УДК 524.527

ПОИСК ВСПЫШЕК МАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ Н₂О В ОБЛАСТЯХ ОБРАЗОВАНИЯ МАССИВНЫХ ЗВЕЗД

© 2018 г. Н. Н. Шахворостова^{1*}, Л. Н. Вольвач², А. Е. Вольвач², А. И. Дмитроца², О. С. Баяндина¹, И. Е. Вальтц¹, А. В. Алакоз¹, Н. Т. Ашимбаева³, Г. М. Рудницкий³

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

²Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

Поступила в редакцию 23.02.2018 г.; принята в печать 23.04.2018 г.

Представлены результаты систематических наблюдений выборки ярких мазеров H_2O (G25.65++1.05, G25.825-0.178, G27.184-0.082, G34.403+0.233, G35.20-0.74, G43.8-0.13, G107.30+5.64) с потоком, в среднем, более 200 Ян в главной детали спектра за период с апреля по сентябрь 2017 г., выполненных в рамках подготовки к проведению интерферометрических наблюдений со сверхдлинными базами с участием радиотелескопа PT-22 (Крымская астрофизическая обсерватория PAH). Все источники на рассмотренном промежутке времени обнаруживают достаточно сильную переменность, в пределах от ~40 до ~2300 Ян. В источнике G25.65+1.05 на дату 07.09.2017 зарегистрирована вспышка излучения до ~17 000 Ян на скорости 42.8 км/с, впоследствии развившаяся до 60 кЯн в конце сентября 2017 г. Этот факт может говорить о наличии в данных мазерах компактных структур. Диапазон скоростей, покрываемый различными компонентами в спектрах источников, составляет от 5 до 20 км/с. В трех источниках (G25.65+1.05, G25.825-0.178, G35.20-0.74) наблюдается общее нарастание потока во всех деталях спектра, что может означать изменение условий накачки со стороны внешнего источника, например, изменение инфракрасного потока в центральной части области или прохождение ударной волны. Обсуждаются возможные аргументы в пользу наличия биполярного истечения вещества или дисковой структуры в источнике G25.65+1.05.

DOI: 10.1134/S0004629918090086

1. ВВЕДЕНИЕ

В межзвездной среде наблюдается множество пекулярных объектов, сопровождающих процесс звездообразования. Особое место занимают молекулярные мазерные источники в областях образования массивных звезд, оказывающих сильное влияние на состояние окружающего вещества в процессе формирования звезд. Это влияние заключается в разогреве среды, присутствии мощных турбулентных движений и ускорении фрагментации родительского молекулярного облака с последующим образованием менее массивных звезд. При этом процесс эволюции самих массивных звезд скрыт от наблюдателей по причине большой плотности и непрозрачности вещества в гигантских молекулярных облаках, в недрах которых эти звезды формируются, что затрудняет построение моделей развития областей звездообразования и особенно понимание начальной стадии их эволюции.

Почти все мазерные линии H₂O в областях звездообразования обычно показывают сильную переменность. Временные масштабы переменности составляют от нескольких дней до нескольких месяцев для различных источников (см., напр., [1, 2]). Такая переменность создает трудности для отбора источников и планирования интерферометрических

Изучение механизмов образования массивных звезд в молекулярных облаках и в плотных фрагментах межзвездной среды, находящихся на начальной стадии процесса звездообразования, опирается на разнообразные исследования этих областей, в том числе на систематические наблюдения различных мазерных линий. Молекулярные мазеры, возникающие в окружении массивных протозвезд на разных стадиях их эволюции, дают ценную информацию о тех физических условиях, в которых они формируются, поскольку накачка мазеров очень чувствительна к изменениям плотности и температуры в газопылевых конденсациях, вкрапленных в молекулярные облака. Наиболее распространенными и яркими являются мазеры H₂O.

^{*}E-mail: nadya@asc.rssi.ru

Источник	RA J2000	DEC J2000	$V_{\rm LSR}$, км/с	Расстояние, кпк	Другие названия
G25.65+1.05	$18^{h}34^{m}20.84^{s}$	$-05^{\circ}59'42.20''$	41.9	2.08[6]	IRAS 18316–0602, Mol 62, RAFGL 7009S
G25.825 - 0.178	18 39 03.60	$-06\ 24\ 11.17$	80.3	6.3[7]	IRAS 18363-0627
G27.184 - 0.082	18 41 13.21	$-05\ 09\ 05.13$	18.3	1.2[8]	IRAS 18385–0512
G34.403+0.233	18 53 18.00	$+01\ 25\ 26.00$	54.7	1.5[9]	IRAS 18507+0121, Mol 74
G35.20 - 0.74	18 58 13.21	+01 40 35.29	31.2	2.2[10]	IRAS 18556+0136
G43.8-0.13	19 11 54.01	$+09\ 35\ 50.52$	37.5	11.8[11]	IRAS 19095+0930
G107.30+5.64	22 21 27.61	+63 51 45.30	-7.1	0.76~[12]	IRAS 22198+6336, WB 176, L1204A

Таблица 1. Источники, отобранные для программы наблюдений мазеров H₂O на PT-22 КрAO

наблюдений, потому что мы не можем заранее предсказать, окажется ли величина наблюдаемой плотности потока достаточной для детектирования на больших базах. С другой стороны, сильная переменность мазеров H₂O показывает, что эти источники являются индикаторами динамического окружения областей звездообразования. Так, изменения в поле излучения — например, из-за возможной аккреции вещества, - могут спровоцировать мощную вспышку мазерного излучения (см., напр., [3]). Сильная переменность излучения источника может свидетельствовать о том, что области, откуда приходит это излучение, являются достаточно компактными. Подобные явления позволяют исследовать такие источники с высоким угловым разрешением, например, с помощью наземно-космического интерферометра Радиоастрон [4, 5], поскольку существенно повышается вероятность зарегистрировать коррелированный сигнал (так называемый лепесток) от очень компактного источника (в данном случае — мазера H_2O).

В данной работе представлены результаты наблюдений мазерных источников H_2O в нескольких областях образования массивных звезд. Для этой программы наблюдений мы отобрали источники (см. табл. 1), имеющие плотность потока в мазерной линии H_2O не менее 200 Ян в течение продолжительного периода. Такое пороговое значение плотности потока было выбрано, исходя из чувствительности интерферометров со сверхдлинными базами на частоте 22 ГГц (прежде всего, Радиоастрона), играющих важную роль в исследованиях тонких пространственных структур.

2. ОПИСАНИЕ ВЫБОРКИ ИСТОЧНИКОВ

В данном разделе представлено общее описание активности данных областей в различных диапазонах длин волн. Все сведения, касающиеся мазерного излучения в линии H₂O, приведены в разделе 5. G25.65+1.05. Хорошо изученная область звездообразования, в которой массивный молодой звездный объект RAFGL 7009S [13] вкраплен в ультракомпактную зону HII [14]. Ассоциируется с мощным биполярным потоком (см. [15] и ссылки в этой работе). В области наблюдаются мазерные линии OH[16, 17] и метанола I и II класса (см. [18] и ссылки в этой работе), причем мазерные пятна, по данным наблюдений в линиях метанола II класса, вероятно, организованы в дисковую структуру [19].

G25.825–0.178. Источник ассоциируется с ультракомпактной зоной HII [7] и плотным молекулярным ядром в миллиметровом диапазоне [20]. В направлении этого источника было обнаружено излучение тепловых молекул C₂H₃N, CH₃CN, H₂CO [21, 22], а также мазеров OH [23], метанола I [24] и II класса [25]. Источник отождествляется с коротковолновым инфракрасным объектом SDC025.824–0.178.

G27.184–0.082. Данный источник также ассоциируется с ультракомпактной зоной НІІ [26], плотным ядром в миллиметровом диапазоне [20] и с источником SDC027.178–0.104 в коротком инфракрасном диапазоне. Информации о метанольных мазерах I класса нет, метанольное мазерное излучение II класса не было детектировано [27]. Мазер ОН наблюдался в работе [28]. Наблюдались тепловые линии молекул CS [29], HCO⁺ и N₂H⁺ [30].

G34.403+0.233. Источник входит в список объектов "Extended Green Objects" (EGO), который был составлен по признаку наличия избытка излучения на длине волны 4.5 μ m, указывающего на наличие в области ионизованного газа или газа, сжатого ударной волной, и обнаруженного в процессе работы Spitzer Space Observatory [31]. В работе [18] было обнаружено метанольное мазерное излучение и I и II классов. Наши собственные

наблюдения на VLA показали слабое излучение во всех четырех линиях основного состояния OH [24].

G35.20–0.74. Это еще один объект EGO из нашей выборки, в котором присутствует "butterflyshaped" туманность и биполярный поток [15], ориентированный с севера на юг. В источнике обнаружено метанольное излучение II класса (результаты VLBI наблюдений приведены в работе [32]) и метанольное излучение I класса [33]. Мазерное излучение OH наблюдается только в главных линиях [24].

