

УДК 524.3

Обнаружение плотных скоплений источников мазера водяного пара во время мощных вспышек в комплексе IRAS 16293-2422

¹ Вольвач А. Е., ¹ Вольвач Л. Н., ² Ларионов М. Г.

¹ Отдел радиоастрономии и геодинамики,

Крымская астрофизическая обсерватория, Ялта, 298688, Российская Федерация

² Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева РАН

Москва, Российская Федерация

volvach@bk.ru

Получено: 17 марта 2022 г.

Отрецензировано: 21 марта 2022 г.

Принято к публикации: 21 марта 2022 г.

Аннотация: По данным многолетнего мониторинга водного мазерного перехода на частоте 22.2 ГГц с 2019 по 2021 гг. нам удалось обнаружить два мощных вспышечных явления в IRAS 16293-2422, длившихся в общей сложности около года и происходивших на лучевых скоростях около 6 и 8 км/с. В обоих случаях мощные короткие вспышки располагались над менее мощными, но более продолжительными, амплитудами 4 и 0.6 кЯн. Их излучение инициировало возникновение более мощных вспышек. Благодаря многолетним детальным наблюдениям этих мазеров воды впервые было подтверждено существование конфигураций излучающих мазерных пятен с очень близкими лучевыми скоростями, находящаяся на луче зрения наблюдателя. Это позволило продемонстрировать правильность гипотезы активации мазера водяного пара, основанной на увеличении длины усиления мазера за счет нескольких мазерных сгущений, находящихся на луче зрения наблюдателя. Наблюдалось ненасыщенное состояние самых мощных и самых коротких мазерных вспышек, а также насыщенное состояние более слабых и продолжительных. Получены новые важные параметры мазеров воды и предполагаемое их положение.

Ключевые слова: звездные образования, звезды с экзопланетами, молекулы, радиолинии, водные мазеры.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Ларионов М. Г. Обнаружение плотных скоплений источников мазера водяного пара во время мощных вспышек в комплексе IRAS 16293-2422 // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 1. С. 1—24.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Вольвач, А. Е. Обнаружение плотных скоплений источников мазера водяного пара во время мощных вспышек в комплексе IRAS 16293-2422 / А. Е. Вольвач, Л. Н. Вольвач, М. Г. Ларионов // Информационные и радиоэлектронные технологии. — 2022. — Т. 5, № 1. — С. 1—24.

1. Введение

Давно известно, что звезды многих спектральных классов образуют двойные и кратные системы [1—3]. Они возникают из коллапсирующих ядер, которые являются наиболее плотными частями большого молекулярного облака, где вращение, турбулентность и магнитные поля создают условия для формирования протозвезд [4—6]. IRAS 16293-2422 (далее IRAS 16293) является протозвездной системой класса 0, что следует из обзоров молодых звездных объектов [7, 8]. Эта молодая система была открыта более трети века назад и с тех пор интенсивно исследуется в различных диапазонах длин волн [9, 10]. IRAS 16293 находится в комплексе облаков ρ Змееносца на расстоянии ~ 140 пк [11] и имеет сложную структуру на масштабах 6000—8000 а. е. [12, 13]. IRAS 16293 очень активен и имеет три биполярных выброса [14—17].

Субмиллиметровые интерферометры позволили исследовать внутреннюю структуру протозвезд, включая и IRAS 16293 [18—20]. Внутри IRAS 16293 были обнаружены два источника континуума, названные *A* и *B*, разделенные расстоянием ~ 700 а. е. [21]. Наблюдения с очень большой антенной решеткой (*VLA*) на длине волны $\lambda = 2$ см позволили разрешить в *A* два компактных источника *A1* и *A2* на расстоянии ~ 50 а. е. друг от друга [21]. Также существует третий компаньон *B*, расположенный примерно в 800 а. е. от *A1* и *A2*. Данная система имеет газопылевые диски размерами 12 а. е. и 3.6 а. е. соответственно. Таким образом, IRAS 16293 представляет собой тройную гравитационно связанную протозвездную систему, части которой движутся вокруг общего центра тяжести. Период взаимного обращения между *A1* и *A2* составляет около 362 лет, а для системы *A—B*, вероятно, несколько тысяч лет [22].

Интерферометрическими наблюдениями также установлено наличие групп мазерных сгущений (пятен), связанных как с истечениями, так и, возможно, расположенных в газопылевых дисках вокруг протозвезд [11, 21, 23, 24]. Для определения местоположения мазеров водяного пара необходимы одновременные мониторинговые наблюдения в режимах одиночных радиотелескопов и интерферометрических режимах. Проводить такие наблюдения довольно сложно. На данный момент мы можем считать, что IRAS

16293A, как минимум, имеет двойную протозвездную природу с массой 2—3 M_{\odot} [22, 25—27].

В работе представлены новые данные о мощных долговременных вспышечных мазерных явлениях в деталях спектральных особенностей с лучевыми скоростями около 6 и 8 км/с, и дана интерпретация полученных данных. Первые результаты о вспышечном явлении около 8 км/с в IRAS 16293 были опубликованы в [28].

2. Наблюдения и обработка

Наблюдения мазерного перехода $6_{16}-5_{23}$ на частоте 22.235 ГГц были получены в период с января 2019 г. по февраль 2021 г. на 22-метровом радиотелескопе РТ-22, расположенном в Симеизе. Размер диаграммы направленности радиотелескопа ($FWHM$) составлял 2.5 угловых минуты, чувствительность — 13 Ян/К. Эффективная площадь радиотелескопа на длине волны 1.35 см составляла 210 м², что соответствует эффективности использования поверхности телескопа, равной 55 %. Для наблюдений применялся неохлаждаемый приемник с шумовой температурой около 60 К. В зависимости от погодных условий температура системы на промежуточных углах места варьировалась в пределах от 120 до 150 К. Полученные спектральные данные были скорректированы за атмосферное поглощение и изменение эффективной площади радиотелескопа при разных углах места. Для калибровки потоков использовались источники DR 21, Vir A и Cyg A. Температурная ступенька (первичный «калибратор») создавалась с помощью фиксированной разности температур на апертуре радиотелескопа (на вторичном рупоре) от согласованной нагрузки, которая находилась сначала при температуре жидкого азота, а затем при температуре окружающей среды.

Приемная система была установлена во вторичном фокусе радиотелескопа. Гетеродинный приемник стабилизировался H -мазером с частотой 5 МГц, а данные наблюдений на промежуточной частоте 160 МГц передавались с радиотелескопа на спектрометр и регистрирующую аппаратуру. Ширина полосы приема данных составляла 16 МГц. Использовался спектрополяриметрический радиометр с параллельным анализатором спектра Фурье. Спектральное разрешение составляло 8 и 2 кГц (0.105 и 0.03 км/с) соответственно [29]. Циклы наблюдений мазерной линии состояли из накопления сигнала в течение 5—10 мин при наведении на источник (вкл) и удалении от источника на градус в сторону (выкл). Процедура повторялась несколько раз для достижения необходимого отношения сигнал/шум. Наблюдения, регистрация, первичная обработка данных и управление ра-

диотелескопом проводились в автоматическом режиме. При этом использовалась программно-аппаратурная система, аналогичная «field system», используемой при интерферометрических наблюдениях. Предварительная обработка данных позволяла оперативно вносить коррективы в программу наблюдений.

3. Результаты

Наблюдения радиальных линий мазера водяного пара вспышечных явлений вблизи 6 и 8 км/с в IRAS 16293 показаны на рис. 1. Интервалы между сборами данных составляли 1—2 дня. Отдельные вспышки в каждом вспышечном явлении как вблизи 6, так и 8 км/с частично перекрывают друг друга. Если мы наблюдали у вспышки, из-за частичного их перекрытия друг другом, только фронт с возрастающей плотностью потока, то мы предполагали, что убывающий наклон изменения плотности потока, который маскируется другой мазерной вспышкой, имеет такую же длительность. В случае обратной ситуации, когда мы видели незаэранированный фронт вспышки с уменьшающейся плотностью потока, длительность вспышки определялась аналогично и считалась равной продолжительности уменьшения плотности потока. Все вспышки для первого явления на лучевой скорости около 6 км/с продолжались шесть месяцев, для второго на лучевой скорости около 8 км/с — два месяца. Полученные данные свидетельствуют о сложном распределении излучающих пятен в мазерном скоплении. Особенно это наблюдается для явления вблизи 6 км/с. Каждое из этих сложных вспышечных явлений состоит из нескольких более коротких вспышек.

Чтобы понять физическую природу этих вспышечных конгломератов, мы использовали спектрально-временной метод исследования. Он основан на одновременном анализе данных мониторинга плотности потока и спектральных данных. На рис. 1 явление вспышки на лучевой скорости около 6 км/с показано синим цветом, а на лучевой скорости 8 км/с — красным. Вспышки первого и второго явления пронумерованы. На рис. 1 также показаны менее мощные вспышки в пределах 1 кЯн, которые присутствуют как на 6, так и на 8 км/с. В данной работе мы их рассматривать не будем, так как это не входит в тему наших исследований. Мы условно разделили первое вспышечное явление на семь более коротких вспышек, а второе — на три. Каждое из рассматриваемых вспышечных явлений содержит еще по одной менее мощной вспышке: Вспышка 8 для явления вблизи 6 км/с и Вспышка 4 для явления вблизи 8 км/с. Вспышка 8 полностью находится под Вспышками 1-7 и короче длительностью, чем общая

продолжительность Вспышек 1-7. Поэтому мы не можем отметить ее положение на рис. 1. Вспышка 4 для явления вблизи 8 км/с почти в семь раз слабее, чем вспышка 8 для явления вблизи 6 км/с, и также находится под более мощными Вспышками 1-3. Наличие Вспышек 8, 4 можно установить только из анализа спектральных данных (рис. 3, 5). Начнем рассмотрение с тех вспышек, которые указаны на рис. 1.

