

ПОИСК ЯРКИХ МАЗЕРОВ В ЛИНИИ ВОДЯНОГО ПАРА В НАПРАВЛЕНИИ НА ПЫЛЕВЫЕ СГУСТКИ ГАЛАКТИКИ

© 2022 г. Д. А. Ладейщиков^{1, *}, А. П. Цивилев^{2, **}, А. М. Соболев^{1, ***}, Е. А. Попова^{1, ****}

¹ Коуровская астрономическая обсерватория, Уральский федеральный университет,
Екатеринбург, 620000 Россия

² Пушчинская радиоастрономическая обсерватория, Физический институт им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук, Пушчино, 142290 Россия

*E-mail: dmitry.ladeyschikov@urfu.ru

**E-mail: tsivilev@prao.ru

***E-mail: andrej.sobolev@urfu.ru

****E-mail: elenapopova@urfu.ru

Поступила в редакцию 04.07.2021 г.

После доработки 06.12.2021 г.

Принята к публикации 27.12.2021 г.

Работа посвящена анализу результатов наблюдений на однозеркальном радиотелескопе РТ-22 (ПРАО, ФИАН) в мазерной линии водяного пара на 22 ГГц в направлении на пылевые сгустки из масштабных слепых обзоров в миллиметровом континууме ATLASGAL и Volocam. Целью работы являются поиск мазеров в линии водяного пара в ранее неисследованных источниках и исследование переменности известных мазеров. В результате наблюдений 140 источников мазерное излучение на 22 ГГц было зарегистрировано в шести источниках, причем в четырех источниках (ATLASGAL 016.987+00.981, 017.216+00.821, 018.701–00.229 и Volocam 081.174–00.100) мазеры были зарегистрированы впервые. В двух источниках (ATLASGAL 034.195–0.592 и Volocam 081.174–0.1) мазеры в линии водяного пара показали значительную переменность в рамках программы наблюдений и последующего мониторинга в течение 8 мес. Сравнение данных наблюдений РТ-22 с архивными данными наблюдений телескопа GBT-100 (Национальная радиоастрономическая обсерватория США) показало, что в 9 источниках из 140 наблюдается существенное изменение плотности потока излучения мазеров: два источника перешли из категории слабых по яркости (~ 0.5 Ян) мазеров в категорию ярких (более 10 Ян), а в семи относительно ярких ранее (более 3 Ян) мазеров излучение не было зарегистрировано. Значительные изменения характеристик мазерного излучения могут указывать на изменения условий среды, в которых мазерное излучение было образовано, что представляет интерес для дальнейшего исследования связанных с мазерами процессов.

Ключевые слова: водяные мазеры, переменность мазеров, мазерные вспышки, пылевые сгустки, ATLASGAL, Volocam, миллиметровый континуум, звездообразование

DOI: 10.31857/S0004629922040041

1. ВВЕДЕНИЕ

Важной и активно развивающейся областью астрофизики является исследование областей звездообразования. В межзвездной среде присутствует большое число молекул, которые достаточно интенсивно излучают в радиолиниях, что дает богатые возможности для их исследования. В некоторых переходах молекул возникает мазерное излучение, что является индикатором особых условий в межзвездной среде, где это излучение обнаруживается. Среди наиболее распространенных молекул с мазерным излучением — молекулы OH, H₂O и CH₃OH, в линиях которых обнаружена большая часть всех межзвездных источников мазерного излучения.

Мазерное излучение молекулы воды является уникальным явлением, которое в настоящее время обнаружено в областях звездообразования, проэволюционировавших звездах и в других галактиках. Впервые мазер в линии водяного пара на переходе $6_{16}-5_{23}$ (22.235 ГГц) был зарегистрирован в 1969 г. в направлении на туманность Ориона [1], а также в направлении на красный сверхгигант VY CMa [2]. В отличие от мазеров метанола на 6.7 ГГц, которые считаются связанными исключительно с образующимися звездами больших и промежуточных масс, мазеры в линии водяного пара могут быть связаны также с маломассивными звездными объектами. В работе [3] показано, что мазеры в линии водяного пара в

первую очередь ассоциируются с молодыми звездными объектами (МЗО) 0 и иногда I класса, но не было найдено мазеров, связанных с II классом МЗО, т.е. таких мазеров практически нет в молодых звездных объектах на поздних этапах эволюции.

В настоящий момент считается, что звездообразование происходит в местах повышенной концентрации молекулярного газа — сгустках, главным компонентом которых является молекулярный водород (H_2). Мазеры на переходе молекулы воды (H_2O), зарегистрированные в направлении на места повышенной концентрации молекулярного газа, указывают на происходящие активные процессы звездообразования [4]. Для поиска и исследования сгустков, в которых могут происходить активные процессы звездообразования, могут быть эффективно использованы слепые обзоры Галактики в субмиллиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн. В этих диапазонах излучает преимущественно холодная пыль (10–30 К), которая трассирует холодное окружение межзвездной среды, в том числе плотные и диффузные облака, холодные сгустки и дозвездные ядра [5]. Накачка мазеров в линии водяного пара имеет столкновительный характер, и в областях звездообразования они в первую очередь образуются в местах истечения вещества из протозвезд, где ударные волны создают необходимые условия для формирования мазеров на линии водяного пара [6, 7]. Соответственно, яркое излучение холодной пыли является вероятным и необходимым признаком объектов, в которых происходят процессы звездообразования, а излучение мазеров в линии водяного пара является явным и достаточным признаком таких объектов.

Поиск мазеров в линии водяного пара на 22 ГГц в направлении на сгустки из субмиллиметровых обзоров проводились ранее в работах [8–10]. Авторы этих работ использовали слепой обзор *Bolocam* в миллиметровом континууме на 1.1 мм [11] для поиска и обнаружения мазеров водяного пара на 22 ГГц. Данные обзоры показали, что частота регистрации мазеров варьируется от 30% [8] до 44% [10] – 48% [9], причем частота регистрации увеличивается в направлении на более яркие источники в миллиметровом континууме и может достигать ~70% при использовании порога на излучение в миллиметровом континууме $F_{870} > 1$ Ян, согласно данным из базы данных *MaserDB.net* [12]. Данная оценка получена на основании анализа статистики регистрации мазеров в линии водяного пара из работ [8–10] во всех источниках *Bolocam*, имеющих плотность потока более 1 Ян. Из 393 объектов 270 имеют как минимум одну регистрацию мазера на 22 ГГц при среднем уровне шума $\sigma \sim 0.1$ Ян.

Обзоры *ATLASGAL* на 870 мкм [13] и *Bolocam* на 1.1 мм [11] являются крупнейшими слепыми обзорами пылевых сгустков Галактики. Наиболее яркие сгустки из данных обзоров являются наиболее явными кандидатами в объекты, в которых могут происходить активные процессы звездообразования. Несмотря на значительное развитие наблюдательных средств, в настоящее время большое количество сгустков *ATLASGAL* и *Bolocam* до сих пор не наблюдалось в линиях водяного пара на 22 ГГц. Во многом это связано с отсутствием крупномасштабного слепого обзора мазеров водяного пара в Галактике, превышающего по чувствительности обзор *HOPS* ($\sigma \sim 1$ Ян [14]). К примеру, подобный обзор *Methanol MultiBeam* (MMB) для метанольных мазеров привел к обнаружению 972 источников при чувствительности $\sigma \sim 0.17$ Ян [15]. Более того, мазеры в линии водяного пара имеют значительную переменность [16–19], поэтому даже проведение подобного обзора не дает точной гарантии отсутствия мазера в источниках, в которых мазер не был обнаружен — он может быть обнаружен спустя некоторое время. Согласно базе данных мазеров <http://maserdb.net> *MaserDB.net*, из ~8000 сгустков *ATLASGAL*, для которых определены физические параметры в работе [20], в настоящее время на 22 ГГц отсутствуют наблюдения в 62% источниках (4999). Из них 922 источника могут наблюдаться на радиотелескопах северного полушария ($\delta > -15^\circ$).

Целью настоящей работы является проведение поискового обзора ярких мазеров в линии водяного пара в направлении на яркие (>1 Ян) пылевые сгустки из обзоров *ATLASGAL* и *Bolocam*. “Яркими” мазерами в данном случае будут называться такие мазеры, которые могут быть обнаружены на *PT-22* в единственном канале с плотностью потока на уровне 2σ с временами накопления порядка 20–40 мин. Это накладывает ограничение на плотность потока мазера — не менее 6 Ян при регистрации в одном канале с шириной 0.329 км/с при уровне $\sigma \sim 3$ Ян.

В работе описываются результаты наблюдений на радиотелескопе *PT-22* ПРАО АКЦ ФИАН мазерного излучения воды в пылевых сгустках, предварительно выделенных из каталогов *ATLASGAL* и *Bolocam*. Для более детального исследования выбранных источников использованы архивные данные наблюдений в мазерных линиях молекул H_2O , CH_3OH (I и II класса) и OH , а также наблюдения в инфракрасном (2MASS [21], *Spitzer IRAC* [22], *Herschel PACS* [23], *Herschel SPIRE* [24]), субмиллиметровом (*ATLASGAL* [13]) и миллиметровом (*Bolocam* [11]) диапазоне длин волн.

Статья организована следующим образом. В разделе 2 описан критерий выбора источников

для наблюдений, в разделе 3 описаны технические детали проведенных наблюдений и их основные параметры. Используемые архивные данные и ресурсы описаны в разделе 4. В разделе 5 представлены основные результаты наблюдений, а в разделе 6 приводятся комментарии к отдельным источникам. В разделе 7 представлено обсуждение полученных результатов, а в разделе 8 приводятся выводы из работы.

2. ВЫБОР ОБЪЕКТОВ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ

Для проведения поискового обзора мазеров в линии водяного пара были использованы каталоги ATLASGAL [25] и Volocam GPS [26]. В качестве источников для наблюдений на РТ-22 были выбраны пылевые сгустки, удовлетворяющие следующим критериям:

1. Источники попадают в область видимости их с местоположения РТ-22 ($\delta > -15^\circ$).

2. Источники не имеют положительных регистраций мазеров на 22 ГГц в известной литературе согласно базе данных <http://maserdb.net> MaserDB.net [12], кроме работы [27], которая использовалась для независимого контроля. В этой работе представлены результаты крупнейшего в доступной литературе поискового обзора мазеров в линии водяного пара на 22 ГГц в направлении на сгустки, излучающие в миллиметровом диапазоне длин волн.

3. Пиковая плотность потока источников на 870 мкм (ATLASGAL) и 1100 мкм (Volocam) должна превышать 1.0 Ян.

Последний критерий введен для уменьшения числа источников для наблюдений. Из 922 источников, доступных для наблюдения на широте РТ-22 ($\delta > -15^\circ$), в список вошли 140 источников, в том числе 100 источников из каталога ATLASGAL и 40 источников из каталога Volocam GPS.

Список источников был составлен с учетом размера диаграммы направленности. В случае, если расстояние между источниками сравнимо или меньше размера диаграммы направленности, то из группы близких источников выбирался наиболее яркий и наблюдения проводились в его направлении.

Для удобства идентификации источники ATLASGAL обозначены буквой "А" в названии источника, а источники Volocam – буквой "В" в названии источника.

3. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Все наблюдения были проведены на телескопе РТ-22 Пушинской радиоастрономической обсерватории ФИАН в период 6–16 октября 2020 г. на длине волны 1.35 см. В период с ноября 2020 г. по

июнь 2021 г. были проведены отдельные наблюдения зарегистрированных мазерных источников для исследования их переменности.

В качестве координат для наблюдений в линии водяного пара на 22 ГГц были выбраны положения пиков излучения в континууме на 870 и 1100 мкм. Размер диаграммы направленности антенны РТ-22 на половине уровня мощности (HPBW) на длине волны 1.35 см составляет $2.6'$.

Была использована частота покоя 22235.08 МГц. Использован метод наблюдения ON-ON, основанный на диаграммной модуляции [28], при котором на выходе получается удвоенный сигнал. Разнос лучей (рупоров) составляет $10'$. Системная температура во время наблюдений находилась в диапазоне от 210 до 300 К по шкале антенной температуры. Данные каждого скана калибровались к антенной температуре по эталонному сигналу от генератора шума с известной антенной температурой и корректировались за поглощение атмосферой. Для перевода из шкалы антенной температуры в шкалу плотности потока использовался коэффициент 13 Ян/К. Следует отметить, что точность привязки антенной температуры к потоку составляет $\sim 10\%$.

