

Поиск быстрой переменности мазерного излучения ОН в источниках W3, W49, W51 и W75 за период 2015–2017 гг.

© **И. В. Госачинский¹, А. В. Ипатов², С. А. Гренков², И. А. Рахимов²**

¹САО РАН, пос. Нижний Архыз, Россия

²ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты трехлетнего цикла наблюдений мазеров ОН на частоте 1665 МГц с целью выявления быстрой переменности потока радиоизлучения с временем от нескольких минут до нескольких часов. Наблюдения проводились на 32-метровом радиотелескопе обсерватории «Светлое» комплекса «Квазар-КВО».

Было выявлено, что в источнике W75 излучение компонент с лучевыми скоростями -4.5 , $+0.6$, $+5.2$ и $+5.4$ км/с в обеих круговых поляризациях менялось на несколько десятков процентов за время меньше 1 ч. В источнике W51 излучение компонент спектра оказалось довольно стабильным. В источнике W49 быстропеременных компонент оказалось три, на лучевых скоростях $+17.1$, $+18.3$ и $+18.5$ км/с в правой круговой поляризации. Также наблюдались вариации интенсивности двух компонент источника W3 на лучевых скоростях -47.6 и -45.1 км/с. Вариации, впервые обнаруженные нами в 2013–2014 гг. [1], имеют почти синусоидальную форму с периодом около 24 ч и антикоррелированы в обеих круговых поляризациях. Такие изменения излучения пока не получили объяснения.

Ключевые слова: космическое мазерное радиоизлучение, переменность мазеров гидроксила, спектральные наблюдения, быстрая переменность.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.47.91-100>

Введение

Характерной особенностью излучения межзвездных молекулярных мазеров является их сильная переменность. Обычно различают кратко- (минуты, часы) и долго- (дни, годы) временные переменности мазерного излучения. Общие сведения по ранним наблюдениям переменности излучения мазеров гидроксила (ОН) в период 1965–1972 гг. хорошо отражены в [2], последующие наблюдения — в [3]. В [3] также приводится исчерпывающий список инструментальных эффектов, которые могут исказить данные наблюдений. Было обнаружено, что практически все исследованные ОН-источники переменные на всех четырех частотах квадруплета спектральной линии, рассматриваемых с дробными амплитудами, равными 100 % и 20 % на длинных и коротких временных масштабах соответственно. Считается, что изменения космического мазерного излучения в долговременных масштабах может быть обусловлено вариациями внутренних свойств источников, тогда как такая интерпретация для кратковременных изменений часто приводит к несогласованным резуль-

татам, и такие вариации иногда интерпретируются как сцинтилляции, вызванные неравномерностью межзвездной среды. Следует отметить, что, несмотря на более чем пятидесятилетнюю историю изучения феномена кратковременных переменностей, для его объяснения не было предложено никакой подходящей физической модели. Туманность W3 является наиболее ярким представителем мазеров класса I (звздообразующие области с основными линиями ярче других линий). Это довольно популярный объект среди исследователей, и его наблюдения были опубликованы во многих работах. Здесь будут упомянуты только результаты, полученные с использованием антенн с высоким угловым разрешением за последнее десятилетие. В [4] и [5] исследовалась структура 18-сантиметрового излучения мазера в туманности W3 с использованием системы синтеза апертуры VLBA (Very Long Baseline Array, Антенная решетка со сверхдлинными базами в обсерватории NRAO, США), которая на этой длине волны имеет ширину диаграммы направленности около 5 мс. Было обнаружено более 250 мазерных пятен с размерами менее 10 мс и сильной круговой поляризацией. Вся область имеет размер около 5.83×10^{16} см (≈ 3897.1 а. е.) и сильно вытянута в направлении склонения. Мазерные пятна образуют своего рода X-образную структуру с двумя дугами вдоль краев. В [4] был обнаружен градиент лучевой скорости по всему кругу этой структуры, составляющий до 2 км/с по краям, что, по-видимому, указывает на вращение, однако распределение собственных движений пятен несовместимо с такой интерпретацией. Авторы этих исследований также идентифицировали 70–80 «зеемановских пар» с расщеплением лучевых скоростей линий, предполагая среднюю силу магнитного поля около 5.9 МГс. Отметим, что среди многих мазерных пятен, наблюдаемых на частоте 1665 МГц, всего восемь ярких деталей (с потоками более 10 Ян), и ни одна из них не является частью «зеемановской пары», т. е. их излучение имеет круговую поляризацию около 100 %. Более того, пятна с близкими лучевыми скоростями, но с противоположным направлением круговой поляризации, имеют существенно отличающиеся координаты, т. е. они являются разными объектами. В статье [6] измерялись тригонометрические параллаксы в туманности W3 и было обнаружено, что ее гелиоцентрическое расстояние составляет 1.95×0.04 кпк.

