

УДК 524.3

Сверхмощное вспышечное явление мазера водяного пара в протозвездной системе IRAS 16293-2422

¹ Вольвач Л. Н., ¹ Вольвач А. Е., 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: 24 марта 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: На основе длительного мониторинга мазера водяного пара на частоте 22.2 ГГц с начала 2019 по март 2021 гг. было зарегистрировано самое мощное за всю историю наблюдений вспышечное явление в протозвездной системе IRAS 16293-2422 на скорости около -1.5 км/с, длившееся около двух лет. Мазерное излучение исходило из крупнейшей структуры мазерных пятен, высокая плотность которых создавала их частичное перекрытие друг друга по времени. Общее число отдельных мощных вспышек мазера воды составило десять. Благодаря высокой детализации полученных данных, фиксировавшихся с интервалом 1—2 дня, были получены новые уникальные результаты. Впервые было подтверждено существование столь сложной конфигурации излучающих мазерных пятен с очень близкими лучевыми скоростями, находящихся на луче зрения наблюдателя. Удалось установить, что мазеры мощных вспышек находились в ненасыщенном состоянии благодаря каскадной накачке нескольких мазеров на луче зрения наблюдателя. Получены новые важные параметры мазеров воды и высказано предположение об их локализации в газаво-пылевой структуре IRAS 16293-2422.

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

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Вольвач Л. Н., Вольвач А. Е., Ларионов М. Г. Сверхмощное вспышечное явление мазера водяного пара в протозвездной системе IRAS 16293-2422 // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 2. С. 153—168.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Вольвач, Л. Н. Сверхмощное вспышечное явление мазера водяного пара в протозвездной системе IRAS 16293-2422 / Л. Н. Вольвач, А. Е. Вольвач, М. Г. Ларионов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2022. — Т. 5, № 2. — С. 153—168.

1. Введение

IRAS 16293-2422 (далее *IRAS* 16293) представляет собой молодой звездный объект класса 0, который находится в облачном комплексе ρ Oriuchus на расстоянии ~ 140 пк и имеет общую светимость 20—30 L_{\odot} [1, 2, 3]. Этот объект является протозвездной системой солнечных масс [4, 5]. Во внутренней структуре протозвезд присутствуют протопланетные диски [6—8]. В направлении на *IRAS* 16293 обнаружены источники континуума [9]. Зарегистрирована высокая активность источника, в котором есть биполярные истечения от протозвездной системы [10]. Для определения природы протозвездной системы необходимо изучать мазеры H_2O , которые отражают физические процессы в этих областях.

Мазеры воды, расположенные в фиксированных областях протозвездного облака, имеют свои отличительные особенности. Установлено существование кластеров мазерных скоплений (пятен). Пока не удалось установить их конкретную связь либо с истечениями из протозвезд, либо с газово-пылевыми дисками вокруг этих протозвезд [9, 11]. В принципе, с помощью мазеров воды можно определить динамические, пространственные и спектральные характеристики областей, в которых формируются физические условия для генерации мазерного излучения.

В данной работе приводятся новые уникальные данные о беспрецедентном по мощности и продолжительности вспышечном явлении мазера воды в протозвездной системе *IRAS* 16293, полученные в результате детального мониторинга этой протозвездной системы на радиотелескопе РТ-22 в Симеизе. Приводятся новые данные о характеристиках возбуждения и состояния мазера воды во время этого мощного сложного вспышечного явления в этом источнике.

2. Наблюдения и обработка

Наблюдательные данные рассматриваемого вспышечного явления, произошедшего на мазерном переходе $6_{16} - 5_{23}$ на частоте 22.235 ГГц, были получены в период с января 2019 по март 2021 гг. с использованием 22-метрового радиотелескопа РТ-22 (Симеиз). Ширина диаграммы направленности радиотелескопа (FWHM) на указанной частоте приема составляла 2.5 угловых минуты, эффективная площадь — 210 м². Для приема инфор-

мации использовался приемник с шумовой температурой около 60 К. При различных погодных условиях температура приемной системы на углах места более 40° изменялась в пределах от 120 до 150 К. Данные наблюдений корректировались на атмосферное поглощение и изменение эффективной площади радиотелескопа на разных углах места. Источники DR 21, Vir A и Cуг A использовались для калибровки данных по потоку. Калибровка антенной температуры производилась с помощью температурного перепада, создаваемого фиксированной разностью температур на апертуре радиотелескопа от согласованной нагрузки, находящейся сначала при температуре жидкого азота, а затем при температуре окружающей среды. Приемник стабилизировался H-мазером частотой 5 МГц, данные наблюдений на 160 МГц передавались с радиотелескопа на спектрометр и регистрирующую аппаратуру. Использовался спектрополяриметрический радиометр с параллельным анализатором Фурье спектра с и полосой приема 16 МГц. Разрешение по частоте и по скорости составляло 8 и 2 кГц (0.105 и 0.03 км/с) соответственно [12]. Циклы наблюдений осуществлялись методом *on-off* и каждый состоял из накопления сигнала в течение 5—10 мин при наведении на источник (*on*) и вне источника (*off*). Процедуру можно было повторять для получения необходимого качества данных. Все операции проводились в автоматическом режиме, включая первичную обработку данных, что позволяло вносить корректировку в программу наблюдений.