Наблюдения проводились сканами по 280 с, из которых 40 с тратилось на накопление сигнала генератора шума. Для каждого источника получено по 2–5 сканов в зависимости от системной температуры. Число сканов выбиралось так, чтобы достигнутый уровень шума составил ~ 3 Ян.

Для наблюдений были использованы две различные полосы анализатора спектра (12.5 и 50 МГц), состоящие из 2048 каналов. Спектральное разрешение для полос 12.5 и 50 МГц составило 0.0823 и 0.329 км/с соответственно. Полоса 50 МГц использовалась для поиска и первичной регистрации мазеров, полоса 12.5 использовалась для прояснения детальной кинематической структуры в некоторых зарегистрированных источниках.

За каждые сутки наблюдений дважды производилась юстировка телескопа по калибровочным источникам: W49N для источников ATLASGAL и W3OH для источников Volocam.

Данные наблюдений были обработаны с помощью программы class из пакета Gildas [29].

4. АРХИВНЫЕ ДАННЫЕ

Для проверки наличия или отсутствия регистрации мазеров в выбранных источниках согласно критерию 2 из раздела 2 использована база данных мазерных источников MaserDB.net [12]. На момент использования степень покрытия базы данных по мазерам в линии водяного пара составляет 95%.

Таблица 1. Новые регистрации мазеров на 22 ГГц в направлении на 140 сгустков из каталогов Volocam и ATLASGAL. B – количество усреднений между каналами, 1σ – достигнутый уровень шума в янских после усреднения между сканами и между каналами, F – пиковая яркость источника, полученная из приближения гауссианой наиболее яркой компоненты, V – пиковая скорость на луче зрения. ΔV – ширина гауссианы в случае единственной компоненты и разброс лучевой скорости в случае множества компонент или сложного профиля

Источник	RA J2000	Dec J2000	B	1σ , Ян	F , Ян	V , км с ⁻¹	ΔV , км с ⁻¹	День 10.2020
A016.821–00.347	18:22:41.43	–14:27:40.8	2	1.69	11.8 ± 0.53	48.9 ± 0.25	6.2 ± 1.3	8
A016.987+00.981	18:18:11.02	–13:41:19.8	2	1.86	13.8 ± 1.44	–67.3 ± 0.52	7.8 ± 2.2	7
A017.216+00.821	18:19:12.58	–13:33:46.0	2	2.16	59.8 ± 2.73	12.9 ± 0.30	8.1 ± 1.5	6
A018.701–00.229	18:25:52.91	–12:44:40.9	5	0.88	3.1 ± 0.16	37.2 ± 0.41	10.5 ± 2.0	11
A034.196–00.592	18:55:51.09	+00:51:17.9	1	2.99	18.7 ± 1.31	55.4 ± 0.29	[51, 58]	6
B081.174–00.100	20:40:04.99	+41:32:13.2	1	2.68	31.3 ± 4.24	–67.15 ± 0.12	[–70; 11]	12
B081.174–00.100	20:40:04.99	+41:32:13.2	1	2.68	31.3 ± 4.24	–67.15 ± 0.12	[–70; 11]	12

Для независимого контроля результатов наблюдений на РТ-22 использовались результаты наблюдений на 100-метровом телескопе Грин Бэнк (США) в работе Свободы [27]. В данной работе в линии аммиака на 23 ГГц и в линии водяного пара на 22 ГГц исследованы ~1600 сгустков, которые имеют излучение на 1.1 мм [30] и в линии $\text{НСО}^+(3-2)$. Линия $\text{НСО}^+(3-2)$ является трассером плотного газа и, в свою очередь, наблюдалась в направлении на источники Volocam в работе Шлингман [31], где главной целью было получение кинематической информации о сгустках из каталога Volocam. Так как наличие плотного газа является необходимым, но не достаточным критерием для образования мазера в линии водяного пара, то отбор источников по линии $\text{НСО}^+(3-2)$ вносит гораздо меньше селекции источников по сравнению с другими обзорами, например обзором мазеров в линии водяного пара в ультра-компактных областях НП (УЧНП) [32, 33], в направлении на метанольные мазеры II класса [34, 35] или мазеры гидроксила [36]. Селекция заключается в том, что мазеры в линии водяного пара могут возникать на ранних стадиях звездообразования [37, 38] – в молекулярных сгустках, в которых еще не проявилось излучение от ультра-компактных зон НП, а также излучение от гидроксильных и метанольных мазеров (II класса). Соответственно, в приведенные выше обзоры вошли в основном развитые области звездообразования, а мазеры в линии водяного пара в менее развитых областях были пропущены.

В работе [27] объектом исследования являются в том числе дозвездные сгустки. Поэтому обзор [27] можно считать наиболее подходящим для исследования статистики регистраций в исследуемых источниках – он наиболее крупный по охвату и менее подвержен эффекту селекции более

развитых областей звездообразования по сравнению с другими крупными обзорами. В результате данного обзора в линии водяного пара на 22 ГГц было зарегистрировано излучение в 30% источников. Примерно половина источников, отобранных для наблюдений на РТ-22 в рамках настоящей работы, ранее наблюдались на 100-метровом телескопе Green Bank Telescope в работе [27]. Поэтому результаты наблюдений на РТ-22 сравнивались с данными наблюдений из работы [27] для независимого контроля и оценки числа источников, которые не были зарегистрированы на РТ-22 ввиду недостаточной чувствительности.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ

В табл. 1 представлены результаты положительных регистраций мазеров в линии водяного пара в направлении на источники ATLASGAL и Volocam GPS, а на рис. 1 представлены спектры зарегистрированных источников. В табл. 2 приведены списки источников из каталогов ATLASGAL и Volocam, в которых не были зарегистрированы мазеры в линии водяного пара на 22 ГГц, с указанием достигнутого уровня 1σ .

В результате обзора 140 источников на РТ-22 было зарегистрировано излучение от 6 источников, причем в четырех источниках излучение было зарегистрировано впервые. Новые мазеры в линии водяного пара были зарегистрированы в направлении на следующие источники из каталога ATLASGAL: A016.987+00.981, A017.216+00.821 и A018.701–00.229. Дополнительно был впервые обнаружен мазер в направлении на источник B081.174–00.100 из каталога Volocam. В источниках A016.821–00.347 и A034.196–00.592 были обнаружены новые компоненты излучения, в том числе ~10 Ян в направлении на A016.821–00.347 и

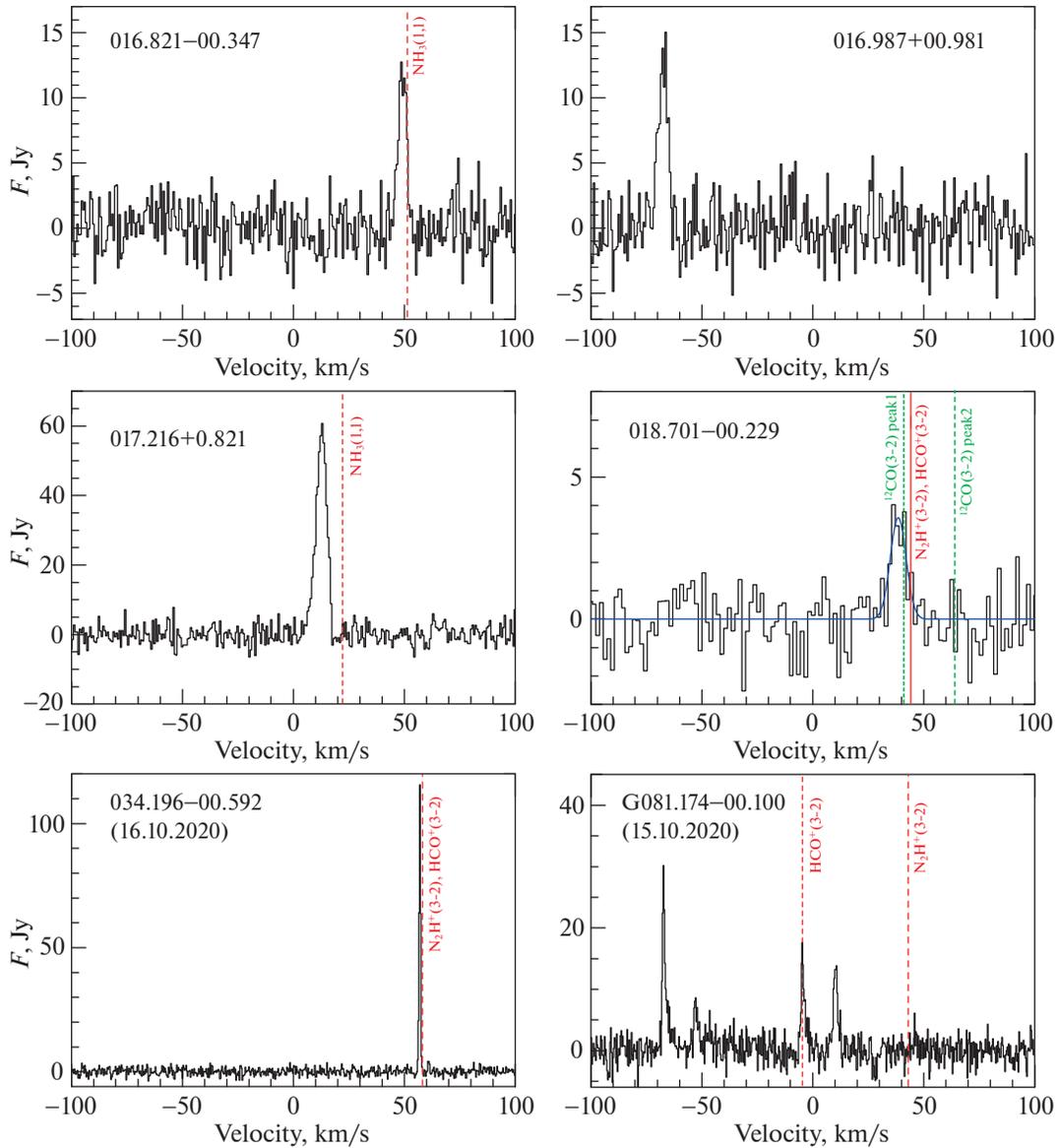


Рис. 1. Спектры источников, в которых были впервые обнаружены мазеры в линии водяного пара на РТ-22 в октябре 2020 г. Данные представлены в шкале плотности потока (Ян). Для источника 018.701–0.229 приведено гауссово приближение спектра. На спектрах вертикальной красной линией показана скорость на луче зрения трассеров плотного газа (NH_3 , HCO^+ , N_2H^+), зеленой линией – трассера газа средней плотности (^{12}CO). Использованы данные по линии $\text{NH}_3(1,1)$ из обзора Винена [39], $\text{HCO}^+(3-2)$ и $\text{N}_2\text{H}^+(3-2)$ из обзора Шлингман [77] и $^{12}\text{CO}(3-2)$ из обзора Демпси [52]. Данные по лучевой скорости газа для источника A016.987+0.981 не найдены в литературе.

~100 Ян в направлении на A034.196–00.592. Кроме того, мазеры в линии водяного пара в источниках A034.196–00.592 и B081.174–00.100 оказались переменными в рамках программы наблюдений (14 дней), поэтому был организован их дальнейший мониторинг.