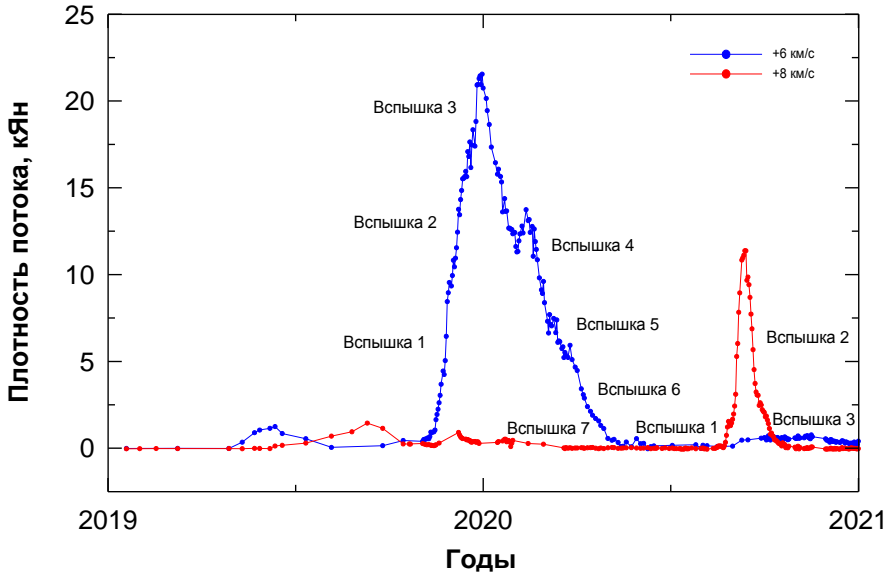


Рис. 1. Мощные вспышечные явления, в IRAS 16293, на частоте около 6 км/с показаны синим цветом и около 8 км/с — красным цветом.

Fig. 1. Powerful flare events, in IRAS 16293, at a frequency of about 6 km/s are shown in blue and about 8 km/s in red

Мощное вспышечное явление около 6 км/с началось с резкого увеличения плотности потока. Продолжительность нарастания плотности потока Вспышки 1 (так мы ее называем) составила около 28 дней (14 дней на уровне половины максимальной плотности потока, рис. 1). Из интерферометрических данных известно, что некоторые мазерные источники имеют размеры в диапазоне 0.5—2 а. е. (например, в *Orion KL*). На самом деле размеры мазерных пятен могут быть меньше, так как имеет место эффект рассеяния в межзвездной среде и в среде, в которой находится сам источник [30]. Если плотность потока вспышек возрастает экспоненциально, то для мазера в ненасыщенном состоянии зависимость ширины линии от плотности потока будет такой, как показано на рис. 2, для вспышек вблизи 6 и 8 км/с (первое и второе явления). Для мазера в ненасыщенном состоянии также предска-

ваются экспоненциальный рост и падение плотности потока во время вспышки вместе с уменьшением ширины линии с ростом плотности потока.

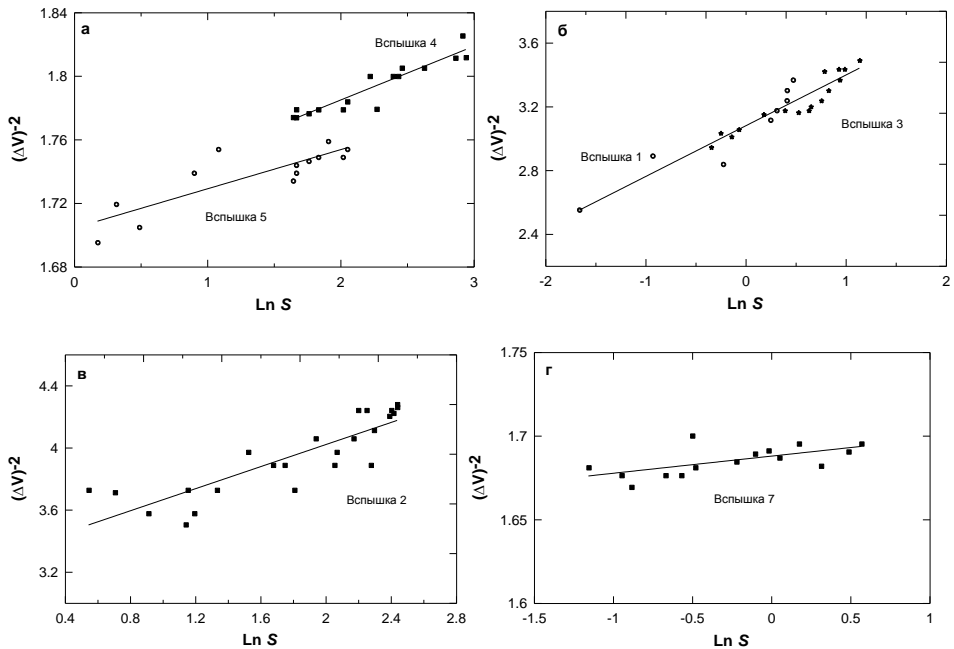


Рис. 2. Зависимость между шириной спектральной линии в степени минус два $(\Delta\nu)^{-2}$ км/с и натуральным логарифмом плотности потока $\ln(S)$ кЯн: (а) Вспышки 4, 5 для явления около 6 км/с, (б) Вспышки 1, 3 для явления около 8 км/с, (в) Вспышка 2 для явления около 8 км/с, (г) Вспышка 7 для явления около 6 км/с. Прямые линии на графике представляют наилучшую аппроксимацию экспериментальных данных. Сплошными квадратами показаны данные для явления около 6 км/с (вспышки 4, 7). Незакрашенными кружками показаны данные для того же явления Вспышки 5. Такие же обозначения используются для явления вблизи 8 км/с для Вспышки 1. Звездочками отмечены данные для Вспышки 3 в том же явлении. Ошибки на графиках имеют размер, сопоставимый с размером символов.

Fig. 2. Dependence between the spectral linewidth to the power of minus two $(\Delta\nu)^{-2}$ km/s and the natural logarithm of the flux density $\ln(S)$ kJy: (a) Flares 4, 5 for an event around 6 km/s, (b) Flares 1, 3 for the phenomenon of about 8 km/s, (c) Flare 2 for the phenomenon of about 8 km/s, (d) Flare 7 for the phenomenon of about 6 km/s. The straight lines on the graph represent the best approximation of the experimental data. Solid squares show data for the phenomenon at about 6 km/s (flares 4, 7). Open circles show data for the same Flare 5 event. The same notation is used for the event near 8 km/s for Flare 1. Asterisks indicate data for Flare 3 in the same event. Errors on the charts have a size comparable to the size of the symbols

Мы получили наилучшие аппроксимации полученных данных прямыми линиями (рис. 2) и соотношение описывает экспериментальную зависимость [31]:

$$1/(\Delta v)^2 = a + b \cdot \ln S, \quad (1)$$

где Δv — полуширина линии H_2O (полная ширина на половине максимальной плотности потока), S — плотность потока мазерной линии воды, a, b — коэффициенты (табл. 1, 2). Вычисленная ошибка Δv не превышает разрешения по скорости, полученной нами в каждом наблюдении (от 0.03 до 0.1 км/с). Рассчитанные σ (*rms*) аппроксимации равны соответственно: для Вспышки 1 — 0.098, Вспышки 3 — 0.235, Вспышки 4 — 0.007, Вспышки 5 — 0.033, Вспышки 7 — 0.007. В табл. 1, 2 приведены параметры вспышек для обоих вспышечных явлений.

Таблица 1. Характеристики вспышек для 6 км/с.

Table 1. Characteristics of flares for 6 km/s

Вспышка	S_{\max} кЯн	$\Delta v_{\text{измеренное}}$ км/с	$T_{\text{К}}, \text{измеренное}$ (К)	$\Delta v_{\text{модель}}$ в S_{\max} км/с	$T_{\text{К}}, \text{модель}$ (К)	Коэффициенты a, b
1	9.5	0.63	150	0.75	245	a=1.52, b = 0.11
2	16.0	0.62	146	0.75	242	a = -0.05, b = 0.12
3	22.0	0.63	150	0.64	178	a = -0.01, b = 0.77
4	13.5	0.63	150	0.74	238	a = 1.72, b = 0.034
5	7.5	0.62	146	0.75	245	a = 1.70, b = 0.025
6	5.0	0.64	155	0.75	245	a = 1.76, b = 0.01
7	2.5	0.63	150	0.60	173	a = 1.69, b = 0.01
8	4.0	2.8	2980			

Таблица 2. Характеристики вспышек для 8 км/с.

