

УДК 524.527

НЕОБЫЧНАЯ ПО МОЩНОСТИ ВСПЫШКА МАЗЕРА ВОДЯНОГО ПАРА, ПРОИЗОШЕДШАЯ В ГАЛАКТИЧЕСКОМ ИСТОЧНИКЕ W49N

© 2019 г. Л. Н. Вольвач^{1*}, А. Е. Вольвач^{1,2}, М. Г. Ларионов³, П. Волак⁴,
Б. Крамер⁵, К. Ментен⁵, А. Краус⁵, Я. Бранд^{6,7}, А. Заничелли⁶, С. Поппи⁸,
С. Ригини⁶, А. В. Ипатов², Д. В. Иванов², А. Г. Михайлов², А. Мельников²

¹Отдел радиоастрономии и геодинамики, Крымская астрофизическая обсерватория РАН,
Кацивели, Россия

²Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

³Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Астрокосмический центр, Москва, Россия

⁴Центр астрономии, факультет физики, астрономии и информатики,
Университет Николая Коперника, Торунь, Польша

⁵Институт радиоастрономии Общества им. Макса Планка, Бонн, Германия

⁶Национальный институт астрофизики, Институт радиоастрономии, Болонья, Италия

⁷Итальянский региональный центр ALMA, Институт радиоастрономии, Болонья, Италия

⁸Национальный институт астрофизики, Астрономическая обсерватория Кальяри,
Селаргиус, Италия

Поступила в редакцию 14.11.2018 г.; после доработки 15.03.2019 г.; принята к публикации 22.03.2019 г.

По данным длительного мониторинга галактического мазерного источника W49N в линии водяного пара (переход $6_{16}-5_{23}$, частота линии $f = 22.235$ ГГц), выполненного на радиотелескопах РТ-22 (Симеиз), РТ-32 (Торунь), РТ-100 (Эффельсберг) и РТ-32 (Медичина) зарегистрирована самая мощная за всю историю наблюдения вспышка, начавшаяся в сентябре 2017 г. и продолжавшаяся в 2018 г. На отдельных этапах мониторинг вспышки производился ежедневно. Получена детальная форма изменения спектральной плотности потока излучения источника в зависимости от времени. В максимуме поток превысил уровень $P \approx 8 \times 10^4$ Ян. Такое значение потока впервые было зафиксировано за все время наблюдений за объектом. Получены важные выводы, связанные с деталями механизма излучения в линии водяного пара H_2O . Зафиксировано экспоненциальное нарастание плотности потока излучения во вспышке, как на стадии подъема, так и спада. Полученные данные свидетельствуют, что мы имеем случай ненасыщенного мазера, который остается в этом положении вплоть до максимальных значений плотностей потоков излучения. Дополнительным аргументом в пользу ненасыщенного состояния мазера является форма зависимости ширины линии от потока. Характер изменений спектральной плотности потока, по-видимому, связан с резким увеличением плотности среды и потока квантов. Это в свою очередь приводит к увеличению температуры от начального уровня в (10–40) К до сотен К. Получены интерферометрические карты объекта на этапе подъема спектральной плотности потока вспышки. Рассмотрен возможный механизм первичного энерговыделения в источнике W49N.

DOI: 10.1134/S0004629919080061

1. ВВЕДЕНИЕ

Открытие мазерного перехода ($6_{16}-5_{23}$) в молекуле водяного пара в 1969 г. в космических источниках связано с появлением 2μ обзора неба (IRC) [1, 2]. На основе данных этого обзора было

обнаружено большое количество мазеров водяного пара, в том числе источник W49N — один из ярчайших объектов мазерного излучения [1, 2].

Мазерный источник W49N ассоциируется с радиокомпактной НП областью с радиусом менее $3.5''$ [3, 4]. Приведенная угловая величина соответствует ~ 0.32 пк, если принять расстояние до объекта 11 кпк [5].

*E-mail: volvach@bk.ru

В широком диапазоне скоростей $+300$ км/с в объекте зарегистрировано множество линий мазера водяного пара. Большая часть из них сосредоточена в компактной области размером 0.1 пк. Было замечено, что источники, расположенные в таком небольшом объеме пространства и обладающие такой большой дисперсией скоростей, не могут представлять собой динамически стабильную систему [6].

Другая проблема состояла, собственно, в объяснении широкого диапазона скоростей линий излучения мазера водяного пара в W49N (≈ 600 км/с). Аккрецией вещества на протозвезду это явление объяснить нельзя, так как скорости аккреции не превышали нескольких десятков км/с [7]. В этой связи были предложены другие механизмы ускорения: за счет звездного ветра от горячих массивных звезд, радиационного давления и ударных волн [6] и даже более редкий механизм ускорения, связанный с взрывом сверхновых звезд [8]. Тем не менее детальная физическая картина этих процессов остается до конца непонятной.

Низкоскоростные детали мазерной линии водяного пара обнаруживают значительную переменность плотности потока в диапазоне от часов до многих лет. Детальный мониторинг плотности потока обнаружил его возрастание до 80 кЯн [9].

Ранние интерферометрические данные указывают на многокомпонентность области излучения H_2O . Так, по данным [10, 11] существует шесть основных областей излучения линии водяного пара в области $3'' \times 1.5''$. Предпринимались также попытки обнаружения линейной поляризации [12].

Задержка по времени между излучением компонентов в источнике W49N в мазерной области размерами $\sim 2 \times 10^{17}$ см соответствует распространению возмущения со скоростью света, что может указывать на радиационный механизм накачки мазера [13].

Отмечено наличие сложной структуры компонентов мазера водяного пара в W49N и значительное их блендирование, что существенно затрудняет интерпретацию наблюдательных данных и построение физической картины излучения мазера водяного пара в этом объекте.

Общая картина области излучения H_2O складывается таким образом. В плотной среде молекулярного водорода, в оболочках вокруг протозвезд имеется нагрев среды, в том числе излучением, ударными волнами, протозвездными выбросами или аккрецией вещества. Содержание H_2O может составлять ощутимую величину ($\sim 10^{-4}$) по отношению к водороду. Это значение на 4–5 порядков выше, чем среднее соотношение в Галактике [14–16]. Испаряясь при температурах около

130 К, молекулы воды становятся преобладающими в газовой составляющей протозвезд наравне с молекулой CO. Данное соотношение может объяснить высокие значения потоков во вспышках в линиях мазеров водяного пара, которые проявляются в областях звездообразования в зонах НП.

Мазеры водяного пара ассоциируются с другими мазерными линиями, в частности с ОН. На это указывал Гвинн, отмечая, что ударная диссоциация H_2O в присутствии водорода и притока энергии приводит к возникновению ОН излучения первого типа [17]. Тем не менее отсутствуют твердые доказательства тесного совпадения излучений в указанных линиях.

В работе представлены результаты длительного мониторинга W49N в линии H_2O на частоте 22 ГГц. Зафиксирована мощная вспышка — одна из сильнейших за все время наблюдений этого объекта. Предложена интерпретация полученных экспериментальных данных.

2. МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Спектрально-поляриметрический радиометр со спектроанализатором параллельного типа, использовавшийся для приема и регистрации сигналов от источников в линии водяного пара на РТ-22 в Симеизе, имел 512 и (или) 2048 каналов и разрешение 8 и 2 кГц (105 и 26 м/с по лучевой скорости в линии H_2O) соответственно [18]. В спектральные данные, получаемые при наблюдениях, вносилась поправка за поглощение в атмосфере (τ) и изменение эффективной площади ($A_{\text{эфф}}$) радиотелескопа от угла места. Полоса приема информации составляла 4 МГц при использовании системы регистрации Марк-5В+ и 16 МГц при записи на регистраторе РДР1. Шумовая температура системы $T_{\text{ш}}$ и поглощение в атмосфере определялись по калибровочной ступеньке (ГШ), приведенной к апертуре радиотелескопа с помощью согласованной нагрузки, находящейся на рупоре при комнатной температуре и температуре жидкого азота, разрезам атмосферы. Указанная процедура необходима, чтобы учесть затухание и вносимые шумы между входами рупора и входного усилителя приемника. $T_{\text{ш}}$ изменялась в пределах 150 – 200 К в зависимости от погодных условий. Калибровка по потоку производилась с использованием источников DR 21, Vir-A, Cug-A. Ширина диаграммы направленности радиотелескопа на 22 ГГц составляла $150''$, чувствительность — 13 Ян/К.

Круговая и линейная поляризации использовались при приеме данных в разделенных по времени режимах. В случае приема в круговой поляризации

использовался поляризатор, работающий на эффекте Фарадея. Цифровой выходной сигнал радиометра интегрировался в течение 3 мин при каждом повороте плоскости поляризации поляризатора на фиксированный угол и регистрировался при помощи спектроанализатора. Антенная температура T_a принимаемого излучения калибровалась по сигналу от генератора шума ГШ.

Высокочувствительная приемная система на длину волны 1.35 см была установлена во вторичном фокусе РТ-22. Перестраиваемые гетеродины синхронизировались высокостабильной частотой 5 МГц от водородного стандарта частоты VCH-1005 и обеспечивали преобразование входных частот приема в промежуточную частоту с указанной выше полосой [19]. Весь цикл наблюдений линий мазера водяного пара состоял в накоплении сигнала в течение 5–10 мин при наведении на источник и при отведении с источника на градус в сторону от источника. Циклы могли повторяться для достижения необходимого отношения сигнал/шум.