Ширина линий мазеров, зарегистрированных в направлении на источники A016.821–00.347, A016.987+00.981, A017.216+00.821, A018.701–00.229 составляет более 6 км/с, что превышает ха-

рактерную ширину мазерных линий (~1–2 км/с). Наблюдаемый широкий профиль линии может быть связан с наложением нескольких неразрешенных спектральных компонент излучения – ранее в работе [27] сообщалось, что в источнике A016.821–00.347 ширина линии составляла 0.3 км/с. С другой стороны, в источниках A034.196–00.592 и B081.174–00.100 ширина отдельных компонент менее 2 км/с, что может указывать на более простую структуру профиля ли-

Таблица 2. Список источников ATLASGAL, в которых мазерное излучение воды на 22 ГГц не было обнаружено. N_{scan} — число сканов источника, по 4 минуты накопления сигнала для каждого скана, 1σ — достигнутый уровень шума в янских. День — день месяца наблюдений данного источника (октябрь 2020 г.). GBT — данные наблюдений на 100-метровом телескопе Green Bank Telescope [27]. В случае отсутствия регистрации на GBT указывается уровень 5σ , в случае положительной регистрации указывается плотность потока мазера и уровень 1σ после знака “±”

N	ATLASGAL	1σ , Ян	GBT, Ян	N	ATLASGAL	1σ , Ян	GBT, Ян
1	A016.942–00.072	2.74	<0.175	68	A037.819–00.382	3.93	0.605 ± 0.03
2	A016.986–00.922	2.9		69	A038.371–00.149	4.41	<0.15
3	A017.031+01.081	2.66		70	A039.884–00.346	3.17	
4	A017.032+01.042	2.89		71	A041.049–00.247	2.53	
5	A017.076+01.034	2.66		72	A045.463+00.027	3.31	
6	A017.169+00.814	2.96		73	A046.086+00.252	2.89	
7	A018.214–00.342	2.85	<0.15	74	A047.051+00.251	2.88	<0.15
8	A018.654–00.059	3.75	<0.15	75	A048.579+00.056	2.49	0.245 ± 0.03
9	A018.711+00.001	2.93	0.925 ± 0.03	76	A048.881–00.276	2.86	
10	A018.761+00.261	2.97		77	A048.953–00.286	3.12	<0.15
11	A018.908–00.626	2.92		78	A049.098–00.254	2.73	2.885 ± 0.035
12	A019.003+00.129	2.91	0.43 ± 0.03	79	A049.111–00.322	2.87	0.27 ± 0.03
13	A019.829–00.329	2.83	<0.15	80	A049.153–00.366	2.77	0.2 ± 0.03
14	A020.362–00.012	2.6	2.99 ± 0.02	81	A049.253–00.411	2.85	<0.575
15	A022.412+00.317	3.03	<0.125	82	A049.266+00.312	2.96	
16	A022.548–00.522	3.46	<0.25	83	A049.378–00.257	2.77	4.205 ± 0.125
17	A023.364–00.289	2.6	<0.225	84	A049.401–00.227	2.74	
18	A023.394–00.129	2.69	0.8 ± 0.045	85	A049.669–00.457	3.34	<0.6
19	A023.567+00.014	2.75	0.585 ± 0.04	86	A049.726–00.012	4.32	1.955 ± 0.125
20	A023.692+00.589	2.94		87	A050.034+00.581	2.64	
21	A024.014+00.049	3.05	0.435 ± 0.05	88	A052.569–00.956	2.79	
22	A024.151+00.396	16.38	0.395 ± 0.045	89	A053.164–00.246	2.57	1.025 ± 0.06
23	A024.351+00.037	2.67	1.65 ± 0.05	90	A053.959+00.031	2.1	<0.2
24	A024.488–00.692	3.12		91	A054.373–00.614	3.6	
25	A024.526+00.349	2.79	<0.225	92	A054.373–00.614	3.49	
26	A024.543–00.246	2.95	<0.225	93	A056.962–00.234	2.79	8.22725 ± 0.075
27	A024.546–00.132	2.7	<0.225	94	A059.359–00.207	3.57	
28	A024.624–00.101	3.1	<0.2	95	A034.712–00.596	15.17	<0.2
29	A024.689–00.126	2.83		96	B075.701+00.342	2.77	
30	A025.612–00.136	2.66	1.385 ± 0.045	97	B076.188+00.096	3.03	
31	A025.674–00.122	4.58	0.76 ± 0.05	98	B077.894–01.192	3.3	
32	A027.464+00.119	3.45		99	B078.113–00.290	3.3	
33	A027.903–00.012	2.95	0.255 ± 0.03	100	B079.132–00.368	2.89	
34	A028.677–00.277	3.4	0.165 ± 0.03	101	B079.269+00.388	2.92	
35	A028.707–00.294	3.01		102	B079.561–00.768	3.21	
36	A028.802–00.022	2.9	0.63 ± 0.03	103	B079.986+00.840	2.64	

Таблица 2. Окончание

<i>N</i>	ATLASGAL	1σ, Ян	GBT, Ян	<i>N</i>	ATLASGAL	1σ, Ян	GBT, Ян
37	A029.226+00.024	3.13	<0.15	104	B080.864+00.346	3.17	
38	A029.396–00.094	2.75	0.39 ± 0.03	105	B080.939–00.126	2.16	
39	A030.251+00.054	2.75		106	B081.045–00.154	2.74	
40	A030.341–00.116	2.63	<0.2	107	B081.209+00.858	3.01	
41	A030.348+00.392	2.61	0.34 ± 0.04	108	B081.433+00.702	2.94	
42	A030.463+00.034	2.76	0.725 ± 0.04	109	B081.453+00.472	2.81	
43	A030.651–00.204	2.65		110	B081.477+00.020	2.46	
44	A030.769–00.087	2.96		111	B081.546+00.097	2.59	
45	A030.839–00.019	3.55		112	B081.680+00.541	3.77	
46	A030.839–00.019	3.3		113	B084.775–01.184	2.54	
47	A030.848–00.081	2.81		114	B084.808–01.174	2.79	
48	A030.854+00.149	2.98		115	B084.896–01.098	2.91	
49	A030.978+00.216	3.11	<0.125	116	B084.966–01.174	2.71	
50	A032.471+00.204	2.99		117	B085.037–00.140	7.51	
51	A032.706–00.061	2.96	1.025 ± 0.025	118	B085.073–00.136	7.89	
52	A032.739+00.192	2.79	<0.125	119	B111.278–00.707	2.97	
53	A033.238–00.022	3.03	<0.2	120	B111.558+00.832	3.58	
54	A033.264+00.067	2.95	<0.2	121	B111.668+00.596	2.21	
55	A033.494–00.014	3.1	<0.15	122	B111.828+00.578	2.82	
56	A033.914+0.109	3.85	1.615 ± 0.03	123	B111.859+00.860	2.2	
57	A034.096+00.017	2.59	8.98 ± 0.045	124	B111.939+00.806	3	
58	A034.454+00.006	2.67	3.63 ± 0.05	125	B133.734+01.268	3.5	
59	A034.598–01.031	2.79		126	B134.211+00.720	3.09	
60	A034.598–01.031	2.47		127	B134.279+0.856	4.92	
61	A034.751–01.386	2.81		128	B173.625+02.787	2.73	
62	A034.751–01.386	2.8		129	B173.676+02.873	2.6	
63	A035.226–00.359	2.96	3.44 ± 0.045	130	B182.338+00.248	5.01	
64	A035.297–00.897	2.82		131	B196.421–01.698	3.17	
65	A035.457–00.179	3.27		132	B203.200+02.018	5.47	
66	A036.839–00.022	3.2	1.175 ± 0.035	133	B203.393+02.034	2.88	
67	A037.268+00.081	2.48	1.845 ± 0.03	134	B204.491–11.359	4.39	

нии этих компонент излучения. Несмотря на узкую ширину линий, в этих источниках наблюдаются иные особенности профиля линии. В источнике A034.196–00.592, кроме основной компоненты на 55.4 км/с, была зарегистрирована вторая слабая компонента на лучевой скорости 61 км/с, а в форме профиля линии основной компоненты прослеживается двойная структура (см. рис. 2). В источнике B081.174–00.100 регистри-

рована сложная структура профиля линии H₂O, состоящая из нескольких компонент излучения (до 7, см. рис. 3). Для прояснения детальной структуры зарегистрированных мазеров необходимы их наблюдения на интерферометре.

Из 134 источников, которые не были зарегистрированы на РТ-22 со средним уровнем шума в ~3 Ян, на 100-метровом телескопе обсерватории Грин Бэнк наблюдались 57 источников при сред-

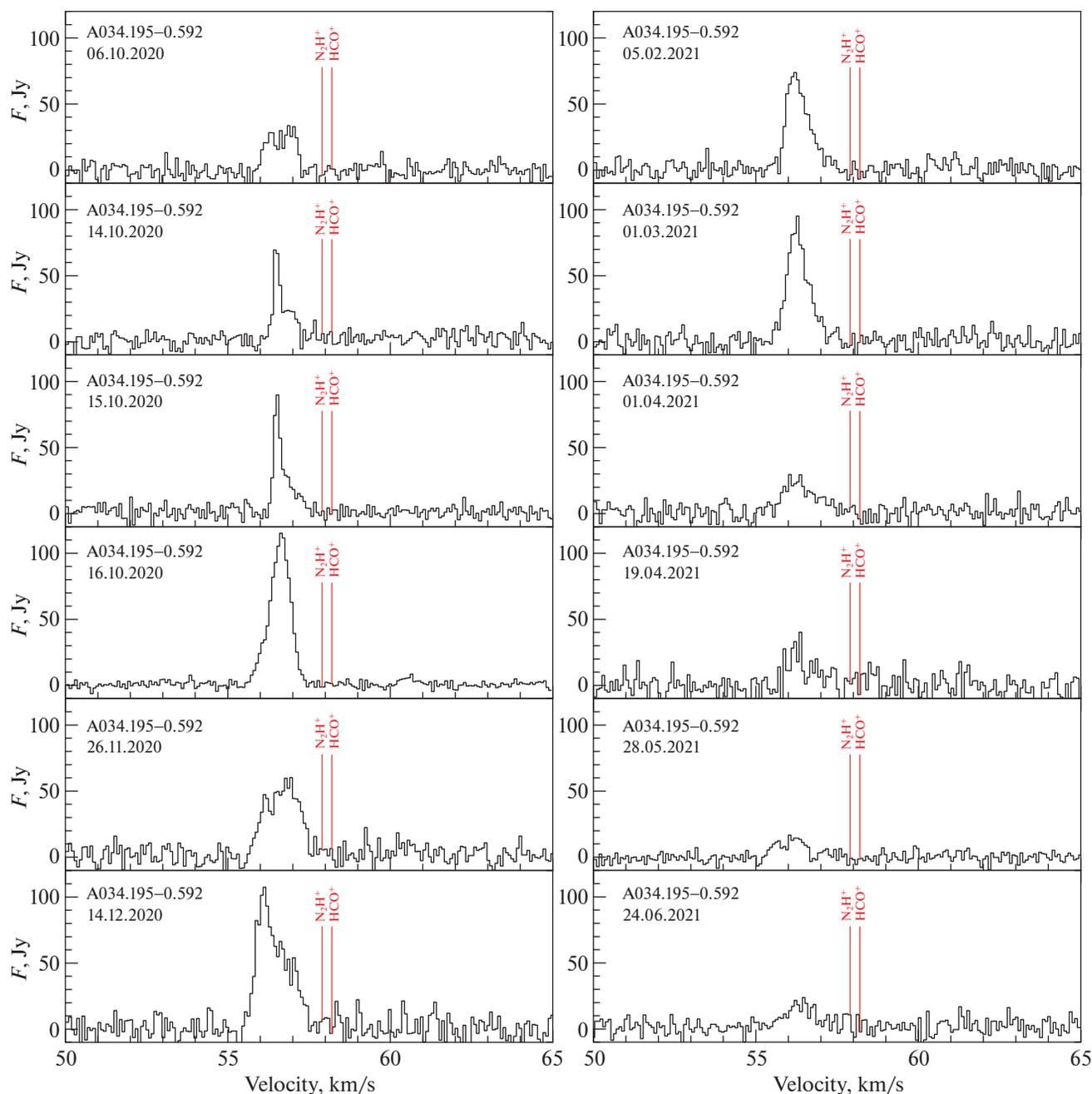


Рис. 2. Результаты мониторинга источника A034.195–0.592 на РТ-22 (ПРАО, ФИАН) с полосой 12.5 МГц в период с октября 2020 по июнь 2021 г.

нем уровне шума ~ 0.03 Ян [8]. Из 57 источников в 32 ($\sim 56\%$) были зарегистрированы мазеры в линии водяного пара, причем в 26 источниках яркость мазера составляет менее 3 Ян. Соответственно, такие источники не могут быть обнаружены на РТ-22 с временем накопления порядка 30 мин.