Table 2. Characteristics of flares for 8 km/s

Вспышка	S_{\max} кЯн	$\Delta v_{\text{измеренное}}$ км/с	$T_{\text{К}}, \text{измеренное}$ (К)	$\Delta v_{\text{модель}}$ в S_{\max} км/с	$T_{\text{К}}, \text{модель}$ (К)	Кoeffициенты a, b
1	1.8	0.59	132	0.55	115	a = 3.10, b = 0.33
2	11.5	0.60	139	0.50	95	a = 3.08, b = 0.32
3	2.5	0.61	141	0.56	119	a = 3.31, b = 0.36
4	0.6	2.8	2980			

Из анализа параметров (табл. 1, 2) можно сделать новые важные выводы. Вспышки в обоих вспышечных явлениях (около 6 и 8 км/с) хорошо аппроксимируются линейными зависимостями, представленными для ненасыщенных мазеров (рис. 2). Ширины линий, измеренные непосредственно по спектрам наблюдений и определенные по модельным зависимостям, совпадают в пределах ошибок. Менее мощные вспышки в обоих случаях (Вспышка 8 для явления около 6 км/с и Вспышка 4 для явления около 8 км/с) не имеют суженных спектральных линий, а значит, скорее всего, относятся к насыщенным мазерам. В некоторых случаях степень

сужения линии у ненасыщенных мазеров составляет 4.75 раза. Это тоже важный результат, так как он показывает, что обнаруженное сужение близко к теоретически предельному (в 5—6 раз) [32]. Тот факт, что это фиксируется для линий разной амплитуды, также является новым результатом. Кинетические температуры для насыщенных линий в обоих случаях близки к 3000 K (см. уравнения 2), что обеспечивает высокую степень ионизации и необходимую населенность сигнальных уровней при вращательных переходах молекулы воды. Это также можно считать одним из важнейших из полученных результатов. Приведем формулу для определения кинетической температуры H_2O [33]:

$$\Delta v_{\text{H}_2\text{O}}/v_{\text{H}_2\text{O}} = 2[2(\ln 2)(kT_k)/(m_{\text{H}_2\text{O}} \times c^2)]^{1/2} \approx 1.7 \times 10^{-7} T_k^{1/2}, \quad (2)$$

где $v_{\text{H}_2\text{O}}$ — центральная частота мазера воды, $\Delta v_{\text{H}_2\text{O}} = \Delta v_{\text{measur}} = \Delta v_{\text{H}_2\text{O}}/\lambda_{\text{H}_2\text{O}}$, $\lambda_{\text{H}_2\text{O}}$ — длина волны молекулы H_2O , T_k — кинетическая температура молекулы H_2O , $m_{\text{H}_2\text{O}}$ — масса молекулы H_2O .

Ультракороткая, достаточно мощная Вспышка 1 (около 2 кЯн), продолжительностью около 4—5 дней, была обнаружена для явления около 8 км/с (рис. 1). Это в десять раз меньше продолжительности Вспышки 2 того же вспышечного явления. Мазерные пятна, ответственные за эти вспышки, скорее всего, расположены в одном мазерном скоплении, а значит, их размеры можно сравнивать друг с другом. Их размеры также отличаются в десять раз. Это первый достоверный случай, когда удалось зарегистрировать одинаковые плотности потоков от мазерных образований, различающихся по размерам в 10 раз (10^3 по объему). Это тоже важный вывод. Ведь агент, инициирующий мазерное излучение в данный интервал времени, вероятно, один и тот же для обеих вспышек.

Каждое из регистрируемых вспышечных явлений мощностью около 6 и 8 км/с состоит из нескольких коротких вспышек, каждая из которых длится менее месяца. В первом явлении около 6 км/с, начало Вспышки 1 сопровождается резким увеличением спектральной плотности потока. Плотность потока трех первых вспышек экспоненциально возрастает. Они частично перекрывают друг друга. Падение плотности потока вспышек 4, 5, 6, 7 также происходит экспоненциально.

Можно отметить, что во вспышечном явлении около 6 км/с, помимо семи вспышек есть еще одна (Вспышка 8), менее мощная, но более продолжительная, полуширина линии которой в несколько раз больше, чем у каждой из семи вспышек. Ее амплитуда составляет около 4.0 кЯн. Вспышка 8 более заметна на низких значениях плотности потока. Спектры Вспышек 3, 8 показаны на рис. 3. Все остальные семь вспышек появляются поверх Вспышки 8, которая создает для них спектральную плотность

входного потока около 4 кЯн. Мазеры воды семи коротких мощных вспышек находятся в ненасыщенном состоянии, в то время как более длинная Вспышка 8 находится в насыщенном состоянии. Состояние мазера Вспышки 8 подтверждается наличием широкой линии, которая не сужена, как в случае ненасыщенного мазера. Реализуется ситуация, когда мощные вспышки водного мазера происходят из-за увеличения длины накачки мазера при наличии каскадного усиления и инициируются вспышками насыщенного мазера воды.

Во втором явлении около 8 км/с сначала началась сверхкороткая Вспышка 1 длительностью около четырех дней на уровне половины максимальной плотности потока 1.8 кЯн (рис. 1). Более мощная Вспышка 2 с максимальной плотностью потока $S_{\max} = 11.5$ кЯн и продолжительностью около 15 дней сопровождалась менее мощной Вспышкой 3 с амплитудой около 2.5 кЯн и длительностью около 40 суток на уровне половины максимальной плотности потока S_{\max} .

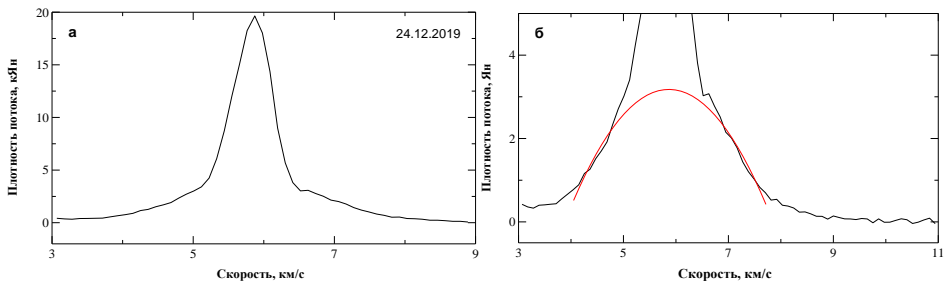


Рис. 3. Спектры Вспышек 3, 8 для явления около 6 км/сек:

- (а) Вспышка 3 показана при максимальной плотности потока, Вспышка 8,
- (б) Вспышка 8 аппроксимирована красной линией. Даты вспышек совпадают.

Fig. 3. Spectra of Flares 3, 8 for an event of about 6 km/sec:

- (a) Flare 3 is shown at the maximum flux density, Flare 8,
- (b) Flare 8 is approximated by a red line. Outbreak dates match

Спектры Вспышек 1 и 3 вблизи 8 км/с показаны на рис. 4.

Как и в случае первого вспышечного явления вблизи 6 км/с, второе вспышечное явление вблизи 8 км/с имеет менее мощную Вспышку 4 с амплитудой около 0.6 кЯн (рис. 5).

Вспышка 4 также является основной для трех других вспышек в явлении около 8 км/с. Вспышка 4 становится заметной также при малых значениях плотности потока (масштаб оси ординат на рис. 5 увеличен примерно на порядок). Центральные частоты трех линий (вспышек 1, 2, 3) находятся в пределах 0.1 км/с, а центральные частоты трех линий (вспышек 4, 5, 6) — в пределах 0.04 км/с (табл. 3).

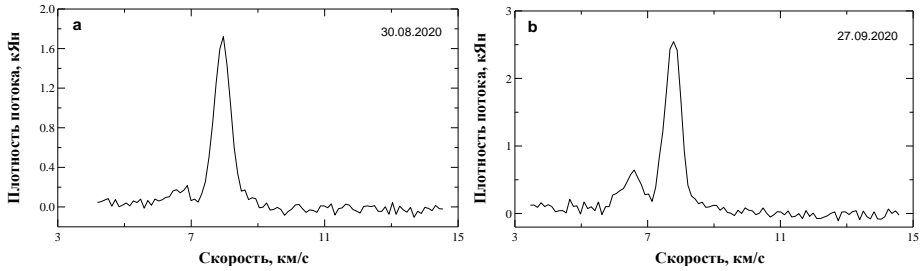


Рис. 4. Спектры мазерных линий вблизи 8 км/с: а) для Вспышки 1, б) для Вспышки 3.

Fig. 4. Spectra of maser lines near 8 km/s: а) for Flare 1, б) for Flare 3

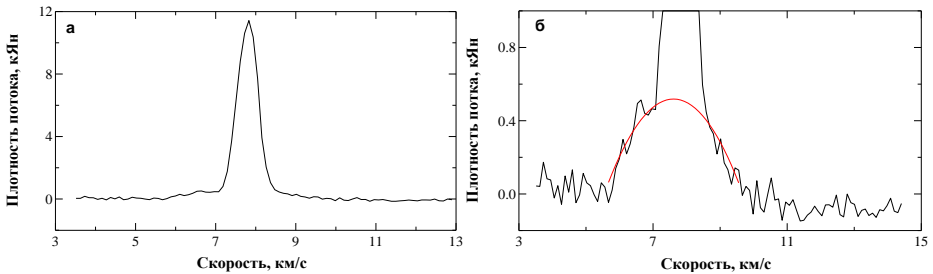


Рис. 5. Линии спектра воды вблизи 8 км/сек для Вспышки 2 (а) и Вспышки 4 (б). Амплитуда (11.5 кЯн) и локализация (7.76 км/с). Амплитуда (0.6 кЯн) и локализация (7.61 км/с) Вспышка 4 получены путем аппроксимации кривой Гаусса (красная линия) к спектральной линии.