3. Результаты

Данные длительного мониторинга спектральной плотности потока мазера воды в направлении протозвездного комплекса IRAS 16293 на частоте 22,235 ГГц показаны на рис. 1. Вспышки занумерованы и обозначены символом «В».

Обнаруженное мощное вспышечное явление представляет собой суперпозицию отдельных более коротких вспышек. Оно началось с продолжительного медленного подъема плотности потока в начале марта 2019 г. и продолжалось до конца этого же года, то есть 9 месяцев. При этом его плотность потока достигла значения около 10000 Ян. После этого последовала серия из 9 более коротких мощных вспышек, длительность каждой из которых не превышала месяца. Затем вспышечное явление завершилось уменьшением плотности потока от 6000 Ян до минимального значения в сотни Ян за время около 4 месяцев. К концу марта 2021 г. вспышечное явление, как таковое, угасло. Важно отметить, что все обозначенные более короткие и мощные вспышки мазера воды располагались поверх длительного мощного подъема плотности потока Вспышки 10, достигающего 10000 Ян. Длительная Вспышка 10 продолжалась около двух лет (рис. 1).

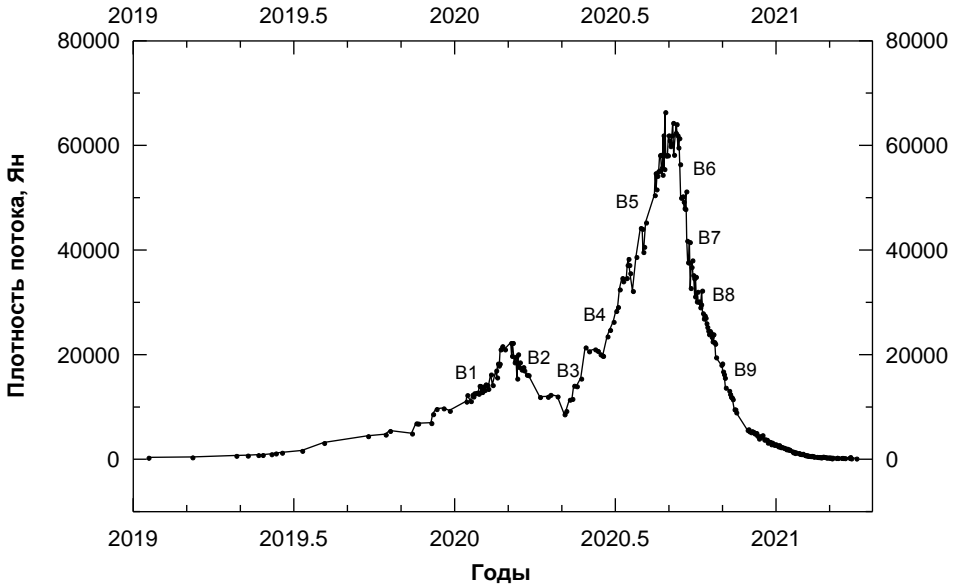


Рис. 1. Сверхмощное продолжительное вспыхивающее явление мазера воды в *IRAS 16293* вблизи скорости -1.5 км/с.

Fig. 1. Super-powerful continuous flare phenomenon of the water maser in *IRAS 16293* near the speed of -1.5 km/s

Чтобы понять физическую природу этого сложного вспыхивающего явления, были использованы спектрально-временной метод. В его основе находится одновременный анализ данных мониторинга плотности потока и спектральных данных. Мы условно разделили вспыхивающее явление на 9 более коротких всплесков и одну чрезвычайно длительную Вспышку 10 (рис. 1).

Изменение плотности потока 9 более коротких, но мощных всплесков, носило экспоненциальный характер как при росте, так и при спаде плотности потока. Такое поведение спектральной плотности потока является одним из важных признаков того, что мазер во время вспышки находился в ненасыщенном состоянии. При этом зависимость ширины линии $\Delta\nu$ от плотности потока мазерной линии S должна иметь вид [13]:

$$\Delta\nu = \Delta\nu_0 / [1 + \ln(S/S_0)], \quad (1)$$

где $\Delta\nu_0$ — тепловая ширина линии молекулы воды, S_0 — входной поток в мазерную глобулу. Нами получена аппроксимация наблюдательных данных и соотношение, которое описывает экспериментальную зависимость [14]:

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

Здесь a и b — коэффициенты.

