеленых кружка на рис. 9 — мазерные группы С (hv1996) и D (hv1996). Эти мазерные детали могут соответствовать двум высокоскоростным компонентам, которые описаны в примечании к табл. 3. Присутствие мазерных деталей с высокими скоростями указывает на наличие коллимированного истечения вещества из окрестности центрального объекта. Увеличение скорости вдоль джета свидетельствует о прогрессивном ускорении течения, например, звездным ветром центрального объекта. За 18 лет, прошедших между наблюдениями 1996 года [17] (зеленые кружки “С (hv1996)” и “D (hv1996)” на

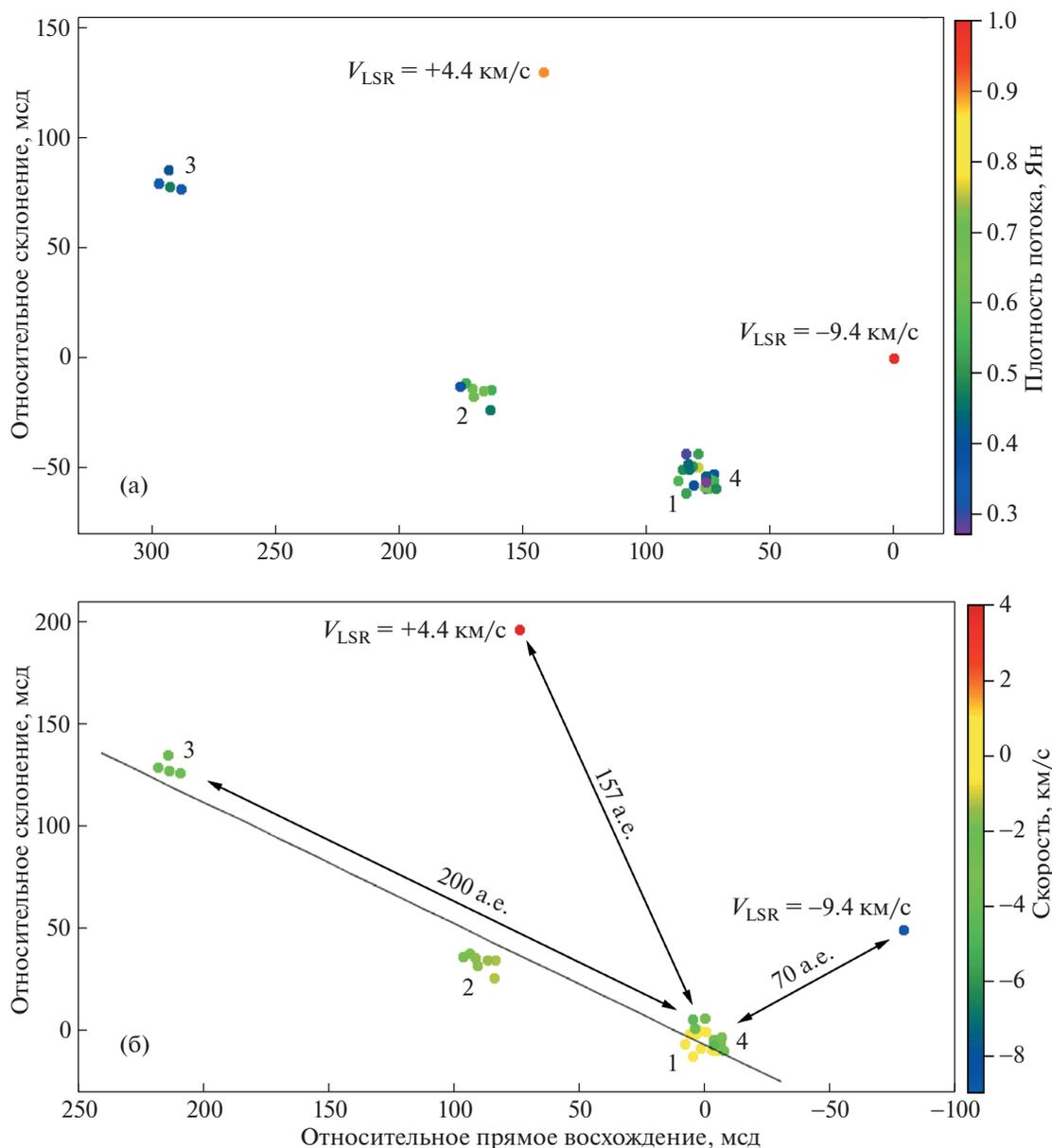


Рис. 8. Карты компонентов мазера H₂O в IC 1396 N в координатах Дек–РА для второго сеанса наблюдений 2014 г. Представлена центральная часть спектра (мазерные группы 1–4) и две высокоскоростные детали. На рис. 8а координаты получены относительно опорной высокоскоростной детали в голубой части спектра на скорости $V_{\text{LSR}} = -9.4 \text{ км/с}$ (цветовая шкала в плотности потока), на рис. 8б координаты пересчитаны относительно опорной детали на скорости $V_{\text{LSR}} = +0.3 \text{ км/с}$ (цветовая шкала в скоростях).

рис. 9) и нашими наблюдениями (синие кружки “С?” (hv2014) и “D?” (hv2014) на рис. 9), направление истечения изменилось примерно на 30° (см. расчеты ниже) — изогнутые стрелки на рис. 9.

Скорость истечения, создавшего за 18 лет мазерные детали на расстоянии в 200 а.е. от центрального объекта, должна быть высокой, порядка 56 км/с. Такая скорость достаточна для ионизации окружающего водородного газа и для появления тормозного излучения. Имеются работы, включающие в себя исследование радиокон-

тинуума в окрестности IRAS 21391+5802 на сантиметровых и миллиметровых волнах, например, на системе ВІМА [3]. Однако угловое разрешение [3] (несколько секунд дуги) недостаточно для того, чтобы определенно связать наблюдаемые радиоструктуры с вышеупомянутым предполагаемым джетом, возбуждающим мазерные детали. Представляет интерес будущее исследование области джета в радиоконтинууме с более высоким разрешением.

Был предложен ряд механизмов для объяснения коллимации истечений из молодых звездных объ-