Fig. 5. Lines of the water spectrum near 8 km/sec for Flare 2 (а) and Flare 4 (б).

Amplitude (11.5 kJy) and localization (7.76 km/s). The amplitude (0.6 kJy) and localization (7.61 km/s) of Flare 4 were obtained by fitting the Gaussian curve (red line) to the spectral line

4. Дискуссия

Каждое из двух мощных вспышечных явлений, которые мы обнаружили в IRAS 16293 вблизи 6 и 8 км/с, образованы несколькими мазерными пятнами на луче зрения наблюдателя. В каждом случае мы видим, что есть два типа вспышек с разным состоянием мазера — насыщенные и ненасыщенные. Признаки состояния водного мазера могут выражаться как в поведении формы и ширины линий во время вспышек, так и самих характеристиках вспышек. Стандартная теория мазерных линий предсказывает их сужение во время процесса ненасыщенного усиления и расширение до полной доплеровской ширины в процессе насыщенного усиления [33]. В последнем случае можно оценить верхний предел T_k , так как существует еще дополнительное уширение линии за счет макроскопических движений массы веще-

ства в источнике и наличия сверхтонкой структуры линии, которая состоит из трех линий на интервале около 1 км/с. По поведению ширин линий во время вспышек вблизи 6 и 8 км/с, можно понять, что мазеры всех мощных коротких вспышек (1-7) около 6 км/с и вспышек (1-3) вблизи 8 км/сек находились в ненасыщенном состоянии. Все эти вспышки аппроксимируются линейными зависимостями (уравнение 1), что соответствуют теоретическим предсказаниям для ненасыщенного состояния мазера воды. Для них мы наблюдаем уменьшение ширины линии с увеличением плотности потока.

Если говорить о форме спектральных линий во время вспышек, то можно отметить еще одну особенность поведения линий во время вспышек мазера в ненасыщенном состоянии. Имеется в виду отклонение от гауссовой формы линии в ее крыльях [34]. Определение состояния насыщения мазера по форме линии требуют точных измерений интенсивности в его далеких крыльях [35]. По мере удаления от центра линии ее форма все больше отличается от гауссовой. На расстоянии трех полуширин линии эта разница может достигать 50 %. Этому анализу, однако, мешают некоторые обстоятельства. Во-первых, необходимо иметь очень высокое отношение сигнал/шум. Кроме того, форма линии может быть искажена смешиванием излучения от нескольких источников, находящихся на луче зрения наблюдателя. Искажающий эффект усиливает и сверхтонкая структура линии. Тем не менее, больше всего неприятностей в нашем случае происходит из-за сложной структуры вспышечных явлений вблизи 6 км/с и 8 км/с. Каждый раз мы наблюдаем появление мощной ненасыщенной мазерной вспышки на вершине более слабой вспышки, предположительно насыщенного мазера. В такой ситуации можно рассматривать только спектральную информацию.

Есть еще одно важное указание на состояние мазера во время вспышки. Это относится к изменению амплитуды самой вспышки. Теория мазерного излучения предсказывает закон изменения амплитуды вспышки во время насыщенного и ненасыщенного состояния мазера. Когда скорость излучательных переходов, стимулирующая рост мазерного излучения, становится сравнимой с интенсивностью накачки, уравнение для разности населенности уровней может быть представлено в виде [36]:

$$\Delta N \approx \Delta N_0 / [1 + (J_{12} / J_s)], \quad (3)$$

где ΔN — разность населенностей уровней, ΔN_0 — разность населенностей популяций при ненасыщенном мазере, J_{12} — интенсивность излучения, усредненная по направлениям и частотам внутри линии, J_s — «интенсивность насыщенного мазера. Для интенсивности мазера имеем

$$dI \propto \Delta N \cdot I \cdot ds,$$

где ds — дифференциал длины пути. Когда мазер находится в ненасыщенном состоянии, то $\Delta N = \Delta N_0$ (ΔN не зависит от I), что дает $dI/I = \text{const} \cdot ds$ и экспоненциальный рост интенсивности. В случае насыщения (значение J_{12} значительно больше J_s), ΔN становится обратно пропорциональным J_{12} и, зависимость dI от I исчезает. С учетом соотношения $\Delta N_0 \approx (\Lambda_2 - \Lambda_1)/(\Gamma + C)$, получим линейное усиление, пропорциональное скорости накачки —

$$dI \propto (\Lambda_2 - \Lambda_1).$$

В приведенных соотношениях Λ_2 , Λ_1 , Γ , C являются коэффициентами.

Возвращаясь к нашему случаю анализа вспышечных явлений, можно отметить, что для вспышек (1-7 явления 6 км/с) и для вспышек (1-3 явления 8 км/с) существуют основные особенности мазеров в ненасыщенных состояниях: сужение линии во время вспышек и экспоненциальный рост и падение интенсивности. Для Вспышки 8 вблизи 6 км/с и Вспышки 4 на 8 км/с есть признаки того, что их мазеры насыщены. Это определяется их значительно более широкими линиями — 2.8 км/с, что совпадает с ширинами линий, предсказанными для насыщенных мазеров [37, 38]. В случае насыщенного мазера ширина линий определяется кинетической температурой молекул H_2O . В нашем случае насыщенных вспышек T_k практически одинаковы в двух разных областях и достаточно высоки, чтобы инициировать сильные вспышки ненасыщенного мазера. Таким образом, насыщенные мазеры всегда играют ключевую роль в формировании ненасыщенных мазеров.

Возникает естественное предположение, что все мощные коротковолновые мазерные вспышки «сконструированы» подобным образом. Но ситуация может быть еще более сложной. Во втором вспышечном явлении вблизи 8 км/с, на вершине ультракороткой Вспышки 1, мазер которой находится в ненасыщенном состоянии, возникает мощная короткая Вспышка 2 (рис. 1), которая еще подпитывается и излучением Вспышки 4 с насыщенным состоянием мазера (рис. 5).

Более глубокий анализ данных для вспышек около 6 км/с показывает, что имеются две группы мазерных пятен с заметной разницей лучевых скоростей (табл. 3). Первая группа вспышек (1-3) имеет близкие лучевые скорости со средним значением 5.88 км/с. Вторая группа вспышек (4-7) также имеет близкие лучевые скорости со средним значением 6.05 км/с.

Разница в лучевых скоростях между этими двумя группами составляет около 8σ (*rms*) (среднеквадратичных значений) (табл. 3). Это очень важный результат, который необходимо понять и объяснить. Одно из воз-

можных объяснений состоит в том, что мазерные пятна сгруппированы в двух скоплениях, которые движутся по своим орбитам вокруг некоторого центра тяжести. В этом случае мазерные пятна (вспышки 1-7) могут располагаться перед мазерным пятном, ответственным за вспышку 8 насыщенного мазера. Изменение в лучевой скорости Вспышки 8 (0.06 км/с) также имеет место, но в гораздо меньшей степени. Возможно, эта мазерная конденсация находится на другой орбите и имеет другую лучевую скорость. Таким образом, полученные результаты могут косвенно свидетельствовать об орбитальных движениях мазерных пятен вокруг общего центра тяжести.

Таблица 3. Скорости спектральных линий Вспышек 1-7 для явления около 6 км/с и скорости линии Вспышки 8 при прохождении каждой из Вспышек 1-7.

Table 3. Velocities of the spectral lines of Flares 1-7 for the phenomenon of about 6 km/s and the velocity of the Flare 8 line during the passage of each of the Flares 1-7

Вспышка	$v_{\text{центральная}}$ км/с	$v_{\text{Вспышки 8}}$ км/с	Вспышка	$v_{\text{центральная}}$ км/с	$v_{\text{Вспышки 8}}$ км/с
1	5.90±0.015	5.95±0.017	4	6.05±0.016	5.87±0.014
2	5.86±0.014	5.96±0.016	5	6.07±0.015	5.87±0.015
3	5.87±0.012	5.92±0.018	6	6.03±0.013	5.90±0.017
			7	6.04±0.025	not visible
$\Sigma/n, \sigma$	5.88±0.02	5.94±0.02	$\Sigma/n, \sigma$	6.05±0.02	5.88±0.02

Примечание: $v_{\text{центральная}}$ — радиальная скорость вспышки, $v_{\text{Вспышки 8}}$ — лучевая скорость вспышки 8 при максимальной плотности потока каждой из вспышек, $\Sigma/n, \sigma$ — средние значения скоростей линий и их среднеквадратические ошибки.