Для приведения формы выражения (1) к виду формулы (2) поменяем местами обе его части и возведем их в квадрат:

$$1/\Delta v^2 = [(1 - \ln S_0) + \ln S]/(\Delta v_0)^2, \quad (3)$$

откуда

$$(\Delta v_0)^2 = 1/b, \quad \ln S_0 = 1 - a(\Delta v_0)^2 \quad (4)$$

Из выражений (3, 4) получим выражение для коэффициентов:

$$a = (1 - \ln S_0)/\Delta v_0, \quad b = 1/(\Delta v_0)^2. \quad (5)$$

Первая из 9 мощных вспышек началась в феврале 2020 г. Ее амплитуда превысила 20000 Ян. На рис. 2 показана самая мощная вспышка 5 этого явления амплитудой около 65000 Ян. Спектральная линия вспышки имеет симметричную форму, ширина линии вблизи -1.5 км/с составляет $\Delta v_{5, \text{измер}} \approx 0.94$ км/с. На спадающем по плотности потока склоне вспыхечного явления изменения плотности потока также происходят по экспоненте, что должно давать близкое значение ширины линии к тому значению, которое получается на восходящем фронте вспышек. Действительно, для вспышки 7 ширина спектральной линии вблизи -1.5 км/с составляет $\Delta v_{4, \text{измер}} \approx 0.96$ км/с (рис. 3). Ошибка измерения ширины спектральной линии близка к максимальному спектральному разрешению, равному 0.03 км/с.

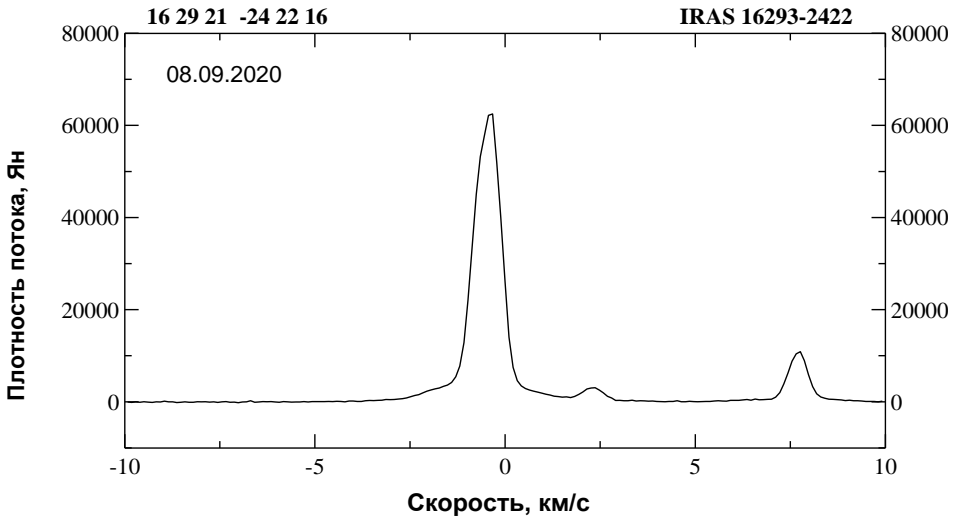


Рис. 2. Мощная Вспышка 5 на радиальной скорости около -1.5 км/с.

Fig. 2. Powerful Flare 5 at a radial velocity of about -1.5 km/s

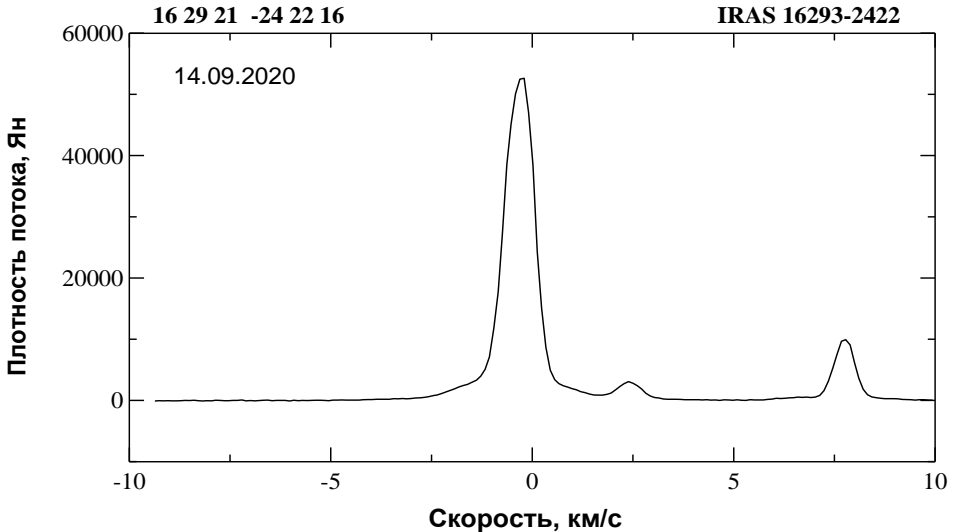


Рис. 3. Мощная Вспышка 7 на радиальной скорости около -1.5 км/с.