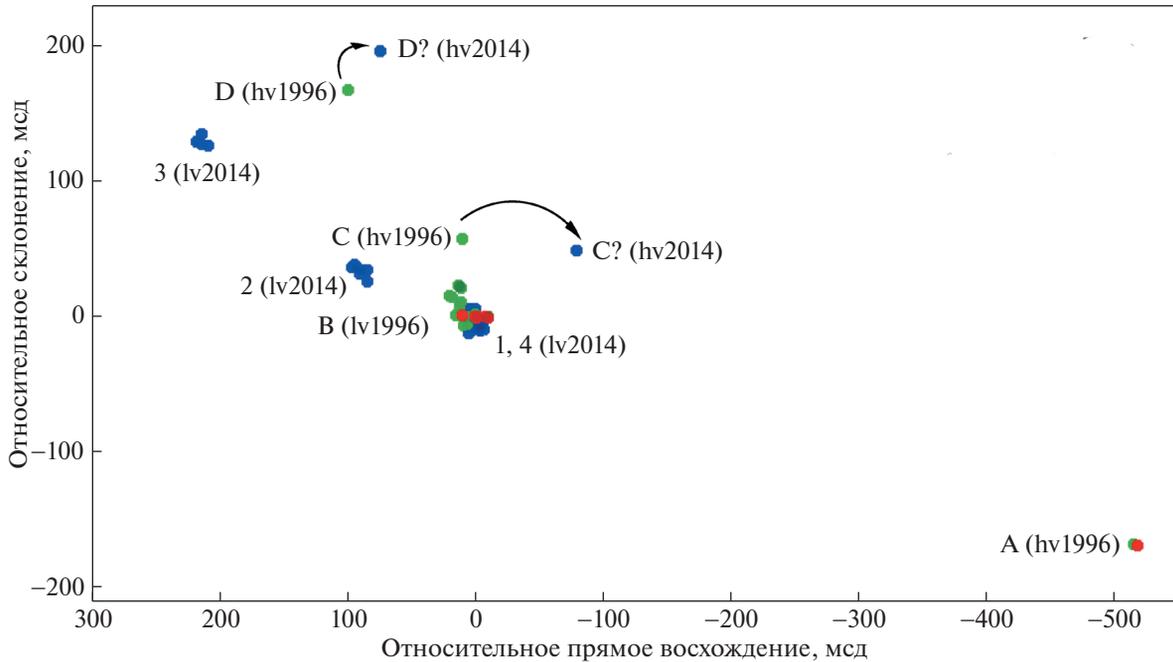


Рис. 9. Комбинированная карта компонентов мазера H_2O в IC 1396 N, полученных в 2014 г. (синие кружки, номера на карте соответствуют номерам мазерных групп в табл. 3), 1996 г. (зеленые кружки, буквенные обозначения на карте соответствуют мазерным группам из [17]), а также 1996 г. (красные кружки, позиции мазеров из работы [16] без учета далекой красной детали на скорости $V_{\text{LSR}} = +9.3$ км/с, несовместимой с масштабом карты по условиям наглядности изображения). Высокоскоростные детали, обнаруженные в наблюдениях 2014 г., обозначены как “hv2014”, в наблюдениях [17] — “hv1996”. То же самое для низкоскоростных компонентов: 2014 г. — “lv2014”, [17] — “lv1996”. Координаты пересчитаны относительно детали на скорости $V_{\text{LSR}} = +0.3$ км/с.

ектов (например, [28–31]): (1) коллимация вблизи поверхности звезды под действием выпадающего околозвездного вещества; (2) коллимация околозвездной структурой (диск или тор); (3) самофокусировка звездного ветра в окружающей межзвездной среде; (4) магнитогидродинамические механизмы, действующие вблизи звезды. В случае IC 1396 N нет данных о магнитном поле звезды, поэтому ничего нельзя сказать о действии механизма 4. В частности, не обнаружено излучение магниточувствительной молекулы гидроксила.

Ввиду наличия свидетельств об околозвездном диске в IC 1396 N мы сосредоточимся на механизме 2. Интересное явление здесь — изменение направления вероятного джета со временем.

Возможна прецессия протопланетного диска под действием вторичного компонента в двойной системе. Такой случай подробно рассмотрен, например, в работе [32], в которой приводится формула для угловой скорости прецессии диска. Однако использование этой формулы для массы звезды в несколько солнечных и большой полуоси орбиты в несколько астрономических единиц дает периоды прецессии порядка нескольких тысяч лет.

Представляется более вероятным, что коллимация и прецессия истечения производятся более

крупной структурой — околозвездным тором внутри глобулы, см. рис. 11 [18–20]. Такой тор отчетливо виден в радиоизлучении молекул (например, N_2H^+ и CH_3CN [2]) в виде структуры, перпендикулярной к направлению биполярного истечения. Данные о молекулярных линиях для околозвездной структуры вокруг IRAS 21391+5802 [33] дают ее вириальную массу в пределах 83–186 M_\odot . Молекулярные данные указывают, что в таких сгустках плотность падает наружу как $\rho \propto r^{-\alpha}$, где $\alpha \sim 1$, см. [20] и ссылки в этой работе. Принимая для околозвездного тора среднее значение массы 134 M_\odot и размер 0.06–0.14 пк ($\sim 2\text{--}4 \times 10^{17}$ см) [33], внутренний радиус полости тора (рис. 11) $R_1 = H = 3 \times 10^{15}$ см, “эффективный” внешний радиус (при $\alpha = 1$) $R_2 = 3 \times 10^{16}$ см, по формуле, приведенной в [18], находим период прецессии диска $T_{\text{pr}} \sim 160$ лет. Таким образом, за 18 лет, прошедших между наблюдениями [17] и нашими, диск мог повернуться примерно на одну десятую от 360°, что согласуется с тем, что мы видим на рис. 9 ($\sim 30^\circ$).

5.3. Теряет ли IC 1396 N протопланетный диск?

Еще одна особенность объекта IC 1396 N — неуклонное снижение мазерного излучения H_2O ,