G43.8–0.13. Источник ассоциируется с ультракомпактной областью НІІ [14] и биполярным потоком в линии СО [34], а также с мазером ОН [35] и метанольным мазером ІІ класса [25]. Отождествляется с коротковолновым инфракрасным объектом SDC43.820–0.121.

G107.30+5.64. В направлении данного источника также наблюдается ультракомпактная зона HII [36]. Он ассоциируется с молекулярным потоком в линии СО, возможной дисковой структурой, наблюдавшейся на длине волны 7 мм на VLA и с радиоджетом, наблюдавшимся на VLA на 1.3 см (см. [37] и ссылки в этой работе). Излучение OH, метанола I и II класса не обнаружено [18].

3. НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения проводились на 22-м радиотелескопе РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории РАН (пос. Симеиз). Высота над уровнем моря составляет 26.2 м, координаты места: 44° 23'52.584″ с.ш., 33°58'46.668″ в.д.

Эффективная площадь антенны РТ-22 на длине волны 1.35 см равна 220 м². Для точечного источника 1 К антенной температуры соответствует плотности потока 13.6 Ян. Облучатель был установлен во вторичном фокусе радиотелескопа. Ширина диаграммы направленности антенны на половине мощности сигнала на частоте 22 ГГц составляет $2.52' \pm 0.01'$. Размеры главного лепестка и эффективная площадь РТ-22 практически не зависят от ориентации антенны, что было подтверждено ранее в результате серии калибровочных наблюдений [38]. Наведение антенны на исследуемый объект осуществляется с точностью не хуже 2.5". Такая точность реализована с помощью тщательного учета систематических ошибок наведения PT-22, для определения которых использовались самые короткие длины волн (3, 4 и 8 мм), т.е. наиболее узкая диаграмма направленности РТ-22.

Телескоп оснащен двухканальным приемником с рабочим диапазоном по частоте 22.0–22.6 ГГц и шириной полосы 100–600 МГц. Тип приемника — неохлаждаемый НЕМТ (High Electron Mobility

Transistor), шумовая температура приемника составляет 45 К. Есть возможность приема сигнала как в круговой, так и в линейной поляризации. В данных наблюдениях прием осуществлялся в правой круговой поляризации. Калибровка производилась с помощью шумового диода. Не перестраиваемый основной гетеродин частотой 21 900 МГц синхронизовался высокостабильной частотой 5 МГц от кварцевого или водородного стандартов частоты.

Типичная шумовая температура системы $T_{\rm sys}$ составляет 150 К. Рост температуры системы на углах ниже 30° над горизонтом, связанный с увеличением оптической толщины атмосферы Земли, контролируется с помощью метода "разрезов" атмосферы в процессе наблюдений. Данный метод является стандартным и заключается в регистрации интенсивности излучения атмосферы на частоте 22.2 ГГц в диапазоне углов места от 30° до 10° при фиксированном азимуте.

Для калибровки потоков в данных наблюдениях использовались источники DR 21, NGC 7027, 3C 274, один из которых наблюдался в начале каждого часа. Целевые источники наблюдались в течение 30 мин (12 сканов по 2.5 мин). Ошибка определения плотностей потоков источников составляла не более 10% и была обусловлена, в основном, метеоусловиями и неточным знанием коэффициента поглощения в атмосфере.

На РТ-22 используется универсальный Фурье спектроанализатор параллельного типа на основе процессора Athlon-1000, состоящий из персонального компьютера с процессором Athlon 1 ГГц, двух плат сопряжения и платы аналого-цифрового преобразователя. Ширина полного диапазона спектрометра может составлять 125, 256, 512 кГц или 1, 2, 4, 8 МГц, число каналов — 512, 2048 или 8192. Во время данных наблюдений ширина полосы спектрометра составляла 4 МГц, число каналов — 512, что соответствует разрешению по частоте 8 кГц и по скорости 0.108 км/с. Частоты в каналах менялись от наблюдения к наблюдению в зависимости от координат источника, лучевой скорости V_{I SR} и даты наблюдений. Пересчет частот в лучевые скорости производился в специальной программе, созданной штатным персоналом КрАО специально для РТ-22. Программа была протестирована, т.е. проводилось сравнение результатов ее работы с эталонными источниками, и она учитывает координаты обсерватории и все виды движения (вращение Земли, движение Земли вокруг Солнца и т.д.)

С 25 апреля по 07 сентября 2017 г. было проведено 5 циклов наблюдений 7 источников мазерного излучения из табл. 1 на частоте покоя перехода в молекуле H₂O, равной 22 235.07985 МГц. Даты наблюдений: 25.04.2017, 26.05.2017, 13.06.2017, 24.07.2017, и 07.09.2017.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Излучение в направлении источников было детектировано во всех сессиях наблюдений.

Обработка полученных данных проводилась в программном пакете CLASS (Continuum and Line Analysis Single-dish Software), созданном в Международном институте исследований в области радиоастрономии (IRAM) в Гренобле (Франция) специально для обработки спектральных данных, полученных на одиночных телескопах. Основные этапы обработки спектральных данных включали в себя следующие действия. Исходные данные загружались в CLASS с помощью процедуры greg, после чего из каждого спектра с помощью задачи base вычиталась базовая линия (baseline). Далее каждая спектральная линия аппроксимировалась гауссовой функцией, для чего использовалась задача mini.

Результаты обработки представлены в табл. 2 с параметрами мазерных линий в спектрах источников, полученными при аппроксимации линий гауссианами. В табл. 2 названия источников и их координаты в системе Ј2000 даны в соответствующих строках. В столбце 1 указаны даты наблюдений, в столбце 2 — порядковые номера компонентов в спектрах в порядке возрастания скорости пика. В столбцах 3-6 представлены результаты аппроксимации с указанием ошибок: интегральный поток компонента $\int F_{\nu} \Delta V$, скорость детали $V_{\rm LSR}$, соответствующая пику линии, ширина линии ΔV на половине амплитуды и плотность потока в пике F_{ν}^{peak} (амплитуда). Спектры источников представлены на рис. 1–7. По оси Х отложена скорость на луче зрения V_{LSR}, по оси Y — плотность потока F_ν в Ян. Даты наблюдений указаны на каждом спектре.

Кроме спектров, полученных на РТ-22 КрАО, для сравнения мы использовали не опубликованные ранее спектры этих источников, полученные на РТ-22 ПРАО примерно в тот же период (см. рис. 8–14).

На рис. 15 для каждого источника представлены графики зависимости полной плотности потока во всех линиях спектра от даты наблюдений (верхние панели рисунков) и графики зависимости плотности потока максимального пика в спектре от даты наблюдений (нижние панели рисунков). Эти графики наглядно иллюстрируют характер переменности источников выборки на масштабе 5 месяцев наблюдений и более подробно обсуждаются в разделе 6.

5. КОММЕНТАРИИ К ИСТОЧНИКАМ И СРАВНЕНИЕ С ДРУГИМИ НАБЛЮДЕНИЯМИ

5.1. G25.65+1.05

Мазер H₂O в данном источнике наблюдался в течение длительного периода с 1989 г. [36, 39]. Изначально была обнаружена одна яркая мазерная деталь с плотностью потока 720 Ян на скорости $V_{\text{peak}} = 45.2 \text{ км/с. B}$ 1995 г. источник наблюдали на 100-м радиотелескопе в Эффельсберге [40], и его спектр отличался от предыдущего: в нем присутствовали уже две детали — новая деталь на скорости $V_{\text{LSR}} = 41.2 \text{ км/с}$ ("голубая деталь") с плотностью потока в пике 450 Ян и предыдущая деталь ("красная") на $V_{\text{LSR}} = 45.2 \text{ км/с}$ с плотностью потока 250 Ян.

С 2002 г. мониторинг G25.65+1.05 (далее G25.65) проводился на PT-22 в Пущино [41], в процессе которого в ноябре-декабре 2016 г. была зафиксирована мощная вспышка мазерного излучения до 40 000 Ян на дату 12.12.2016 [42]. Вспыхнувшая деталь имела скорость 41.8 км/с, что отличается от скорости детали в спектре 1995 г. на 0.6 км/с. Дальнейший мониторинг G25.65 в Пущино на PT-22 показал, что вспышка пошла на убыль, и уже в январе 2017 г. плотность потока в пике этой детали составляла 6000 Ян, а в февралемарте упала до 160 Ян. На рис. 8 приведены спектры G25.65, полученные на PT-22 в Пущино в мае-июле 2017 г.