Fig. 3. Powerful Flare 7 at a radial velocity of about -1.5 km/s

Для Вспышек 5, 7 в соответствии с формулой (2) были построены зависимости, которые аппроксимированы прямыми линиями (рис. 4, 5). Из этих зависимостей могут быть найдены коэффициенты a и b в формулах (4), (5) и на их основе рассчитаны значения Δv_0 и S_0 . Для Вспышки 5, например, эти коэффициенты равны $a_5 = -1.96$, $b_5 = 0.81$. Полученные по этим коэффициентам $\Delta v_{05} \approx 1.05$ км/с и входной поток $S_{05} \approx 31$ кЯн.

Ранее мы указывали измеренное значение для Вспышки 5 — $\Delta v_{\text{измер}} \approx 0.94$ км/сек, что в пределах примерно 10 % совпадает модельным значением. Что касается входного потока, полученного из модельных представлений, $S_{05} \approx 31$ кЯн. Как раз такой входной поток создает Вспышка 4 для Вспышки 5 (рис. 1).

Вспышка 3 создает входной поток около 20 кЯн для вспышки 4. Это свидетельствует о том, что предложенная модель аппроксимации наблюдательных данных работает достаточно точно.

Полученные по вспышкам данные можно характеризовать следующим образом:

1. В 9 мощных вспышках наблюдается экспоненциальное изменение плотности потока во время подъема потока и его падения, как в случае ненасыщенного лазера воды.

2. Зависимость изменения обратной величины квадрата ширины линии от логарифма плотности потока линейная и находится в соответствии с ненасыщенным состоянием лазера во время вспышки.

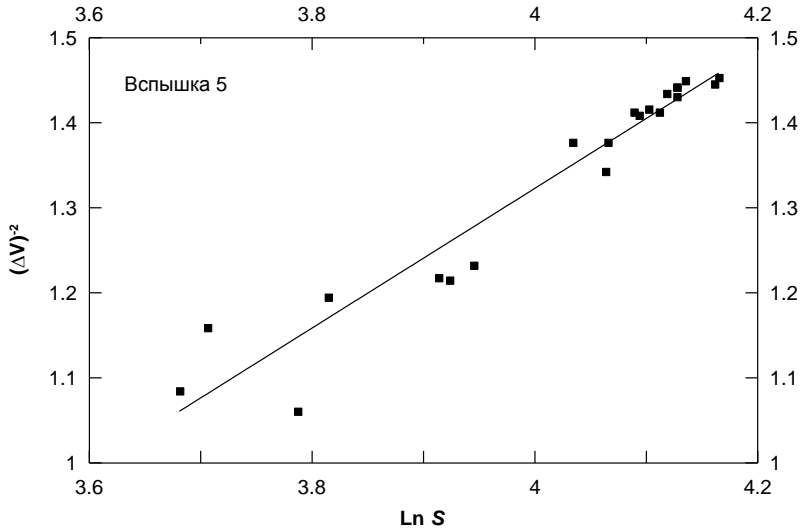


Рис. 4. Зависимость обратной величины квадрата ширины линии в минус второй степени от натурального логарифма плотности потока для Вспышки 5 на радиальной скорости около -1.5 км/с.

Fig. 4. Dependence of the reciprocal of the squared linewidth to the minus second power on the natural logarithm of the flux density for Flare 5 at a radial velocity of about -1.5 km/s

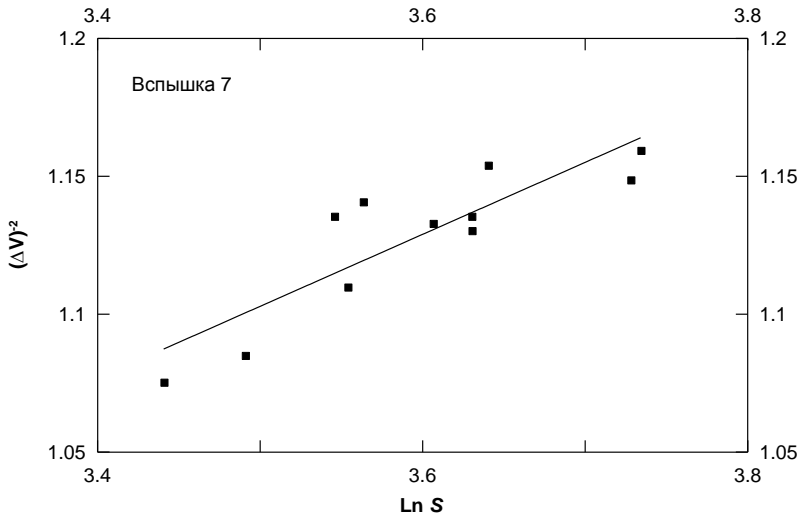


Рис. 5. Зависимость обратной величины квадрата ширины линии в минус второй степени от натурального логарифма плотности потока для Вспышки 7 на радиальной скорости около -1.5 км/с.

Fig. 5. Dependence of the reciprocal of the squared linewidth to the minus second power on the natural logarithm of the flux density for Flare 7 at a radial velocity of about -1.5 km/s

3. Следующие друг за другом вспышки мазера воды создают для последующих вспышек все более высокие значения плотности потока, обеспечивая рост общей плотности потока мощного продолжительного вспышечного явления.