Для некоторых источников плотность потока на 100-метровом телескопе ранее была более ≈ 3 Ян,

что может быть достаточно для их регистрации на РТ-22. Тем не менее в настоящих наблюдениях мазеры в линии водяного пара в данных источниках не были зарегистрированы, т.е. их яркость изменилась и опустилась ниже уровня 3 Ян. Всего таких источников 7, они представлены в табл. 3.

Таким образом, в рамках настоящей работы были зарегистрированы ранее неизвестные мазерные источники, а также мазерные источники, которые ранее имели низкое значение плотности

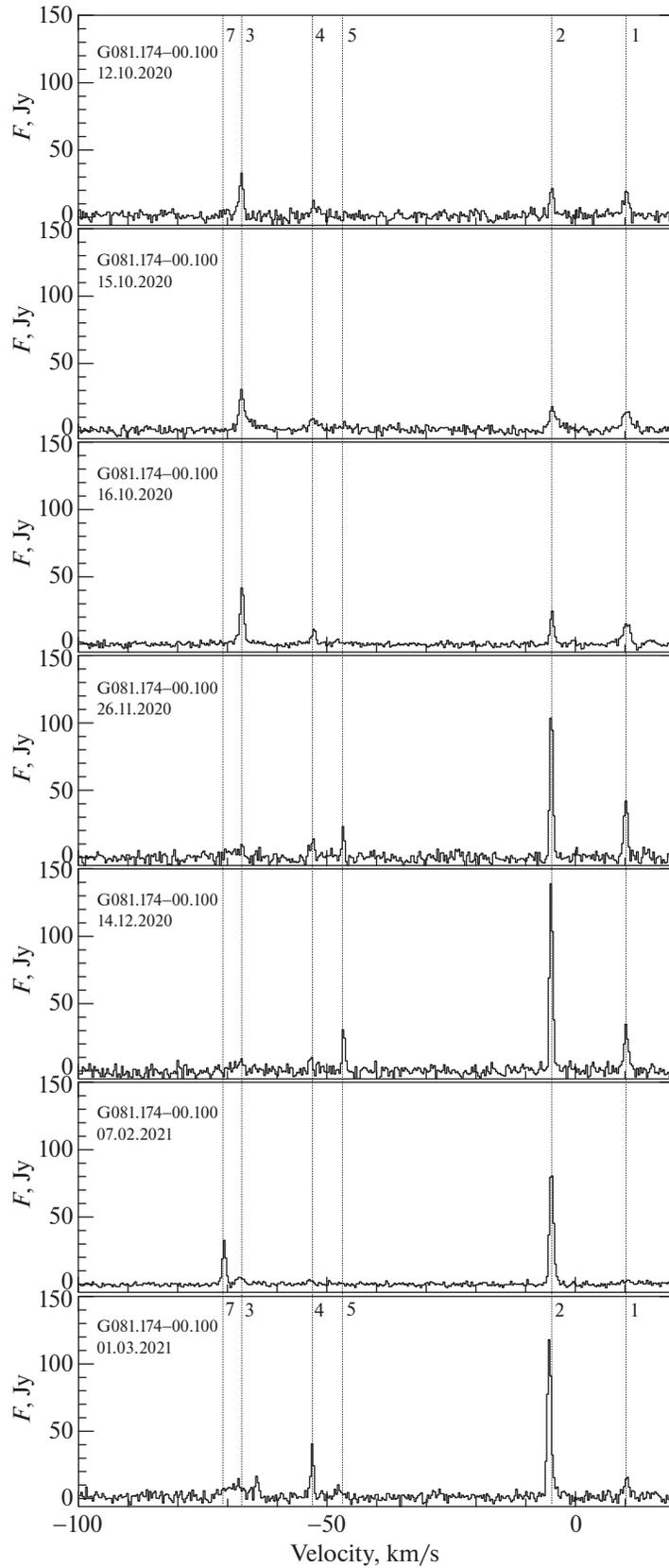


Рис. 3. Результаты мониторинга источника V081.174-00.100 на РТ-22 (ПРАО, ФИАН) с полосой 50 МГц в период с октября 2020 по март 2021 г.

Таблица 3. Список источников ATLASGAL, в которых в работе [27] ранее были зарегистрированы достаточно яркие (≥ 3 Ян) мазеры в линии водяного пара на 22 ГГц, но которые не были зарегистрированы в наблюдениях из настоящей работы

N	ATLASGAL	Volocam	$F_{\text{ГВТ}}, \text{Ян}$	$\sigma_{\text{RT22}}, \text{Ян}$
1	A020.364–0.013	3468	2.99 ± 0.02	2.6
2	A034.096+0.015	5971	8.98 ± 0.045	2.59
3	A034.454+0.006	6041	3.63 ± 0.05	2.67
4	A035.228–0.358	6222	3.44 ± 0.045	2.96
5	A049.097–0.254	6844	2.885 ± 0.035	2.73
6	A049.375–0.262	6868	4.205 ± 0.125	2.77
7	A056.962–0.234	6998	8.225 ± 0.075	2.79

Таблица 4. Результаты пятиточечного картографирования регистраций мазеров на 22 ГГц в направлении на сгустки из каталога Volocam. ΔRA и ΔDec – смещение текущего положения относительно центрального в угловых секундах, N_{scan} – число сканов источника, по 4 мин накопления сигнала для каждого скана, Bin – количество усреднений между каналами, 1σ – достигнутый уровень шума в янских после усреднения между сканами и каналами

Источник	Положение	RA (J2000) h:m:s	Dec (J2000) d:m:s	$\Delta RA, ''$	$\Delta Dec, ''$	B	$1\sigma, \text{Ян}$	$F, \text{Ян}$	День 10.2020	
A116 016.821	A016.821–00.347	Central	18:22:40.96	–14:27:41.2	0	0	1.25	8.6	13	
		South	18:22:41.02	–14:30:17.2	0	–156	1.28		13	
		East	18:22:51.96	–14:27:40.4	165	0	1.28		13	
		West	18:22:30.96	–14:27:41.9	–150	0	1.44		13	
		North	18:22:40.91	–14:25:05.2	0	156	2.59		13	
A113 016.987	A016.987+00.981	Central	18:18:11.03	–13:41:19.7	0	0	2.07	14.3	15	
		South	18:18:11.06	–13:42:37.7	0	–78	1.61		8.06	15
		East	18:18:16.03	–13:41:19.4	75	0	1.56		9.79	15
		West	18:18:06.03	–13:41:20.1	–75	0	2		16.07	15
		North	18:18:11.01	–13:40:01.7	0	78	2.02		15	
A105 017.216	A017.216+00.821	Central	18:19:12.87	–13:33:46.2	0	0	5.45	105	14	
		South	18:19:12.90	–13:35:04.2	0	–78	6.86		45	14
		East	18:19:17.87	–13:33:45.9	75	0	6.6		70	14
		West	18:19:06.87	–13:33:46.7	–90	0	7.14		44	14
		North	18:19:12.85	–13:32:28.2	0	78	7.13		57	14
A43 034.196	A034.196–00.592	Central	18:55:50.86	+00:51:18.4	0	0	3.04	47.3	14	
		South	18:55:50.91	+00:48:41.4	0	–157	2.8		14	
		East	18:56:01.86	+00:51:19.2	165	0	3.42		14	
		West	18:55:40.86	+00:51:17.7	–150	0	6.41		14	
		North	18:55:50.81	+00:53:53.4	0	155	6.53		14	
B62 G081.17	B081.174–00.100	Central	20:40:05.47	+41:32:14.3	0	0	3.44	18.51	14	
		South	20:40:05.54	+41:29:38.3	0	–156	2.23		14	
		East	20:40:15.50	+41:32:14.8	150	0	2.26		14	
		West	20:40:15.50	+41:32:14.8	150	0	2.07		14	
		North	20:40:05.40	+41:34:50.3	0	156	2.15		14	
North	20:40:05.40	+41:34:50.3	0	156	2.15	14				

потока (~ 0.5 Ян) по данным GBT [27], а на момент проведения настоящего обзора их яркость увеличилась в несколько десятков ($B016.821-00.347$, 0.15 Ян $\rightarrow 11.8$ Ян) или даже сотен раз ($A034.196-00.592$, 0.55 Ян $\rightarrow 110$ Ян). Изменения плотности потока мазеров как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения свидетельствуют об изменении условий, в которых данное мазерное излучение было образовано.

5.1. Пятиточечные карты

Так как размер диаграммы направленности RT-22 на 22 ГГц составляет $2.6'$, а средний размер источника ATLASGAL $\sim 40-60''$, то существует возможность попадания нескольких источников ATLASGAL в диаграмму направленности RT-22. Для проверки корректной ассоциации между водяным мазером и источником ATLASGAL для всех зарегистрированных мазеров, кроме $A018.701-0.229$, были получены пятиточечные карты. Результаты представлены в табл. 4, а изображения спектров доступны онлайн по следующей ссылке: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.c.568272410.6084/m9.figshare.c.5682724>. Для источника $A018.701-0.229$ карта не была получена из-за низкой плотности потока зарегистрированного мазера.

Анализ полученных данных показывает, что во всех источниках, кроме $A016.987+0.981$, интенсивность линий в центре является максимальной, а в иных четырех направлениях интенсивность мазерной линии уменьшается. Такое поведение спектральной линии может указывать на ассоциацию между мазером и пылевым сгустком ATLASGAL, в направлении на который данный мазер был зарегистрирован.

В случае источника $A016.987+0.981$ в центральном направлении интенсивность линии составила 14.3 Ян, а при смещении к западу ($\Delta Dec = -75''$) интенсивность увеличилась до 16.1 Ян. Так как форма профиля линии для источника не изменилась при смещении к западу, однако изменилась только интенсивность линии, мы можем сделать вывод, что зарегистрированный мазер напрямую не связан с источником $A016.987+0.981$, а находится к западу от него. Для прояснения ассоциации между зарегистрированным водяным мазером и источником ATLASGAL требуются наблюдения на интерферометре или на более чувствительном однозеркальном радиотелескопе.

6. КОММЕНТАРИИ К ОТДЕЛЬНЫМ ИСТОЧНИКАМ

6.1. $A016.821-00.347$

Источник впервые был зарегистрирован в мазерной линии воды в работе [27] под номером 3177, причем его плотность потока составила 0.515 (0.05) Ян, а скорость на луче зрения в пиковом значении интенсивности составила 56.7 км/с. В настоящей работе была зарегистрирована другая компонента излучения: 11.8 ± 0.5 Ян на лучевой скорости 48.9 ± 0.25 км/с. Соответственно, максимальная плотность потока источника возросла более чем в 20 раз по сравнению с наблюдениями из [27]. В направлении на данный источник в обзоре Винена [39] было зарегистрировано излучение молекулы аммиака на скорости 51.3 км/с, что соответствует лучевой скорости мазера в линии водяного пара (48.9 км/с).

Источник представляет собой достаточно яркий и компактный пылевой сгусток, излучение которого прослеживается в широком диапазоне длин волн — в инфракрасном (2MASS K [21], Spitzer IRAC 3–16 мкм [22], Herschel PACS 70–160 мкм [23], SPIRE 250–500 мкм [24]), субмиллиметровом (ATLASGAL 870 мкм [13]) и миллиметровом (Bolocam 1.1 мм [11]) диапазонах длин волн (см. рис. 4). Согласно наблюдениям на интерферометре Very Large Array (VLA, [40]), в направлении на центр сгустка ATLASGAL 016.821–00.347 имеется компактный источник в континууме на 1.4 ГГц (20 см). В направлении на источник $A016.821-00.347$ были ранее проведены наблюдения метанольных мазеров I [41] и II [42, 43] класса, но излучения зарегистрировано не было.