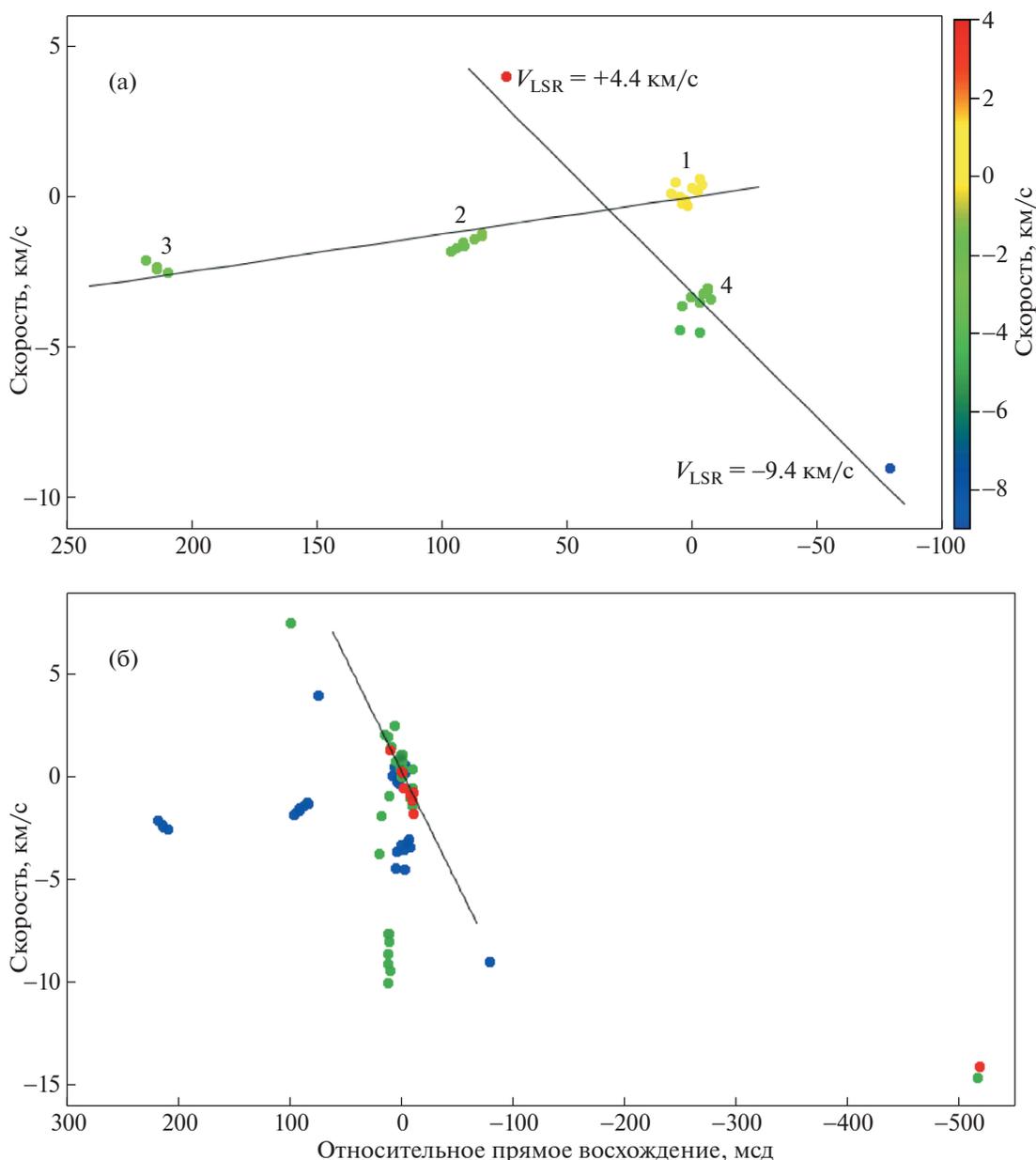


Рис. 10. Диаграмма скорость—расстояние (V_{LSR} -RA) для мазерных компонентов, представленных на рис. 8 (соответствует рисунку 10а) и 9 (соответствует рисунку 10б). Описание рисунка см. в тексте.

наблюдаемое нами в нашем мониторинге в Пушино на протяжении последних 10 лет [34]. До второй половины 2000-х годов максимальная плотность потока F_{\max} в линии H₂O в IC 1396 N держалась на уровне порядка сотен янских. На дату 19 декабря 2014 г., наиболее близкую к эпохе № 5 наших наблюдений по проекту “Радиоастрон”, $F_{\max}(\text{H}_2\text{O})$ была порядка 50 Ян, к июню 2016 г. упала до 20 Ян и на момент подачи статьи продолжает снижаться. Если наблюдаемая тенденция продолжится, это может означать исчезновение протопланетного диска IC 1396 N, в котором были сосредоточены основные детали мазерного излучения H₂O.