4. Приведенные параметры вспышек согласуются с параметрами гигантских вспышек в *G25.65+1.05* и *W49N*, полученных нами ранее в работах [15, 16].

4. Дискуссия

Нами было зарегистрировано несколько случаев возникновения гигантских вспышек мазера воды в галактических областях мощного звездообразования как для низкоскоростных линий в *IRAS 16293* на скорости вблизи 8 км/с [17], так и для высокоскоростных, например, в *W49N* на скоростях близких к -81 км/с и -60 км/с [15]. Можно предположить, что многие мощные вспышечные явления имеют сложную структуру из-за чрезвычайно высокой плотности мазерных пятен в кластерах мазерного излучения. Высокая плотность мазерных конденсаций приводит к большой вероятности того, что на луче зрения наблюдателя во время вспышек окажется сразу несколько мазерных пятен. При возникновении агента, активирующего мазерное излучение, появляется возможность каскадного усиления мазера воды за счет увеличения уровня входного потока в каждую мазерную глобулу, находящуюся на луче зрения наблюдателя, и увеличения длины накачки мазера. В настоящее время еще нет достаточного числа таких явлений, когда наблюдательные данные, полученные за длительный период, имеют такую высокую детализацию по времени (один-два дня интервал съема данных). Поэтому мы пока не можем однозначно подтвердить предположение, что все мощные мазеры воды «устроены» одинаковым образом, и каждое новое явление подобного рода дает чрезвычайно важную информацию.

Полученная из наблюдательных данных физическая картина среды в излучаемых областях дает понимание процессов, происходящих в области генерации мазеров и может привести к сильным ограничениям на возможную модель генерации излучения. Вспышки мазера зависят от схемы накачки мазера (столкновительной или радиационной), типа поглотителя энергии мазерного теплового двигателя, типа перехода, составляющего цикл накачки (вращательный или колебательный).

Некоторые исследователи склоняются к мнению, что мощные вспышки водяного мазера объясняются столкновительно-столкновительным механизмом накачки на вращательных уровнях (*CCr*) из-за определенных трудностей, возникающих с другими механизмами, в частности, радиаци-

онным механизмом [18, 19]. Ранее механизм мазерной накачки CCr за фронтом ударной волны был предложен в работах [20, 21], где присутствуют сверхзвуковое истечение газа из молодой звезды и его взаимодействие с окружающим газовым облаком. Это приводит к сверхзвуковым ударным волнам, необходимым для накачки мазера воды. Механизм CCr -накачки под действием звездного ветра был предложен еще в работе [22]; позже он использовался другими авторами в гипотезах физичекой природы мазерных образований, находящихся в протопланетных дисках [23, 24].

Мы рассмотрим возможность применения модели CCr для объяснения коротких и очень мощных вспышек в $IRAS\ 16293$ на скорости вблизи -1.5 км/с. Основным условием CCr -накачки является наличие в мазерной среде не менее двух типов частиц (молекул или атомов водорода и электронов) с разными температурами, но вкладывающих в возбуждение уровней H_2O сравнимые отношения [25]. Вообще, CCr -накачка работает при всех плотностях, но для ее эффективной работы требуется достаточно высокая плотность среды. Вероятность столкновительных переходов для различных уровней (r или v) высоки только при определенных диапазонах степени ионизации. Интересно рассмотреть, как условия CCr -накачки могут быть выполнены в случае мощного вспышечного явления в $IRAS\ 16293$ на скорости около -1.5 км/с. Плотность среды, необходимая для эффективной работы CCv -накачки мазера при колебательных переходах в H_2O , на шесть порядков ниже, чем для вращательных переходов и нет смысла рассматривать их в дальнейшем. Мощность накачки, необходимая для наблюдаемой плотности потока от $IRAS\ 16293$ в линии воды, определяется из уравнения (3) и (8а) [25], откуда получено соотношение $n_1 \cdot \Delta P_{CCr} \geq n_1 \cdot \Delta P$:

$$n_1 n_e \cdot q_e^r \cdot [E_r / (kT_e)] \cdot [(T_H - T_e) / T_H] \geq 10 \cdot l^3 \cdot D^2 \cdot S \cdot (\Delta \nu_{H_2O} / \nu_{H_2O}), \quad (6)$$

или

$$n_1 n_e \geq \{10 \cdot l^3 \cdot D^2 \cdot S \cdot (\Delta \nu_{H_2O} / \nu_{H_2O})\} / \{q_e^r \cdot [E_r / (kT_e)] \cdot [(T_H - T_e) / T_H]\}. \quad (7)$$

Здесь n_1 — плотность населения нижнего сигнального уровня, n_e — электронная плотность, q_e^r — коэффициент дезактивации электронным ударом, $E_r = h \nu_{H_2O}$, T_e — кинетическая электронная температура, T_H — кинетическая температура H_2 молекул, l — длина мазерного усиления (в единицах а. е.), D — расстояние до источника (кпк), S — плотность потока от источника (Ян), $\Delta \nu_{H_2O} / \nu_{H_2O}$ — отношение ширины мазерной линии к ее частоте покоя (в ед. 10^{-6}).