Статьи [7] и [8] посвящены изучению радиоизлучения различных компонент линии ОН на 18 см в W3 (ОН). При этом были использованы РСДБ-наблюдения, проведенные в 1996 и 2005 годах на VLBA соответственно в 12- и 15-часовых наблюдательных сессиях, обеспечивающих целенаправленный поиск быстрых переменностей. Авторы статей выявили статистически значимые переменности яркости мазерных пятен на протяжении 15–20 мин и 5–20 мин в «крыльях» спектральной линии (а не в максимумах линии!). И они считают, что изменения не могут быть вызваны межзвездными сцинтилляциями, предполагая, что этот странный эффект может быть объяснен изменениями типа мазера: от ненасыщенного в «крыльях» спектральной линии до насыщенного в максимуме, однако они не подтвердили эту гипотезу расчетами.

В декабре 2011 г. на 32-метровом радиотелескопе радиоинтерферометрической сети «Квazar-КВО» в обсерватории «Светлое» была начата программа по поиску быстрой переменности ОН мазеров. После регистрации необычного события в линии ОН-излучения на частоте 1665 МГц в туманности W3, 23 ян-

варя 2012 г. все время наблюдения, выделенное этой программе, было посвящено этому объекту. Результаты этих наблюдений были опубликованы в [1]. В настоящей работе сообщается о результатах наблюдений, полученных в течение последующих трех лет (2015–2017 гг.).

Аппаратура и методика наблюдения

При работе в 18-сантиметровом диапазоне длин волн антенна РТ-32 [9] имеет полуширину диаграммы направленности $20'$, эффективную площадь поверхности антенны 480 м^2 и чувствительность по потоку 5.7 Ян/К . Приемная система радиотелескопа РТ-32 [10] обеспечивает регистрацию двухканальным БПФ-спектрометром [11] сигналов обеих круговых поляризации с помощью двух независимых каналов, развязка между которыми составляет величину порядка 20 дБ. Динамический диапазон мощности обоих каналов составляет величину порядка 60 дБ. Два высокочастотных малошумящих усилителя диапазона 18 см, охлажденные до температуры жидкого азота, поддерживают шумовую температуру системы примерно на уровне 50 К. Сигналы промежуточных частот радиотелескопа подаются на видео-конвертеры, позволяющие выбрать анализируемый участок спектра в полосе 0.25 МГц. Каждый получаемый спектр состоял из 2048 частотных каналов шириной 0.488 кГц (0.088 км/с). Преобразование мощностного спектра в единицы антенной температуры осуществлялся с использованием измерений сигнала калибровочных генераторов шума в соответствии с методом калибровки, описанным в [12] и с учетом неравномерности частотной характеристики. Из каждого спектра вычиталась «нулевая» линия, вычисленная как линейная регрессия спектральных каналов, в которых отсутствуют компоненты сигнала источника.

Стабильность генераторов шума калибровки, параметров антенны и приемника проверялась в каждом цикле наблюдений с использованием измерений опорных источников 3C295, 3C147, 3C123 и Tau A, координаты и потоки которых для 18-сантиметрового диапазона были взяты из [13]. Основное время накопления в спектрометре составляло около 10 с, после чего измеренные спектры передавались в компьютер и сохранялись в архивном файле жесткого диска, вторичное накопление проводилось путем усреднения спектров из архива с выбранными интервалами в пределах от 0.5 до 5 мин. Среднеквадратичное отклонение (СКО) остаточных шумов, которое автоматически вычислялось по частям спектра, свободным от компонентов радиоизлучения источника, составило от 2.44 до 0.78 Дж соответственно. Измерения проводились примерно 20-минутными сетями, после чего антенна отводилась от источника для записи нулевой линии профилей, также позволяющей проводить визуальный контроль наличия помех и калибровку по опорным источникам. Диапазон высот, на котором проводились наблюдения туманности W3, составлял от 32° до 70° . Следует отметить, что некоторые компоненты профиля линии OH в туманности W3 очень яркие (их поток превышает 300 Ян). Это приводит к увеличению шумовой температуры системы на 2–2.5 % на частотах, соответствующих максимумам этих линий, и соответствующему уменьшению чувствительности при мак-