Мощные вспышки водного мазера имеют большое значение для понимания физических процессов генерации мазеров и могут обеспечить сильные ограничения на возможную модель генерация излучения. Эффективность мазера зависит от схемы накачки и типа поглотителя энергии. Мощные вспышки объясняются столкновительным механизмом накачки во вращательных уровнях (CCr), т. к. возникают трудности с другими механизмами накачки, в частности, с радиационными [39, 40]. Механизм накачки мазера CCr за фронтом ударной волны был предложен в работе [32, 41], где сверхзвуковые истечения газа из молодых звезд и их взаимодействия с окружающими газовыми облаками создают сверхзвуковые ударные волны, необходимые для накачки мазера. Более подробно эта тема рассмотрена в работе [28].

В случае протозвезд класса 0 остается открытым вопрос об источниках первичного энерговыделения, обеспечивающего накачку мощных мазеров воды. Отсутствие информации об этих источниках, в том числе, связана с большим молекулярным поглощением в плотных облаках, где лока-

лизованы протозвезды. Кроме того, отсутствуют одновременные данные мониторинга, получаемых с помощью одиночных радиотелескопов и глобальных интерферометров.

Важнейшим вопросом является локализация мазерных пятен, вызывающих такие мощные кратковременные вспышки мазера. При этом совершенно не обязательно, чтобы мазерные пятна, ответственные за вспышки вблизи 6 и 8 км/с, находились в одних и тех же газовой-пылевых образованиях, например, в дисках вокруг протозвезд. Известно, что в IRAS 16293 существует как минимум два таких диска ($A1$, $A2$) с расстоянием между ними около 50 а. е. [22]. Эти диски разного размера, и если на них расположены мазерные пятна, то они будут двигаться с разными лучевыми скоростями. В случае дисков $A1$ и $A2$ эти скорости не превышают 20 и 9 км/с. Лучевые скорости относительно LSR для них составляют 2.1 и 5.8 км/с соответственно. Мы не можем указать вариант локализации мазерных пятен, так как не имеем интерферометрических данных во время этих вспышечных явлений. Однако следует использовать имеющиеся интерферометрические данные о точном положении мазерных источников, полученные в другие эпохи.

Как уже говорилось, мазерные пятна, ответственные за вспышки вблизи 6 и 8 км/с, могут быть пространственно не связаны друг с другом. Дзиб и др. [11] проанализированы 15 интерферометрических сеансов, проведенных в 2005—2006 гг. с массивами ланнх, полученных на РСДБ (VLBA) в рамках проекта BC152 (*PI: M. Claussen*), направленного на уточнение расстояния до объекта путем определения тригонометрического параллакса источников мазерного излучения в линии H_2O . Они обнаружили единственную мазерную линию воды, которая присутствовала во всех 15 эпохах наблюдений, разделенных временем около 7 месяцев. Это было мазерное излучение с лучевой скоростью ≈ 6.1 км/с [11]. Если это та же линия, что и в нашем случае, то существенных изменений лучевой скорости она не претерпела. Разрешение интерферометрических наблюдений составляло 0.2 км/с. (*Dzib* и др.). *Imai* также обнаружил излучение в своих РСДБ-наблюдениях (*VERA*), которые проводились с 2005 по 2006 год вблизи скорости 6.0 км/с с $Sv \sim 2$ Ян, что может соответствовать излучению, обнаруженному на радиальной скорости ≈ 6.1 км/с [24]. Дзиб и др. [11] обнаружили, что расстояние между мазерными пятнами $A1$ и $A2$ составляет около 140 а. е. Иными словами, обнаруженные ими и нами вспышки вблизи 6 км/сек не связаны с мазерными пятнами в дисках вокруг протозвезд. Это новый и крайне важный вывод.

Наши данные также дополняют эту картину новыми и важными деталями. Мазерное излучение со скоростью около 6 км/с состоит из сово-

купности излучений 8 вспышек от мазерных пятен, возможно, находящихся в одном или двух мазерных скоплениях и локализованных на прямой видимости к наблюдателю. Плотность мазерных пятен в скоплении настолько велика, что излучения мазерных пятен частично перекрывают друг друга. Это мы видим на рис. 1. При переходе от излучения одного пятна к другому скорости деталей изменяются в диапазоне 0.2 км/с от 5.87 до 6.07 км/с (табл. 3).

Это совершенно новая информация, которая ставит перед исследователями новые вопросы. Во-первых, почему излучение около 6 км/сек сохраняется на одних и тех же скоростях в течение столь длительного времени, с 2005 по 2020 год? Кроме того, если это излучение связано с выбросами из звезды, то как можно объяснить такое постоянство скорости? Вопрос о том, где расположены водные мазеры, ответственные за мощное излучение около 6 км/сек, по-прежнему остается без ответа, учитывая отсутствие обнаруженного источника в указанной позиции в направлении на *IRAS 16293*, полученное в наблюдениях с большой миллиметровой/субмиллиметровой антенной решеткой (*ALMA*) на длине волны 3 мм [22]. Это означает, что мазеры тоже могут двигаться вокруг общего центра тяжести, находясь, в первом приближении, на расстоянии 140 а. е. от его центра. Их местонахождением может быть зарождающийся протопланетный газово-пылевой диск. В то же время, нельзя исключать вариант, при котором мы не видим рядом с нашими мазерными пятнами маломассивную протозвезду солнечной массы, скрытую от наших глаз плотным молекулярным облаком, обладающим заметным поглощением даже в инфракрасном диапазоне. Для случая молодых звезд малых (солнечных) масс Стрельницкий рассмотрел модель, основанную на представлении об образовании планетных систем вокруг этих молодых звезд [42].

Если таких протозвезд вообще нет, то, для случая зарождающихся протопланет, можно найти скорости наших мазеров, движущихся по орбите вокруг общего центра масс 4 M_{\odot} . Для расстояния от центра 140 а. е. получим $v = 5.1$ км/с. Система *A1*, *A2* имеет регулярную скорость относительно *LSR*, равную ≈ 4 км/с [22]. С учетом неопределенностей в массе комплекса *IRAS 16293* и скорости общего центра масс относительно *LSR* лучевые скорости деталей могут варьироваться в пределах 1—10 км/с. Следовательно, нельзя исключать такую возможность локализации рассматриваемых мазеров воды.

Теперь объясним, почему мы не видим заметного изменения лучевых скоростей деталей вблизи 6 км/с за время 15 лет. Период обращения нашей предполагаемой системы, полученный на основе законов небесной механики, составляет около тысячи лет. За 15 лет система совершит всего

1.5 % целого оборота. В принципе, величину изменения лучевой скорости деталей при таком вращении при наличии более высокого, чем сейчас, разрешения интерферометрических наблюдений, можно было бы зафиксировать. Однако об этом стоит подумать в будущем.

В случае мазерных вспышек вблизи 8 км/с мы не обнаружили изменений скоростей спектральных линий вспышек на временном интервале 40 дней на уровне ошибок наблюдений (~0.1 км/с). Остается открытым и вопрос локализации этих мазеров.

Остается неясным также другой важный вопрос: что инициирует мазерное излучение в удаленном от протозвезд газопылевом облаке? Вариант активации мазера, связанный с аккрецией окружающего вещества на протозвездный объект, не является предпочтительным, так как наши детали вблизи 6 км/с очень далеки от *A1* и *A2*. Остается предположить, что мазерные пятна расположены внутри плотного массивного газово-пылевого ядра и каждое из них движется по своей орбите вокруг общего центра масс.

Помимо истечения материи из звезд инициатором мазерного излучения может быть мелкомасштабная турбулентность. В турбулентной среде могут возникать сильные мазеры воды. Эту среду можно рассматривать как реальный источник столкновительной накачки мазера («по крайней мере, в низкоскоростной части спектра») [43—45]. Мазеры H_2O могут возникать в областях звездообразования из-за регулярных движений турбулентного газового и пылевого вещества во время его расширения или сжатия и вращения вокруг протозвезд. Турбулентность может дать энергию для столкновительной накачки с использованием мелкомасштабных стохастических сверхзвуковых ударных волн. Первичным источником энерговыделения в этом случае является гравитационный за счет сжимающего газопылевого облака больших размеров 6000—8000 а. е. Стрельницкий и др. смоделировали рассматриваемый метод столкновительной накачки мазеров воды, используя данные наблюдений известных галактических источников *W49N*, *W3(OH)*, *Sgr B2 (M)* [44].

Совокупность рассмотренной информации позволяет сделать важные выводы, не противоречащие нашим данным: мазеры могут существовать как в насыщенном, так и в ненасыщенном состоянии при возникновении сложных мощных вспышечных явлений. В насыщенном режиме появляется большое количество пятен сопоставимой яркости. Насыщенные мазеры имеют меньшую плотность потока, чем ненасыщенные. Более многочисленные насыщенные мазеры могут инициировать излучение ненасыщенных мазерных пятен, находящихся вдоль луча зрения наблюдателя. Для нашего случая это означает, что существует повышенная вероятность того, что насыщенный мазер инициирует своим излучением ненасыщен-

ные мазеры. Для нашего мазера воды около 8 км/с обнаружен еще и эффект инициирования мощной мазерной Вспышки 2 ультракороткой ненасыщенной вспышкой 1, обеспечивающей Вспышке 2 входной поток около 2 кЯн. Это свидетельствует о том, что для эффективной работы водяного мазера при создании мощных вспышек требуется высокий уровень входного потока, а отсутствие сужения спектральной линии мазера во время вспышки является важным показателем насыщенного состояния мазера.