Подставив известные и измеренные значения, имеем: $q_e^r \approx 10^{-6}$ см³/сек [26], $E_r = 1.5 \cdot 10^{-16}$ эрг, $T_e \approx 1500$ К, $T_H \approx 1665$ К, $(T_H - T_e) / T_H \approx 0.1$, $l \approx 3 \cdot 10^{13}$ см ≈ 2 а. е. (три мазерные конденсации размерами 10^{13} см каждая),

$D \approx 0.14$ кпк, $S \approx 6.5 \cdot 10^4$ Ян, $\Delta v_{H_2O}/v_{H_2O} \approx 2.7$. После чего мы имеем $n_1 n_e \geq 2.4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-6}$. Нижние оценки на n_1 и n_e ($n_1 \approx 1.5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$, $n_e \approx 1.5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$) находятся в согласии с теоретическими расчетами физических условий в областях излучения мазеров воды [25]. Результаты также подтверждают ранние работы по изучению мазерного излучения в *Orion KL*, где значения $n_e/n_H \approx 10^{-5}$ и $n_H \approx 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ были получены на основе разумных предположений [18].

Какие процессы могут обеспечить такие физические характеристики среды (как температуру, плотность окружающей среды и уровень ионизации)? Один из эффективных механизмов увеличения плотности среды — это действие звездного ветра [18, 22, 24]. В этом случае мазерные источники H_2O являются местами взаимодействия звездного ветра и газовых конденсаций в его оболочке. Следует упомянуть еще один источник, который может обеспечить высокую плотность газа и подходящие условия для возникновения мазерного излучения — магнитогидродинамическую турбулентность газа. Турбулентность может дать энергию для *ССr*-накачки в мелкомасштабных стохастических ударных волнах [27].

Наклон зависимости ширины линии от плотности потока для Вспышек 5, 7 (рис. 4, 5) предполагает, что мазерные пятна ведут себя как ненасыщенные мазеры и могут иметь одинаковый источник возбуждения. Этот источник должен приводить к взрывному увеличению температуры, плотности среды компонентов мазера, испарению льда с поверхности пыли и созданию условий для эвакуации излучающих квантов из области мазера, например, более холодной пылью или квантами колебательного перехода молекулы H_2O , имеющими меньшую оптическую толщину. Предполагая, что наиболее вероятный механизм накачки мазера воды при мощных вспышках является *ССr*-накачка, источником инициирования ее могут быть именно ударные волны. Если это так, то скорость распространения ударной волны будет $v_{распр} = r/15$ дней. Здесь r — размер мазерной конденсации, 15 дней — длительность Вспышки 6 или 7, например. Если принять размер $r = 0.5 \cdot 10^{13} \text{ см}$ (как в *Orion KL*) получаем $v \approx 60 \text{ км/с}$. Это значение скорости более чем на порядок выше, чем скорость звука в рассматриваемой среде излучения мазера воды.

Полученные новые данные чрезвычайно важны, поскольку они указывают на то, что области мазерного излучения имеют кластерную структуру с высокой плотностью мазерных пятен, обеспечивающих возникновение длительного и мощного мазерного излучения сериями вспышек, частично накладывающихся друг на друга и находящихся на луче зрения наблюдателя. Вспышки имеют близкие скорости мазерных линий, что может свидетельствовать о тесном расположении мазерных пятен.

5. Выводы

1. Приведены данные детальных наблюдений мазера воды в направлении протозвездного комплекса *IRAS 16293-2422*, выполненных в течение более двух лет.

2. Зарегистрировано необычное по мощности и длительности вспышечное явление вблизи -1.5 км/с, состоящие из многих вспышек мазера воды, исходящих из близко расположенных друг к другу мазерных пятен, возможно, находящихся в одном мазерном скоплении.

3. Получены важные физические параметры вспышек мазера.

4. Установлено наличие каскадного усиления мазера в случаях возникновения этих мощных коротких вспышек.

5. Вспышки мазера воды следуют друг за другом и создают для последующих вспышек все возрастающие значения плотности потока, создавая рост плотности потока продолжительного вспышечного явления в течение нескольких месяцев, после чего также в течение нескольких месяцев наблюдался спад активности вспышек.

6. Мощные вспышки мазера воды указывают на то, что сами мазеры находятся в ненасыщенном состоянии.

7. Высказано предположение о том, что мазеры воды локализованы в пределах газовой-пылевой протопланетных дисках молодого протозвездного комплекса *IRAS 16293-2422*.

Благодарности

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

Список литературы

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.