симумах излучения этих компонентов. Кроме того, отмечены флуктуации коэффициента усиления (не более 2 %), что также несколько увеличивает СКО остаточных шумов.

Результаты наблюдений

На представленных рисунках показаны кривые яркости деталей профиля на лучевых скоростях их максимума. Программа анализа автоматически определяла максимум потока излучения (S) каждого профиля спектра, тем самым исключая эффект возможного сдвига их лучевой скорости — как физической, так и инструментальной — из-за неустойчивости гетеродинной частоты. К сожалению, излучение в «крыльях» деталей профиля не может быть разделено, так как многие слабые компоненты при разных лучевых скоростях попадают в достаточно широкую диаграмму направленности антенны. Также следует упомянуть, что яркие компоненты могут представлять собой смесь, состоящую из излучений двух-трех (и более) мазерных пятен.

Странное явление было зарегистрировано в кривых яркости 2013–2014 гг. линии ОН на частоте 1665 МГц. На рис. 1–3 показаны результаты измерений, проведенных в течение трех дней с 12 по 15 января 2015 г. На рис. 1 представлены кривые яркости стабильных компонент с лучевыми скоростями -46.5 , -44.3 км/с в левой и правой круговых поляризациях (ЛКП и ПКП соответственно). На рис. 2 и 3 представлены кривые изменения излучения деталей с лучевыми скоростями -47.6 и -44.3 км/с также в обеих поляризациях. Изменение их излучения объяснить пока не удалось. Во-первых, все кривые имеют почти синусоидальную форму с периодами около 24 ч. Амплитуды этих переменных деталей составляют около 36 % от всего радиоизлучения источника. Во-вторых, излучение в правой и левой круговых поляризациях имеет антикоррелированный характер.

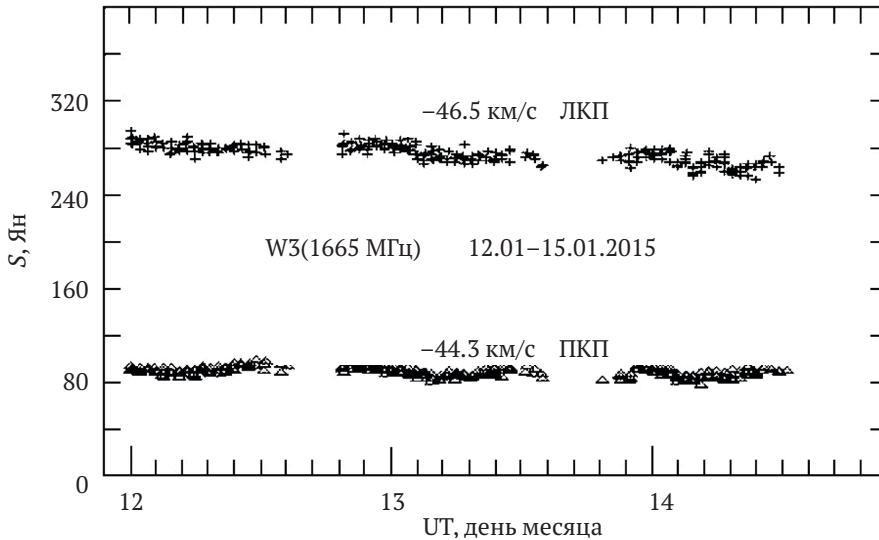


Рис. 1. Яркость стабильных компонент -46.5 и -44.3 км/с в W3(ОН) с 12 по 15 января 2015 г.