6.2. $A016.987+00.981$

Ранее в источнике наблюдения мазеров любых типов не проводились, согласно базе данных мазерных источников <http://maserdb.net/MaserDB.net>. В рамках настоящей работы был зарегистрирован мазер с плотностью потока 13.8 ± 1.4 Ян на лучевой скорости -67.3 ± 0.52 км/с. Как и предыдущий источник, $G016.987+00.981$ выделяется на картах в широком диапазоне длин волн (см. рис. 4). Излучение от источника зарегистрировано в полосах 2MASS K, Spitzer IRAC (3–16 мкм), Herschel PACS (70–160 мкм) и SPIRE (250–500 мкм), ATLASGAL 870 мкм. Согласно изображениям Spitzer IRAC, источник имеет яркое излучение на 4.5 мкм, что позволяет отнести его к типу EGO (Extended Green Object). Этот тип объектов характеризуется ярким излучением на 4.5 мкм [44]. Изображения Spitzer IRAC также указывают на существование небольшой ($\sim 15''$) кольцевой структуры вокруг центрального компактного источника.

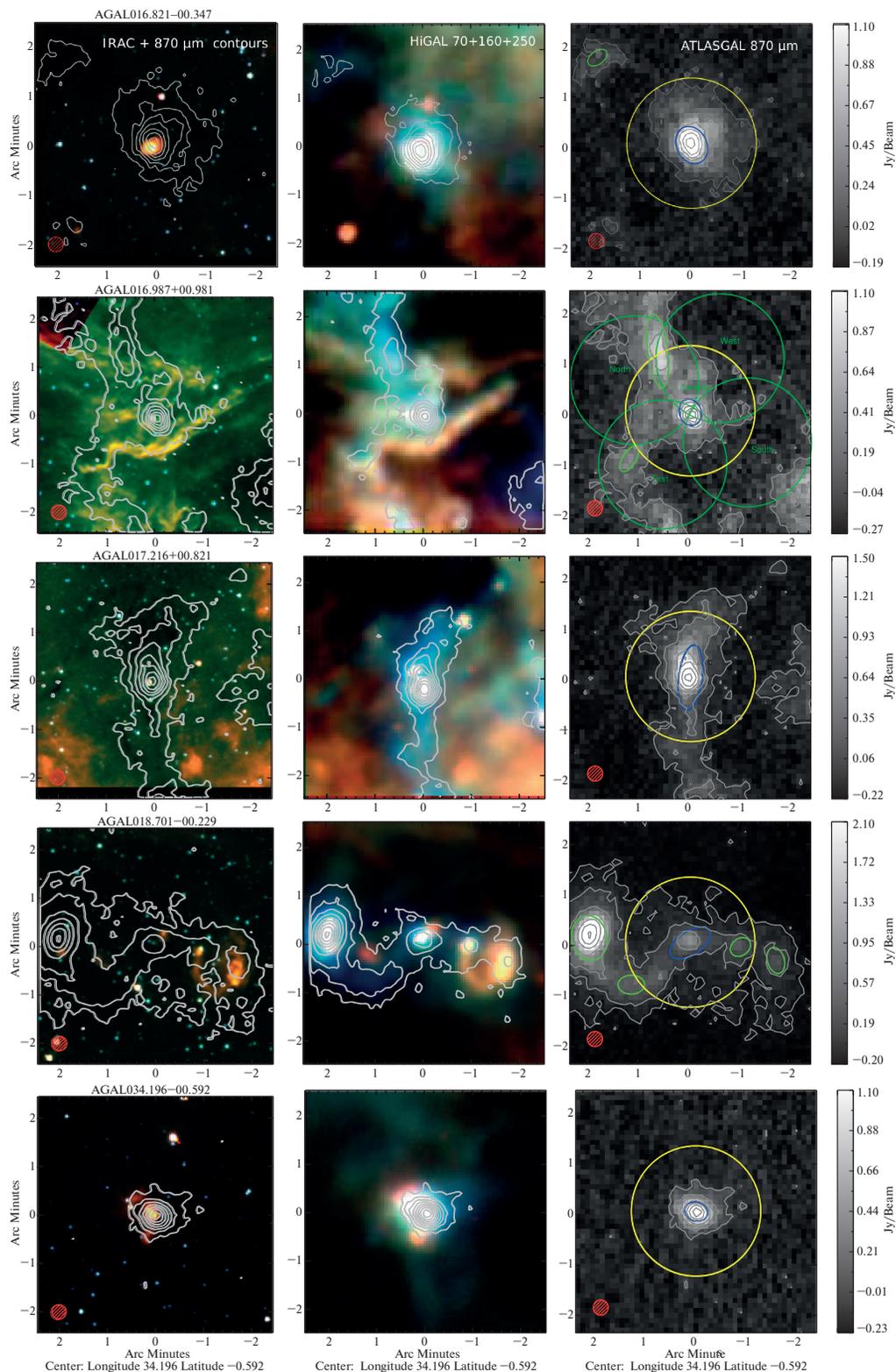


Рис. 4. Изображения в инфракрасном (Spitzer 4.5–8 мкм, Herschel 70–250 мкм) и субмиллиметровом (ATLASGAL, 870 мкм) диапазоне длин волн для источников ATLASGAL, в которых был зарегистрирован мазер на РТ-22. Контуры на всех рисунках показано излучение ATLASGAL на 870 мкм. Синий эллипс показывает положение и ориентацию источника из каталога ATLASGAL Compact Source Catalog (CSC) [25], в направлении на который был зарегистрирован мазер, зелеными эллипсами показаны другие ближайшие источники из каталога ATLASGAL-CSC. Желтой окружностью показан размер диаграммы направленности РТ-22 на 1.35 см (2.6'), а красной окружностью – размер диаграммы направленности на 870 мкм из обзора ATLASGAL. Для источника A016.987+0.981 зелеными окружностями показано положение диаграммы направленности при построении пятиточечных карт. Для данных Spitzer цвета закодированы следующим образом: 4.6 мкм – синий, 5.8 мкм – зеленый и 8 мкм – красный. Для изображений Herschel цвета закодированы как 70 мкм – красный, 160 мкм – зеленый и 250 мкм – синий.

На изображениях Spitzer IRAC [22] заметно присутствие фронта зоны фотодиссоциации (PDR), связанного с источником. Этот фронт в свою очередь связан с областью ионизованного водорода в известной области звездообразования NGC 6611, или M16. Данная область является второй по яркости после туманности Ориона и известна также благодаря изображениям “столбов звездообразования” (Pillars of creation), полученным на космическом телескопе им. Хаббла.

Пятиточечное картографирование источника A016.987+00.981 показало отсутствие пространственной ассоциации между водяным мазером и источником ATLASGAL 016.987+00.981, в направлении на который мазер был обнаружен. Зарегистрированный мазер в направлении на A016.987+00.981 может быть связан с иным источником ATLASGAL, который расположен к западу от пика источника ATLASGAL 016.987+00.981.

6.3. A017.216+00.821

Как и A016.987+00.981, источник A017.216+00.821 располагается в окрестности зоны НП Sh2-49 в области NGC 6611 (угловое расстояние до центра зоны НП составляет $25'$, диаметр зоны НП 90 уг. минут согласно каталогу Шарплесс [45]). В источнике A017.216+00.821 ранее не проводились наблюдения мазеров любых типов, согласно базе данных мазерных источников <http://maserdb.net/MaserDB.net>. На PT-22 был зарегистрирован яркий мазер с плотностью потока 59.8 ± 2.73 Ян на скорости 12.9 ± 0.30 км/с. Скорость на луче зрения мазера в линии водяного пара близка к скорости линии $\text{NH}_3(1,1)$ (22.2 км/с), зарегистрированной в обзоре Винена [39]. В соответствии с каталогом физических параметров сгустков ATLASGAL [20], расстояние до источника составляет 1.86 кпк, а в соответствии с каталогом Hi-GAL [46] – 2.3 кпк. Источник виден в широком диапазоне длин волн (см. рис. 4), включая инфракрасный (WISE 3–24 мкм, Spitzer IRAC 3–16 мкм, Herschel PACS 70–160 мкм, SPIRE 250–500 мкм), субмиллиметровый (ATLASGAL 870 мкм) и миллиметровый (Bolocam 1.1 мм) диапазон. Источник A017.216+00.821, как и A016.987+00.981 (см. раздел 6.2), имеет яркое излучение на 4.5 мкм, что позволяет отнести его к типу EGO (Extended Green Object) согласно работе [44].

Другой важной особенностью источника A017.216+00.821 является тот интересный факт, что он располагается на границе кольцеобразной структуры, в центре которой имеется другой яркий источник ATLASGAL 017.169+00.814. В направлении на источник 017.169+00.814 мазер в линии водяного пара в рамках настоящей работы не был обнаружен на уровне $1\sigma = 2.96$ Ян. Яркость

центрального источника на 870 мкм (1.19 Ян на диаграмму, 017.169+00.814) имеет меньшее значение, чем яркость источника ATLASGAL на границе кольцеобразной структуры (2.43 Ян на диаграмму, 017.216+00.821). Кольцеобразная структура проявляется как поглощение на изображениях в ближнем и среднем ИК (2MASS, WISE, Spitzer) и как излучение на изображениях в дальнем ИК (Herschel PACS, Herschel SPIRE), субмиллиметровом (ATLASGAL) и миллиметровом (Bolocam) диапазонах. Особенности излучения объекта позволяют отнести его к классу ИК-темных облаков [47, 48]. Такие объекты характеризуются, в том числе, образованием массивных звезд и скоплений [49]. Ранее мазеры в линии водяного пара в данном типе объектов наблюдались в работах [50, 51].

6.4. A018.701–00.229

В источнике A018.701–00.229 ранее проводился поиск мазера в линии водяного пара в работе [27], однако на уровне $5\sigma = 0.15$ Ян мазер зарегистрирован не был. В настоящей работе был зарегистрирован мазер с плотностью потока 3.08 Ян на скорости 37.3 км/с. Средний уровень шума в канале составил 1.97 Ян. Так как линия в источнике A018.701–00.229 имеет широкое основание (FWHM ~ 11 км с^{-1} , или 36 каналов), то применено пятикратное усреднение между каналами, что уменьшило уровень шума до $\sqrt{5} = 2.2$ раз ($\sigma = 0.89$ Ян). В результате такого усреднения мазерная линия была зарегистрирована на уровне 3.5σ . При использовании 10-кратного усреднения мазерная линия зарегистрирована на уровне 4.9σ .

Скорость на луче зрения мазера в линии водяного пара (37.3 км/с) близка к скорости молекулярного газа. Согласно обзору Демпси [52], в источнике A018.701–00.229 зарегистрированы две компоненты в линии $^{12}\text{CO}(3-2)$: на 41.0 км/с ($T_a = 4.2$ К, $\sigma = 1$ К) и на 64 км/с ($T_a = 2.2$ К, $\sigma = 1$ К). Согласно обзору Ширли [26], на лучевой скорости 44.3 км/с зарегистрированы линии-трассеры плотного газа: $\text{HCO}^+(3-2)$ и $\text{N}_2\text{H}^+(3-2)$. Антенная температура составила 0.9 ± 0.05 и 0.6 ± 0.08 К для линий $\text{HCO}^+(3-2)$ и $\text{N}_2\text{H}^+(3-2)$ соответственно.