Столь быстрая эволюция околозвездной структуры в IC 1396 N не кажется невероятной. Быстрые изменения на временном масштабе в несколько лет наблюдались в инфракрасном спектре молодой звезды солнечного типа ГYC 8241 2652 1. Поток ее излучения в области от 3 до 300 мкм с 2008 по 2012 гг. упал примерно в 30 раз [35]. Такое падение интерпретируется как потеря пылевой составляющей околозвездного протопланетного диска вследствие ее концентрации в более крупных телах (планетезималиях). Таким образом, формирование планет в околозвездных дисках может занимать гораздо меньшее время, чем предполагалось до сих пор. Возможно, нам удалось застать объект

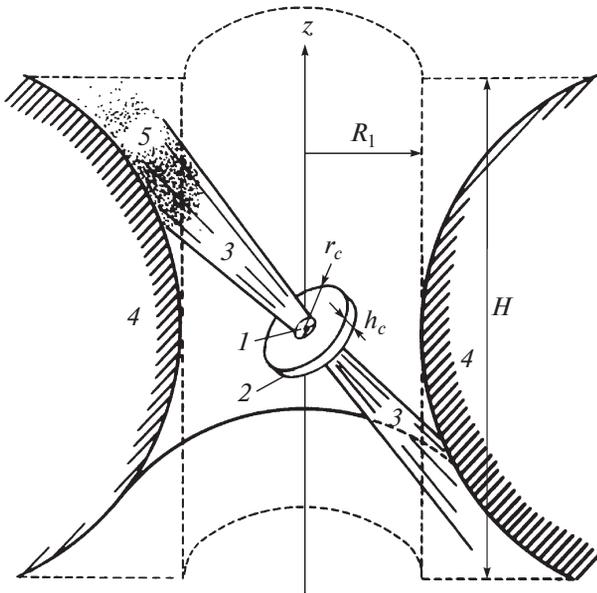


Рис. 11. Скетч модели источника с прессирующим диском [18]; 1 — звезда, 2 — протопланетный диск, 3 — джеты, 4 — околозвездный тор, 5 — яркое мазерное пятно.

IC 1396 N как раз в такой стадии, когда катастрофическая перестройка протопланетного диска приводит к угасанию мазерного излучения H_2O . Дальнейший мониторинг мазера H_2O в IC 1396N должен подтвердить или опровергнуть это предположение.

6. ВЫВОДЫ

1. В наблюдениях мазера H_2O в глобуле IC 1396 N на наземно-космическом интерферометре с 10-м радиотелескопом “Радиоастрон” отклик от источника не был обнаружен на проекциях баз >2.3 диаметров Земли. Получен нижний предел на размер мазера $L > 0.03$ а.е. и верхний предел на яркостную температуру $T_B = 6.25 \times 10^{12}$ К.

2. В результате анализа карт, построенных методом частоты интерференционных лепестков по данным сеанса с наибольшей длительностью наблюдений (4 часа) на наземной сети, получены позиции мазерных пятен, скорости и значения плотностей потоков для мазерных деталей, детектированных с отношением сигнала к шуму выше 4σ .

3. В спектре наблюдаются четыре группы низкоскоростных деталей в интервале скоростей от -4.5 до $+0.7$ км/с и две высокоскоростные детали на скоростях $V_{\text{LSR}} = -9.4$ км/с и $V_{\text{LSR}} = +4.4$ км/с, удаленные от наиболее яркой детали на скорости $\sim +0.3$ км/с в центральной части спектра на расстоянии 157 и 70 а.е., соответственно.

4. Мазерные компоненты центральной части спектра по скоростям делятся на 4 группы.

При этом две группы (первая — на скоростях $\sim +0.3$ км/с и четвертая — на скоростях около -3.4 км/с) совпадают пространственно.

5. На пространственных картах четыре группы низкоскоростных центральных мазерных компонентов выстраиваются на прямой линии протяженностью ~ 200 а.е. При этом две группы — вторая ($V_{\text{LSR}} \sim -1.5$ км/с) и третья ($V_{\text{LSR}} \sim -2.4$ км/с) — не наблюдались в 1996 г. и, возможно, являются джетами, сформировавшимися в период 18 лет между наблюдениями 1996 и 2014 гг.

6. Появление в 2014 г. высокоскоростных мазерных деталей “С” и “D” на других пространственных координатах по сравнению с 1996 г. [17] можно объяснить прецессией узконаправленного потока вещества под воздействием гравитационного поля молодого протозвездного объекта.