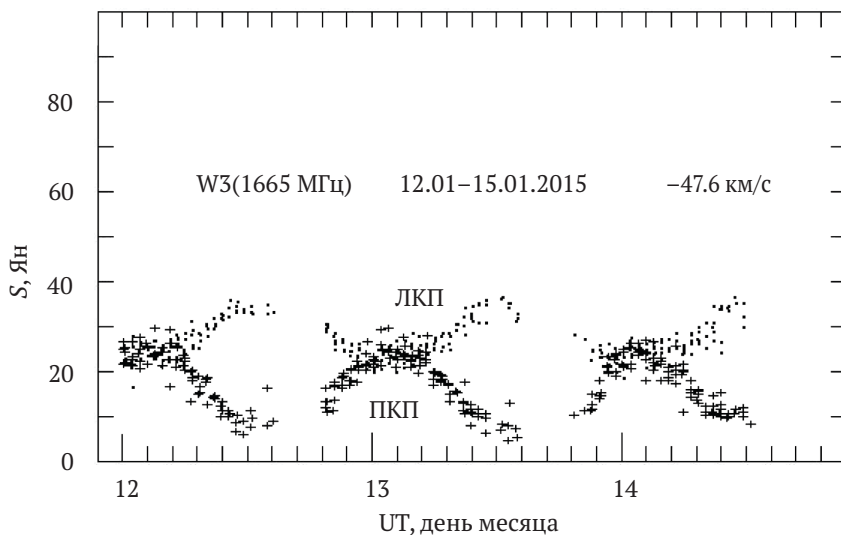


Рис. 2. Яркость переменных компонент -47.6 км/с в W3(OH) в левой и правой круговых поляризациях с 12 по 15 января 2015 г.

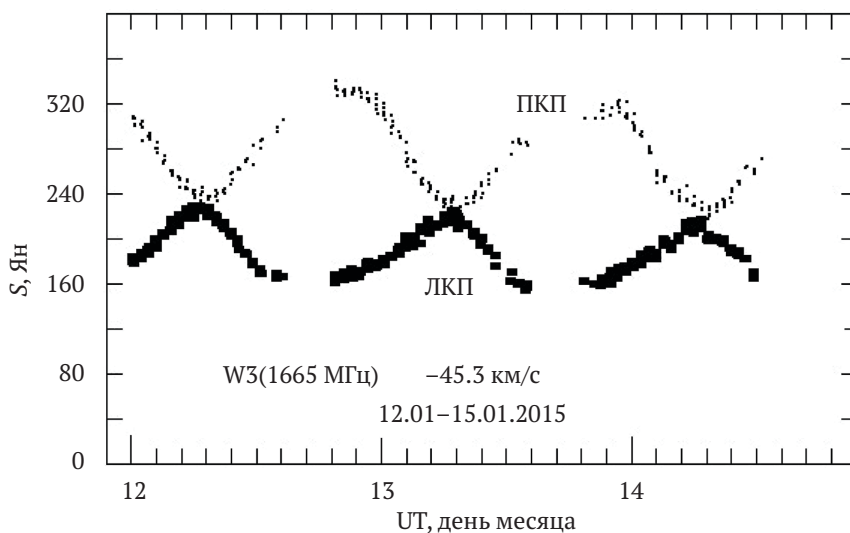


Рис. 3. Яркость переменных компонент -45.3 км/с в W3(OH) в левой и правой круговых поляризациях с 12 по 15 января 2015 г.

Такое необычное явление требует более подробного обсуждения возможных инструментальных эффектов. Во-первых, вариации коэффициента усиления абсолютно исключены, поскольку наблюдаемая полоса пропускания колебаний потока равна примерно 2 км/с (около 11 кГц), а ширина полосы обоих усилительных трактов до БПФ-спектрометра составляет не менее 0.25 МГц, так что любые вариации усиления должны оказаться коррелированными в этой полосе частот. Кроме того, калибровка усиления в обоих каналах проводилась

непрерывно с помощью сигналов генераторов шума, которые также использовались в качестве пилотных сигналов. Изменение мощности сигналов этих генераторов маловероятно, а изменения мощности в локальной узкой полосе является еще более маловероятным событием. Анализ спектров проводился с помощью БПФ-спектрометра, который является цифровым устройством и, следовательно, не подвержен воздействиям помех. Во-вторых, следует учитывать возможное присутствие узкополосных помех. Однако, если узкополосная помеха, которая имеет частоту, в точности совпадающую с характеристикой функции, в принципе возможна, она должна быть видна в наблюдениях в режиме «off source». По тем же причинам мы можем исключить какой-либо эффект атмосферы Земли и погоды (атмосферные осадки вдоль линии видимости).