Наблюдения на 100-метровом радиотелескопе в Эффельсберге проводились с приемником на длину волны 1.3 см, установленном во вторичном фокусе. Центральная частота приема была равна 22.235 ГГц, ширина диаграммы направленности составляла $\sim 38''$. Спектральные наблюдения проводились с использованием FFT спектрометра с 65 535 каналами. Полоса пропускания составляла 100 МГц, разрешение по скорости около 20 м/с. В спектральные данные, получаемые при наблюдениях, вносились поправки за поглощение в атмосфере и зависимости чувствительности телескопа от угла места. Коэффициент пересчета от антенной температуры к плотности потока определялся методом непрерывных наблюдений (в режиме сканирования) калибровочных источников 3C286, NGC7027 и др. [20].

Методики наблюдений на 32-метровых радиотелескопах в обсерватории Торунь (Польша) и в Медине (Италия) были схожи с методикой, используемой в Эффельсберге. В обсерватории Торунь цифровой автокоррелятор на 4096 каналов имел разрешение по скорости 26 м/с.

3. МОНИТОРИНГ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА W49N В ЛИНИИ H₂O

Регулярный длительный мониторинг W49N был начат в сентябре 2017 г. и проводился параллельно с наблюдениями мазера IRAS 18316-0602, в котором в это время была зафиксирована развивающаяся мощная вспышка. Данные спектральных

измерений снимались с интервалами времени 1–2 дня. На рис. 1 показана зависимость спектральной плотности потока излучения в линии водяного пара на скорости около 6 км/с, полученной по максимумам спектральной линии.

Так же, как и в случае вспышек мазерных источников в OrionKL, IRAS 18316-0602, такая форма изменений спектральной плотности потока может свидетельствовать, что в мазерном объекте произошли резкие изменения физических характеристик областей излучения мазера водяного пара. Эти изменения могут быть связаны с резким впрыском энергии, что привело к подъему температуры, плотности, как вещества самой глобулы, так и квантов падающего излучения.

Были предприняты шаги, чтобы шкалы данных, полученных на разных телескопах, были согласованы в пределах 5–10%. Для этого сравнивались значения потоков источников в определенные даты наблюдений. Дополнительно следует учесть, что вблизи максимальных значений ежедневные изменения амплитуды могут составлять десятки процентов при экспоненциальном росте (см., например, [30]).

По данным [5] W49N находится на расстоянии 11 кпк от Солнца и является одним из самых далеких мазеров внутри нашей Галактики. Можно использовать полученное расстояние до мазера для оценки болометрической светимости ассоциированного с ним ИК источника и класса возбуждающей звезды. Принимая во внимание необходимый параметр возбуждения, требуемый для компактной области НП ($u = 110 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-2}$), и интегральную инфракрасную светимость, мы приходим к необходимости иметь в качестве центрального источника первичного энерговыделения массивную звезду раннего спектрального класса O5 со светимостью $L \sim 4 \times 10^6 L_{\odot}$ [21]. То есть мы можем иметь дело с массивным горячим гигантом в десятки солнечных масс, способным ионизовать плотную среду вокруг себя на расстоянии $10^{17} - 10^{18}$ см.

Таким образом, источник W49N вместе с IRAS 18316-0602 являются самыми мощными галактическими киломазерами. Если поставить W49N на место Orion KL, поток был бы 50 000 кЯн, что почти в 10 раз превышает максимальное значение самой мощной вспышки в Орионе за всю историю его наблюдения (≈ 6000 кЯн).

Гигантская вспышка мазера водяного пара в W49N началась с апреля 2017 г. и продолжалась в 2018 г. Анализ кривой мониторинга плотности потока во время вспышки позволяет сделать важные выводы.

Форма вспышки не симметрична. Склоны можно аппроксимировать экспоненциальной зависимостью. Экспоненциальная форма кривой плотности потока мазера не противоречит состоянию

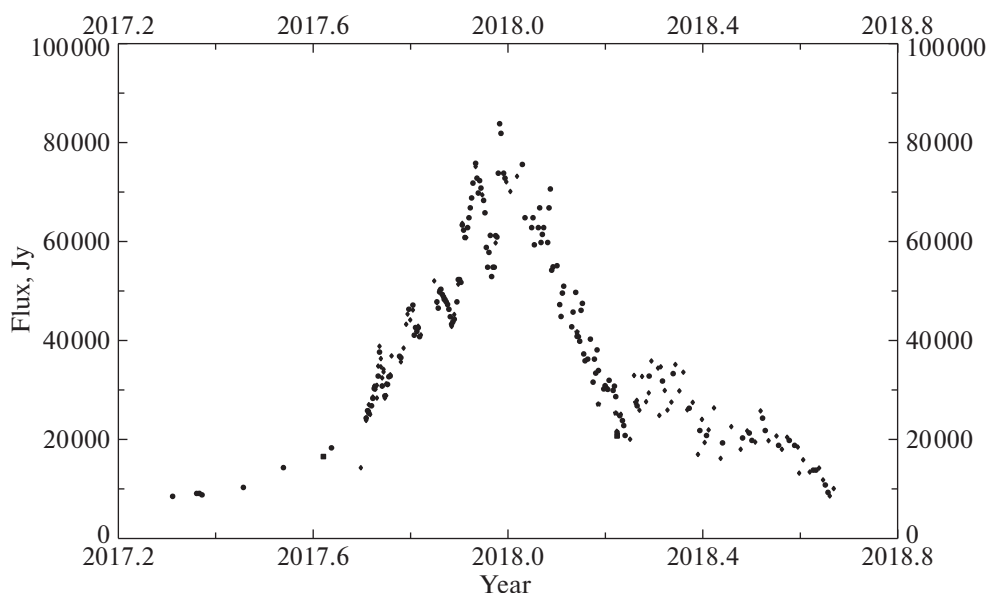


Рис. 1. Долговременный мониторинг W49N в линии водяного пара (кружками показаны данные, полученные в Симеизе, ромбами — в Туруни, квадратами — в Эффельсберге, звездочками — в Медичине).

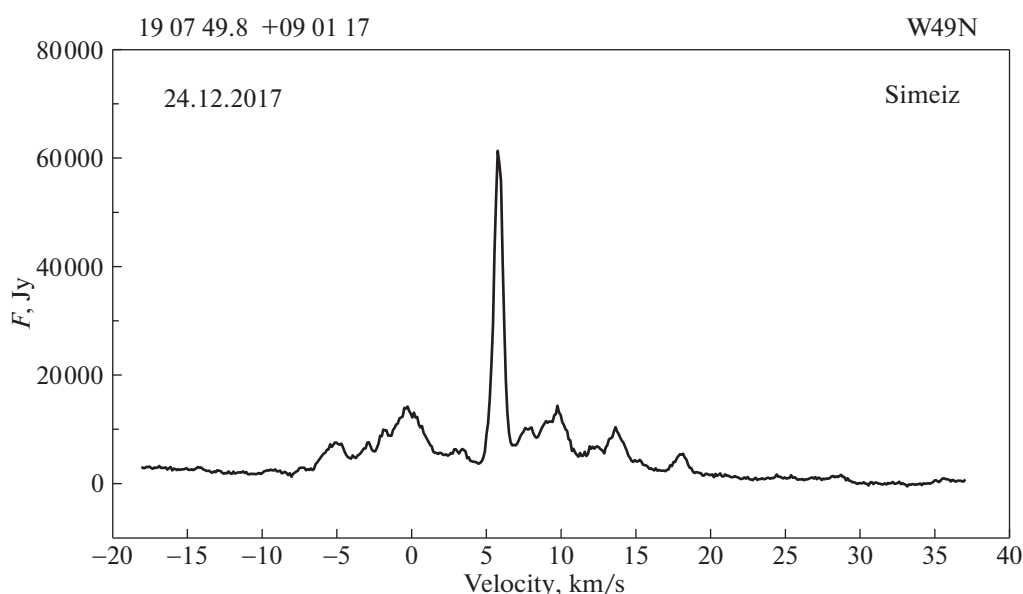


Рис. 2. Линия водяного пара в W49N в максимуме вспышки.

мазера во время вспышки, когда он работает в ненасыщенном режиме и усиление мазера возрастает экспоненциально с экспоненциальным ростом оптической толщи [22].

Симметричная форма центральной части мазерной линии W49N вблизи максимальной фазы и полуширина линии, снижающаяся до 50 кГц, свидетельствуют в пользу однокомпонентного источника, ответственного за основную долю увеличения плотности потока. Образцы записей линии

водяного пара вблизи максимума вспышки 2017–2018 гг. показаны на рис. 2 и 3.