С апреля 2017 г. был начат мониторинг источника G25.65 в Симеизе на PT-22 КрАО (см. рис. 1). В спектре источника наблюдаются три группы деталей: первая группа расположена на скорости ~37 км/с, вторая группа — в интервале скоростей от 40 до 43 км/с, третья — в интервале скоростей от 50 до 54 км/с. Группа деталей на скорости ~37 км/с присутствует на всех спектрах, кроме спектра от 25 апреля 2017 г., причем в этой группе появляются детали в пределах от 36.7 до 37.4 км/с, а плотность потока некоторых из них в течение периода наблюдений возросла от 120 до 410 Ян.

Вторая группа деталей претерпевает значительные изменения на протяжении 5 месяцев наблюдений. В самом начале наблюдений 25 апреля 2017 г. в спектре источника присутствует яркая мазерная линия с плотностью потока в пике 820 Ян на скорости 41.3 км/с, а уже через месяц в интервале скоростей от 40 до 43 км/с появляется группа деталей (от 1 до 3), имеющих сходную по величине плотность потока от 400 до 500 Ян. На протяжении

Таблица 2. Параметры спектральных линий

Дата	#	$\int F_{\nu} \Delta V$	$V_{\rm LSR}$	ΔV	$F_{ u}^{ m peak}$		
$G25.65+1.05(18^{h}34^{m}20.96^{s}, -05^{\circ}59'42.15''), J2000$							
25.04.2017	1	52.1(10.6)	39.10 (0.05)	0.46 (0.10)	106.6		
	2	646.3(34.2)	41.65 (0.02)	0.83 (0.06)	730.6		
	3	122.3(20.2)	49.13 (0.14)	1.64 (0.30)	70.0		
	4	223.2(71.5)	53.03 (0.04)	0.52(0.12)	404.1		
	5	483.5(102.4)	53.85 (0.19)	1.78(0.34)	255.2		
	6	87.8(19.8)	57.50(0.11)	1.14 (0.39)	72.7		
26.05.2017	1	104.4(17.4)	37.18 (0.06)	0.80 (0.18)	122.0		
	2	901.8(15.4)	41.45 (0.02)	1.87 (0.04)	452.1		
	3	167.0(18.8)	48.58 (0.05)	0.96 (0.10)	163.3		
	4	162.8(24.3)	50.34 (0.11)	1.62 (0.30)	94.5		
	5	762.0(14.7)	53.53 (0.01)	1.55(0.04)	461.6		
13.06.2017	1	86.2(10.2)	37.45 (0.04)	0.68 (0.09)	118.5		
	2	362.4(41.7)	41.15 (0.06)	1.16(0.10)	293.9		
	3	489.5(41.9)	42.47 (0.05)	1.24 (0.09)	372.0		
	4	55.3(9.6)	48.94 (0.06)	0.64 (0.11)	81.1		
	5	414.6(15.4)	50.88 (0.02)	1.29 (0.06)	301.5		
	6	55.2(50.6)	52.64 (0.57)	1.02 (0.75)	51.1		
	7	539.7(12.5)	53.97 (0.01)	0.91 (0.03)	555.7		
24.07.2017	1	179.7(12.8)	37.07 (0.02)	0.70 (0.06)	243.0		
	2	206.2(29.1)	40.99 (0.04)	0.76 (0.08)	254.3		
	3	596.4(33.0)	42.20 (0.03)	1.29 (0.08)	435.5		
	4	73.0(18.4)	48.83 (0.18)	1.26 (0.43)	54.4		
	5	215.3(88.2)	52.02 (0.03)	0.92(0.21)	220.5		
	6	447.5(104.4)	53.11 (0.30)	2.53 (0.33)	166.0		
07.09.2017	1	284.9(13.4)	37.04 (0.02)	0.65(0.03)	411.2		
	2	15410.0 (78.5)	42.78 (0.01)	0.86(0.01)	16841.0		
	3	221.1 (27.5)	51.34 (0.05)	0.87 (0.11)	238.8		
	4	416.0 (38.0)	52.39 (0.02)	0.81 (0.07)	482.1		
	5	132.4(24.1)	53.52 (0.10)	1.01 (0.18)	122.7		
G25.825–0.178 ($18^{h}39^{m}03.60^{s}$, $-06^{\circ}24'11.17''$), J2000							
25.04.2017	1	336.5(21.3)	80.80 (0.08)	2.40 (0.18)	131.6		
	2	182.8(15.6)	84.78 (0.06)	1.41 (0.13)	122.2		
	3	115.6(18.1)	89.62 (0.04)	0.58(0.09)	185.8		
	4	69.5(20.4)	90.58 (0.17)	0.99(0.26)	65.7		
	5	531.2(26.8)	92.81 (0.05)	2.30 (0.16)	216.9		
26.05.2017	1	188.3(26.3)	79.63 (0.07)	1.22 (0.19)	145.3		
	2	264.7 (24.1)	81.11 (0.05)	1.17 (0.11)	213.5		
	3	465.7(13.8)	84.38 (0.02)	1.41 (0.05)	310.8		
	4	271.8(14.5)	89.69 (0.03)	1.14 (0.09)	223.3		
	5	379.2(18.0)	92.68 (0.04)	1.77 (0.12)	200.9		

Таблица 2. Продолжение

Дата	#	$\int F_{\nu} \Delta V$	$V_{\rm LSR}$	ΔV	$F_{ u}^{ m peak}$	
13.06.2017	1	205.9(23.9)	79.45 (0.06)	1.27 (0.14)	152.7	
	2	253.9(24.0)	80.95 (0.05)	1.27 (0.12)	187.6	
	3	589.9 (12.2)	84.25 (0.02)	1.57 (0.04)	353.5	
	4	335.2(10.5)	89.57 (0.01)	0.97(0.04)	325.1	
	5	318.4(14.7)	92.26 (0.03)	1.23 (0.07)	243.0	
24.07.2017	1	229.9(12.5)	78.91 (0.03)	1.21 (0.08)	178.4	
	2	177.8(13.0)	80.89(0.04)	1.34 (0.12)	124.5	
	3	337.5(12.3)	84.23 (0.04)	1.95(0.08)	163.0	
	4	374.2(40.2)	89.49 (0.05)	1.40(0.09)	251.5	
	5	390.6(42.3)	91.46(0.12)	2.38 (0.26)	154.3	
07.09.2017	1	370.6(24.5)	79.50 (0.05)	1.49(0.13)	233.9	
	2	301.5(85.8)	85.02 (0.20)	1.45(0.31)	195.8	
	3	402.1 (81.4)	86.00 (0.04)	0.91 (0.07)	416.0	
	4	391.2(26.7)	82.10 (0.05)	1.66 (0.15)	222.1	
	5	1719.6 (75.5)	91.11 (0.04)	1.96 (0.07)	825.6	
	6	692.8(75.9)	93.02 (0.07)	1.74 (0.14)	374.7	
	G	27.184–0.082 (18 ^h 41 ^m 13	$3.21^{\rm s}, -05^{\circ}09'05.13''),$	J2000	<u>-</u>	
25.04.2017	1	78.6 (20.7)	16.23 (0.09)	0.73(0.15)	101.3	
	2	563.8(77.9)	17.95 (0.08)	1.59 (0.23)	332.8	
	3	840.3 (65.3)	19.30 (0.02)	0.99(0.05)	799.4	
	4	395.3(45.8)	26.78 (0.10)	2.17 (0.28)	171.5	
	5	241.4(43.1)	29.32 (0.13)	1.79 (0.35)	126.7	
26.05.2017	1	1015.4(35.1)	18.53 (0.04)	2.55(0.08)	374.6	
	2	351.4 (21.7)	19.32 (0.01)	0.63(0.03)	520.6	
	3	98.2(21.6)	21.34 (0.13)	1.29 (0.36)	71.3	
	4	673.4 (19.2)	27.20 (0.02)	1.67 (0.06)	378.5	
13.06.2017	1	151.1(12.2)	15.40(0.04)	0.92(0.08)	154.9	
	2	613.5(37.8)	17.83 (0.05)	1.86(0.12)	310.0	
	3	519.8(30.3)	19.20 (0.01)	0.82 (0.03)	595.1	
	4	32.4(10.0)	20.60 (0.14)	0.80 (0.23)	38.1	
24.07.2017	1	76.5(28.6)	15.52(0.14)	1.06(0.28)	67.8	
	2	520.8(55.1)	17.38 (0.05)	1.89(0.24)	258.4	
	3	500.7(35.3)	19.19(0.02)	1.03 (0.06)	458.8	
	4	277.6 (30.5)	27.04 (0.29)	5.54 (0.76)	47.1	
07.09.2017	1	749.2(35.3)	17.45(0.04)	1.96(0.11)	358.7	
	2	405.6(30.9)	19.35 (0.03)	1.08 (0.08)	353.5	
$G34.403+0.233(18^{h}53^{m}18.00^{s}+01^{\circ}25'26\ 00'')$ J2000						
25.04.2017	1	71.9 (17.2)	50.54 (0.25)	1.56(0.41)	43.4	
	2	111.5 (49.2)	52.92 (0.20)	1.40 (0.73)	74.7	
	3	571.0 (18.9)	54.24 (0.01)	0.74 (0.02)	725.0	
	4	723.1(43.0)	55.04 (0.11)	3.42 (0.26)	198.5	
	5	575.9(19.0)	56.53 (0.01)	0.60 (0.02)	910.0	
	6	468.7(20.5)	58.09(0.01)	0.80 (0.03)	550.5	
	7	223.6(14.6)	59.45 (0.03)	1.03 (0.08)	204.9	
	8	28.7 (8.3)	77.35 (0.08)	0.58 (0.19)	46.8	