При длительных наблюдениях (несколько часов) антенную систему также следует добавить в список возможных источников инструментальных ошибок, которые могут влиять на результаты измерений и исказить их. Возможные источники ошибок могут включать в себя паразитную круговую поляризацию антенны и ее изменение в зависимости от угла положения источника относительно антенной системы, хотя это и маловероятно для сигнала круговой поляризации с учетом круговой симметрии антенны и поляризационного селектора. Однако излучение ОН-мазера может иметь линейно поляризованную часть, если наблюдения проходят в поперечном магнитном поле. Но в этом случае легко показать, что выходной сигнал не зависит от угла места источника.

Для исключения антенной системы из списка возможных источников искажения результатов 25 июля 2017 г. был проведен контрольный эксперимент. Во время эксперимента источник W3 одновременно наблюдался полностью идентичными инструментами в обсерваториях «Светлое» и «Бадары», разнесенных на $72^{\circ}45'$ по долготе, что соответствуют 4.8 h по времени наблюдения и в позиционном угле. Результаты этих наблюдений представлены на рис. 4 и 5.

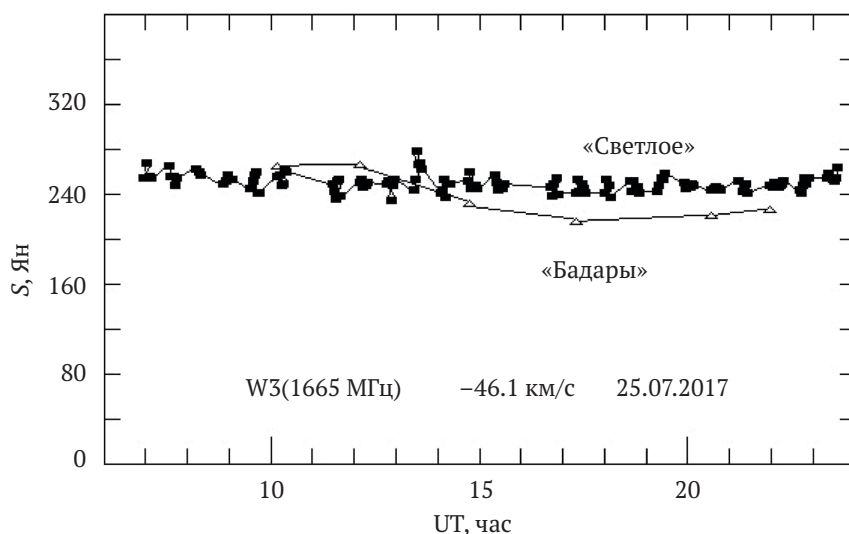


Рис. 4. Яркость компоненты $-46,1$ км/с в W3(ОН) 25.07.2017 при одновременных наблюдениях в обсерваториях «Светлое» и «Бадары»

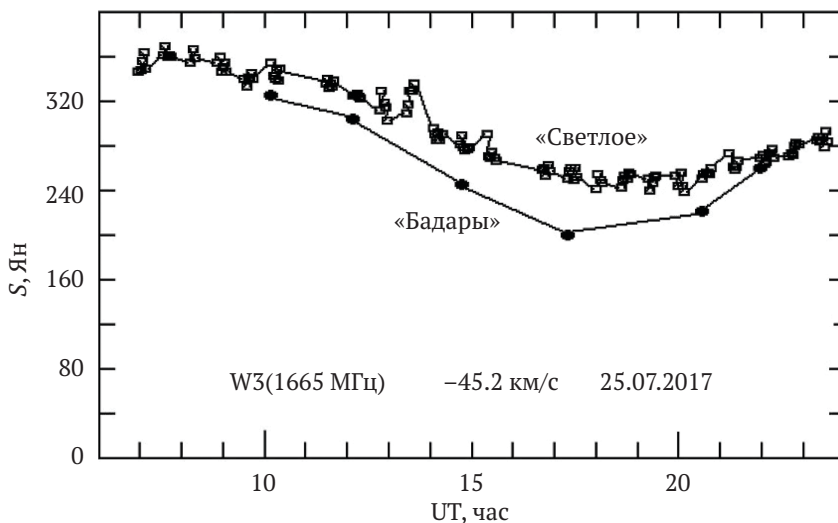


Рис. 5. Яркость компоненты -45.2 км/с в W3(ОН) 25.07.2017 при одновременных наблюдениях в обсерваториях «Светлое» и «Бадары»