Линия вблизи нулевой скорости (относительно локальной системы покоя) имеет спектральную плотность потока, превышающую 15 кЯн. Двенадцать разрешенных спектрометром линий превышают уровень плотности потока 5 кЯн. Если бы W49N находился на расстоянии Орион KL, то эти линии имели бы спектральные плотности потоков более 5000 кЯн, что практически равно самой

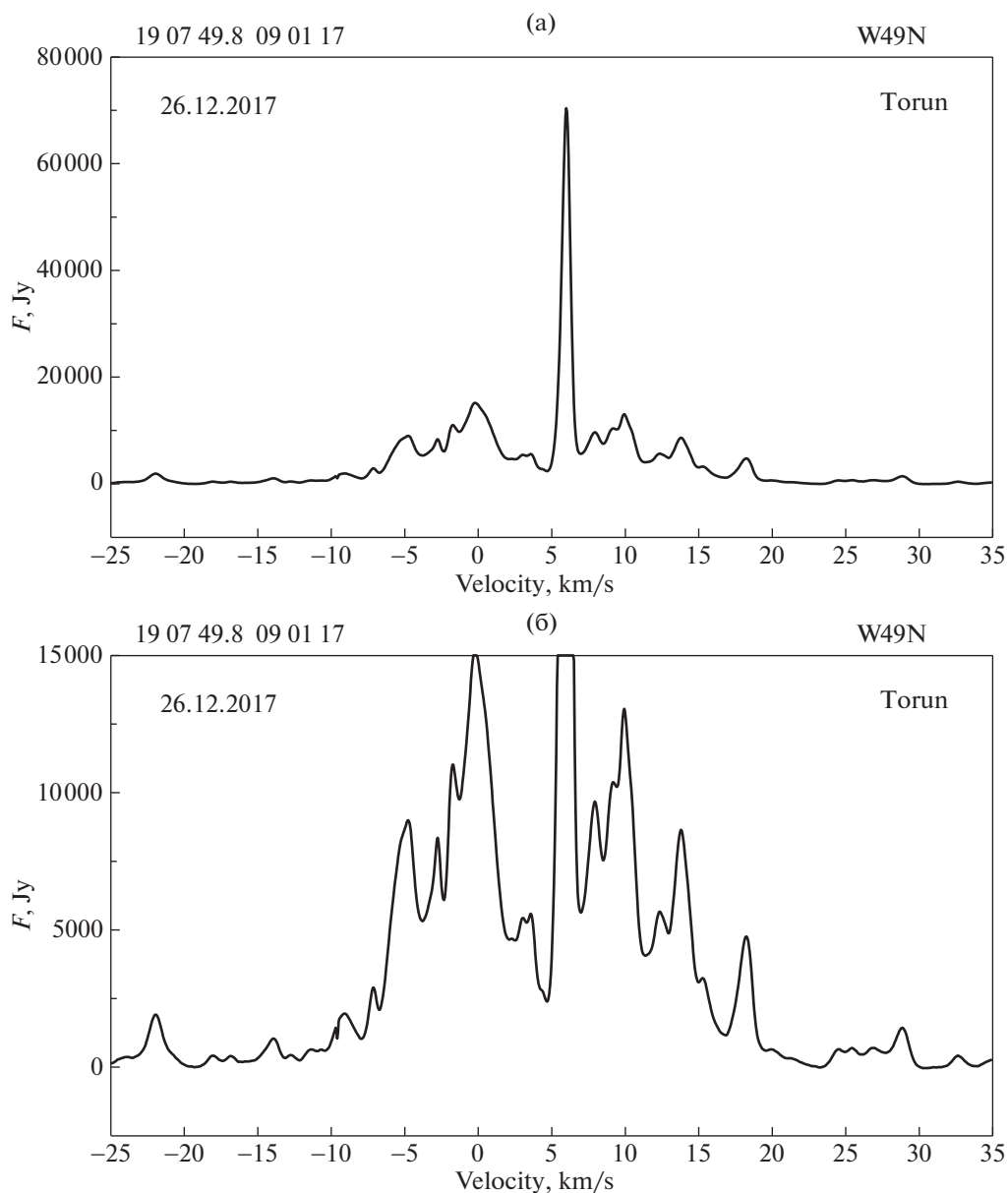


Рис. 3. а) Образец записи линии водяного пара в W49N вблизи максимума вспышки. б) Образец записи линии водяного пара в W49N вблизи максимума вспышки до уровня плотности потока 15 кЯн.

мощной вспышке в Oriou KL, произошедшей в 1998 г. [24].

В мае 2017 г. компонент на скорости около 6 км/с имел плотность потока ниже 10 кЯн, в то время как поток ближайших компонентов был в 1.5–2 раза больше (рис. 4). В середине августа 2017 г. на подъеме вспышки был момент, когда ближайшие к центральной линии компоненты имели равную с ней спектральную плотность потока излучения 16 кЯн (рис. 5). Эти линии не изменились в амплитуде вплоть до максимальной фазы вспышки (24 декабря 2017 г., рис. 2).

На склонах вспышки ниже 5000 Ян появляется сильное блендирование за счет многих компонентов, попадающих в диаграмму направленности радиотелескопа. Пример записи линии до уровня 15 кЯн приведен на рис. 3б, 4 и 5. На примерах видно, что исследуемая линия узкая. Исследование формы линии приводит к выводу, что она отражает излучение единичной глобулы. Соседние линии значительно блендированы излучением нескольких глобул. На рис. 2 приведен образец записи линии в максимуме вспышки 24 декабря 2017 г.

В начале 2018 г. мазерный источник все еще вблизи максимальной стадии вспышки, имея

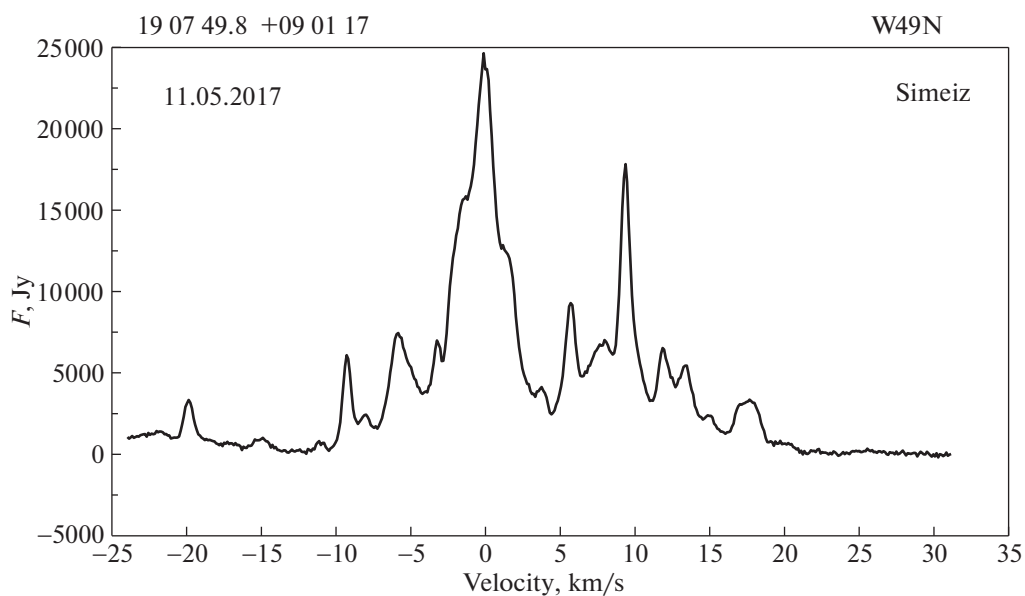


Рис. 4. Фаза подъема спектральной плотности излучения вспышки в W49N.

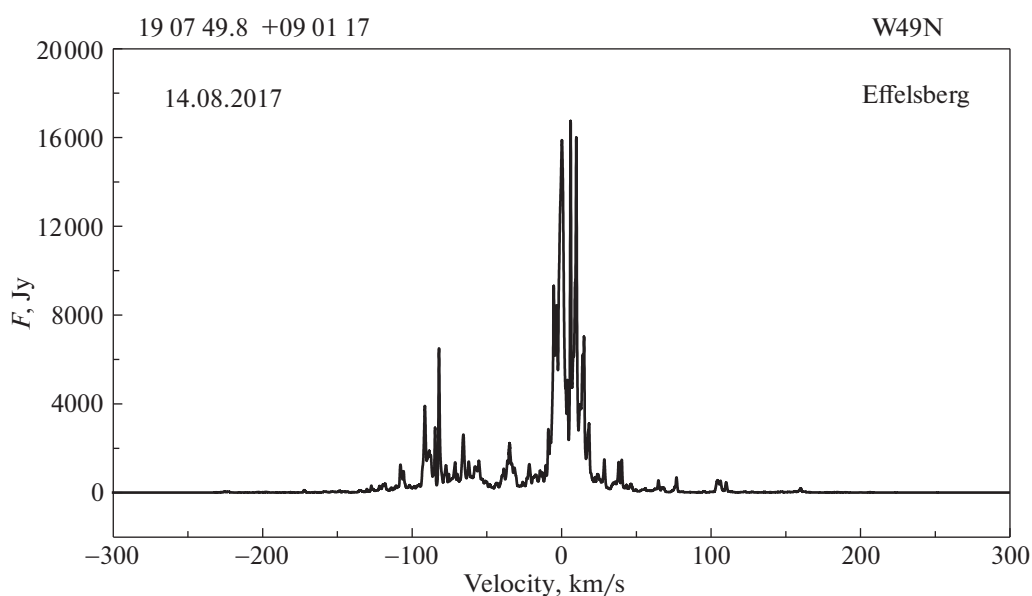


Рис. 5. Фаза подъема спектральной плотности излучения вспышки в W49N.