7. Имеется линейная зависимость V_{LSR} от расстояния между джетами и центральной группой пятен со скоростями $V_{\text{LSR}} \sim +0.3$ км/с, в то время как четвертая центральная группа с теми же координатами, но со скоростями $V_{\text{LSR}} \sim -3.4$ км/с связана линейной зависимостью с высокоскоростными пятнами.

8. Сопоставление расположения мазерных пятен 2014 г. и 1996 г. в координатах V_{LSR} — расстояние для низкоскоростных деталей показывает, что большая часть низкоскоростных мазерных пятен сохраняет свое пространственное положение на протяжении 18 лет.

9. Наблюдаемое снижение активности излучения мазера H_2O в IC 1396 N, особенно заметное в период с 2014 по 2016 гг., может свидетельствовать о радикальном изменении структуры околозвездного протопланетного диска в связи с быстрым формированием планет в нем.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

Представленные результаты частично основаны на наблюдениях, выполненных на 100-м телескопе Радионаблюдательного института Макса Планка (MPIfR) в Эффельсберге; радиотелескопах Болонского института радионаблюдения (INAF) в Ното и на Сардинии; 40-м радиотелескопе Национального географического института Испании в Йебесе; 32-м телескопе Центра астрономии Университета Николая Коперника в Торунь и радиотелескопах ИПА

РАН (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной астрономии Российской академии наук). Авторы выражают благодарность астрономическим обсерваториям за предоставленную возможность провести наблюдения на радиотелескопах и персоналу обсерваторий за помощь в проведении наблюдений.