На рис. 5 видно, что изменения деталей на -45.1 км/с наблюдаются как в обсерватории «Светлое», так и в «Бадарах» без какого-либо смещения времени между этими наблюдениями, которые можно ожидать из-за существенного сдвига долготы между точками наблюдений. Поэтому наблюдаемые странные изменения потоков в источнике W3 со скоростями -45.1 и -47.6 км/с могут быть не инструментальными.

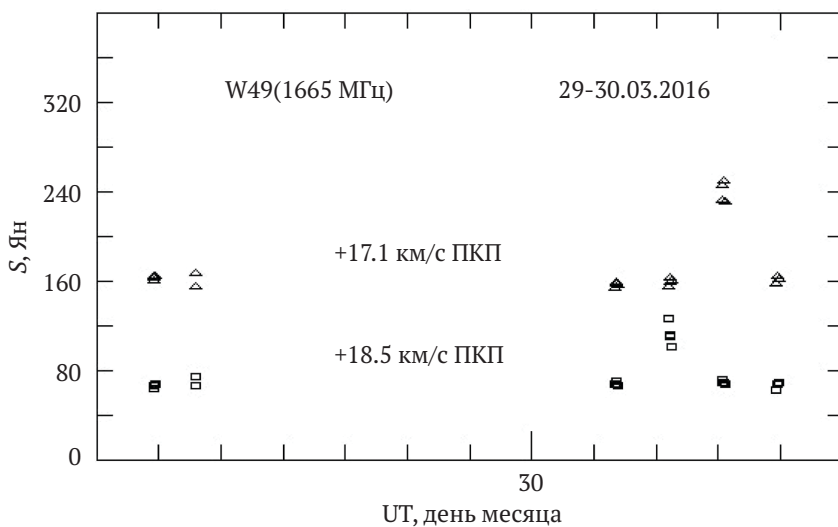


Рис. 6. Яркость компонентов $+17.1$ км/с и $+18.5$ км/с в W49 с 29.03.2016 по 30.03.2016 с шагом 0.1 суток

Что касается других трех источников, включенных в нашу программу наблюдений, размер базы наблюдательных данных для них пока не достаточен. Можно лишь прийти к заключению, что излучение компонентов в W51 достаточно стабильно. В W49 имеются три переменные компоненты на лучевых скоростях +17.1, +18.3 и +18.5 км/с в правой круговой поляризации (см. рис. 6), а в W75 — четыре переменных детали со скоростями -4.5, +0.6, +5.2 и +5.4 км/с (рис. 7). Наблюдение этих источников будет продолжено.