спектральную плотность потока около 75 кЯн (рис. 6а, б). На рис. 7 показан спектр низкоскоростных линий в W49N во время экспоненциального снижения спектральной плотности потока вспышки.

Как и в случае гигантской вспышки в 2017–2018 гг. в IRAS 18316-0602, в рассматриваемой нами вспышке наблюдается зависимость ширины линии от потока. В координатах $(\ln F, \Delta V^{-2})$ эта зависимость представлена на рис. 8, где F — плотность потока в максимуме линии в янских, а ΔV — ширина линии на уровне 0.5, выраженная в км/с.

Экспериментальные данные нанесены на графике точками. График аппроксимирован прямой линией. В максимуме активности линия симметричная и описывается гауссианой.

Такая зависимость ширины линии от потока может свидетельствовать о том, что мазер находится в ненасыщенном состоянии. Сходные результаты были получены и для гигантских вспышек в Orion KL и в IRAS 18316-0602 [23, 24]. В обоих случаях было сделано заключение о том, что мазеры находятся в ненасыщенном состоянии вплоть до максимальной амплитуды вспышки.

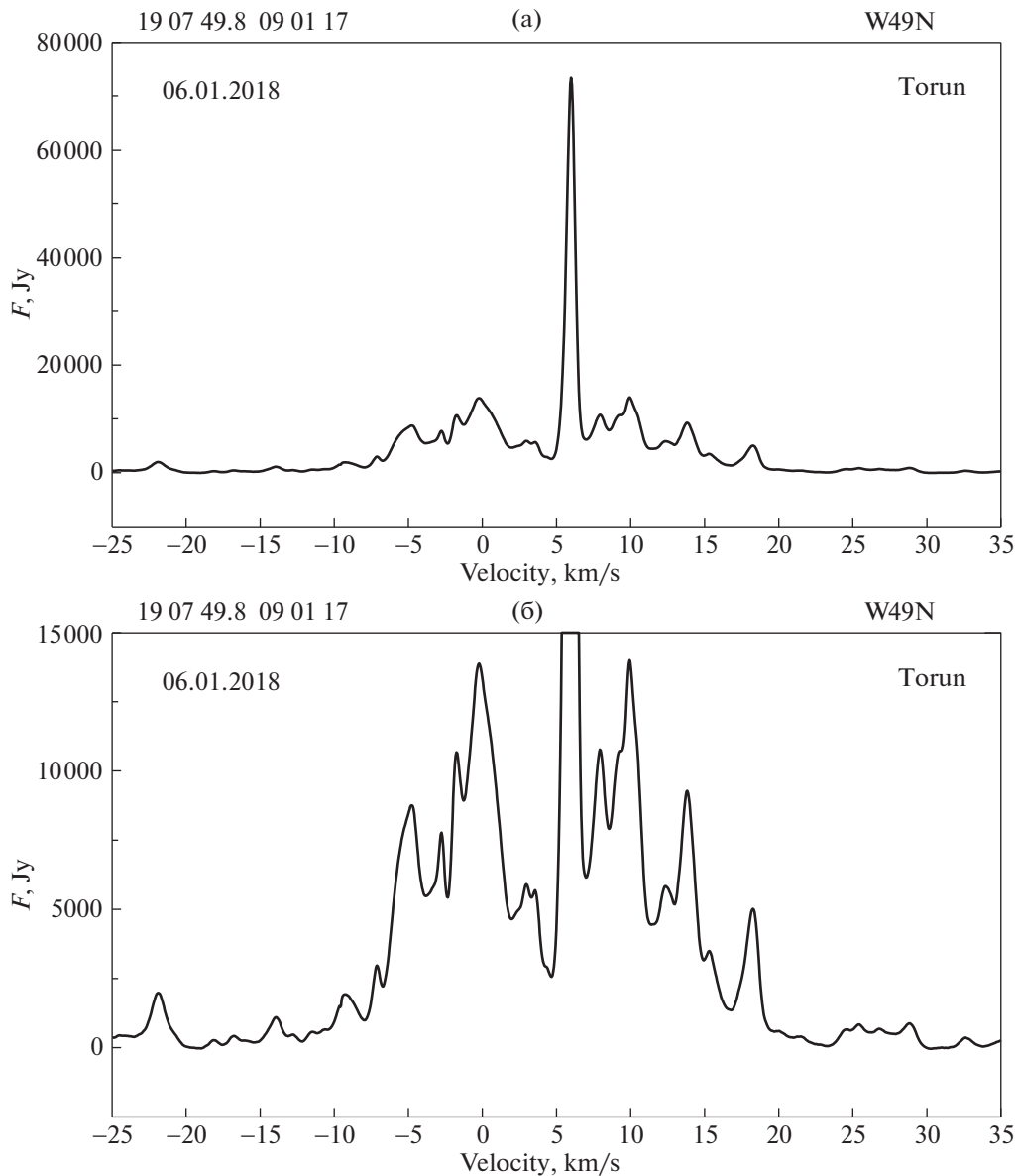


Рис. 6. а) Исследуемая мазерная линия в максимальной фазе перед началом снижения спектральной плотности потока. б) Исследуемая мазерная линия в максимальной фазе перед началом снижения спектральной плотности потока до уровня 15 кЯн.

Кратные звезды в центре туманности также могут обеспечить наблюдаемую инфракрасную светимость с классом самой массивной звезды O5. Это одни из самых массивных звезд в Галактике.

Исследователи [25] не нашли линейной поляризации в W49N на уровне 1% от величины потока. Это позволило им использовать этот источник для поляризационных калибровок аппаратуры.

4. ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Интерферометрические данные по структуре мазеров водяного пара в W49N указывают, что

области излучения сосредоточены в отдельных местах активности, размерами $\sim 10^{16}$ см. Их насчитывается около десятка, и они занимают общую зону размерами $\sim 3 \times 10^{17}$ см [10, 26, 27]. Исследователи полагают, что области активности так или иначе связаны с молодыми массивными звездами, находящимися на стадии эволюции до главной последовательности.

В объекте наблюдается беспрецедентное блендирование как в пространственном расположении, так и в спектральной области. По данным указанных авторов более половины всех мазерных источников в этой области имеют компоненты в спектрах

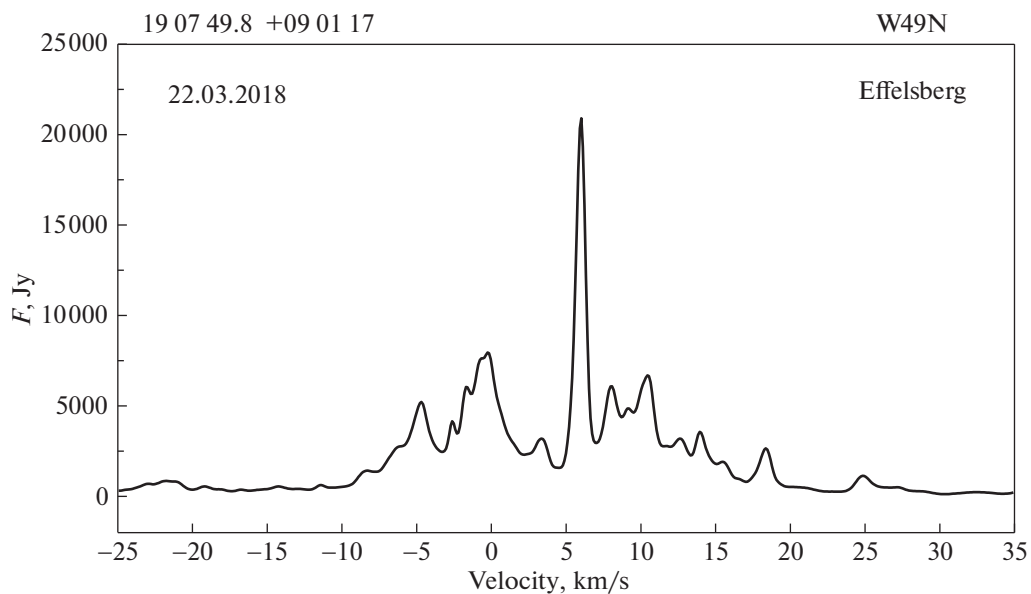


Рис. 7. Поведение спектра линий в фазе снижения спектральной плотности потока исследуемой вспышки.