Необычная структура анализируемых сложных вспышечных явлений имеет важные общие черты с другими вспышками, обнаруженными нами в другом галактическом источнике *W49N* (вблизи -60 и -81 км/с, [46, 47]). Как и в нашем случае, мощные короткие вспышки происходили поверх менее мощных, но более продолжительных, длительность которых была примерно такой же, как у вспышек в *IRAS* вблизи 6 и 8 км/с. Во всех случаях наблюдались и другие основные параметры вспышек, характерные для ненасыщенного мазера — экспоненциальный рост и спад плотности потока, а также зависимость $\Delta\nu$ от $\ln S$. Во всех случаях основой были более продолжительные, но менее мощные вспышки насыщенных мазеров.

Полученные нами новые данные для рассматриваемых явлений мазерных вспышек очень важны. Они вероятно, подтверждают сделанные на ранних этапах изучения мазера воды предположения о состоянии мазера в мазерных скоплениях [48], что формулируется следующим образом: мазерный кластер может одновременно содержать мазерные образования как в ненасыщенном, так и в насыщенном состояниях.

5. Выводы

1. Проведены детальные наблюдения в течение двух лет мазера воды малоассивного протозвездного объекта *IRAS 16293-2422*.

2. Обнаружены необычные мощные вспышечные явления вблизи 6 и 8 км/с, состоящие из отдельных вспышек мазера воды и исходящих из мазерных пятен, расположенных близко друг к другу и находящихся в близких мазерных скоплениях.

3. Короткие мощные мазерные вспышки возникали на вершинах более длинных, но менее мощных вспышек, которые инициировали возникновение более коротких и более мощных вспышек. В отдельном случае дополнительно таким мощным инициатором мазерного излучения была ультракороткая вспышка ненасыщенного мазера воды.

4. Установлено также, что для возникновения мощных вспышек необходим достаточно высокий (более 0.5 кЯн) входной поток в мазерное образование.

5. Получены важные физические параметры вспышек мазера в *IRAS 16293-2422*: состояния мазера во время вспышек, амплитуды вспышек, ширины мазерных линий и кинетические температуры. Установлено наличие каскадного усиления мазера в случаях возникновения мощных коротких вспышек.

6. С учетом представленных обоснований можно предположить существование кластерной структуры мазерных пятен, внутри которой находятся как насыщенные, так и ненасыщенные мазеры. Насыщенные мазеры могут играть важную роль в создании необходимого входного потока для появления мощных ненасыщенных мазеров.

7. Обсуждена возможная локализация мазеров вблизи 6 и 8 км/с в пределах молодого газопылевого комплекса *IRAS 16293-2422*.

8. Работа содержит новые подробные наблюдательные данные вспышек, самая короткая из которых длилась всего около 4 суток. Впервые удалось интерпретировать сложное вспышечное явление и определить физические характеристики отдельных вспышек.

Благодарности

Авторы признательны правительству Российской Федерации и Министерству науки и высшего образования РФ за поддержку по гранту 075-15-2020-780 в части обработки и анализа данных PT-22.

Список литературы

1. Abt H. A., Gomez A. E., Levy S. C. The Frequency and Formation Mechanism of B2—B5 Main-Sequence Binaries // *ApJS*. 1990. Vol. 74, No. 2. P. 551—573.
2. Duquennoy A., Mayor M. Multiplicity among solar-type stars in the solar neighbourhood. II — Distribution of the orbital elements in an unbiased sample // *A&A*. 1991. Vol. 248. P. 485—524.
3. A Survey of Stellar Families : Multiplicity of Solar-Type Stars / D. Raghavan, H. A. McAlister, T. J. Henry [et al.] // *ApJS*. 2010. Vol. 190, No. 1. P. 1—42.
4. Padoan P., Nordlund A. The Stellar Initial Mass Function from Turbulent Fragmentation // *A&A*. 2002. Vol. 576, No. 2. P. 870—879.
5. Mac Low M., Klessen R. Control of star formation by supersonic turbulence // *Reviews of Modern Physics*. 2004. Vol. 76, Iss. 1. P. 125—194.
6. From filamentary clouds to prestellar cores to the stellar IMF : Initial highlights from the Herschel Gould Belt Survey / P. André, A. Men'shchikov, S. Bontemps [et al.] // *A&A*. 2010. Vol. 518. Id. L102. 7 p.
7. SMA Observations of Class 0 Protostars : a High Angular Resolution Survey of Protostellar Binary Systems / X. Chen, H. G. Arce, Q. Zhang [et al.] // *ApJ*. 2013. Vol. 768. 31 p.
8. The VLA/ALMA Nascent Disk and Multiplicity (VANDAM) Survey of Orion Protostars. II. A Statistical Characterization of Class 0 and Class I Protostellar Disks / J. J. Tobin, P. D. Sheehan, S. T. Megeath [et al.] // *ApJ*. 2020. Vol. 890. 93 p.
9. Spectroscopic Evidence for Infall around an Extraordinary IRAS Source in Ophiuchus / C. K. Walker, C. J. Lada, E. T. Young [et al.] // *ApJ*. 1986. Vol. 309. P. L47—L51.

10. Physical conditions in the IRAS 16293-2422 parent cloud / K. M. Menten, E. Serabyn, R. Guesten, T. L. Wilson // *A&A*. 1987. Vol. 177, No. 1-2. P. L57—L60.
11. A revised distance to IRAS 16293-2422 from VLBA astrometry of associated water masers / S. A. Dzib, G. N. Ortiz-León, A. Hernandez-Gomez [et al.] // *A&A*. 2018. Vol. 614. Id. A20. 12 p.
12. The solar type protostar IRAS16293-2422: new constraints on the physical structure / N. Crimier, C. Ceccarelli, S. Maret [et al.] // *A&A*. 2010. Vol. 519. Id. A65. 13 p.
13. The ALMA-PILS survey : 3D modeling of the envelope, disks and dust filament of IRAS 16293-2422 / S. K. Jacobsen, J. K. Jørgensen, M. H. D. van der Wiel [et al.] // *A&A*. 2018. Vol. 612. Id. A72. 20 p.
14. Discovery of Seven Bipolar Outflows by an Unbiased Survey / Y. Fukui, K. Sugitani, H. Takaba [et al.] // *ApJL* 1986. Vol. 311. L85—L88.
15. Wootten A. The Duplicity of IRAS 16293-2422: A Protobinary Star? // *ApJ*. 1989. Vol. 337, No. 2. P. 858—864.
16. IRAS 16293-2422 : Proper Motions, Jet Precession, the Hot Core, and the Unambiguous Detection of Infall / C. J. Chandler, C. L. Brogan, Y. L. Shirley, L. Loinard // *ApJ*. 2005. Vol. 632, No. 1. P. 371—396.
17. ALMA CO J = 6—5 observations of IRAS 16293-2422 : Shocks and entrainment / L. E. Kristensen, P. D. Klaassen, J. C. Mottram [et al.] // *A&A*. 2013. Vol. 549. Id. L6. 7 p.
18. Kinematics of the Circumstellar Gas of HL Tauri and R Monocerotis / A. I. Sargent, S. Beckwith // *ApJ*. 1987. Vol 323. P. 294—305.
19. Sub-arcsecond [Fe II] spectro-imaging of the DG Tauri jet — Periodic bubbles and a dusty disk wind? / V. Agra-Amboage, C. Dougados, S. Cabrit, J Reunanen // *A&A*. 2011. Vol. 532 Id. A59. 15 p.
20. Water around IRAS 15398-3359 observed with ALMA / P. Bjerkeli, J. K. Jørgensen, E. A. Bergin [et al.] // *A&A*. 2016. Vol. 595. Id. A39. 8 p.
21. Wootten A. The Duplicity of IRAS 16293-2422: A Protobinary Star? // *ApJ*. 1989. Vol. 337. P. 858—864.
22. Orbital and Mass Constraints of the Young Binary System IRAS 16293-2422 A / M. J. Maureira, J. E. Pineda, D. M. Segura-Cox [et al.] // *ApJ*. 2020. Vol. 897. Id. 59.
23. Imai H., Iwata T., Miyoshi M. Rotation-Infall Motion around the Protostar IRAS 16293-2422 Traced by Water Maser Emission // *PASJ*. 1999. Vol. 51, No. 4. P. 473—477.
24. Astrometry of H₂O Masers in Nearby Star-Forming Regions with VERA I. IRAS 16293-2422 in ρ Oph East / H. Imai, K. Nakashima, I. Bushimata [et al.] // *PASJ*. 2007. Vol. 59, No. 6. P. 1107—1113.
25. Modelling the abundance structure of isocyanic acid (HNCO) towards the low-mass solar type protostar IRAS 16293-2422 / A. Hernández-Gómez, E. Sahnoun, E. Caux [et al.] // *MNRAS*. 2019. Vol. 483, Iss. 2. P. 2014—2030.
26. The ALMA-PILS survey : gas dynamics in IRAS 16293-2422 and the connection between its two protostars / M. H. D. van der Wiel, S. K. Jacobsen, J. K. Jørgensen [et al.] // *A&A*. 2019. Vol. 626. Id. A93. 27 p.
27. New Radio Sources and the Composite Structure of Component B in the Very Young Protostellar System IRAS 16293-2422 / L. Loinard, C. J. Chandler, L. F. Rodríguez [et al.] // *ApJ*. 2007. Vol. 670. P. 1353.
28. Volvach A., Volvach L., Larionov M. Composite powerful short flare of water maser emission in IRAS 16293-2422 // *MNRASL*. 2021. Vol. 507, No. 1. P. L52—L56.
29. Радиометр на частоту 22 ГГц для международной РСДБ станции СИМЕИЗ / Н. С. Нестеров, А. Е. Вольвач, И. Д. Стрелка [и др.] // *Радиофизика и радиоастрономия*. 2000. Т. 5, № 3. С. 320—322.