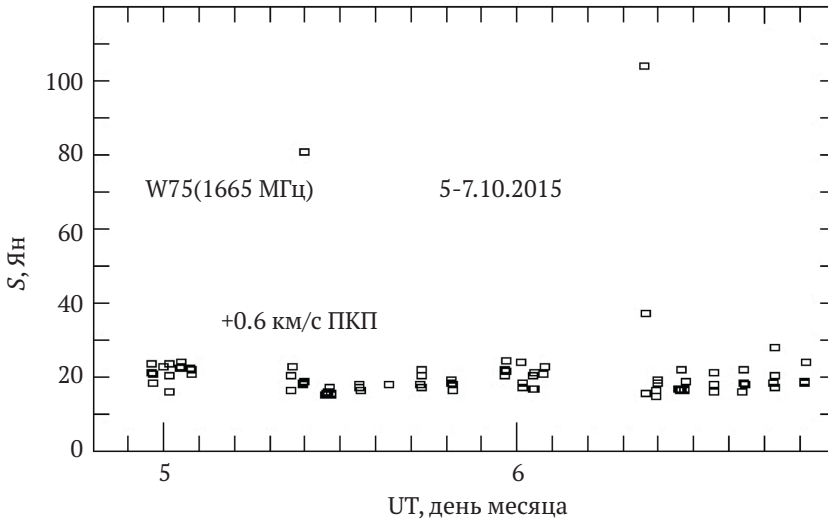


Рис. 7. Яркость компоненты + 0.6 км/с в W75 с 05.10.2015 по 07.10.2015

Заключение

Регулярные измерения потоков мазеров ОН на частоте 1665.402 МГц в источниках W3(ОН), W49, W51 и W75, проведенные в 2015–2017 гг., позволили обнаружить статистически значимые кратковременные переменности некоторых из их деталей. Регистрация излучения компонент спектра в источнике W51 не выявила существенных быстрых переменностей. В источнике W75 было обнаружено, что излучение компонент с лучевыми скоростями -4.5, +0.6, +5.2 и +5.4 км/с в обеих круговых поляризациях имело скачкообразные изменения интенсивности (в некоторых случаях до 5.5 раз, типичное значение около 20 %) на интервале меньше часа. В W49 имеются три переменные компоненты на лучевых скоростях +17.1, +18.3 и +18.5 км/с в правой круговой поляризации, которые изменяли свою интенсивность в 1.5–2 раза. Что касается источника W3, которому было уделено наибольшее внимание ввиду ряда особенностей, то продолжал наблюдаться странный эффект антикорреляционных вариаций интенсивности двух компонент на лучевых скоростях -47.6 и -45.1 км/с с явной периодикой, близкой к 24 ч. Это явление не получило разумной интерпретации, и для исключения инструментальных эффектов были проведены одновременные наблюдения W3 в обсерваториях «Светлое» и «Бадары». Станции разнесены по долготе на 72°45', но тем не менее изменения обозна-

ченных деталей наблюдались как в обсерватории «Светлое», так и в «Бадарах» без какого-либо смещения времени между этими наблюдениями, которые можно ожидать из-за существенного сдвига долготы между точками наблюдений (около 4.8 ч). По этой причине полученный результат для W3 нуждается в дополнительном обсуждении и интерпретации.

В первую очередь, необходимо оценить влияние межзвездной среды на излучение OH-мазеров на 18 см. По результатам наблюдений пульсаров могут выявляться различные сцинтилляции, существующие на коротких временных масштабах порядка нескольких минут. Их относительная амплитуда определяется угловым размером источников излучения. Сильные сцинтилляции могут появляться только при $\Psi < 0.5 \mu\text{as}$ [14], где Ψ — угловые размеры источника. Однако, сильных сцинтилляций вряд ли можно ожидать, учитывая то, что истинные угловые размеры пятен мазера могут составлять порядка 100 μas . Важным свойством дифракционных сцинтилляций является так называемая полоса декорреляции Δf , в пределах которой изменения яркости коррелируют. Величину Δf сложно оценить непосредственно из-за скудости наших знаний о статистических свойствах неравномерностей межзвездной среды, однако в [7] попытались косвенно оценить эту величину для источника W3 (OH). Вышеупомянутые авторы вычислили $\Delta f \sim 35$ кГц, что примерно в пять раз больше наблюдаемой ширины деталей OH-мазеров в источнике W3. Вышеуказанные авторы также оценивают ожидаемую сцинтилляционную амплитуду менее 1 %.

Следует также обратить внимание на другой тип сцинтилляций, обнаруженных в наблюдениях, — рефракционные сцинтилляции, возникающие в результате смещения, фокусировки и дефокусировки лучей в неравномерностях межзвездной среды [15]. Временная шкала их существования может быть более продолжительной: до нескольких недель или месяцев. К сожалению, их возможные свойства сложно вычислить, поскольку эти сцинтилляции остаются очень плохо изученными.