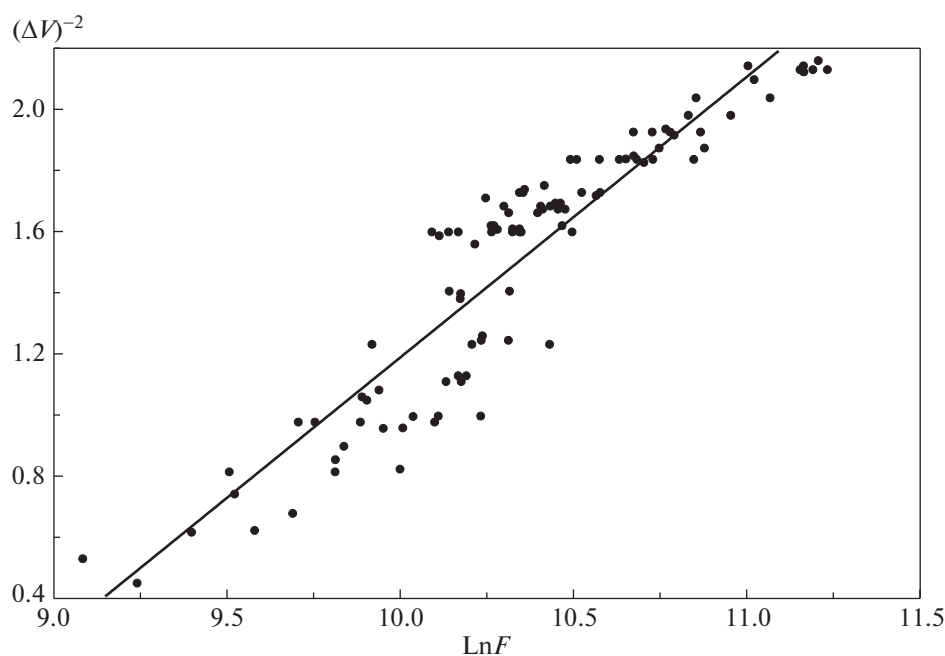


Рис. 8. Зависимость ширины линии мазера водяного пара от потока во время вспышки в W49N в 2017–2018 гг.

в пределах 1.0 км/с. Такой величины могут достигать и значения дрейфов частот линий со временем даже в отдельном мазерном источнике. Поэтому, если наблюдать объект через какое-то время, то неясно, наблюдаете ли вы дрейф частоты линии в том же источнике, или это уже другой источник с близкими частотными характеристиками. Это показывает сложность интерпретации физической картины в таком сложном радиоисточнике.

Тем не менее успехи интерферометрических наблюдений трудно недооценивать. Уже в 1973 г. были установлены ограничения на размеры ярких мазерных глобул в источнике W49. Их величина составляла $< 5 \times 10^{-4}$ угл. с. Учитывая расстояние до объекта, это менее 5 а.е. [10].

Мазерный источник W49N в линии водяного пара в интерферометрическом режиме наблюдался в сентябре 2017 г. в виде серии 4 последовательных

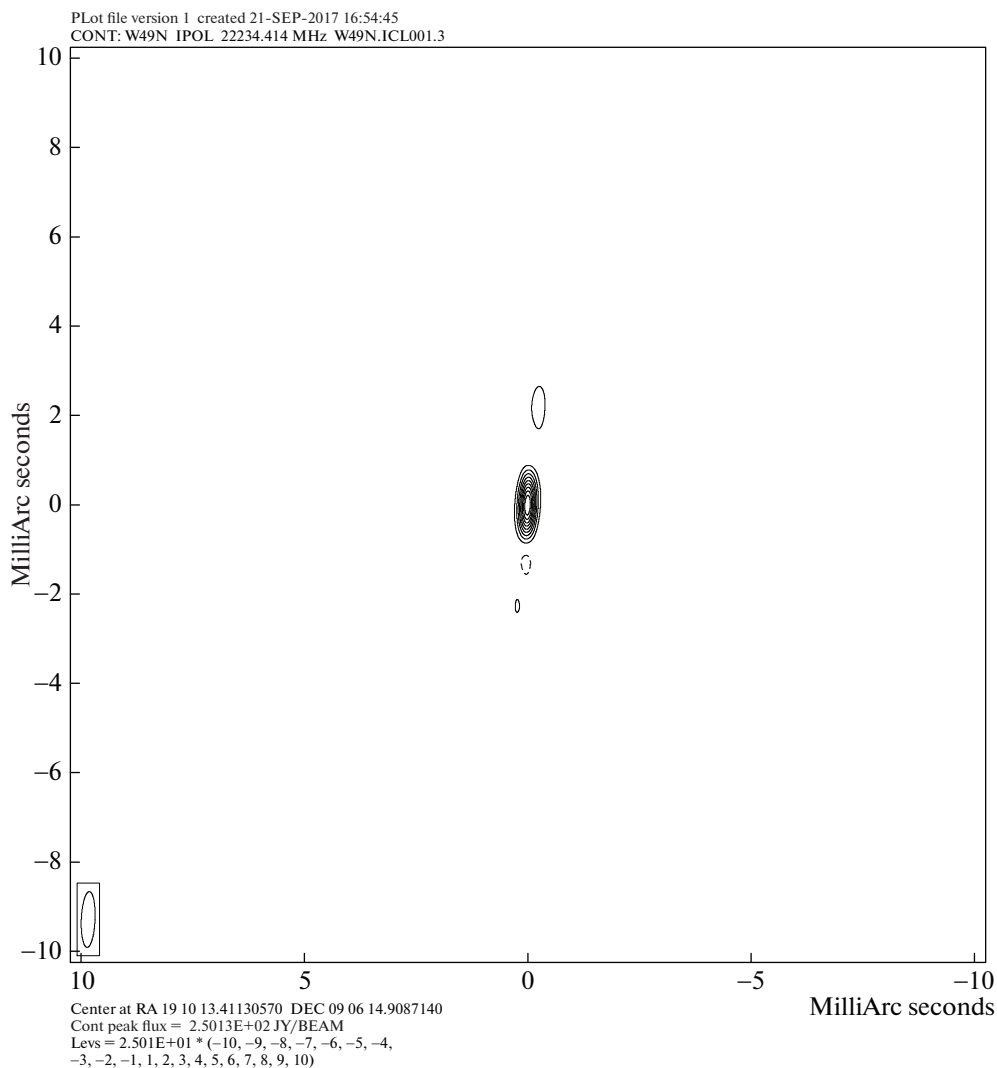


Рис. 9. Интерферометрическое изображение W49N, полученное на базах “КВАЗАР-Симеиз” 18 сентября 2017 г.

наблюдательных дней (17, 18, 26 и 27 сентября). В состав интерферометра входили три 32-м радиотелескопа РСДБ-комплекса “Квazar-КВО” и 22-м радиотелескоп — РСДБ станция Симеиз. В РСДБ наблюдениях начало полосы было установлено на частоту 22.229 ГГц, длительность сканов исследуемого источника составляла 20 мин. В качестве калибратора был выбран источник 3C454.3, который наблюдался сканами по 5 или 20 мин в начале, середине и конце сеанса. Корреляционная обработка данных РСДБ наблюдений проводилась на программном корреляторе DiFX 2.4.1 в ИПА РАН на гибридном блейд-серверном кластере. Карты, полученные 18 и 27 сентября 2017 г., когда источник был в состоянии подъема плотности потока излучения, показаны на рис. 9 и 10. На рис. 11, 12 показаны спектры низкоскоростных линий во время проведения интерферометрических сеансов.

На приведенных интерферометрических картах

(рис. 9 и 10) 1 мс дуги соответствует линейному масштабу около 13 а.е. Данный масштаб получен из расчета того, что расстояние до W49N составляет 11 кпк. При таком разрешении отдельные источники мазерного излучения остаются неразрешенными. Учитывая, что наземная РСДБ интерферометрия обеспечивает лишь вдвое более высокое разрешение, перспективными можно считать только наземно-космические эксперименты. Тем не менее общая картина распределения яркости в данном объекте наблюдается достаточно определенно. Мы видим яркую центральную деталь, которую можно соотнести с рассматриваемым источником мазерного излучения, в котором произошла сверхмощная вспышка мазера водяного пара. Другие детали на карте практически отсутствуют.