30. An Interferometer Map of the Water-Vapor Sources in W49 / K. J. Johnston, S. H. Knowles, W. T. I. Sullivan [et al.] // *ApJ*. 1971. Vol. 166. L21—L26.
31. Powerful bursts of water masers towards G25.65+1.05 / A. Volvach, L. Volvach, M. Lari-onov [et al.] // *MNRASL*. 2019. Vol. 482, Iss. 1. P. L90—L92.
32. Collisional pumping of a cosmic H₂O maser in a shock wave / I. Shmeld, V. Strelnitski, V. Muzulev // *Soviet Ast.* 1976. Vol. 20. P. 411—418.
33. Goldreich P., Kwan J. Astrophysical Masers. IV. Line Widths // *ApJ*. 1974. Vol. 190, No. 1. P. 27—34.
34. Turner B. E. Anomalous Emission from Interstellar Hydroxyl and Water (concluded) // *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*. 1970. Vol. 64, No. 5. P. 282—304.
35. Strelnitskii V. S. Interpretation of the H₂O maser outburst in Orion // *Pisma v Astronomicheskii Zhurnal*. 1982. Vol. 8. P. 165—171.
36. Strelnitski V. Advances in Maser Theory // In : *Proc. of the Intern. Astronomical Union*. 2012. Vol. 8, Symp. 287. P. 3—12.
37. Arcsecond resolution images of the chemical structure of the low-mass protostar IRAS 16293-2422 / J. K. Jørgensen, T. L. Bourke, Q. Nguyen Luong, S. Takakuwa // *A&A*. 2011. Vol. 534, Id. A100. 28 p.
38. Protostellar Holes : Spitzer Space Telescope Observations of the Protostellar Binary IRAS 16293-2422 / J. K. Jørgensen, F. Lahuis, F. L. Schöier [et al.] // *ApJ*. 2005. Vol. 631, No. 1. P. L77—L80.
39. Collision-collision pumping of cosmic masers / Strel'nitskiy V. // *Soviet Ast. Let.* 1980. Vol. 6. P. 196—199.
40. Collisional Excitation of Interstellar Waters / A. Palma, S. Green, D. DeFrees, A. McLean // *ApJ*. 1988. Vol. 68. P. 287—318.
41. Kylafis N., Norman, C. On Pumping Astronomical Masers // *ApJ*. 1986. Vol. 300, No. 2. P. L73—L77.
42. Strelnitskii V. S. On the nature of the strong cosmic H₂O masers // *MNRAS*. 1984. Vol. 207. P. 339—354.
43. The Distance to the Center of the Galaxy: H₂O Maser Proper Motions in Sagittarius B2(N) / M. J. Reid, M. H. Schneps, J. M. Moran [et al.] // *ApJ*. 1988. Vol. 330, No. 2. P. 809—816.
44. H₂O Masers and Supersonic Turbulence / V. Strelnitskiy [et al.] // *ApJ*. 2002. Vol. 581, No. 2. P. 1180—1193.
45. Flares and Proper Motions of ground-state OH Masers in W75N / V. L. Fish, M. Gray, W. M. Goss, A. M. S. Richards // *MNRAS*. 2011. Vol. 417, No.1. P. 555—566.
46. Volvach A., Volvach L., Larionov M. Unusually powerful flare activity of the H₂O maser feature near a velocity of -60 km s^{-1} in W49N // *MNRASL*. 2020. Vol. 496, Iss. 1. P. L147—L151.
47. Unusual flare activity in the extreme-velocity -81 km s^{-1} water-maser feature in W49N / A. Volvach, L. Volvach, M. Larionov [et al.] // *MNRASL*. 2019. Vol. 487, Iss. 1. P. L77—L80.
48. Goldreich P., Keeley D. A. Astrophysical Masers. I. Source Size and Saturation // *Astro-phys. J.* 1972. Vol. 174, No. 3. P. 517—525.

Информация об авторах

Вольвач Александр Евгеньевич, доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

Вольвач Лариса Николаевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

Ларионов Михаил Григорьевич, доктор физико-математических наук, заместитель руководителя Астрокосмического центра Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, Москва.

Detection of Dense Clusters of Water Vapor Maser Sources during Powerful Flares in the IRAS 16293-2422

A. E. Volvach¹, L. N. Volvach¹, and M. G. Larionov²

¹Radio Astronomy and Geodynamics Department, Crimean Astrophysical Observatory, Yalta, 298688, Russian Federation

²Astro Space Center, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997, Russian Federation
volvach@bk.ru

Received: March 17, 2022

Peer-reviewed: March 21, 2022

Accepted: March 21, 2022

Abstract: Based on long-term monitoring data of the water maser transition at 22.2 GHz from 2019 to 2021 we were able to detect two powerful phenomena in IRAS 16293-2422 that lasted in total about a year and that occurred at radial velocities near 6 and 8 km s⁻¹. In both cases, powerful short flares were located on the top of less powerful, but more prolonged ones (4 and 0.6 kJy). Their radiation initiated the release of more powerful flares. Thanks to long-term detailed observations of water masers, the existence of the several emitting maser spot configurations with very close radial velocities, located in the line of sight of the observer were confirmed for the first time. This made it possible to demonstrate the correctness of the water maser activation hypothesis based on an increase in the amplification length of the maser due to several maser condensations located in the line of sight of the observer. The unsaturated state of the most powerful and shortest maser flares, as well as the saturated state of the weaker ones, has been observed. New important parameters of the water masers and the assumed location of the maser spots have been obtained.

Keywords: star formations, stars with exoplanet, molecules, radio lines, water masers.

For citation (IEEE): A. E. Volvach, L. N. Volvach, and M. G. Larionov, "Detection of Dense Clusters of Water Vapor Maser Sources during Powerful Flares in the IRAS 16293-2422," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 1, pp. 1–24, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.1.01. (In Russ.).

References

- [1] H. A. Abt, A. E. Gomez, and S. G. Levy, "The frequency and formation mechanism of B2-B5 main-sequence binaries," *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 74, p. 551, 1990, doi: 10.1086/191508.
- [2] A. Duquennoy and M. Mayor "Multiplicity among solar-type stars in the solar neighbourhood. II — Distribution of the orbital elements in an unbiased sample," *Astronomy & Astrophysics*, vol. 248, pp. 485–524, 1991.