Как показано на рис. 4, источник расположен в центре волокнистой структуры, имеющей S-образную форму. Интересной особенностью структуры является разность яркостей восточной и западной части на различных длинах волн. Восточная часть ярче светит на длинах волн более 250 мкм, а западная часть волокна ярче светит на длинах волн менее 70 мкм. При этом в центральной части волокна располагается компактный ис-

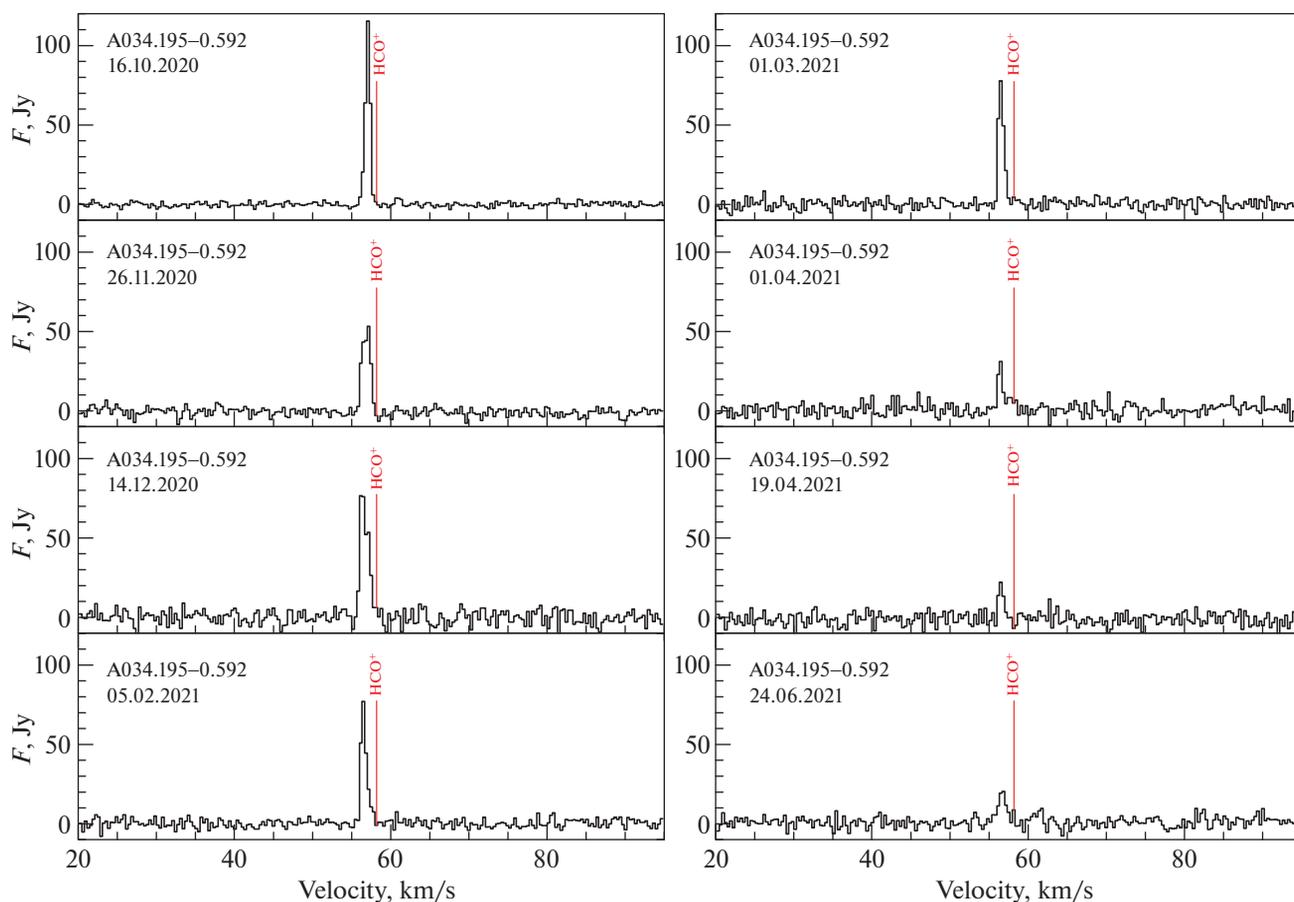


Рис. 5. Результаты мониторинга источника A034.195–0.592 на РТ-22 (ПРАО, ФИАН) с полосой 50 МГц в период с октября 2020 по июнь 2021 г.

точник излучения в континууме на 870 мкм, который выделяется по яркости на фоне излучения остальной части волокна.

Западная часть волокна, которая ярко светит на длинах волн менее 70 мкм, имеет кольцевидную структуру согласно изображениям Spitzer IRAC (см. рис. 4). Эта структура идентифицирована как область НII с названием N23, согласно обзору Симпсона [53]. В направлении на кольцевидную структуру N23 имеется два источника ATLASGAL 018.673–00.236 ($F_{\text{peak}} = 0.61$ Ян/луч) и 018.684–00.231 ($F_{\text{peak}} = 0.68$ Ян/луч). Область НII N23 находится внутри области N24. Тем не менее, согласно [54], эти области не связаны друг с другом. Как описано в работе [54], расстояние до области N24 составляет 4.5–4.6 кпк. Расстояние до метанольного мазера на 6.7 ГГц в направлении на восточную часть волокна составляет 13 кпк [55]. Метанольный мазер на 6.7 ГГц в направлении на N23 и мазер на молекуле воды на 22 ГГц зарегистрированы не были [27, 43, 56, 57]. Но учитывая

непрерывный характер излучения от восточной и западной части волокна, возможна их физическая ассоциация.

В восточной части волокна расположен яркий источник ATLASGAL 018.734–00.226, имеющий плотность потока $F_{\text{peak}} = 4.1$ Ян/луч¹. Масса сгустка в соответствии с каталогом физических параметров сгустков Hi-GAL [46] составляет $11153 M_{\odot}$. Расстояние до источника составляет 12.64 кпк согласно каталогу ATLASGAL [20] и 12.56 кпк согласно каталогу Hi-GAL [46]. В источнике A018.701–00.229 ранее неоднократно был зарегистрирован мазер в линии водяного пара [9, 14, 27, 58, 59], а также метанольный мазер на 6.7 ГГц [60, 61].

Регистрация мазера на 22 ГГц в направлении на центральную область волокна может свидетельствовать о процессах звездообразования, происходящих вдоль волокна. Так как объект располагается на значительном расстоянии от на-

¹ Jy/beam.

блюдателя (~13 кпк), исследование его детальной структуры затруднено. Тем не менее объект может быть интересен как пример цепочки звездообразования, происходящего вдоль массивного волокна.

6.5. A034.196–00.592

В источнике A034.196–00.592 мазер ранее был обнаружен в работе [27] с плотностью потока 0.555 Ян на лучевой скорости 61.1 км/с. В настоящей работе мазер первоначально зарегистрирован на лучевой скорости 55.4 км/с с плотностью потока 20 Ян, причем плотность потока увеличилась в процессе наблюдений с 6 по 16 октября 2020 г. – от 20 до 110 Ян соответственно. В рамках настоящей работы был произведен мониторинг источника A034.196–00.592 в течение 8 мес. (06.10.20–24.06.21, см. рис. 2 и рис. 5). Детальная информация о переменности мазера представлена в следующем разделе. В этом же источнике ранее были зарегистрированы метанольные мазеры I [62] и II класса [63, 64].

Объект, связанный с мазером A034.196–00.592, известный также как IRAS 18532+0047, впервые был обнаружен в обзоре компактных источников Галактики на 1400 МГц на VLA [65]. Согласно обзору Молилари [66], данный источник имеет спектральное распределение энергии, характерное для ультра-компактных областей НП. Классификация IRAS 18532+0047 как ультра-компактной области НП подтвердилась наблюдениями VLA на 3.6 и 6 см [67, 68] – в этих наблюдениях зарегистрировано компактное излучение в направлении на IRAS 18532+0047.

6.6. B081.174–00.100

Источник B081.174–00.100, известный также под названием CygX-N63, является массивной протозвездой на очень ранней стадии эволюции [69]. Источник ранее был подробно исследован в работах [69, 70]. Расстояние до источника, определенное методом тригонометрического параллакса мазеров воды и метанола в работе [71], оценивается как 1.2 кпк. Объект, связанный с источником B081.174–00.100, является наиболее массивной и молодой протозвездой класса 0 во всей области Cygnus-X, в которой обнаружено мощное истечение [72]. Согласно [72], масса оболочки составляет $44 M_{\odot}$ в пределах 2500 а.е.

Интересной особенностью источника является отсутствие ультра-компактной зоны НП, что подтверждается наблюдениями на VLA на 8.4 ГГц [70]. Другой важной особенностью источника является первая регистрация иона CF^+ в направлении на массивную протозвезду. Вполне возможно, что источник образования иона CF^+ связан с

протозвездой CygX-N63. В таком случае возможно существование зоны ионизованного углерода, которая может образоваться еще до ультра-компактной зоны НП, так как углерод имеет меньший потенциал ионизации (11.3 эВ) по сравнению с водородом (13.6 эВ) [69]. Таким образом, объект CygX-N63 является уникальным примером массивной протозвезды, которая находится в процессе активного формирования, но еще не образовала ультра-компактной зоны НП и горячего ядра.

В настоящей работе в источнике B081.174–00.100 впервые был зарегистрирован мазер в линии водяного пара. Регистрация мазера в источнике показывает, что мазеры в линии водяного пара могут возникать на очень ранних стадиях звездообразования, еще до возникновения ультра-компактной зоны НП. В рамках настоящей работы был организован мониторинг источника в течение 5 мес. (06.10.20–01.03.21, см. рис. 3), который показал значительные изменения в структуре профиля линии мазера. Детальная информация о переменности мазера представлена в разделе 7.2.2.

7. ОБСУЖДЕНИЕ

РТ-22 (ПРАО) позволяет выявлять яркие компоненты излучения (>3 Ян) за время накопления порядка 30–40 мин, что позволяет использовать его для поиска вспышек и значительных изменений яркости в спектральных компонентах мазеров в линии водяного пара. Обнаружение таких вспышек и изменений яркости может указывать на активные фазы процессов звездообразования, в том числе аккреционные вспышки (см., к примеру, работу МакЛеод [73]) и динамические процессы [19], которые могут быть изучены в дальнейшем с помощью более чувствительных инструментов и интерферометров при условии их обнаружения.

7.1. Распределение плотностей потока зарегистрированных мазеров

Так как возможность регистрации мазеров на радиотелескопе зависит от их яркости, мы рассмотрим процент “ярких” (более 3 Ян) источников в различных выборках объектов. Следует отметить, что мазеры в линии водяного пара зачастую имеют сложную форму профиля линии, которая превышает ширину одного канала (0.329 км/с) при наблюдениях на РТ-22 с полосой 50 МГц. Так, в обзоре [27], из 439 зарегистрированных мазеров только 6% имеют разброс лучевых скоростей менее 0.6 км/с. Поэтому иногда возможно усреднение между каналами для улучшения суммарного отношения сигнал/шум. Это возможно в том случае, если отдельные спек-

тральные компоненты невозможно разрешить при выбранном шаге по лучевой скорости. В настоящих наблюдениях из гауссова приближения установлено, что значение ширины линии на уровне половины интенсивности (FWHM) для источников с одной видимой компонентой варьируется от 6.2 до 10.5 км/с, что соответствует 18–32 каналов. Данная ширина не соответствует действительной ширине мазерной линии, но является суперпозицией нескольких спектральных компонент, которые невозможно разрешить с выбранной полосой анализатора спектра. Тем не менее в этом случае возможно применение 5–10-кратного усреднения между каналами, что позволяет уменьшить уровень шума в 2.2–3.2 раза соответственно. Поэтому на РТ-22 при среднем уровне $I_{\sigma} = 3$ Ян в одном канале возможна регистрация мазеров на уровне более $3\sigma/\sqrt{10} = 2.8$ Ян, что и было сделано в случае A018.701–0.229, где мазер имеет плотность потока 3.05 Ян, а уровень шума I_{σ} составил 0.88 Ян при 10-кратном усреднении между каналами.

Данные обзора мазеров в линии водяного пара на РТ-22 из настоящей работы сравнивались с данными обзора мазеров на радиотелескопе Green Bank Telescope (GBT) [27]. Всего в работе [27] содержатся наблюдения 1025 сгустков ATLASGAL, для которых определены физические параметры в работе [20]. Из них мазеры в линии водяного пара были зарегистрированы в 392 источниках (~38%). Число мазеров, имеющих плотность потока более 6 Ян, составляет 74 (~18%), а более 3 Ян – 118 (~30%).

Анализируя список источников из настоящей работы (см. раздел 2), установлено, что из 60 источников, для которых есть наблюдения в работе [27], только 6 источников (10%) имеют плотность потока выше 3 Ян. Доля “ярких” источников составляет ~10% от числа всех источников ATLASGAL, в которых производится поиск мазеров. Из статистических соображений следует, что в направлении на 100 источников ATLASGAL, отобранных в разделе 2, мазеры должны быть обнаружены в ~10 источниках. В результате проведения наблюдений на РТ-22 мазеры в линии водяного пара были зарегистрированы в 6 источниках, что по порядку величины соответствует статистике регистрации мазеров на GBT.