На рис. 13 приведено состояние линий на спадающей ветви вспышки мазера в W49N. Структура смежных линий существенно изменилась. Чрезвы-

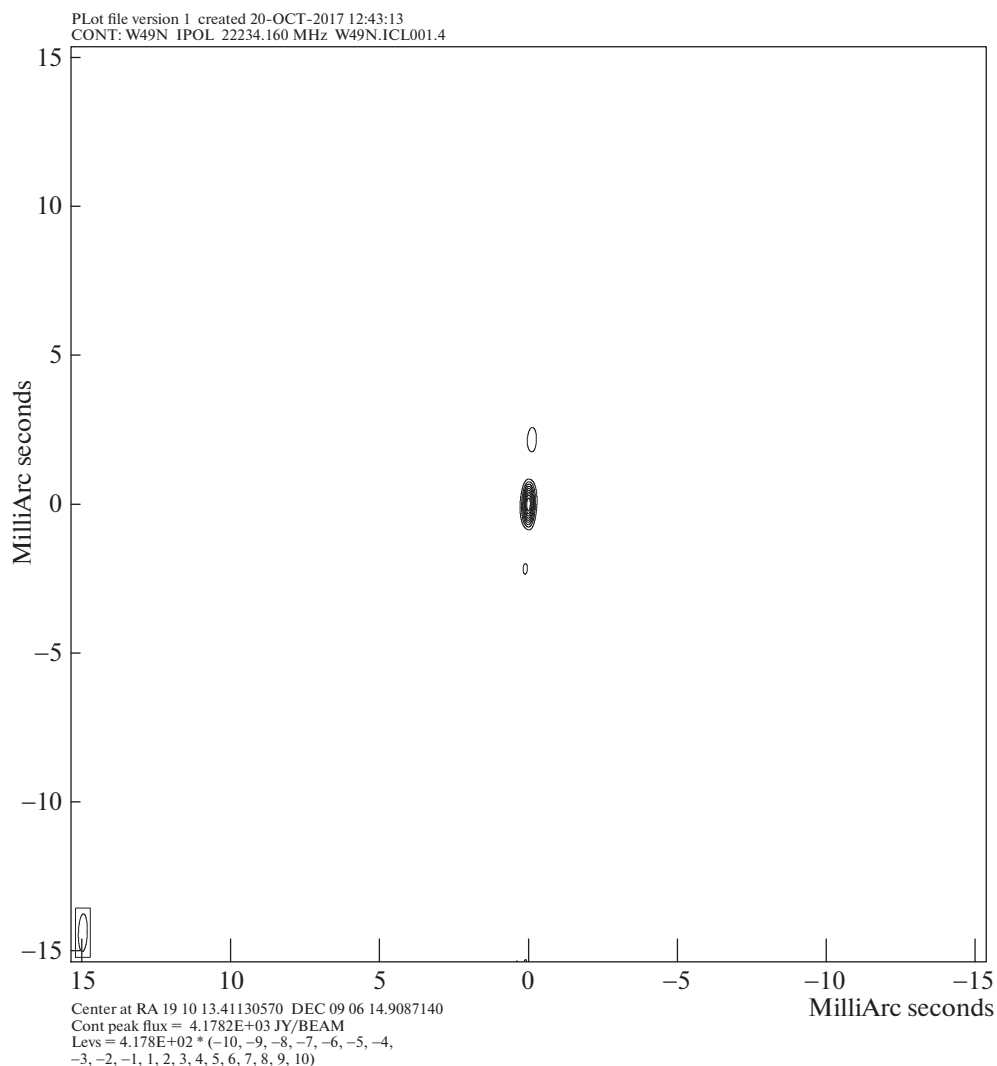


Рис. 10. Интерферометрическое изображение W49N, полученное на базах “КВАЗАР-Симеиз” 27 сентября 2017 г.

чайное блендирование по лучу зрения и по частоте затрудняет определение параметров индивидуальных мазерных источников, которые выделяются только во время сильных вспышек. В эти периоды спектральная плотность потока от них существенно превышает все остальные и появляется возможность определить координаты, частоту мазерной линии, ее параметры и временные характеристики. Полученные данные согласуются с результатами наблюдений других мощных галактических источников мазерного излучения, согласно которым компактные зоны HII имеют размеры $l_{\text{HII}} \approx 10^{16}$ см [27]. Молекулярные диски, где могут располагаться мазерные источники, имеют размеры $l_{\text{disc}} \geq 10^{17}$ см (10^4 а.е.). Сами же мазерные источники имеют размеры, по-видимому, менее 1 а.е.

Можно сделать вывод, что интерферометрические данные, полученные во время вспышки мазера водяного пара в W49N, не противоречат данным

о наличии единичных компактных образований, ответственных за подъем плотности потока излучения в этом объекте во много раз.

В заключение этого раздела хотелось бы отметить еще одно важное обстоятельство, касающееся формы зависимости спектральной плотности потока излучения во время вспышки в W49N (рис. 1). Кривая изменения потока разительно похожа на гигантскую вспышку в Oriou KL — та же форма и та же продолжительность [24]. Авторы также делают вывод, что мазер во время вспышки находится в ненасыщенном состоянии.

5. К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПЕРВИЧНОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ W49N (ДИСКУССИЯ)

Существуют мнения относительно источников первичного энерговыделения, которые до настоя-

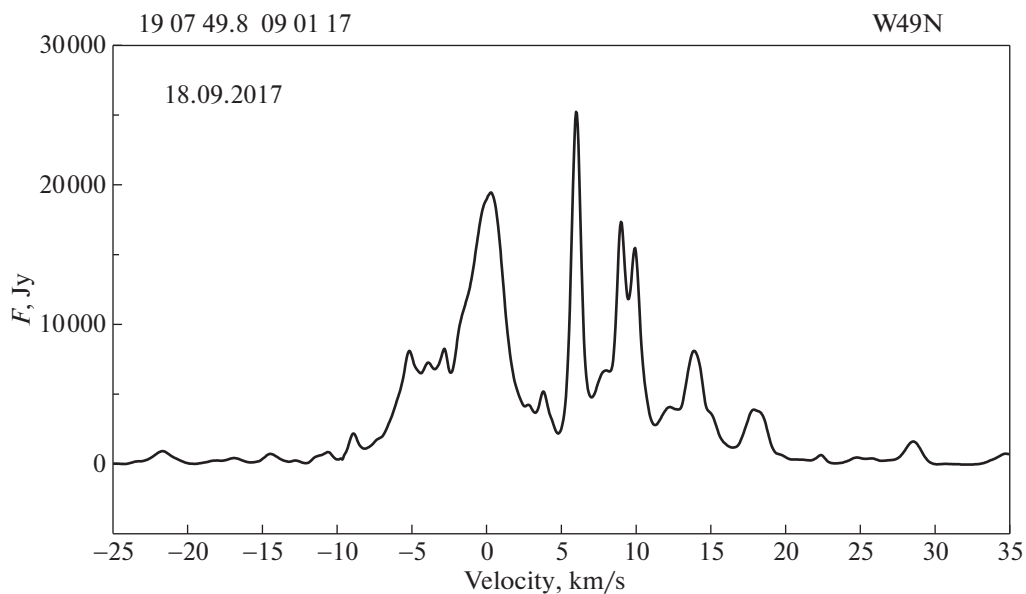


Рис. 11. Состояние низкоскоростных линий в спектре W49N в день проведения интерферометрических наблюдений 18 сентября 2017 г.

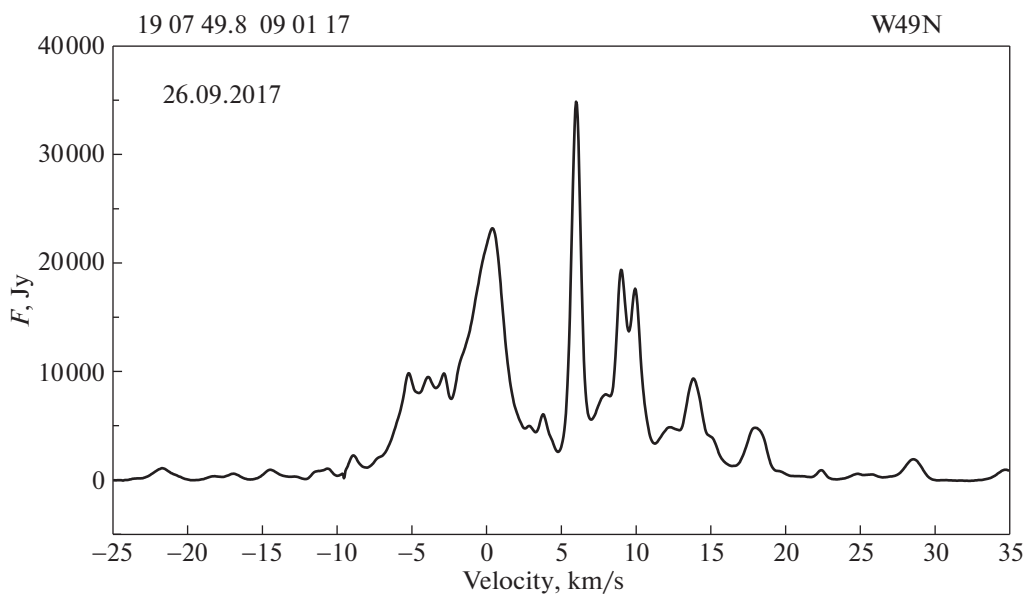


Рис. 12. Состояние низкоскоростных линий в спектре W49N в день проведения интерферометрических наблюдений 26 сентября 2017 г.

шего времени носят дискуссионный характер. Гигантские подъемы плотности потока мазеров водяного пара в моменты вспышек должны быть следствием мощных источников первичного энерговыделения.

Наблюдается картина быстрых изменений спектральных плотностей потоков линий, которые так или иначе связываются с изменениями активности центральной массивной звезды. Но остается главный вопрос: что является инициатором таких изменений в поведении центрального тела, обеспечи-

вающего такие мощные вспышки мазеров водяного пара?