Работа частично поддержана грантами Российского фонда фундаментальных исследований — номер проекта 15-02-07676-а (Г.М. Рудницкий), номер проекта 16-32-00877-мол_а (О.С. Баяндина) и грантом Мексиканского национального автономного университета UNAM/DGAPA — номер проекта IN114514 (С.Е. Куртц). Выражаем благодарность С.В. Каленскому за помощь в подготовке заявки на наблюдения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. E. Matthews, *Astron. and Astrophys.* **75**, 345 (1979).
2. A. Fuente, T. Castro-Carrizo, T. Alonso-Albi, M. T. Beltrán, C. Ceccarelli, B. Lefloch, C. Codella, and P. Caselli, *Astron. and Astrophys.* **507**, 1475 (2009).
3. M. T. Beltrán, J. M. Girart, R. Estalella, P. T. P. Ho, and A. Palau, *Astrophys. J.* **573**, 246 (2002).
4. C. Codella, R. Bachiller, B. Nisini, P. Saraceno, and L. Testi, *Astron. and Astrophys.* **376**, 271 (2001).
5. K. Sugitani, Y. Fukui, A. Mizuni, and N. Ohashi, *Astrophys. J.* **342**, L87 (1989).
6. B. A. Wilking, R. D. Schwartz, L. G. Mundy, and A. S. B. Schultz, *Astron. J.* **99**, 344 (1990).
7. A. L. Gyulbudaghian, L. F. Rodríguez, and S. Curiel, *Rev. Mex. Astron. y Astrofís.* **20**, 51 (1990).
8. K. A. Edris, G. A. Fuller, and R. J. Cohen, *Astron. and Astrophys.* **465**, 865 (2007).
9. V. I. Slysh, I. E. Val'tts, S. V. Kalenskii, M. A. Voronkov, F. Palagi, G. Tofani, and M. Catarzi, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **134**, 115 (1999).
10. S. V. Kalenskii, R. Bachiller, I. I. Berulis, I. E. Val'tts, J. Gomez-Gonzalez, J. Martin-Pintado, A. Rodriguez-Franco, and V. I. Slysh, *Soviet Astronomy* **36**, 517 (1992).
11. R. Simon, J. M. Jackson, J. M. Rathborne, and E. T. Chambers, *Astrophys. J.* **639**, 227 (2006).
12. N. Peretto and G. A. Fuller, *Astron. and Astrophys.* **505**, 405 (2009).
13. C. J. Cyganowski, B. A. Whitney, E. Holden, E. Braden, C. L. Brogan, E. Churchwell, R. Indebetouw, D. F. Watson, B. L. Babler, R. Benjamin, M. Gomez, M. R. Meade, M. S. Povich, T. P. Robitaille, and C. Watson, *Astron. J.* **136**, 2391 (2008).
14. G. Tofani, M. Felli, G. B. Taylor, and T. R. Hunter, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **112**, 299 (1995).
15. V. Migenes, S. Horiuchi, V. I. Slysh, I. E. Val'tts, V. Golubev, P. G. Edwards, E. B. Fomalont, R. Okayasu, P. J. Diamond, T. Umemoto, and M. Inoue, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **123**, 487 (1999).
16. V. Slysh, I. Val'tts, V. Migenes, E. Fomalont, H. Hirabayashi, M. Inoue, and T. Umemoto, *Astrophys. J.* **526**, 236 (1999).
17. N. A. Patel, L. J. Greenhill, J. Herrnstein, Q. Zhang, J. M. Moran, P. T. P. Ho, and P. F. Goldsmith, *Astrophys. J.* **538**, 268 (2000).