Таблица 2. Продолжение

Дата	#	$\int F_{\nu} \Delta V$	$V_{\rm LSR}$	ΔV	$F_{ u}^{ m peak}$		
26.05.2017	1	131.8 (22.7)	50.65 (0.15)	1.90 (0.43)	65.2		
	2	170.4(19.3)	52.68(0.04)	0.94 (0.12)	170.4		
	3	225.2(56.4)	54.12 (0.03)	0.76(0.11)	280.0		
	4	831.6(59.2)	54.78 (0.08)	1.98 (0.10)	395.2		
	5	830.8(19.1)	56.58 (0.01)	0.65(0.01)	1204.7		
	6	305.6(24.1)	58.13 (0.03)	1.01 (0.08)	283.2		
	7	274.6(27.1)	59.60 (0.05)	1.25(0.15)	205.8		
13.06.2017	1	435.8(53.0)	53.82(0.02)	0.74 (0.05)	557.0		
	2	603.2(75.8)	55.03 (0.05)	1.50 (0.23)	378.1		
	3	932.6(28.2)	56.55(0.01)	0.75(0.03)	1170.7		
	4	596.0(36.2)	58.04 (0.03)	0.82 (0.06)	680.3		
	5	298.4(41.6)	59.50 (0.07)	1.12 (0.20)	251.0		
24.07.2017	1	111.3(16.2)	52.10(0.09)	1.27 (0.23)	82.2		
	2	588.0(94.3)	54.29(0.10)	1.56(0.16)	353.7		
	3	352.8(76.6)	56.08 (0.29)	1.74(0.44)	190.6		
	4	358.2(40.7)	56.62(0.01)	0.57(0.04)	587.5		
	5	347.9(16.7)	58.18 (0.02)	0.86(0.05)	381.5		
	6	251.1(17.2)	59.59(0.04)	1.19(0.10)	197.6		
07.09.2017	1	151.1(27.8)	51.16(0.11)	1.46(0.42)	97.4		
	2	250.6(62.6)	53.97(0.09)	1.03(0.13)	228.2		
	3	310.0(76.8)	55.18 (0.09)	1.29(0.31)	225.3		
	4	742.0(18.5)	56.59(0.01)	0.81 (0.03)	856.1		
	5	101.3(17.3)	57.93 (0.06)	0.61 (0.09)	157.0		
	6	61.0(35.9)	58.54 (0.07)	0.53(0.27)	108.8		
	7	237.2(32.6)	59.43(0.07)	0.98(0.15)	228.5		
G35.20–0.74 ($18^{h}58^{m}13.21^{s}$, $+01^{\circ}40'35.29''$), J2000							
25.04.2017	1	164.5(27.3)	29.74 (0.06)	1.09(0.26)	142.4		
	2	90.1(19.1)	30.91 (0.07)	0.73(0.11)	116.7		
26.05.2017	1	277.4(12.6)	30.03 (0.05)	2.42 (0.13)	107.8		
13.06.2017	1	336.0(15.6)	29.76(0.05)	2.17 (0.12)	145.8		
24.07.2017	1	393.9(16.2)	30.19(0.04)	1.84 (0.09)	201.0		
07.09.2017	1	344.7(124.9)	29.94 (0.38)	2.21 (0.45)	146.4		
	2	241.7 (36.8)	30.18(0.01)	0.48(0.04)	474.5		
	3	107.0 (36.3)	30.84 (0.03)	0.39(0.06)	258.5		
	4	299.1(50.4)	31.50 (0.02)	0.62 (0.06)	453.2		
G43.8–0.13 $(19^{h}11^{m}54.01^{s}, +09^{\circ}35'50.52'')$, J2000							
25.04.2017	1	778.2 (14.9)	37.67 (0.01)	0.51 (0.01)	1444.2		
	2	178.1 (18.7)	38.54 (0.03)	0.66 (0.08)	255.6		
	3	426.1(23.9)	40.36(0.04)	1.54 (0.11)	259.7		
26.05.2017	1	637.4(8.8)	37.7 (0.01)	0.52(0.01)	1160.2		
	2	128.2 (8.9)	38.58 (0.02)	0.55 (0.05)	217.0		
	3	243.3 (28.9)	40.35 (0.03)	1.27 (0.10)	179.4		
	4	250.8(55.3)	40.70 (0.52)	5.40 (0.76)	43.6		

Таблица 2. Окончание

Дата	#	$\int F_{\nu} \Delta V$	$V_{\rm LSR}$	ΔV	$F_{ u}^{ m peak}$	
13.06.2017	1	1291.4(8.6)	37.60(0.01)	0.52(0.01)	2331.7	
	2	259.3(9.5)	38.44(0.01)	0.52(0.02)	465.2	
	3	710.7(18.5)	40.15(0.02)	1.44 (0.04)	462.7	
	4	77.6(9.8)	40.68(0.01)	0.31 (0.03)	235.6	
	5	218.3(50.8)	41.91(0.10)	1.72(0.46)	119.5	
	6	$149.3\ (35.5)$	43.49(0.09)	1.09(0.16)	128.3	
24.07.2017	1	710.5(11.8)	37.74(0.01)	0.52(0.01)	1283.4	
	2	$162.1\ (13.6)$	38.64(0.03)	0.70(0.07)	218.8	
	3	515.1(23.8)	$40.33\ (0.03)$	1.44 (0.07)	337.0	
	4	66.5(13.9)	40.78(0.02)	0.34 (0.05)	185.1	
	5	146.4(26.0)	42.18(0.17)	2.03(0.4)	67.6	
07.09.2017	1	94.7(8.7)	34.66(0.04)	0.93 (0.10)	95.6	
	2	220.2(11.0)	$37.77\ (0.01)$	0.64 (0.05)	321.5	
	3	153.7(35.4)	38.18(0.21)	1.80(0.34)	80.2	
	4	152.3(47.1)	$39.99\ (0.13)$	0.95(0.29)	150.6	
	5	91.0(43.4)	$40.75\ (0.07)$	0.56(0.15)	153.5	
G107.30+5.64 (22 ^h 21 ^m 27.61 ^s , +63°51′45.30″), J2000						
25.04.2017	1	138.3(23.8)	-17.04(0.03)	0.61 (0.06)	212.8	
	2	497.6(35.2)	$-16.26\ (0.07)$	2.07 (0.13)	226.4	
	3	84.9(16.0)	-7.32(0.10)	1.05(0.26)	76.0	
26.05.2017	1	72.4(7.2)	-19.23(0.02)	0.45(0.05)	152.5	
	2	707.1(14.4)	-17.03(0.02)	1.71 (0.04)	388.3	
	3	$63.6\ (10.3)$	$-7.73\ (0.10)$	1.11 (0.19)	53.8	
13.06.2017	1	475.2(16.7)	-17.30(0.03)	1.64 (0.07)	272.1	
	2	84.9(15.2)	-8.11(0.13)	1.42(0.30)	56.2	
24.07.2017	1	58.5(5.9)	$-19.88\ (0.03)$	0.59(0.06)	93.6	
	2	196.3(8.1)	-17.38(0.02)	1.00(0.05)	185.2	
	3	24.6(5.5)	-8.71(0.07)	0.56(0.12)	41.6	
07.09.2017	1	122.2(16.2)	-19.62(0.04)	0.64 (0.10)	180.9	
	2	369.8(41.7)	-17.65(0.07)	1.40(0.20)	248.2	

последующих двух месяцев наблюдений (июньиюль 2017) данная группа линий остается в пределах тех же значений скоростей и потоков, а в сентябре 2017 г. в источнике наблюдается мощная вспышка мазерного излучения до 17 000 Ян в пике линии на скорости около 42.8 км/с. После появления информации о вспышке авторами в достаточно короткие сроки были организованы интерферометрические наблюдения этого источника на Радиоастроне. Таким образом, основная цель мониторинга мазерных источников на РТ-22 КрАО, о которой говорится во Введении, выявление источников, пригодных для наблюдения на этом интерферометре, была достигнута.

Третья группа линий также изменяется достаточно существенно в течение всего 5-месячного периода наблюдений, т.е. разные детали то возрастают в потоке, то убывают. Так, в начале наблюдений в спектре присутствует деталь со скоростью 52.6 км/с и плотностью потока 500 Ян, в сентябре



Рис. 1. Спектры источника G25.65+1.05, полученные в пяти сеансах наблюдений на РТ-22 КрАО с 25 апреля по 7 сентября 2017 года.