7.2. Переменность мазеров в линии водяного пара

В результате обзора на РТ-22 мазер с плотностью потока 3.07 Ян был зарегистрирован в источнике A018.701–0.229, где ранее в работе [27] мазер не был зарегистрирован на уровне 0.03 Ян. В источнике A034.196–0.592 в данной работе был зарегистрирован мазер с плотностью потока 110 Ян, хотя по наблюдениям из работы [27] мазер

имеет плотность потока всего лишь 0.55 Ян. В 6 источниках в работе [27] были зарегистрированы мазеры в линии водяного пара с плотностью потока более 3 Ян, однако в настоящих наблюдениях данные источники не были зарегистрированы. Данные результаты указывают, что переменность мазеров является существенной и вносит неопределенность в возможность обнаружения ярких мазеров в произвольный момент времени. Прежняя регистрация яркого мазера не дает гарантии, что данный мазер будет сохранять свою яркость на протяжении значительного времени в будущем. С другой стороны, отсутствие регистрации мазера не гарантирует, что мазер не может появиться там в ближайшем будущем. Для более надежной оценки наличия или отсутствия мазера необходимы многократные наблюдения источников.

7.2.1. A034.196–00.592. В рамках настоящей работы был произведен мониторинг источника A034.196–00.592 в течение 8 мес. после первой регистрации в октябре 2020 г. (см. рис. 2). Максимальная плотность потока, которая была зарегистрирована на РТ-22 в ПРАО, – 115 Ян (16 октября 2020 г.). Наблюдения данного источника на РТ-22 в КраО (частные сообщения) показали, что плотность потока данного источника достигала 200 Ян (27 октября 2020 г.). Дальнейший мониторинг на РТ-22 в ПРАО показал, что в течение 7 мес. в данном источнике происходило уменьшение яркости мазера до ~8 Ян (24 июня 2021 г.). Данная тенденция прослеживалась при наблюдениях данного источника как с полосой анализатора 12.5 МГц, так и с полосой анализатора 50 МГц. Согласно данным РТ-22 (см. рис. 2), структура профиля линии мазера указывает на наличие двойной структуры основной компоненты.

В настоящее время одной из рабочих гипотез возникновения мазерных вспышек в линии водяного пара является наложение отдельных мазерных областей на луч зрения и соответствующее экспоненциальное усиление мазерного излучения. Данный вид мазерных вспышек был впервые описан в работе [74]. В настоящее время известно всего два объекта, для которых получены дополнительные свидетельства того, что вспышки мазерных линий H_2O в этих объектах произошли в результате наложения нескольких мазерных областей на луч зрения – G25.65+1.05 [19, 75] и Orion KL [76]. Для осуществления данного типа мазерных вспышек требуется пространственное наложение нескольких областей мазерного излучения при совпадении их скоростей на луче зрения. Это может довольно часто происходить в динамически активных областях распространения ударных волн, связанных с истечениями из мо-

лодых звездных объектов [16], но получить подтверждение трудно, так как для этого требуется проведение интерферометрических наблюдений со сверхдлинными базами в краткий период вспышки.

Усиление излучения линии H_2O на 22 ГГц в источнике A034.196–00.592 могло быть вызвано сценарием, подобным G25.65+1.05 и Orion KL — две спектральные компоненты в процессе вспышки могли соединиться и вызвать экспоненциальное повышение яркости мазера. Для прояснения особенностей мазерной вспышки в источнике A034.196–00.592 в ноябре 2020 г. были проведены наблюдения на интерферометрах VLA и VLBI. Результаты данного исследования, а также интерпретация данных о мазерной вспышке будут представлены в последующей работе.

7.2.2. B081.174–00.100. Другим объектом, для которого были организованы наблюдения в формате мониторинга, является источник B081.174–0.100 (см. рис. 3). Интересной особенностью данного источника является множество компонент излучения мазера в широком диапазоне лучевых скоростей — от -70 до 11 км/с, что указывает на сложную структуру мазера в истечении. Для прояснения структуры мазера требуется его дальнейшее интерферометрическое исследование.

В течение пяти месяцев наблюдений одна из компонент излучения мазера (номер 2 на рис. 3) увеличила яркость с ~ 20 до ~ 140 Ян в период 16.10.2020–14.12.2020. Кроме того, происходили и другие изменения в профиле линии: некоторые компоненты исчезали (компонента 3), появлялись (компонента 7), а также исчезали и вновь появлялись (компоненты 4 и 1).

Значительные и частые изменения компонент профиля линии мазера свидетельствуют об активных процессах, происходящих в данном объекте. Переменность мазеров молекулы воды в подобных источниках может быть связана в том числе с распространением ударных волн в истечениях из протозвезд [16]. Объекты, которые проявляют значительную переменность, также могут быть кандидатами для поиска и регистрации аккреционных вспышек подобных происшедшей в объекте NGC 6334I [73].

8. ВЫВОДЫ

В результате проведения обзора мазеров в линии водяного пара в направлении на пылевые сгустки в миллиметровом диапазоне длин волн, а так же анализа данных получены следующие выводы:

- В шести источниках из 140 зарегистрированы яркие (>3 Ян) мазеры, причем в четырех источниках мазеры были зарегистрированы впервые.

- Для пяти источников из шести получены пятиточечные карты, которые показали ассоциацию между мазером и источником излучения в континууме во всех источниках кроме A016.987+0.981. В источнике A016.987+0.981 мазер расположен к западу от источника ATLASGAL.

- В семи источниках мазеры не были зарегистрированы, хотя ранее по данным из литературы [27] эти источники имели плотность потока более 3 Ян, что достаточно для их регистрации на РТ-22.

- В источнике A034.196–00.592 зарегистрирована мазерная вспышка, которая проявилась в изменении плотности потока с 20 до 200 Ян за период наблюдений в 10 дней в октябре 2020 г. Последующий мониторинг в течение 8 мес. показал, что плотность потока после вспышки опустился ниже того уровня яркости, который был зарегистрирован в начале наблюдений.

- В источнике B081.174–00.100, который является протозвездой на очень ранней стадии звездообразования [69], впервые был зарегистрирован мазер в линии водяного пара на 22 ГГц. Данный источник — единственный в своем роде объект, в котором отсутствует излучение ультра-компактной зоны НII, но при этом присутствует излучение зоны СИ [70]. В данном объекте зарегистрировано существенное изменение компонент излучения в течение 5 мес. наблюдений, в том числе — увеличение яркости компоненты на -5 км/с с 20 Ян до 120 Ян в период с октября 2020 до декабря 2020 г.

Таким образом, найденные динамические изменения в спектрах мазеров в линии водяного пара, в том числе появление, угасание, изменение плотности потока, могут свидетельствовать об активных процессах изменения условий среды, в которых данные мазеры были образованы. Данные объекты представляют наибольший интерес в контексте поиска мазерных вспышек, в том числе вспышек аккреции (см., к примеру, работу МакЛеод [73]) и динамических процессов (см. работу Бернс [19]) в областях образования массивных звезд.

Важно, что для поиска таких объектов может быть использован радиотелескоп РТ-22, так как источники, связанные с динамическими изменениями условий среды, проявляют себя как яркие (>3 Ян) мазеры в линии водяного пара, которые могут быть зарегистрированы на РТ-22 за время накопления сигнала (15–20 мин). Отсутствие регистрации яркого мазера указывает так же на отсутствие существенного повышения яркости источников в том случае, если мазеры там присутствуют, но имеют относительно низкую яркость. В таком случае отсутствие регистрации так же может указывать на отсутствие явных изменений условий среды, в которых образуются мазеры в линии водяного пара.

В итоге РТ-22 позволяет осуществлять первичный поисковый обзор кандидатов в объекты, в которых могут происходить динамические процессы, в том числе мазерные вспышки. В дальнейшем исследование обнаруженных объектов может быть организовано с помощью более крупных и чувствительных инструментов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа Д.А. Ладейщикова по отбору источников (раздел 2), анализу архивных данных (раздел 4) и анализу результатов наблюдений (разделы 5, 6, 7.1) выполнена при поддержке гранта РНФ 20-72-00137. Работа А.М. Соболева по анализу причин зарегистрированных мазерных вспышек (раздел 7.2) поддержана грантом РНФ 18-12-00193.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *A. C. Cheung, D. M. Rank, C. H. Townes, D. D. Thornton, and W. J. Welch*, *Nature* **221**, 626 (1969).
2. *M. L. Meeks, J. C. Carter, A. H. Barrett, P. R. Schwartz, J. W. Waters, and I. Brown*, *W. E.*, *Science* **165**, 180 (1969).
3. *R. S. Furuya, Y. Kitamura, A. Wootten, M. J. Claussen, and R. Kawabe*, *Astrophys. J. Supp. Ser.* **144**, 71 (2003).
4. *M. Gray*, *Maser Sources in Astrophysics* (Cambridge University Press, New York, 2012).
5. *K. Demyk, C. Meny, X. H. Lu, G. Papatheodorou, M. J. Toplis, H. Leroux, C. Depecker, J. B. Brubach, P. Roy, C. Nayral, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **600**, A123 (2017), 1701.07225.
6. *M. J. Kaufman and D. A. Neufeld*, *Astrophys. J.* **456**, 250 (1996).
7. *D. Hollenbach, M. Elitzur, and C. F. McKee*, *Astrophys. J.* **773**, 70 (2013), 1306.5276.
8. *B. E. Svoboda, Y. L. Shirley, C. Battersby, E. W. Rosolowsky, A. G. Ginsburg, T. P. Ellsworth-Bowers, M. R. Pestalozzi, M. K. Dunham, I. Evans, J. Neal, J. Bally, et al.*, *Astrophys. J.* **822**, 59 (2016), 1511.08810.
9. *H. Xi, J. Zhou, J. Esimbek, G. Wu, Y. He, W. Ji, and X. Tang*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **453**, 4203 (2015).
10. *S. L. Breen and S. P. Ellingsen*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **416**, 178 (2011), 1105.1318.
11. *J. E. Aguirre, A. G. Ginsburg, M. K. Dunham, M. M. Drosback, J. Bally, C. Battersby, E. T. Bradley, C. Cyganowski, D. Dowell, I. Evans, J. Neal, et al.*, *Astrophys. J. Supp. Ser.* **192**, 4 (2011), 1011.0691.
12. *D. A. Ladeyshchikov, O. S. Bayandina, and A. M. Sobolev*, *Astron. J.* **158**, 233 (2019), 1911.04742.
13. *F. Schuller, K. M. Menten, Y. Contreras, F. Wyrowski, P. Schilke, L. Bronfman, T. Henning, C. M. Walmsley, H. Beuther, S. Bontemps, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **504**, 415 (2009), 0903.1369.
14. *A. J. Walsh, S. L. Breen, T. Britton, K. J. Brooks, M. G. Burton, M. R. Cunningham, J. A. Green, L. Harvey-Smith, L. Hindson, M. G. Hoare, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **416**, 1764 (2011), 1105.4663.
15. *S. L. Breen, G. A. Fuller, J. L. Caswell, J. A. Green, A. Avinson, S. P. Ellingsen, M. D. Gray, M. Pestalozzi, L. J. Quinn, A. M. S. Richards, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **450**, 4109 (2015).
16. *T. Liljeström and C. R. Gwinn*, *Astrophys. J.* **534**, 781 (2000), astro-ph/0002299.
17. *V. Strel'nitski, J. Alexander, S. Gezari, B. P. Holder, J. M. Moran, and M. J. Reid*, *Astrophys. J.* **581**, 1180 (2002), astro-ph/0210342.
18. *A. M. Sobolev, J. M. Moran, M. D. Gray, A. Alakoz, H. Imai, W. A. Baan, A. M. Tolmachev, V. A. Samodurov, and D. A. Ladeyshchikov*, *Astrophys. J.* **856**, 60 (2018), 1802.06756.
19. *R. A. Burns, G. Orosz, O. Bayandina, G. Surcis, M. Olech, G. MacLeod, A. Volvach, G. Rudnitskii, T. Hirota, K. Immer, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **491**, 4069 (2020), 1911.12634.
20. *J. S. Urquhart, C. König, A. Giannetti, S. Leurini, T. J. T. Moore, D. J. Eden, T. Pillai, M. A. Thompson, C. Braiding, M. G. Burton, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **473**, 1059 (2018), 1709.00392.
21. *M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, M. D. Weinberg, S. Schneider, J. M. Carpenter, C. Beichman, R. Capps, T. Chester, J. Elias, et al.*, *Astron. J.* **131**, 1163 (2006).
22. *G. G. Fazio, J. L. Hora, L. E. Allen, M. L. N. Ashby, P. Barmby, L. K. Deutsch, J. S. Huang, S. Kleiner, M. Marengo, S. T. Megeath, et al.*, *Astrophys. J. Supp. Ser.* **154**, 10 (2004), astro-ph/0405616.
23. *A. Poglitsch, C. Waelkens, N. Geis, H. Feuchtgruber, B. Vandenbussche, L. Rodriguez, O. Krause, E. Renotte, C. van Hoof, P. Saraceno, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **518**, L2 (2010), 1005.1487.
24. *M. J. Griffin, A. Abergel, A. Abreu, P. A. R. Ade, P. André, J. L. Augeres, T. Babbedge, Y. Bae, T. Baillie, J. P. Baluteau, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **518**, L3 (2010), 1005.5123.
25. *Y. Contreras, F. Schuller, J. S. Urquhart, T. Csengeri, F. Wyrowski, H. Beuther, S. Bontemps, L. Bronfman, T. Henning, K. M. Menten, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **549**, A45 (2013), 1211.0741.
26. *Y. L. Shirley, T. P. Ellsworth-Bowers, B. Svoboda, W. M. Schlingman, A. Ginsburg, E. Rosolowsky, T. Gerner, S. Mairs, C. Battersby, G. Stringfellow, et al.*, *Astrophys. J. Supp. Ser.* **209**, 2 (2013), 1308.4149.
27. *B. E. Svoboda, Y. L. Shirley, C. Battersby, E. W. Rosolowsky, A. G. Ginsburg, T. P. Ellsworth-Bowers, M. R. Pestalozzi, M. K. Dunham, I. Evans, J. Neal, J. Bally, et al.*, *Astrophys. J.* **822**, 59 (2016), 1511.08810.
28. *I. I. Berulis, V. A. Gusev, A. V. Kutsenko, G. T. Smirnov, R. L. Sorochenko, A. M. Tolmachev, and V. A. Shirochenkov*, *Trudy Akademiia Nauk SSSR Fizicheskii Institut* **135**, 35 (1983).