18. G. M. Rudnitskij, in: *Star Forming Regions*, Proc. IAU Symp. No. 115, held 11–15 November 1985 in Tokyo, Japan. M. Peimbert and J. Jugaku, eds. (Dordrecht: D. Reidel Publishing Co., 1987), p. 398.
19. G. M. Rudnitskij, *Bull. Astron. Inst. Czechoslovakia* **69**, 51 (1987).
20. И. И. Берулис, Е. Е. Лехт, Г. М. Рудницкий, *Астрон. журн.* **73**, 44 (1996) [I. I. Berulis, E. E. Lekht, and G. M. Rudnitskij, *Astron. Reports* **40**, 36 (1996)].
21. J. F. Lightfoot, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **239**, 665 (1989).
22. Н. С. Кардашев, А. В. Алакоз, А. С. Андрианов, М. И. Артюхов и др., *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина* **3**, 4 (2016).
23. Н. С. Кардашев, В. В. Хартов, В. В. Абрамов, В. Ю. Авдеев и др., *Астрон. журн.* **90**, 179 (2013) [N. S. Kardashev, V. V. Khartov, V. V. Abramov, V. Yu. Avdeev, et al., *Astron. Reports* **57**, 153 (2013)].
24. Ю. А. Ковалев, В. И. Васильков, М. В. Попов, В. А. Согласнов, П. А. Войчик, М. М. Лисаков, А. М. Кутькин, Н. Я. Николаев, Н. А. Нижельский, Г. В. Жеканис, П. Г. Цыбулев, *Косм. исслед.* **52**, 430 (2014) [Yu. A. Kovalev, V. I. Vasil'kov, M. V. Popov, V. A. Soglasnov, P. A. Voitsik, M. M. Lisakov, A. M. Kut'kin, N. Ya. Nikolaev, N. A. Nizhel'skii, G. V. Zhekanis, P. G. Tsybulev, *Cosm. Res.* **52**, 393 (2014)].
25. А. С. Андрианов, И. А. Гирин, В. Е. Жаров, В. И. Костенко, С. Ф. Лихачев, М. В. Шацкая, *Вестник НПО имени С.А. Лавочкина* **3**, 55 (2014) [A. S. Andrianov, I. A. Girin, V. E. Jharov, V. I. Kostenko, S. F. Likhachev, and M. V. Shatskaya, *Vestnik NPO imeni S. A. Lavochkina* **3**, 55 (2014)].
26. R. C. Walker, *Astron. J.* **86**, 1323 (1981).
27. L. Kogan, *Astronomical Data Analysis Software and Systems V ASP Conference Series*, 101 (1996).
28. R. Bachiller, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* **34**, 111 (1996).
29. L. F. Rodríguez, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **98**, 1012 (1986).
30. L. F. Rodríguez, in *Proceedings of Star Formation 1999, held in Nagoya, Japan, June 21–25, 1999*, Ed. T. Nakamoto, (Nagoya: Nagoya Univ., 1999), p. 257.
31. D. J. Price, T. S. Tricco, and M. R. Bate, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **423**, L45 (2012).
32. D. Lai, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **440**, 3532 (2014).
33. J. Wu, N. J. Evans II, Y. L. Shirley, and C. Knez, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **188**, 313 (2010).
34. N. Ashimbaeva, O. Bayandina, P. Colom, E. Lekht, M. Pashchenko, G. Rudnitskij, A. Tolmachev, I. Val'tts, talk presented at Symposium No. 9, European Week of Astronomy and Space Science, Athens, Greece, 4–8 July 2016.
35. C. Melis, B. Zuckerman, J. H. Rhee, I. Song, S. J. Murphy, and M. S. Bessell, *Nature* **487**, 74 (2012).