эта же деталь имеет такую же плотность потока и расположена на той же скорости. В промежутке между этими эпохами в данной группе наблюдаются детали на скорости 51 и 53–54 км/с, которые изменяют плотность потока от 100 до 400 Ян.

5.2. G25.825-0.178

Этот источник (далее G25.825) наблюдался в 2010 г. в рамках обзора HOPS на частоте 22 ГГц на РТ-22 в Мопре (Австралия) [43] с плотностью потока 345 Ян на скорости V_{peak} = 91 км/с, а также



Рис. 2. То же, что на рис. 1, для источника G25.825-0.178.

с двумя другими более слабыми линиями на скоростях 85 и 93 км/с и потоками в пике 165 и 135 Ян соответственно. Также источник наблюдался на решетке ATCA [44] в 2011–2012 гг. с плотностью потока 400 Ян на скорости 91 км/с.

В ноябре 2016 г. мазер G25.825 наблюдался на PT-22 в Пущино. Сравнение спектров, полученных на PT-22 в Мопре и PT-22 в Пущино, показало, что за прошедший промежуток времени появилась новая деталь на скорости 80 км/с с плотностью потока в пике 400 Ян, деталь на скорости 85 км/с практически исчезла, а наиболее яркая в 2010 г. деталь на $V_{\rm LSR} = 91$ км/с снизила плотность потока до ~70 Ян, т.е. примерно в 5 раз. Линия в спектре, полученном в Мопре, на скорости $V_{\rm LSR} = 93$ км/с при этом сохраняется, увеличив плотность потока до 280 Ян. Следующие наблюдения G25.825 состоялись в Пущино в январе 2017 г. и показали, что спектр за этот относительно короткий промежуток времени менее 2 месяцев изменился существенно. Деталь на $V_{\rm LSR} = 80$ км/с снизила поток до 100 Ян, т.е. в 4 раза. Плотность потока в пике 2010 г. на скорости 91 км/с стала еще меньше и составила не более 50 Ян. А линия с $V_{\rm LSR} = 93$ км/с остается



Рис. 3. То же, что на рис. 1, для источника G27.184-0.082.

относительно стабильной, немного увеличив плотность потока в пике с 280 до 320 Ян.

Наблюдения источника G25.825 на PT-22 в Симеизе были начаты примерно через 3 месяца после наблюдений в Пущино (см. рис. 2). При сравнении спектров от 17.01.2017 (Пущино) и 25.04.2017 (Симеиз) оказалось, что драматических изменений не произошло за этот промежуток времени. Линия на 93 км/с по-прежнему остается стабильной и имеет плотность потока около 300 Ян. Пик на 90 км/с увеличил поток до 220 Ян, т.е. более, чем в 4 раза. Деталь на 85 км/с снова возросла и имеет плотность потока 140 Ян, что близко к значению на спектре 2010 г. На протяжении последующих 3 сеансов наблюдений вид спектра кардинальных изменений не претерпевал, плотность потока во всех компонентах колебалась в пределах ~200-400 Ян (см. рис. 2). На спектре от 07.09.2017 видно, что деталь на 91 км/с увеличила яркость до 900 Ян, т.е. в 3 раза по сравнению со всеми предыдущими эпохами наблюдений, во время которых она оставалась относительно стабильной по потоку ~300 Ян. Более того, соседняя деталь на 93 км/с также увеличила плотность потока в пике до 500 Ян, т.е. в 2.5 раза по сравнению с





Рис. 4. То же, что на рис. 1, для источника G34.403+0.233.

Velocity LSR, km/s

существенное увеличение яркости детали на скорости 86 км/с до 500 Ян по сравнению со спектром, полученным в Пущино 17.01.2017, когда эта деталь имела плотность потока около 50 Ян, т.е. в 10 раз меньше.

Источник наблюдался также в мае-июле на РТ-22 в Пущино, см. рис. 9. В целом анализ спектров G25.825, как архивных по данным литературы, так и за 2017 год, показывает, что источник имеет минимум 4—5 деталей, соответствующих разным скоростям в диапазоне от 80 до 95 км/с. Плотность потока в линиях может меняться, в среднем, в 3— 4 раза.

5.3. G27.184-0.082

Источник G27.184—0.082 (далее G27.184) наблюдался в 2010 г. на PT-22 в Мопре (Австралия) [43] в рамках обзора HOPS и в 2009— 2010 гг. на 100-м радиотелескопе GBT в Грин Бэнке, США [45]. В спектре наблюдалось несколько деталей, самая яркая из которых имела в пике плотность потока 3500 Ян, скорость $V_{\rm LSR}$ = = 17.5 км/с. На скорости 14.5 км/с присутствовала достаточно яркая деталь с плотностью потока от 600 до 1000 Ян по данным этих двух работ, на скорости 20 км/с — яркая линия с переменной плотностью потока от 400 (Мопра) до 1400 Ян (GBT),



Рис. 5. То же, что на рис. 1, для источника G35.20-0.74.

т.е. возможно, что эта линия показывает быструю переменность (наблюдения на обоих телескопах проводились в течение нескольких месяцев в один и тот же год). Кроме того, в спектре, полученном на РТ-22 в Мопре, также видна еще одна деталь на скорости 30 км/с с плотностью потока около 200 Ян, которая не видна на спектре, полученном на GBT. В 2011 г. источник наблюдался на решетке ATCA [44], и на скорости $V_{\rm LSR} = 17.5$ км/с была зарегистрирована плотность потока 200 Ян.

Наблюдения источника на РТ-22 в Пущино в 2016-2017 гг. показали наличие двух деталей с плотностью потока 200-300 Ян на скоростях 18.5–19 км/с и 29–30 км/с. На рис. 10 приведены спектры G27.184, полученные на РТ-22 в Пущино в мае и июле 2017 г.

В ходе мониторинга в Симеизе на РТ-22 с апреля по сентябрь наиболее яркая линия на скорости 19 км/с сохраняла свое положение, колеблясь около него в пределах 0.5 км/с (см. рис. 3). Плотность потока в пике линии при этом постепенно снижалась от 850 до 400 Ян в течение почти 5 месяцев. Слева от этой линии в спектре присутствуют еще несколько линий с плотностью потока от 200 до 400 Ян, которые меняют свое положение по скорости от месяца к месяцу. Интересно отметить деталь





Рис. 6. То же, что на рис. 1, для источника G43.8-0.13.

с $V_{\rm LSR} = 26.5$ км/с, которая видна 25 апреля на уровне 150 Ян и через месяц увеличила плотность потока до 400 Ян, после чего эта линия полностью исчезла из спектра до конца наблюдений.

5.4. G34.403+0.233

Наблюдения этого источника (далее G34.403) проводились в 2008—2010 гг. на 45-м телескопе в Нобеяме (Япония) [46], в ходе которых было зарегистрировано мазерное излучение нескольких компонентов. Наиболее яркая группа компонентов была расположена в интервале скоростей от 45 до 63 км/с, а самая яркая мазерная линия с $V_{\rm LSR}$ = 57 км/с имела плотность потока в пике 220 Ян. В этой же группе можно выделить еще две линии с $V_{\rm LSR}$ = 53 и 60 км/с с плотностью потока 80 и 60 Ян соответственно. Помимо этой основной группы мазерных деталей, в ту эпоху наблюдались еще две слабых детали (менее 10 Ян) на скоростях ~18 и ~32 км/с, которые впоследствии не были видны, а также еще одна группа линий около $V_{\rm LSR}$ = 81 км/с с плотностью потока не более 20 Ян, которая также впоследствии больше не наблюдалась в обсуждаемом периоде времени.

Наиболее сильная мазерная деталь Н₂О с



Рис. 7. То же, что на рис. 1, для источника G107.30+5.64.

плотностью потока 1310 Ян на скорости $V_{\text{peak}} = 54.50 \text{ км/с}$ была обнаружена на VLA в направлении холодного молекулярного ядра IRDC MM1 [47]. Кроме того, ранее в 2006 г. проводились интерферометрические наблюдения G34.403 на решетке VERA [9], в результате которых на достаточно большой базе Mizusawa-Iriki (1300 км) источник имел плотность потока 60 Ян на скорости 57 км/с. При этом на скорости 38 км/с наблюдалась еще одна деталь с плотностью потока около 27 Ян. Таким образом, было показано, что мазер H₂O не разрешается на длинных базах [9],

а в работе [48] говорится, что распределение мазерных пятен имеет структуру "V-shape", вдоль которой располагается большинство мазерных пятен. Можно предположить, что в 2006 г. в спектре присутствовала та же деталь с $V_{\rm LSR} = 57$ км/с, что и в спектре, полученном на PT-45 в Нобеяме в 2008—2010 гг., и что плотность потока сохранялась в течение этого периода. Эта же деталь остается в спектре G34.403 на протяжении всех последующих наблюдений (см. анализ ниже). В рамках этого предположения можно заключить, что наиболее яркая деталь в спектре на скорости



Рис. 8. Спектры источника G25.65+1.05, полученные на РТ-22 ПРАО в 2017 г.