- [3] D. Raghavan, "A Survey of Stellar Families: Multiplicity of Solar-Type Stars," *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 190, no. 1, pp. 1–42, 2010, doi: 10.1088/0067-0049/190/1/1.
- [4] P. Padoan and A. Nordlund, "The Stellar Initial Mass Function from Turbulent Fragmentation," *The Astrophysical Journal*, vol. 576, no. 2, pp. 870–879, 2002, doi: 10.1086/341790.
- [5] M.-M. Mac Low and R. S. Klessen, "Control of star formation by supersonic turbulence," *Reviews of Modern Physics*, vol. 76, no. 1, pp. 125–194, 2004, doi: 10.1103/revmodphys.76.125.
- [6] P. André, A. Men'shchikov, S. Bontemps et al., "From filamentary clouds to prestellar cores to the stellar IMF: Initial highlights from the Herschel Gould Belt Survey," *Astronomy & Astrophysics*, vol. 518, id. L102, 2010.
- [7] X. Chen, "SMA Observations of Class 0 Protostars: a High Angular Resolution Survey of Protostellar Binary Systems," *The Astrophysical Journal*, vol. 768, no. 2, p. 110, 2013, doi: 10.1088/0004-637x/768/2/110.
- [8] J. J. Tobin, P. D. Sheehan, S. T. Megeath et al., "The VLA/ALMA Nascent Disk and Multiplicity (VANDAM) Survey of Orion Protostars. II. A Statistical Characterization of Class 0 and Class I Protostellar Disks," *The Astrophysical Journal*, vol. 890, 2020.
- [9] C. K. Walker, C. J. Lada, E. T. Young, P. R. Maloney, and B. A. Wilking, "Spectroscopic evidence for infall around an extraordinary IRAS source in Ophiuchus," *The Astrophysical Journal*, vol. 309, 1986, doi: 10.1086/184758.
10. K. M. Menten, E. Serabyn, R. Guesten, and T. L. Wilson, "Physical conditions in the IRAS 16293-2422 parent cloud," *Astronomy & Astrophysics*, vol. 177, no. 1-2, P. L57–L60, 1987.
- [11] S. A. Dzib, "A revised distance to IRAS 16293-2422 from VLBA astrometry of associated water masers," *Astronomy & Astrophysics*, vol. 614, 2018, doi: 10.1051/0004-6361/201732093.
- [12] N. Crimier, "The solar type protostar IRAS16293-2422: new constraints on the physical structure," *Astronomy and Astrophysics*, vol. 519, 2010, doi: 10.1051/0004-6361/200913112.
- [13] S. K. Jacobsen, "The ALMA-PILS survey: 3D modeling of the envelope, disks and dust filament of IRAS 16293–2422," *Astronomy & Astrophysics*, vol. 612, 2018, doi: 10.1051/0004-6361/201731668.
- [14] Y. Fukui, "Discovery of seven bipolar outflows by an unbiased survey," *The Astrophysical Journal*, vol. 311, 1986, doi: 10.1086/184803.
- [15] A. Wootten, "The Duplicity of IRAS 16293-2422: A Protobinary Star?" *The Astrophysical Journal*, vol. 337, p. 858, 1989, doi: 10.1086/167156.
- [16] C. J. Chandler, C. L. Brogan, Y. L. Shirley, and L. Loinard, "IRAS 16293–2422: Proper Motions, Jet Precession, the Hot Core, and the Unambiguous Detection of Infall," *The Astrophysical Journal*, vol. 632, no. 1, pp. 371–396, 2005, doi: 10.1086/432828.
- [17] L. E. Kristensen, P. D. Klaassen, J. C. Mottram, M. Schmalzl, and M. R. Hogerheijde, "ALMA COJ = 6–5 observations of IRAS 16293–2422," *Astronomy & Astrophysics*, vol. 549, 2012, doi: 10.1051/0004-6361/201220668.
- [18] A. I. Sargent and S. Beckwith, "Kinematics of the circumstellar gas of HL Tauri and R Monocerotis," *The Astrophysical Journal*, vol. 323, p. 294, 1987, doi: 10.1086/165827.
- [19] V. Agra-Amboage, C. Dougados, S. Cabrit, and J. Reunanen, "Sub-arcsecond [Fe ii] spectro-imaging of the DG Tauri jet," *Astronomy & Astrophysics*, vol. 532, 2011, doi: 10.1051/0004-6361/201015886.
- [20] P. Bjerkeli, "Water around IRAS 15398–3359 observed with ALMA," *Astronomy & Astrophysics*, vol. 595, 2016, doi: 10.1051/0004-6361/201628795.
- [21] A. Wootten, "The Duplicity of IRAS 16293-2422: A Protobinary Star?" *The Astrophysical Journal*, vol. 337, p. 858, 1989, doi: 10.1086/167156.

- [22] M. J. Maureira, “Orbital and Mass Constraints of the Young Binary System IRAS 16293-2422 A,” *The Astrophysical Journal*, vol. 897, no. 1, p. 59, 2020, doi: 10.3847/1538-4357/ab960b.
- [23] H. Imai, T. Iwata, and M. Miyoshi, “Rotation-Infall Motion around the Protostar IRAS 16293-2422 Traced by Water Maser Emission,” *Publications of the Astronomical Society of Japan*, vol. 51, no. 4, pp. 473–477, 1999, doi: 10.1093/pasj/51.4.473.
- [24] H. Imai, “Astrometry of H₂O Masers in Nearby Star-Forming Regions with VERA I. IRAS 16293-2422 in rho Oph East,” *Publications of the Astronomical Society of Japan*, vol. 59, no. 6, pp. 1107–1113, 2007, doi: 10.1093/pasj/59.6.1107.
- [25] A. Hernández-Gómez, “Modelling the abundance structure of isocyanic acid (HNC) towards the low-mass solar type protostar IRAS 16293–2422,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 483, no. 2, pp. 2014–2030, 2018, doi: 10.1093/mnras/sty2971.
- [26] M. H. D. Van der Wiel, “The ALMA-PILS survey: gas dynamics in IRAS 16293–2422 and the connection between its two protostars,” *Astronomy & Astrophysics*, vol. 626, 2019, doi: 10.1051/0004-6361/201833695.
- [27] L. Loinard, “New Radio Sources and the Composite Structure of Component B in the Very Young Protostellar System IRAS 16293–2422,” *The Astrophysical Journal*, vol. 670, no. 2, pp. 1353–1360, 2007, doi: 10.1086/522568.
- [28] A. E. Volvach, L. N. Volvach, and M. G. Larionov, “Composite powerful short flare of water maser emission in IRAS 16293-2422,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, vol. 507, no. 1, 2021, doi: 10.1093/mnras/lsab096.
- [29] N. S. Nesterov, A. E. Volvach, I. D. Strepka et al., “22 GHz Radiometer for International VLBI Station SYMEIZ,” *Radio Physics and Radio Astronomy*, vol. 5, no. 3, pp. 320–322, 2000. (In Russ.).
- [30] K. J. Johnston, “An Interferometer Map of the Water-Vapor Sources in W49,” *The Astrophysical Journal*, vol. 166, 1971, doi: 10.1086/180731.
- [31] L. N. Volvach, “Powerful bursts of water masers towards G25.65+1.05,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, vol. 482, no. 1, 2018, doi: 10.1093/mnras/sly193.
- [32] I. Shmeld, V. Strelnitski, and V. Muzulev, “Collisional pumping of a cosmic H₂O maser in a shock wave,” *Soviet Ast.*, vol. 20, pp. 411–418, 1976.
- [33] P. Goldreich and J. Kwan, “Astrophysical Masers.IV. Line Widths,” *The Astrophysical Journal*, vol. 190, p. 27, 1974, doi: 10.1086/152843.
- [34] B. E. Turner, “Anomalous Emission from Interstellar Hydroxyl and Water (concluded),” *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, vol. 64, no. 5, pp. 282–304, 1970.
- [35] V. S. Strelnitskii, “Interpretation of the H₂O maser outburst in Orion,” *Pisma v Astro-nomicheskii Zhurnal*, vol. 8, pp. 165–171, 1982.
- [36] V. Strelnitski, “Advances in Maser Theory,” *Proceedings of the International Astronomical Union*, vol. 8, pp. 3–12, 2012, doi: 10.1017/s1743921312006576.
- [37] J. K. Jørgensen, T. L. Bourke, Q. Nguyen Luong, and S. Takakuwa, “Arcsecond resolution images of the chemical structure of the low-mass protostar IRAS 16293-2422,” *Astronomy & Astrophysics*, vol. 534, 2011, doi: 10.1051/0004-6361/201117139.
- [38] J. K. Jørgensen, “Protostellar Holes: Spitzer Space Telescope Observations of the Protostellar Binary IRAS 16293-2422,” *The Astrophysical Journal*, vol. 631, no. 1, 2005, doi: 10.1086/497003.
- [39] V. Strel’ nitskiy, “Collision-collision pumping of cosmic masers,” *Soviet Ast. Let.*, vol. 6, pp. 196–199, 1980.
- [40] A. Palma, S. Green, D. J. Defrees, and A. D. McLean, “Collisional excitation of interstellar water,” *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 68, p. 287, 1988, doi: 10.1086/191289.

- [41] N. D. Kylafis and C. Norman, “On pumping astronomical masers,” *The Astrophysical Journal*, vol. 300, 1986, doi: 10.1086/184606.
- [42] V. S. Strel'nitskij, “On the nature of the strong cosmic H₂O masers,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 207, no. 2, pp. 339–354, 1984, doi: 10.1093/mnras/207.2.339.
- [43] M. J. Reid, “The distance to the center of the Galaxy – H₂O maser proper motions in Sagittarius B2(N),” *The Astrophysical Journal*, vol. 330, p. 809, 1988, doi: 10.1086/166514.
- [44] V. Strel'nitski, J. Alexander, S. Gezari, B. P. Holder, J. M. Moran, and M. J. Reid, “H₂O Masers and Supersonic Turbulence,” *The Astrophysical Journal*, vol. 581, no. 2, pp. 1180–1193, 2002, doi: 10.1086/344244.
- [45] V. L. Fish, M. Gray, W. M. Goss, and A. M. S. Richards, “Flares and proper motions of ground-state OH masers in W75N,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 417, no. 1, pp. 555–566, 2011, doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.19297.x.
- [46] A. E. Volvach, L. N. Volvach, and M. G. Larionov, “Unusually powerful flare activity of the H₂O maser feature near a velocity of –60 km s^{–1} in W49N,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, vol. 496, no. 1, 2020, doi: 10.1093/mnras/laaa104.
- [47] L. N. Volvach, A. E. Volvach, M. G. Larionov, G. C. MacLeod, and P. Wolak, “Unusual flare activity in the extreme-velocity –81 km s^{–1} water-maser feature in W49N,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, vol. 487, no. 1, 2019, doi: 10.1093/mnras/slz088.
- [48] P. Goldreich and D. A. Keeley, “Astrophysical Masers. I. Source Size and Saturation,” *The Astrophysical Journal*, vol. 174, p. 517, 1972, doi: 10.1086/151514.

Information about the authors

Alexandr E. Volvach, Dr. Sci., FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS”, Nauchni, Crimea, Russian Federation.

Larisa N. Volvach, PhD. Sci., FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS”, Nauchni, Crimea, Russian Federation.

Michail G. Larionov, Dr. Sci., Astro Space Center, P. N. Lebedev Physical Institute, RAS, Moscow, Russian Federation.