6. Sargent A. I., Beckwith S. Kinematics of the Circumstellar Gas of HL Tauri and R Monocerotis // *ApJ*. 1987. Vol. 323. P. 294—305.
7. Water around IRAS 15398-3359 observed with ALMA / P. Bjerkerli, J. K. Jørgensen, E. A. Bergin [et al.] // *A&A*. 2016. Vol. 595. Id. A39. 8 p.
8. Disk-driven rotating bipolar outflow in Orion Source I / T. Hirota, M. N. Machida, Y. Matsu-shita [et al.] // *Nature Astronomy*. 2017. Vol. 1. Id. 0146.
9. Wootten A. The Duplicity of IRAS 16293-2422 : A Protobinary Star? // *ApJ*. 1989. Vol. 337, no. 2. P. 858—864.
10. Wootten A., Loren R. B. L1689N : Misalignment between a Bipolar Outflow and a Magnetic Field // *ApJ*. 1987. Vol. 317. P. 220—230.
11. 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.
12. Радиометр на частоту 22 ГГц для международной РСДБ станции «СИМЕИЗ» / Нестеров Н. С., Вольвач А. Е., Стрелка И. Д. [и др.] // *Радиофизика и радиоастрономия*. 2000. Т. 5, № 3. С. 320—322.
13. Goldreich P., Kwan J. Astrophysical Masers. IV. Line Widths // *ApJ*. 1974. Vol. 190, no. 1. P. 27—34.
14. Powerful bursts of water masers towards G25.65+1.05 / A. Volvach, L. Volvach, M. Larionov [et al.] // *MNRASL*. 2019. Vol. 482, iss. 1. P. L90—L92.
15. 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.
16. Flaring water masers associated with W49N / Volvach A., Volvach L., Larionov M. [et al.] // *A&A*. 2019. Vol. 628. P.A89.
17. 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.
18. Strel'nitskiy V. Collision-collision pumping of cosmic masers // *Soviet Ast. Let.* 1980. Vol. 6. P. 196—199.
19. Collisional Excitation of Interstellar Waters / A. Palma, S. Green, D. DeFrees, A. McLean // *ApJ*. 1988. Vol. 68. P. 287—318.
20. Shmeld I., Strelnitski V., Muzulev V. Collisional pumping of a cosmic H₂O maser in a shock wave // *Soviet Ast.* 1976. Vol. 20. P. 411—418.
21. Kylafis N., Norman C. On Pumping Astronomical Masers // *ApJ*. 1986. Vol. 300, no. 2. P. L73—L77.
22. Pikelner S. B., Strelnitskii V. S. Models of Cosmic Maser Sources // *Astrophysics and Space Science*. 1976. Vol. 39. P. L19.
23. Strelnitsky V.S., and Sunjaev R. A. Pumping of Strong H₂O Cosmic Masers // *Astron. Zh.* 1972. Vol. 49. P. 704—711.
24. Norman C., Silk J. Interstellar bullets : H₂O masers and Herbig-Haro objects // *Astrophysical Journal*. 1979. Vol. 228. P. 197—205.
25. Strelnitskii V. S. On the nature of the strong cosmic H₂O masers // *MNRAS*. 1984. Vol. 207. P. 339—354.
26. Itikawa Yu. Rotational Transition in an Asymmetric-Top Molecule by Electron Collision : Applications to H₂O and H₂CO // *Journal of the Physical Society of Japan*. 1972. Vol. 32, iss. 1. P. 217—226.
27. H₂O masers and supersonic turbulence / V. S. Strelnitski, J. Alexander, S. Gezari [et al.] // *ApJ*. 2002. Vol. 581. P.1180—1193.

Информация об авторах

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

Вольвач Александр Евгеньевич, доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе 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.

Super-Powerful Flare Phenomenon of the Water Maser in the Protostellar System IRAS 16293-2422

L. N. Volvach¹, A. E. 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 24, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: Based on long-term monitoring of the water vapor maser at 22.2 GHz from early 2019 to March 2021, the most powerful flare event in the entire history of observations was recorded in the protostellar system IRAS 16293-2422 at a velocity of about -1.5 km s^{-1} , lasting of about two years. The maser emission came from the largest structure of maser spots, the high density of which created their partial overlap in time. The total number of individual flares of the water maser reached ten. Due to the high detail of the data obtained, recorded at intervals of 1–2 days, new unique results were obtained. The existence of such a complex configuration of emitting maser spots with very similar radial velocities located on the observer's line of sight was confirmed for the first time. It was possible to establish that the masers of powerful flares were in an unsaturated state due to the cascade pumping of several masers on the observer's line of sight. New important parameters of water masers have been obtained, and an assumption has been made about their localization in the gas-dust structure IRAS 16293-2422.

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

For citation (IEEE): L. N. Volvach, A. E. Volvach, and M. G. Larionov, "Super-Powerful Flare Phenomenon of the Water Maser in the Protostellar System IRAS 16293-2422," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 2, pp. 153–168, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.2.11. (In Russ.).

References

- [1] X. Chen et al., "SMA Observations of Class 0 Protostars: a High Angular Resolution Survey of Protostellar Binary Systems," *The Astrophysical Journal*, vol. 768, no. 2, p. 110, Apr. 2013, doi: 10.1088/0004-637x/768/2/110.
- [2] J. J. Tobin 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, no. 2, p. 130, Feb. 2020, doi: 10.3847/1538-4357/ab6f64.