 $V_{\rm LSR} = 57$ км/с не разрешается на больших базах, т.е. является достаточно компактной. Более того, несколько других более слабых деталей в данной группе мазерных линий также не разрешаются, т.е. это группа из нескольких компактных мазерных пятен.

Исходя из данных о средней величине плотности потока мазерной линии в спектре, полученном на одиночном телескопе, и в кросс-корреляционном спектре, полученном на VERA, можно оценить размеры области, из которой приходит излучение в данной линии. В работе [49] предложен метод оценки яркостной температуры и углового размера излучающей области для различных случаев распределения яркости в зависимости от координат внутри проекции этой области на небесную сферу, и, в частности, для гауссового распределения. Пользуясь этим методом и предположив, что величина плотности потока в пике линии с $V_{\rm LSR} = 57$ км/с составляет 220 Ян (см. спектр из работы [46]), что наиболее близко к эпохе наблюдений на VERA, а также приняв плотность потока этой же детали в кросс-корреляционном спектре 60 Ян, длину базы B = 1300 км, мы получили верхнюю границу на угловой размер мазерного пятна $\theta_{\rm r} = 1.3$ mas¹. В работе [9] были определены параллакс и расстояние до источника G34.403, которые

¹mas (milli arc second) — угловая миллисекунда дуги в год, единица измерения собственных движений звезд, мс/год.



Рис. 9. То же, что на рис. 8, для источника G25.825-0.178.



Рис. 10. То же, что на рис. 8, для источника G27.184-0.082.

составили 0.643 mas и 1.56 кпк соответственно. На таком расстоянии угловой размер 1.3 mas соответствует линейному размеру порядка 2 a.e. При указанных параметрах яркостная температура источника составляет $T_{\rm b} = 3.3 \cdot 10^{11}$ K.

В 2015—2016 гг. источник G34.403 наблюдался на PT-22 в Пущино [50]. Линия на $V_{LSR} = 57$ км/с в этот период имела плотность потока в пике от 350 до 450 Ян в 2015 г. и возросла до 1000 Ян в конце 2016 г. Одновременно с этим в спектре появилась деталь на скорости 54.5 км/с с плотностью потока в пике 1200 Ян, которая ранее не наблюдалась. Через 2 месяца в январе 2017 г. обе эти линии имели плотность потока 1000 Ян. На рис. 11 приведены спектры G34.403, полученные на PT-22 в Пущино в мае-июле 2017 года.

С 25 апреля были начаты наблюдения данного источника на РТ-22 в Симеизе, спектры представлены на рис. 4. На протяжении всего периода наблюдений в Симеизе (5 месяцев) деталь на скорости 57 км/с (назовем ее "основной") имела среднюю плотность потока 1000 Ян, колеблясь в пределах 800–1300 Ян. Новая же деталь на скорости 54.5 км/с постепенно уменьшала плотность потока с 900 Ян в апреле 2017 г. до 300 Ян в сентябре 2017 г. Помимо эти двух линий, в спектре G34.403 присутствовали еще две более слабые детали с $V_{\rm LSR} = 58$ и 60 км/с, которые, в среднем, имели плотность потока 400 и 250 Ян соответственно.

5.5. G35.20-0.74

В северной и южной частях молекулярного облака G35.20-0.74 (далее G35.20) присутствуют два мазера H₂O [51], в данной работе наблюдалось излучение северных Н₂О мазеров, которые, как считается, находятся на более ранней стадии эволюции, чем южные мазеры. С 1987 по 2007 г. источник наблюдался в ходе длительного мониторинга на РТ-32 в Медичине (Италия) [52, 53]. В течение этого периода источник демонстрировал переменность во всех компонентах, достигая в максимуме плотности потока 340 Ян на скорости около 32 км/с. В среднем яркость источника на протяжении 20 лет составляла около 40 Ян, а интегральный поток во всех компонентах монотонно возрастал примерно с 2000 г. с тремя ярко выраженными пиками активности в 1994, 2002 и 2006 гг. (см. [52, рис. А.24.d, А.24.е]).

В 2008—2010 гг. проводились наблюдения источника G35.20 на 45-м телескопе в Нобеяме [46], во время которых источник в целом был слабым: самая яркая линия с $V_{\rm LSR} = 31$ км/с имела плотность потока в пике 12 Ян.

Наблюдения в 2015—2017 гг. на РТ-22 в Пущино показали, что в 2015 г. источник был достаточно ярким: единственная деталь в спектре на скорости 31 км/с имела плотность потока 400—500 Ян. В ноябре 2016 г. — январе 2017 г. источник имел две близкие линии с $V_{\rm LSR} \sim 31$ км/с в спектре



Рис. 11. То же, что на рис. 8, для источника G34.403+0.233.

с плотностью потока менее 100 Ян. На рис. 12 приведен спектр G35.20, полученный на РТ-22 в Пущино в июле 2017 г.

В наблюдениях на РТ-22 в Симеизе на протяжении 5 месяцев яркость источника не превышала 200 Ян, кроме последнего спектра. В сентябре источник имел спектр с тремя близкими мазерными деталями на скоростях 30, 31 и 31.5 км/с и плотностью потока 600, 400 и 500 Ян соответственно (см. рис. 5).

5.6. G43.8-0.13

Мониторинг источника G43.8-0.13 (далее G43.8) проводился с 1987 по 2007 г. на РТ-32

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 95 № 9 2018

в Медичине [52], и в течение всего периода этих 20-летних наблюдений источник оставался значительно ярким: минимальная плотность потока в пике самой яркой детали в спектре составляла 300 Ян в 2007 г. Максимум плотности потока наблюдался в 1990 г. и составил около 4000 Ян в пике, и в это же время интегральный поток во всех компонентах спектра также был максимальным за данный период наблюдений — около 7000 Ян·км/с. В дальнейшем яркость источника G43.8 снижалась с небольшим пиком интегральной яркости в 1998 г. (см. [52, рис. А.25.d]).

С 1981 г. H_2O мазер G43.8 изучался в ходе длительного мониторинга мазеров H_2O на PT-22 в Пущино [54]. Источник остается ярким на про-



Рис. 12. То же, что на рис. 8, для источника G35.20-0.74.

тяжении многих лет и стабильно показывает интересный спектр. Плотность потока в пике наиболее яркой детали на скорости 37.5 км/с составляла более 500 Ян в период 1994–1998 гг. и более 1000 Ян в период 2016–2017 гг., достигнув почти 3000 Ян на дату 16 января 2017 г. В спектрах 2016–2017 гг. имеются еще три линии с $V_{\rm LSR} = 34$, 38 и 40.5 км/с с плотностью потока 300–500 Ян. На рис. 13 приведены спектры G43.8, полученные на РТ-22 в Пущино в мае-июле 2017 г.

В процессе мониторинга на РТ-22 в Симеизе главная линия имела плотность потока от 1200 до 2200 Ян, а в сентябре 2017 г. уменьшилась до 360 Ян. Следует отметить, что деталь на $V_{\rm LSR} = 34$ км/с отсутствовала в спектре G43.8 почти весь период наблюдений, кроме последнего месяца, когда она снова появилась и имела плотность потока около 100 Ян. Линия с $V_{\rm LSR} = 40.5$ км/с присутствовала в спектре все время и имела плотность потока от 200 до 500 Ян (см. рис. 6).

Этот источник наблюдался на Радиоастроне на частоте 22 ГГц в мае-июне 2015 г. и дал лепесток на наземно-космической базе длиной 0.9 ED, плотность потока компактной детали размером менее 240 μ as (\approx 2.7 а.е. на расстоянии 11.8 кпк) [55] составила \approx 150 Ян.

5.7. G107.3+5.64

Мазер H₂O G107.3+5.64 (далее G107.3) наблюдался в 1988 г. на 100-м радиотелескопе в Эффельсберге и в 1991 г. на 32-м радиотелескопе в Медичине [56]. При наблюдениях на РТ-100 в Эффельсберге [56] источник имел в спектре три детали с $V_{LSR} = -20.8$, -22.4 и -24.3 км/с, и плотность потока в пике 260, 220 и 100 Ян соответственно. При наблюдениях в Медичине на РТ-32 [56] спектр G107.3 изменился: из указанных трех линий осталась только центральная, но появилась еще одна деталь 100 Ян на скорости -20 км/с.