Всякая предлагаемая модель первичного энерговыделения в системе мазерных источников должна объяснять комплекс наблюдаемых проявлений, в которые входят как низкоскоростные мощные вспышки мазерного излучения, так и высокоскоростные детали излучения космических мазеров. Длительность процесса вспышки (рис. 1) составляет более года. Процесс активации мазера продолжается в течение 6 мес., после чего

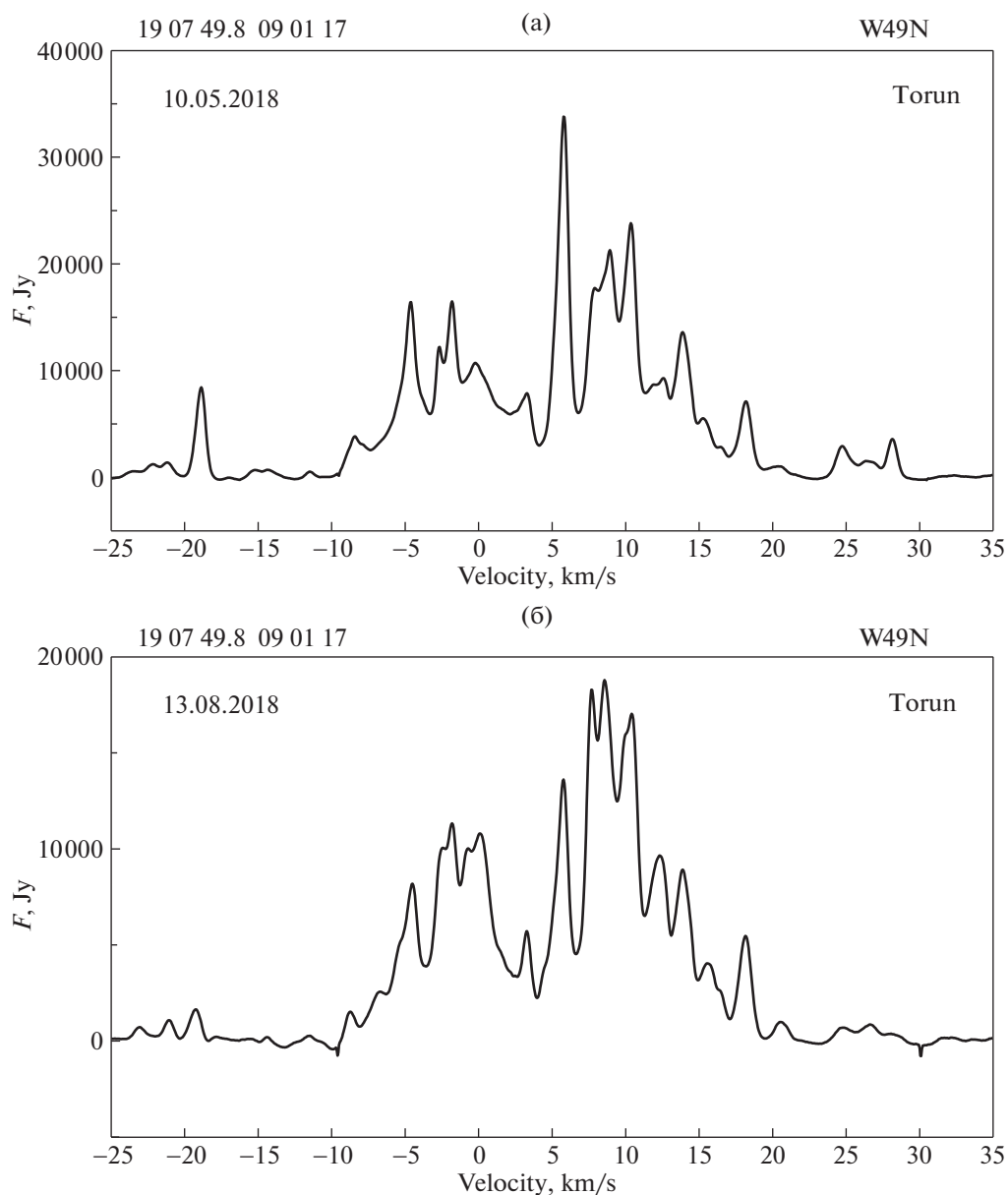


Рис. 13. Спектр низкоскоростных линий в W49N на ниспадающей ветви вспышки мазера водяного пара 10 мая 2018 г. (а) и 13 августа 2018 г. (б).

происходит спад плотности потока излучения. На то, что мазерная конденсация была, возможно, единственной, указывают факт наличия узкой линии излучения на фиксированной частоте и ее гауссообразная форма. Наблюдаемые параметры излучения в линии должны обеспечиваться высокой плотностью мазерного образования, его значительной массой и большим перепадом температуры, сохраняющимся в течение заметного промежутка времени, порядка нескольких месяцев. Необходимо указать на физический процесс, инициирующий поведение центрального тела и приводящий к изменению названных характеристик мазера в течение обозначенного

времени со стремительным подъемом излучения и его спадом. Все предлагаемые механизмы накачки мазеров водяного пара при объяснении гигантских вспышек сталкиваются с трудностями энергетического характера. Накачка излучением центральной звезды и все, что с ней связано, не может обеспечить наблюдаемую светимость в линии во время сверхмощных вспышек. Поэтому необходимо предложить механизм первичного энерговыделения, который смог бы обеспечить необходимую энергетику в максимуме гигантских вспышек и объяснить, почему центральная машина во время таких вспышек переходит в состояние

выброса гигантского количества энергии, в тысячу раз превышающую спокойное состояние.

Некоторыми авторами предлагалась модель пульсационно нестабильных массивных звезд [28]. При этом предполагаемую цикличность вспышек пытались объяснить сталкивающимися звездными ветрами двойных звезд [29]. Идея двойственности массивных звезд нам представляется продуктивной. В работе [30] мы развили эти представления на случай кратных массивных звезд, когда в объекте присутствует квазипериодическая составляющая излучения мазера водяного пара. Была высказана идея инициирования первичного энерговыделения в массивных кратных звездах раннего спектрального класса, которая может быть связана с частичными сбросами части оболочки центральной звезды под действием достаточно массивного компаньона в периастре кратной звездной системы.

Естественно предположить, что заметная доля массивных звезд на ранней стали эволюции являются двойными и кратными системами, образовавшимися в процессе эволюции газо-пылевого облака. В случае образования тесных массивных звездных систем возникает мощное гравитационное взаимодействие между звездами. При этом появляется возможность инициации источников первичного энерговыделения в газовой-пылевой облаках посредством частичного сброса оболочки центральной массивной звезды из-за гравитационного воздействия со стороны компаньона в периастре системы. Эпизодические сбросы оболочек звезды в принципе могут обеспечить энергетический процесс и объяснить гигантские вспышки мазерного излучения, происходящие эпизодически раз в 10–20 лет. Такие выбросы могут быть несимметричными, и преимущественное направление выброса зависит от ориентации орбиты. Этим можно объяснить тот факт, что в разных системах мы видим преобладание высокоскоростных линий того или иного знака. Кроме того, из-за эффекта проекции мы видим как низкоскоростные, так и высокоскоростные линии в объекте.

В случае W49N супервспышка продолжалась более года. Учитывая наличие в источнике высокоскоростной детали около 100 км/с, мы имеем скорость перемещения сброшенной оболочки $v \approx 10^7$ см/с (100 км/с) и расстояние, на которое переместится оболочка за время активации мазерной глобулы (6 мес.) $l \approx 1.5 \times 10^{14}$ см (11 а.е.), что более чем на порядок превышает размеры мазерных образований. Чтобы мазер находился в активированном состоянии, необходимо иметь размеры сброшенной оболочки, простирающейся на 11 а.е.

Необходимые для наблюдения мазерной линии энергетические затраты можно оценить следующим образом. Поток от источника на поверхности Земли $F_3 \approx 8 \times 10^4$ Ян. Зная расстояние от

Земли до W49N (~ 11 кпк) и полосу излучения в мазерной линии (~ 50 кГц), получим светимость в линии $L_{\text{маз}} \approx 0.1 L_{\odot}$. Отношение светимости в линии к светимости центральной звезды ($L_* \approx 10^6 L_{\odot}$) равно $N \approx 10^{-6}$. Необходимо еще учесть фактор рассеяния энергии, идущей от звезды до мазерной глобулы. До нее доходит доля энергии $(R_{\text{гл}}/R)^2 \approx (1.3 \times 10^{13}/1.3 \times 10^{16})^2 \approx 10^{-6}$, где $R_{\text{гл}}$ — размер глобулы, R — расстояние от центральной звезды до глобулы. Это означает, что центральная звезда может обеспечить необходимую энергию для обеспечения изотропной светимости мазерной глобулы. Необходимая для возбуждения глобулы энергия составляет величину $E \approx L_* \cdot t \approx 6 \times 10^{46}$ эрг, где L_* — светимость центральной звезды, t — длительность вспышки.

Например, за время своей эволюции массивная звезда отдает в окружающее пространство $E_* \approx 10^{-2} M_* c^2 \approx 0.6 \times 10^{54}$ эрг, то есть на 8 порядков больше. За время эволюции центральной массивной звезды (примерно миллион лет) может произойти множество сбросов оболочки, если дополнительно учесть, что масса сброшенной оболочки имеет величину $M_{\text{об}} \approx E/v^2 \approx 10^{31}$ г, что составляет около 10^{-4} от массы центральной звезды.