- [3] S. A. Dzib et al., “A revised distance to IRAS 16293-2422 from VLBA astrometry of associated water masers,” *Astronomy & Astrophysics*, vol. 614, p. A20, Jun. 2018, doi: 10.1051/0004-6361/201732093.
- [4] 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, p. L47, Oct. 1986, doi: 10.1086/184758.
- [5] K. M. Menten, E. Serabyn, R. Guesten, and T. L. Wilson, “Physical conditions in the IRAS 16293-2422 parent cloud,” *Astronomy & Astrophysics*, vol. 177, pp. L57–L60, 1987.
- [6] A. I. Sargent and S. Beckwith, “Kinematics of the circumstellar gas of HL Tauri and R Monocerotis,” *The Astrophysical Journal*, vol. 323, p. 294, Dec. 1987, doi: 10.1086/165827.
- [7] P. Bjerkeli et al., “Water around IRAS 15398–3359 observed with ALMA,” *Astronomy & Astrophysics*, vol. 595, p. A39, Oct. 2016, doi: 10.1051/0004-6361/201628795.
- [8] T. Hirota et al., “Disk-driven rotating bipolar outflow in Orion Source I,” *Nature Astronomy*, vol. 1, no. 7, Jun. 2017, doi: 10.1038/s41550-017-0146.
- [9] A. Wootten, “The Duplicity of IRAS 16293-2422: A Protobinary Star?,” *The Astrophysical Journal*, vol. 337, p. 858, Feb. 1989, doi: 10.1086/167156.
- [10] A. Wootten and R. B. Loren, “L1689N – Misalignment between a bipolar outflow and a magnetic field,” *The Astrophysical Journal*, vol. 317, p. 220, Jun. 1987, doi: 10.1086/165270.
- [11] H. Imai et al., “Astrometry of H₂O Masers in Nearby Star-Forming Regions with VERA I. IRAS 16293-2422 in ρ Oph East,” *Publications of the Astronomical Society of Japan*, vol. 59, no. 6, pp. 1107–1113, Dec. 2007, doi: 10.1093/pasj/59.6.1107.
- [12] 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.).
- [13] P. Goldreich and J. Kwan, “Astrophysical Masers.IV. Line Widths,” *The Astrophysical Journal*, vol. 190, p. 27, May 1974, doi: 10.1086/152843.
- [14] L. N. Volvach et al., “Powerful bursts of water masers towards G25.65+1.05,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, vol. 482, no. 1, pp. L90–L92, Oct. 2018, doi: 10.1093/mnrasl/sly193.
- [15] 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, pp. L147–L151, Jun. 2020, doi: 10.1093/mnrasl/slaa104.
- [16] L. N. Volvach et al., “Flaring water masers associated with W49N,” *Astronomy & Astrophysics*, vol. 628, p. A89, Aug. 2019, doi: 10.1051/0004-6361/201935521.
- [17] 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, pp. L52–L56, Aug. 2021, doi: 10.1093/mnrasl/slab096.
- [18] V. Strel’nitskiy, “Collision-collision pumping of cosmic masers,” *Soviet Ast. Let.*, vol. 6, pp. 196–199, 1980.
- [19] 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, Oct. 1988, doi: 10.1086/191289.
- [20] I. Shmeld, V. Strel’nitskiy, and V. Muzulev, “Collisional pumping of a cosmic H₂O maser in a shock wave,” *Soviet Ast.*, vol. 20, pp. 411–418, 1976.
- [21] N. D. Kylafis and C. Norman, “On pumping astronomical masers,” *The Astrophysical Journal*, vol. 300, p. L73, Jan. 1986, doi: 10.1086/184606.

- [22] S. B. Pikel'ner and V. S. Strel'nitskiy, "Models of cosmic maser sources," *Astrophysics and Space Science*, vol. 39, no. 2, pp. L19–L24, Feb. 1976, doi: 10.1007/bf00648350.
- [23] V. S. Strel'nitsky and R. A. Sunjaev, "Pumping of Strong H₂O Cosmic Masers," *Astron. Zh.*, vol. 49, pp. 704–711, 1972.
- [24] C. Norman and J. Silk, "Interstellar bullets – H₂O masers and Herbig-Haro objects," *The Astrophysical Journal*, vol. 228, p. 197, Feb. 1979, doi: 10.1086/156836.
- [25] V. S. Strel'nitsky, "On the nature of the strong cosmic H₂O masers," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 207, no. 2, pp. 339–354, Mar. 1984, doi: 10.1093/mnras/207.2.339.
- [26] Y. Itikawa, "Rotational Transition in an Asymmetric-Top Molecule by Electron Collision: Applications to H₂O and H₂CO," *Journal of the Physical Society of Japan*, vol. 32, no. 1, pp. 217–226, Jan. 1972, doi: 10.1143/jpsj.32.217.
- [27] V. Strel'nitsky, 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, Dec. 2002, doi: 10.1086/344244.

Information about the authors

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

Alexandr E. Volvach, Dr. 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.