Мониторинг источника также проводился с 1989 по 2007 г. на РТ-32 в Медичине [52], и в течение всего периода этих наблюдений источник демонстрировал значительную переменность как по яркости максимума (от 10 до 800 Ян), так и по количеству компонентов и их скорости. Вид спектра претерпевал довольно значительные изменения на масштабе нескольких месяцев, в нем присутствовало от 1 до 7 деталей в разные периоды, некоторые детали исчезали полностью, появлялись новые (см. спектры в работе [52, рис. А.37.а]). Интересно отметить, что в рассматриваемый период 1989-2007 гг. наиболее яркие компоненты в спектре G107.3 располагаются в диапазоне скоростей от -15 до -20 км/с, что существенно отличается от системной скорости $V_{\text{therm}} =$ = -10.1 км/с, соответствующей молекулярному облаку, с которым ассоциируется источник G107.3.

Наблюдения в Пущино на РТ-22 в 2016– 2017 гг. показали, что в спектре источника присутствовали мазерные детали на скоростях –17.5,



Рис. 13. То же, что на рис. 8, для источника G43.8-0.13.

-16.5 и -7 км/с, имеющие плотность потока 140, 50 и 170 Ян соответственно. Через 2 месяца в январе 2017 г. плотность потока на $V_{\rm LSR} =$ = -17 км/с возросла до 600 Ян. На рис. [14] приведены спектры G107.3, полученные на РТ-22 в Пущино в мае-июле 2017 г.

Последующий мониторинг источника на РТ-22 в Симеизе не выявил кардинальных изменений в спектре. Вспыхнувшая до 600 Ян деталь на скорости —17 км/с с апреля 2017 г. имела тенденцию к уменьшению плотности потока до 200 Ян в течение этого периода наблюдений (см. рис. 7).

6. ДИСКУССИЯ

Все источники обнаруживают достаточно сильную переменность на масштабе нескольких месяцев, что может говорить о наличии в этих объектах компактных структур (мазерных пятен), делающих их интересными с точки зрения интерферометрических исследований. Это подтверждается также приведенными выше расчетами линейных размеров подобных структур в областях G34.403 и G43.8 по результатам наземной и наземно-космической интерферометрии, которые составили около 2 а.е.

Плотность потока различных компонентов в спектрах на протяжении 5 месяцев покрывает



Рис. 14. То же, что на рис. 8, для источника G107.3+5.64.

диапазон от ~40 до ~2300 Ян, а в источнике G25.65+1.05 зарегистрирована вспышка излучения до ~17 000 Ян на скорости 42.8 км/с на дату 07.09.2017, впоследствии получившая развитие до 60 кЯн в конце сентября 2017 г. Большинство мазерных деталей в спектрах выборки имеют плотность потока в пике в среднем от 200 до 400 Ян, что отвечает наблюдательному критерию выборки (не слабее 200 Ян).

На рис. 15 для каждого источника представлена зависимость от времени интегральной плотности потока во всех компонентах спектра (верхние панели рисунков) и плотности потока максимального пика (нижние панели рисунков). Эти графики иллюстрируют общую активность мазеров в течение всего периода наблюдений. Как видно из рис. 15, у источников G25.65, G25.825 и G35.20 имеется тенденция к возрастанию интегральной плотности потока по всему спектру в течение всего периода наблюдений, а источники G27.184, G34.403 и G43.8 постепенно снижали свою интегральную яркость. Источник G107.3 в указанный промежуток времени то возрастал, то убывал как по интегральной яркости, так и по плотности пото-



Рис. 15. Зависимость интегральной плотности потока (верхние панели) и плотности потока максимального пика в спектре (нижние панели) от даты наблюдений.

ка максимального пика. Как правило, изменение интегральной плотности потока источников коррелирует с изменением плотности потока наиболее яркой детали, за исключением G27.184 и G34.403, в которых эти зависимости были противоположны друг другу большую часть периода наблюдений. Последнее может говорить о том, что в данных источниках увеличение (или уменьшение) интегральной яркости происходило не за счет какой-то одной яркой детали, а за счет уярчения (или ослабевания) сразу нескольких компонентов, т.е. за счет общей активности источника (G34.403). Другая причина может состоять в появлении новых деталей в спектре (G27.184). В первом случае общее нарастание потока во всех деталях спектра может говорить об изменении условий накачки со стороны внешнего провоцирующего источника — например, увеличения инфракрасного потока в центральной части области вследствие аккреции вещества [57]. Чтобы доказать правильность подобного предположения, необходимо проводить более длительные ряды наблюдений и дополнить их наблюдениями в других спектральных диапазонах. Во втором случае появление новых деталей в спектре может быть обусловлено, например, турбулентными движениями вещества или прецессией диска, при которой его положение относительно картинной плоскости изменяется, вследствие чего изменяется толщина газового слоя на луче зрения.

Анализ спектров, полученных на РТ-22 в Симеизе (рис. 1-7), показывает, что диапазон скоростей, который покрывают различные компоненты в спектрах источников, составляет от 5 до 20 км/с. Разброс деталей по скорости у двух источников составляет около 5 км/с (G35.20, G107.3), еще у двух — около 10 км/с (G34.403, G43.8). Известно, что ширина тепловых линий, наблюдаемых в областях звездообразования и соответствующих газопылевым конденсациям в этих областях, может составлять от 2 до 15 км/с (см., напр., [29]). Таким образом, разброс скоростей мазерных деталей 5-10 км/с может указывать на то, что структуры, ответственные за мазерное излучение в различных компонентах одного и того же источника, располагаются достаточно близко друг к другу в пространстве в одной области звездообразования (т.е. предположительно в одной газо-пылевой конденсации).

При этом разброс деталей по скорости в источнике G27.184 составляет 15 км/с и еще в двух (G25.65, G25.825) — около 20 км/с. Такой разброс может указывать на возможные динамические эффекты в области. Например, появление в источнике G25.65 мощной переменной по интенсивности вспышки может соответствовать сильной фонтанирующей струе вещества или выбросу от центрального объекта во внешние слои голубого фронта биполярного потока. В то же время сохранение устойчивого положения ярких мазерных деталей в голубой части спектра является аргументом в пользу наличия устойчивой пространственной структуры типа края диска, а не разлетающегося вещества в форме потока от центрального объекта. За время наших наблюдений источник G25.65 испытал наиболее мощные вспышки с возрастанием плотности потока основной мазерной детали в несколько сот раз относительно "спокойного" состояния. Можно связать такие вспышки с процессами в околозвездном диске. Выше упоминалась одна из возможностей — рост потока ИК-излучения в центральной части области при всплеске аккреции вещества на центральный звездный объект [57], или воздействие на мазерную область ударной волны, возникшей при этом эпизоде аккреции. Мазер может также вспыхнуть, например, при совмещении на луче зрения двух или более протопланетных мазерных конденсаций, движущихся по кеплеровским орбитам вокруг центрального объекта и усиливающих излучение Н₂О в ненасыщенном режиме. Сходная модель была предложена в работе [58] для объяснения мощной вспышки мазера H₂O в источнике Orion A. Другим вариантом может быть подходящая ориентация протопланетных колец в диске [59]. Еще одна возможность — совмещение с лучом зрения оси мазерного волокна, возникшего в диске вследствие гравитационной неустойчивости [60].

Более длительный мониторинг плотности потока и картографирование мазерных деталей в различных молекулярных переходах в таком типе источников позволит сделать выбор между этими гипотезами.

7. ВЫВОДЫ

1. Выполнен мониторинг семи источников мазерного излучения в линии H₂O в областях образования массивных звезд. Проведен анализ полученных наблюдательных данных и проведено сравнение спектров с данными более ранних работ.

2. Аппаратура PT-22 КрАО работает в штатном режиме, калибровка позволяет проводить сравнение с аналогичными наблюдениями, которые выполняются на PT-22 в Пущино и на других телескопах.

3. Все наблюдавшиеся в данной работе мазеры H_2O демонстрируют сильную переменность, что представляет проблему для постановки интерферометрических наблюдений. С другой стороны, такая переменность доказывает необходимость наблюдений и мониторинга на одиночных телескопах, предваряющих интерферометрические наблюдения, поскольку это позволяет оценить плотности потока мазерных деталей, среднего потока в

максимальной детали спектра и период стабильности плотности потока. Все это, в конечном итоге, принципиально для расчета даты постановки эксперимента с привлечением большого числа антенн и экономии полезного времени наблюдений.