Зная характерное время между вспышечными явлениями, можно оценить примерные параметры орбиты компаньона системы в W49N. За время длительных наблюдений источника со времени его открытия в объекте зафиксированы единичные мощные вспышки мазера водяного пара. Полагая характерное время между вспышками 10 лет, на основе законов небесной механики получим размер эллиптической орбиты с полуосью ~ 30 а.е. для массивной центральной звезды $50 M_{\odot}$ в паре с менее, но все же массивным объектом. Таким образом, находясь вблизи перицентра системы несколько лет, компаньон массивной центральной звезды своим гравитационным взаимодействием может инициировать выброс в окружающее пространство некоторой доли звездной атмосферы. Двигаясь со скоростью в сотни км/с, сброшенная масса работает мощнее любого звездного ветра. Асимметрия направленности выбросов оболочки создает наблюдаемую асимметрию линий в широком спектре, если учесть, что выбросы в W49N происходят под углом 35° по направлению к лучу зрения [33]. Имея в виду, что вблизи перицентра звезды могут находиться несколько лет, данный механизм активации мазерного излучения нельзя исключить из рассмотрения.

В пользу предлагаемой концепции можно привести наблюдательные данные. В W49N мы видим спектр мазерных линий в широком диапазоне скоростей (500 км/с). На наш взгляд, наиболее

приемлемое объяснение этого предложено в работах [31, 32, 34]. Согласно их представлениям, высокоскоростные и низкоскоростные мазерные детали имеют один и тот же набор скоростей, но низкоскоростные детали перемещаются ближе к перпендикулярному направлению по отношению к лучу зрения из-за эффекта проекции. Это согласуется и с нашими представлениями о вытянутой оболочке центральной массивной звезды, перемещающейся в преимущественном направлении под некоторым углом к лучу зрения. Этот угол измерен и составляет 35° [33]. Низкоскоростные и высокоскоростные детали расширяются из общего центра [34], что может свидетельствовать в пользу идентичности механизма их возникновения. Можно себе представить и такое продолжение событий. Для расстояний от звезды до 0.1 пк скорость мазерных деталей находится в пределах 20 км/с. Далее она может возрасти до 200 км/с и более [33, 34]. Подобное ускорение объясняется переходом ударной волны в менее плотную окружающую среду [33]. Если верна гипотеза ускорения мазерных облаков ударными волнами от сброшенного центральной звездой вещества, то оценку размеров сброшенной оболочки следует пересмотреть в сторону уменьшения ее толщины. Интерферометрическими наблюдениями также показано, что как низкоскоростные, так и высокоскоростные детали показывают большие собственные движения [31, 34]. Это может свидетельствовать о физической идентичности мазерных образований (деталей).

Таким образом, предлагаемый нами механизм первичного энерговыделения не противоречит представлениям о физической картине образований гигантских вспышек в мазерных деталях в W49N, ORION KL, G25.65+1.05. Для подтверждения предлагаемой концепции необходимы дальнейшие мониторинги объекта на одиночных антеннах и РСДБ исследования в динамическом режиме.

6. ВЫВОДЫ

1. Выполнен длительный мониторинг галактического киломазера W49N в линии водяного пара (переход $6_{16}-5_{23}$, частота линии $f = 22.235$ ГГц) с использованием радиотелескопа РТ-22 КрАО, РТ-32 (Торунь), Эффельсберг (РТ-100) и Медичина (РТ-32).

2. Зафиксирована детальная форма кривой плотности потока излучения во время уникальной гигантской вспышки, продолжавшейся с сентября 2017 г. и в течение практически всего 2018 г.

3. Получены свидетельства того, что во время вспышки киломазер “работал” в ненасыщенном режиме: наблюдалась специфическая зависимость ширины линии от потока.

4. Отмечено совпадение формы кривой изменения потока со временем в гигантских вспышках в двух разных источниках — W49N и Orion KL, что может подтверждать тезис об идентичности процессов, происходящих во время возможных вспышек мазеров водяного пара.

5. Форма линии указывает, что вспышка произошла в единичном источнике.

6. Более подробно рассмотрен один из возможных стимуляторов источника первичного энерговыделения в системе и приводящий к вспышке киломазера и увеличивающий его поток во многие десятки раз. Этот взрывной процесс в центральной массивной звезде может быть связан с перманентным частичным сбросом ее оболочки.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторы выражают благодарность Национальному научному центру Польши, грант 2016/21/B/ST9/01455. Работа частично поддержана Программой 12 РАН и грантом РФФИ 19-52-4014. Частично основано на наблюдениях с помощью 100-метрового телескопа Эффельсберг Института радиоастрономии Общества им. Макса Планка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. H. Knowles, C. H. Mayer, A. C. Cheung, D. M. Rank, and C. H. Townes, *Science* **163**, 1055 (1969).
2. A. C. Cheung, D. M. Rank, C. H. Townes, D. D. Thornton, and W. J. Welch, *Nature* **221**, 626 (1969).
3. F. Sato, F. Akabane, and F. J. Kerr, *Australian J. Phys.* **20**, 197 (1967).
4. C. G. Wynn-Williams, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **151**, 397 (1971).
5. B. Zhang, M. J. Reid, K. M. Menten, et al., *Astrophys. J.* **775**, 79 (2013).
6. В. С. Стрельницкий, Р. А. Сюняев, *Астрон журн.* **49**, 704 (1972).
7. R. B. Larson, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* **11**, 219 (1973).
8. J. Silk and J. R. Burke, *Astrophys. J.* **190**, 11 (1974).
9. W. T. Sullivan, *Astrophys. J. Suppl.* **25**, 393 (1973).
10. J. M. Moran, G. D. Papadopoulos, B. F. Burke, K. J. Lo, et al., *Astrophys. J.* **185**, 535 (1973).
11. S. N. Knowles, K. J. Johnston, J. M. Morgan, B. F. Burke, K. Y. Lo, P. R. and G. D. Papadopoulos, *Astron. J.* **79**, 925 (1974).
12. S. H. Knowles, C. H. Mayer, W. T. Sullivan, and A. C. Cheung, *Science* **166**, 221 (1969).
13. R. H. Gammon, *Astron. and Astrophys.* **50**, 71 (1976).
14. M. Harwit, D. A. Neufeld, G. J. Melnik, and M. J. Kaufman, *Astrophys. J.* **497**, 105 (1998).

15. C. Ceccarelli, E. Caux, G. J. White, S. Molinari, et al., *Astron. and Astrophys.* **331**, 372 (1998).
16. B. Nisini, M. Benedettini, T. Giannini, E. Caux, et al., *Astron. and Astrophys.* **350**, 529 (1999).
17. W. D. Gwinn, B. E. Turner, W. M. Goss, G. L. Blackman, *Astrophys. J.* **179**, 789 (1973).
18. Н. С. Нестеров, А. Е. Вольвач, И. Д. Стрепка, В. М. Шульга, В. И. Лебедь, А. М. Пилипенко, *Радиофизика и радиоастрономия* **5**, 320 (2000).
19. А. Е. Вольвач, Л. Н. Вольвач, И. Д. Стрепка, А. В. Антюфеев, В. В. Мышенко, С. Ю. Зубрин, В. М. Шульга, *Изв. КРАО* **104**, 6, 72 (2009).
20. A. Kraus, T. P. Krichbaum, R. Wegner, A. Witzel, et al., *Astron. and Astrophys.* **401**, 161 (2003).
21. T. M. Heckman and W. T. Sullivan, *Astrophysical Letters* **17**, 105 (1976).
22. P. Goldreich, D. A. Keeley, and J. J. Kwan, *Astrophys. J.* **179**, 111 (1973).
23. T. Omodaka, T. Maeda, M. Miyoshi, A. Okudaira, et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **51**, 333 (1999).
24. T. Shimoikura, H. Kobayashi, T. Omodaka, P. J. Diamond, L. I. Matveyenko, and K. Fujisawa, *Astrophys. J.* **634**, 459 (2005).
25. J. M. Bologna, K. J. Johnston, S. H. Knowles, S. A. Mango, and R. M. Sloanaker, *Astrophys. J.* **199**, 86 (1975).
26. R. C. Walker, K. J. Johnston, B. F. Burke, and J. H. Spencer, *Astrophys. J.* **211**, 1135 (1977).
27. R. Gensel, D. Downes, J. M. Morgan, K. J. Johnston, et al., *Astron. and Astrophys.* **66**, 13 (1978).
28. S. Yu. Parfenov and A. M. Sobolev, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **444**, 620 (2014).
29. K. Inayoshi, K. Sugiyama, and T. Hosokawa, *Apstrophys. J.* **773**, 70 (2013).
30. L. N. Volvach, A. E. Volvach, M. G. Larionov, G. C. MacLeod, et al., *Astronomy Reports* **63**, 49 (2019).
31. R. Genzel, D. Downes, M. H. Schneps, M. J. Reid, et al., *Astrophys. J.* **247**, 1039 (1981).
32. M. Elitzur, D. J. Hollenbach, and C. F. McKee, *Astrophys. J.* **346**, 983 (1989).
33. C. R. Gwinn, *Astrophys. J.* **393**, 149 (1992).
34. C. R. Gwinn, *Astrophys. J.* **429**, 241 (1994).