29. *S. Maret, P. Hily-Blant, J. Pety, S. Bardeau, and E. Reynier*, *Astron. and Astrophys.* **526**, A47 (2011), 1012.1747.
30. *E. Rosolowsky, M. K. Dunham, A. Ginsburg, E. T. Bradley, J. Aguirre, J. Bally, C. Battersby, C. Cyganowski, D. Dowell, M. Drosback, et al.*, *Astrophys. J. Supp. Ser.* **188**, 123 (2010), 0909.2871.
31. *W. M. Schlingman, Y. L. Shirley, D. E. Schenk, E. Rosolowsky, J. Bally, C. Battersby, M. K. Dunham, T. P. Ellsworth-Bowers, I. Evans, J. Neal, A. Ginsburg, et al.*, *Astrophys. J. Supp. Ser.* **195**, 14 (2011), 1105.4181.
32. *J. S. Urquhart, M. G. Hoare, S. L. Lumsden, R. D. Oudmaijer, T. J. T. Moore, P. R. Brook, J. C. Mottram, B. Davies, and J. J. Stead*, *Astron. and Astrophys.* **507**, 795 (2009), 0909.1720.
33. *J. S. Urquhart, L. K. Morgan, C. C. Figura, T. J. T. Moore, S. L. Lumsden, M. G. Hoare, R. D. Oudmaijer, J. C. Mottram, B. Davies, and M. K. Dunham*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **418**, 1689 (2011), 1107.3913.
34. *A. M. Titmarsh, S. P. Ellingsen, S. L. Breen, J. L. Caswell, and M. A. Voronkov*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **443**, 2923 (2014), 1407.1131.
35. *A. M. Titmarsh, S. P. Ellingsen, S. L. Breen, J. L. Caswell, and M. A. Voronkov*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **459**, 157 (2016), 1603.04602.
36. *S. L. Breen, J. L. Caswell, S. P. Ellingsen, and C. J. Phillips*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **406**, 1487 (2010), 1004.1060.
37. *S. L. Breen and S. P. Ellingsen*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **416**, 178 (2011), 1105.1318.
38. *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*, edited by J. M. Chapman and W. A. Baan (2007), vol. 242, pp. 213–217, 0705.2906.
39. *M. Wienen, F. Wyrowski, F. Schuller, K. M. Menten, C. M. Walmsley, L. Bronfman, and F. Motte*, *Astron. and Astrophys.* **544**, A146 (2012), 1208.4848.
40. *D. J. Helfand, R. H. Becker, R. L. White, A. Fallon, and S. Tuttle*, *Astron. J.* **131**, 2525 (2006).
41. *W. Yang, Y. Xu, X. Chen, S. P. Ellingsen, D. Lu, B. Ju, and Y. Li*, *Astrophys. J. Supp. Ser.* **231**, 20 (2017), 1705.01806.
42. *D. J. van der Walt, M. J. Gaylard, and G. C. MacLeod*, *Astron. and Astrophys. Supp.* **110**, 81 (1995).
43. *M. Szymczak, G. Hrynek, and A. J. Kus*, *Astron. and Astrophys. Supp.* **143**, 269 (2000).
44. *C. J. Cyganowski, J. Koda, E. Rosolowsky, S. Towers, J. Donovan Meyer, F. Egusa, R. Momose, and T. P. Robitaille*, *Astrophys. J.* **764**, 61 (2013), 1210.5528.
45. *S. Sharpless*, *Astrophys. J. Supp. Ser.* **4**, 257 (1959).
46. *D. Elia, S. Molinari, E. Schisano, M. Pestalozzi, S. Pezzuto, M. Merello, A. Noriega-Crespo, T. J. T. Moore, D. Russeil, J. C. Mottram, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **471**, 100 (2017), 1706.01046.
47. *D. Teyssier, P. Hennebelle, and M. Pérault*, *Astron. and Astrophys.* **382**, 624 (2002), astro-ph/0111458.
48. *R. Simon, J. M. Rathborne, R. Y. Shah, J. M. Jackson, and E. T. Chambers*, *Astrophys. J.* **653**, 1325 (2006).
49. *S. E. Ragan, E. A. Bergin, and R. A. Gutermuth*, *Astrophys. J.* **698**, 324 (2009), 0903.2771.
50. *Y. Wang, Q. Zhang, J. M. Rathborne, J. Jackson, and Y. Wu*, *Astrophys. J. Lett.* **651**, L125 (2006).
51. *S. Deguchi, D. Tafuya, and S. Nagisa*, *Publ. Astron. Soc. Jap.* **64**, 28 (2012), 1109.0677.
52. *J. T. Dempsey, H. S. Thomas, and M. J. Currie*, *Astrophys. J. Supp. Ser.* **209**, 8 (2013).
53. *R. J. Simpson, M. S. Povich, S. Kendrew, C. J. Lintott, E. Bressert, K. Arvidsson, C. Cyganowski, S. Maddison, K. Schawinski, R. Sherman, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **424**, 2442 (2012), 1201.6357.
54. *X. Li, J. Esimbek, J. Zhou, W. A. Baan, W. Ji, X. Tang, G. Wu, X. Tang, Q. Li, Y. Ma, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **487**, 1517 (2019), 1905.03565.
55. *J. A. Green and N. M. McClure-Griffiths*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **417**, 2500 (2011).
56. *G. C. MacLeod, D. J. van der Walt, A. North, M. J. Gaylard, J. A. Galt, and G. H. Moriarty-Schieven*, *Astron. J.* **116**, 2936 (1998).
57. *F. Palla, J. Brand, R. Cesaroni, G. Comoretto, and M. Felli*, *Astron. and Astrophys.* **246**, 249 (1991).
58. *A. M. Titmarsh, S. P. Ellingsen, S. L. Breen, J. L. Caswell, and M. A. Voronkov*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **443**, 2923 (2014), 1407.1131.
59. *A. J. Walsh, C. R. Purcell, S. N. Longmore, S. L. Breen, J. A. Green, L. Harvey-Smith, C. H. Jordan, and C. Macpherson*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **442**, 2240 (2014), 1405.4096.
60. *J. A. Green, J. L. Caswell, G. A. Fuller, A. Avison, S. L. Breen, S. P. Ellingsen, M. D. Gray, M. Pestalozzi, L. Quinn, M. A. Thompson, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **409**, 913 (2010), 1007.3050.
61. *B. Hu, K. M. Menten, Y. Wu, A. Bartkiewicz, K. Rygl, M. J. Reid, J. S. Urquhart, and X. Zheng*, *Astrophys. J.* **833**, 18 (2016), 1609.03280.
62. *A. I. Gómez-Ruiz, S. E. Kurtz, E. D. Araya, P. Hofner, and L. Loinard*, *Astrophys. J. Supp. Ser.* **222**, 18 (2016), 1601.01084.
63. *F. Fontani, R. Cesaroni, and R. S. Furuya*, *Astron. and Astrophys.* **517**, A56 (2010), 1004.3689.
64. *L. Olmi, E. D. Araya, P. Hofner, S. Molinari, J. Morales Ortiz, L. Moscadelli, and M. Pestalozzi*, *Astron. and Astrophys.* **566**, A18 (2014), 1311.0771.
65. *S. Zoonematkermani, D. J. Helfand, R. H. Becker, R. L. White, and R. A. Perley*, *Astrophys. J. Supp. Ser.* **74**, 181 (1990).
66. *S. Molinari, J. Brand, R. Cesaroni, and F. Palla*, *Astron. and Astrophys.* **308**, 573 (1996).
67. *S. Molinari, J. Brand, R. Cesaroni, F. Palla, and G. G. C. Palumbo*, *Astron. and Astrophys.* **336**, 339 (1998).
68. *V. A. Hughes and G. C. MacLeod*, *Astrophys. J.* **427**, 857 (1994), astro-ph/9311063.

69. *S. Bontemps, F. Motte, T. Csengeri, and N. Schneider*, *Astron. and Astrophys.* **524**, A18 (2010), 0909.2315.
70. *S. Fechtenbaum, S. Bontemps, N. Schneider, T. Csengeri, A. Duarte-Cabral, F. Herpin, and B. Lefloch*, *Astron. and Astrophys.* **574**, L4 (2015), 1501.05439.
71. *K. L. J. Rygl, A. Brunthaler, A. Sanna, K. M. Menten, M. J. Reid, H. J. van Langevelde, M. Honma, K. J. E. Torstensson, and K. Fujisawa*, *Astron. and Astrophys.* **539**, A79 (2012), 1111.7023.
72. *A. Duarte-Cabral, S. Bontemps, F. Motte, M. Hennemann, N. Schneider, and P. André*, *Astron. and Astrophys.* **558**, A125 (2013), 1308.6490.
73. *G. C. MacLeod, D. P. Smits, S. Goedhart, T. R. Hunter, C. L. Brogan, J. O. Chibueze, S. P. van den Heever, C. J. Thesner, P. J. Banda, and J. D. Paulsen*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **478**, 1077 (2018), 1804.05308.
74. *S. Deguchi and W. D. Watson*, *Astrophys. J. Lett.* **340**, L17 (1989).
75. *O. S. Bayandina, R. A. Burns, S. E. Kurtz, N. N. Shakhvorostova, and I. E. Val'tts*, *Astrophys. J.* **884**, 140 (2019), 1812.11353.
76. *T. Shimoikura, H. Kobayashi, T. Omodaka, P. J. Diamond, L. I. Matveyenko, and K. Fujisawa*, *Astrophys. J.* **634**, 459 (2005).
77. *W. M. Schlingman, Y. L. Shirley, D. E. Schenk, E. Rosolowsky, J. Bally, C. Battersby, M. K. Dunham, T. P. Ellsworth-Bowers, I. Evans, Neal J., A. Ginsburg, et al.*, *Astrophys. J. Supp. Ser.* **195**, 14 (2011), 1105.4181.