4. В результате данного мониторинга в сентябре 2017 г. была зафиксирована вспышка мазерного излучения в источнике G25.65+1.05, что позволило в короткие сроки организовать интерферометрические наблюдения на Радиоастроне.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи выражают благодарность персоналу РТ-22 КрАО РАН и РТ-22 ПРАО АКЦ ФИАН за помощь в проведении наблюдений. Работа частично поддержана Программой 28 РАН: "Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей" и грантом РФФИ 18-42-910018.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Е. Е. Лехт, В. В. Краснов, А. М. Толмачев, Письма в Астрон. журн. **40**, 611 (2014).
- П. Колом, Е. Е. Лехт, М. И. Пащенко, Г. М. Рудницкий, А. М. Толмачев, Астрон. журн. 93, 723 (2016).
- T. R. Hunter, C. L. Brogan, G. MacLeod, C. J. Cyganowski, *et al.*, Astrophys. J. 837, L29 (2017).
- http://www.asc.rssi.ru/radioastron/index. html.
- Н. С. Кардашев, А. В. Алакоз, А. С. Андрианов, М. И. Артюхов и др., Вестн. ФГУП НПО Лавочкина 3, 4 (2016).
- 6. "Bayesian Distance Calculator", http://bessel. vlbi-astrometry.org/bayesian.
- A. J. Walsh, A. R. Hyland, G. Robinson, and M. G. Burton, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 291, 261 (1997).
- M. A. Braz, J. C. Gregorio Hetem, E. Jr. Scalise, J. L. Monteiro Do Vale, and M. Gaylard, Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. 77, 465 (1989).
- T. Kurayama, A. Nakagawa, S. Sawada-Satoh, K. Sato, M. Honma, K. Sunada, T. Hirota, and H. Imai, Publ. Astron. Soc. Japan 63, 513 (2011).
- B. Zhang, X. W. Zheng, M. J. Reid, K. M. Menten, Y. Xu, L. Moscadelli, and A. Brunthaler, Astrophys. J. 693, 419 (2009).
- 11. J. Forster and J. Caswell, Astron. and Astrophys. **213**, 339 (1989).
- 12. A. Palau, A. Fuente, J. M. Girart, R. Estalella, *et al.*, Astrophys. J. **762**, 120 (2013).
- 13. A. Zavagno, L. Deharveng, D. Nadeau, and J. Caplan, Astron. and Astrophys. **394**, 225 (2002).
- 14. S. Kurtz, E. Churchwell, and D. O. S. Wood, Astrophys. J. Suppl. **91**, 659 (1994).

- Á. Sánchez-Monge, M. T. Beltrán, R. Cesaroni, S. Etoka, *et al.*, Astron. and Astrophys. 569, id. A11 (2014).
- 16. M. J. Gaylard, G. C. MacLeod, and D. J. van der Walt, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **269**, 257 (1994).
- 17. O. S. Bayandina, I. E. Val'tts, S. E. Kurtz, and N. N. Shakhvorostova, in preparation (2018).
- 18. F. Fontani, R. Cesaroni, and R. S. Furuya, Astron. and Astrophys. **517**, 56 (2010).
- G. Surcis, W. H. T. Vlemmings, H. J. van Langevelde, B. Hutawarakorn Kramer, A. Bartkiewicz, and M. G. Blasi, Astron. and Astrophys. 578, 102 (2015).
- E. Rosolowsky, M. K. Dunham, A. Ginsburg, E. Bradley, *et al.*, Astrophys. J. Suppl. **188**, 123 (2010).
- 21. V. Rosero, P. Hofner, S. Kurtz, J. Bieging, and E. D. Araya, Astrophys. J. Suppl. **207**, 12 (2013).
- 22. E. D. Araya, P. Hofner, W. M. Goss, H. Linz, S. Kurtz, and L. Olmi, Astrophys. J. Suppl. **178**, 330 (2008).
- 23. M. Szymczak and E. Gérard, Astron. and Astrophys. 414, 235 (2004).
- 24. O. S. Bayandina, I. E. Val'tts, and S. E. Kurtz, Astron. Rep. **59**, 997 (2015).
- 25. M. R. Pestalozzi, V. Minier, and R. S. Booth, Astron. and Astrophys. **432**, 737 (2005).
- 26. Y. Wu, C. Henkel, R. Xue, X. Guan, and M. Miller, Astrophys. J. **669**, 37 (2007).
- 27. D. J. van der Walt, Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. **110**, 81 (1995).
- J. L. Caswell, R. A. Vaile, S. P. Ellingsen, J. B. Whiteoak, and R. P. Norris, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 272, 96 (1995).
- 29. L. Bronfman, L.-A. Nyman, and J. May, Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. **115**, 81 (1996).
- W. M. Schlingman, Y. L. Shirley, D. E. Schenk, E. Rosolowsky, *et al.*, Astrophys. J. Suppl. **195**, 14 (2011).
- 31. C. J. Cyganowski, B. A. Whitney, E. Holden, E. Braden, *et al.*, Astron. J. **136**, 2391 (2008).
- 32. G. Surcis, W. H. T. Vlemmings, H. J. van Langevelde, and B. Hutawarakorn Kramer, Astron. and Astrophys. **541**, id. A47 (2012).
- 33. R. Bachiller, K. M. Menten, J. Gómez-González, and A. Barcia, Astron. and Astrophys. **240**, 116 (1990).
- 34. D. S. Shepherd and E. Churchwell, Astrophys. J. **457**, 267 (1996).
- 35. A. L. Argon, M. J. Reid, and K. M. Menten, Astrophys. J. Suppl. **129**, 159 (2000).
- 36. F. Palla, J. Brand, G. Comoretto, M. Felli, and R. Cesaroni, Astron. and Astrophys. **246**, 249 (1991).
- Á. Sánchez-Monge, A. Palau, R. Estalella, M. T. Beltrán, and J. M. Girart, Astron. and Astrophys. 485, 497 (2008).
- 38. И. Г. Моисеев, Н. С. Нестеров, Изв. Крымской астрофиз. обсерв. **73**, 154 (1985).
- 39. J. Brand, R. Cesaroni, P. Caselli, M. Catarzi, *et al.*, Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. **103**, 541 (1994).
- 40. S. Kurtz and P. Hofner, Astron. J. 130, 711 (2005).
- 41. E. E. Lekht, M. I. Pashchenko, G. M. Rudnitskij, and A. M. Tolmachev, Astron. Rep. **62**, 213 (2018).

- 42. A. E. Volvach, L. N. Volvach, G. MacLeod, E. E. Lekht, G. M. Rudnitskij, and A. M. Tolmachev, Astron. Telegram № 10728 (2017).
- 43. A. J. Walsh, S. L. Breen, T. Britton, K. J. Brooks, *et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **416**, 1764 (2011).
- 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).
- J. S. Urquhart, L. K. Morgan, C. C. Figura, T. J. T. Moore, *et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 418, 1689 (2011).
- 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).
- 47. Y. Wang, Q. Zhang, J. M. Rathborne, J. Jackson, and Y. Wu, Astrophys. J. **651**, L125 (2006).
- T. Kurayama, in Approaching Micro-Arcsecond Resolution with VSOP-2: Astrophysics and Technologies, ASP Conf. Ser. 402, Proc. of a Conference held 3–7 Dec, 2007, at ISAS/JAXA, Sagamihara, Kanagawa, Japan, edited by Y. Hagiwara, E. Fomalont, M. Tsuboi, and Y. Murata, p. 473 (2009).
- 49. A. Lobanov, Astron. and Astrophys. **574**, id. A84 (2015).
- G. M. Rudnitskii, E. E. Lekht, O. S. Bayandina, I. E. Val'tts, and E. R. Khan, Astron. Rep. 60, 129 (2016).

- L. T. Little, A. T. Brown, P. W. Riley, N. Matthews, G. H. MacDonald, D. R. Vizard, and R. J. Cohen, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 203, 409 (1983).
- 52. M. Felli, J. Brand, R. C. Cesaroni, C. Codella, *et al.*, Astron. and Astrophys. **476**, 373 (2007).
- 53. R. Valdettaro, F. Palla, J. Brand, R. Cesaroni, G. Comoretto, M. Felli, and F. Palagi, Astron. and Astrophys. **383**, 244 (2002).
- 54. E. E. Lekht and R. L. Sorochenko, Astron. Rep. **76**, 758 (1999).
- 55. A. M. Sobolev, N. N. Shakhvorostova, A. V. Alakoz, and W. A. Baan, in *Stars: From Collapse to Collapse*, Proc. of a Conference held at Special Astrophysical Observatory, Nizhny Arkhyz, Russia 3–7 October 2016, edited by Yu. Yu. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, and I. A. Yakunin (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2007), p. 27.
- 56. J. G. A. Wouterloot, J. Brand, and K. Fiegle, Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. **98**, 589 (1993).
- 57. A. Caratti o Garatti, B. Stecklum, R. Garcia Lopez, *et al.*, Nature Phys. **13**, 276 (2017).
- 58. V. S. Strel'nitskii, Soviet Astron. Letters 8, 86 (1982).
- 59. L. I. Matveenko, Soviet Astron. Letters 7, 54 (1981).
- R. T. Tominaga, S. Inutsuka, and S. Z. Takahashi, Publ. Astron. Soc. Japan 70, 3 (2018) (arXiv:1711.05948).