Л и т е р а т у р а

1. Госачинский И. В., Гренков С. А., Ипатов А. В., Рахимов И. А. Вспышка мазера OH в туманности W3 // Астрофизический бюллетень. — п. Нижний Архыз: САО РАН, 2016. — Том 71, № 3. — С. 358–371.
2. Woodruff T. Sullivan III, Kerstholt J. H. Time Variations in 18-cm OH Emission Profiles over the Period 1965–1972 // *Astron. & Astrophys.* — 1976. — Vol. 51. — P. 427–450.
3. Clegg A. V., Cordes J. M. Variability of Interstellar Hydroxyl Masers // *Astrophys. J.* — 1991. — Vol. 374. — P. 150–168.
4. Wright M. M., Gray M. D., Diamond P. J. The OH ground-state masers in W3(OH) – I. Results for 1665 MHz // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2004. — Vol. 350. — P. 1253–1271.
5. Fish V. L., Brinken W. F., Sjouwerman L. O. A very high spectral resolution study of ground-state OH masers in W3(OH) // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 647. — P. 418–431.
6. Xu Y., Reid M. J., Menten K. M., Zheng X. W. Search for Compact Extragalactic Radio Sources near Massive Star-forming Regions // *Astrophysical Journal Supp.* — 2006. — Vol. 166(2). — P. 526–533.
7. Ramachandran R., Deshpande A. A., Goss W. M. Intrinsic Short-Timescale Variability in W3(OH) Hydroxyl Masers // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 653(2). — P. 1314–1324.
8. Laskar T., Goss W. M., Zauderer A. B. Intrinsic Sizes of the W3 (OH) Masers via Short

Time Scale Variability // Proceedings of IAU Symposium. — 2012. — Vol. 8, no. 287. — P. 465–469.

9. Финкельштейн А. М., Ипатов А. В., Кайдановский М. Н., Кольцов Н. Е., Коркин Э. И., Малкин З. М., Рахимов И. А., Сальников А. И., Смоленцев С. Г. Радиointерферометрическая сеть «Квазар-КВО» — базовая система координатно-временного обеспечения // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2005. — Вып. 13. — С. 104–138.

10. Иванов Д. В., Ипатов А. В., Ипатова И. А., Мардышкин В. В., Михайлов А. Г. Приемники радиointерферометрической сети КВАЗАР // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 1997. — Вып. 2. — С. 242–256.

11. Гренков С. А., Ипатов А. В., Кольцов Н. Е. Способ регистрации космического радиоизлучения в спектральных линиях // Известия вузов. Радиофизика. — 2008. — Том 51, № 9. — С. 777–788.

12. Способ измерения энергетического спектра узкополосного космического радиоизлучения: пат. 2316775.С1 Российская Федерация, МПК G 01 R 23/18. / Кольцов Н. Е.; заявитель и патентообладатель ЗАО «РЭЛТА». заявл. 02.05.06; опубл. 10.02.08; бюл. № 4.

13. Ott M., Witzel A., Quirrenbach A., Krichbaum T. P., Standke K. J., Schalinski C. I. and Hummel C. A. An updated list of radio flux density calibrators // Astron. Astrophys. — 1994. — Vol. 284. — P. 331–339.

14. Каплан С. А., Пикельнер С. Б. Физика межзвездной среды. — М.: Наука, 1979. — 592 с.

15. Sieber W. Causal relationship between pulsar long-term intensity variations and the interstellar medium // Astronomy and Astrophysics. — 1982. — Vol. 113, no. 2. — P. 311–313.

The Search for a Fast Variability of OH Maser Emission in Sources W3, W49, W51 and W75 for the Period 2015–2017

I. V. Gosachinskij, A. V. Ipatov, S. A. Grenkov, I. A. Rakhimov

We report the results of three-year observations of OH masers at 1665 MHz with characteristic times of flux variations from minutes to hours carried out with the 32-m antenna of “Svetloe” Radio Astronomical Observatory. It is discovered in W75 as many as four spectral details with radial velocities of -4.5 , $+0.6$, $+5.2$ and $+5.4$ km/s in the both circular polarisations, emission of which changed on several tens percent during lower than hour. In the W51 emission of spectral detail was found rather stable. In the W49 we have found three variable details with radial velocities of $+17.1$, $+18.3$ and $+18.5$ km/s in the right circular polarisation. The most strange were found the flux variations of two details in the OH spectrum of W3 with radial velocities of -47.6 and -45.1 km/s first discovered by us in 2013–2014. These variations have almost sinusoidal form with periods near 24 h and anticorrelated in right and left circular polarizations. We have showed that such variations can not be any of instrumental effects, but for now have not any reasonable explanation.

Keywords: cosmic maser radio emission, variability of hydroxyl masers, spectral observations, fast variability.