

ЭВОЛЮЦИЯ СИЛЬНЫХ ВСПЫШЕК МАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ H_2O В ОБЛАСТИ АКТИВНОГО ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ W51

© 2022 г. Н. Т. Ашимбаева¹, Е. Е. Лехт^{1,*}, В. В. Краснов², А. М. Толмачев³

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,

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

² Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

³ Пушинская радиоастрономическая обсерватория,

Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Пушино, Россия

*E-mail: lekht@sai.msu.ru

Поступила в редакцию 01.08.2022 г.

После доработки 17.08.2022 г.

Принята к публикации 30.09.2022 г.

Представлены результаты исследования сильных вспышек мазерного излучения H_2O в области W51 из наблюдений (мониторинга) в 2009–2022 гг. на 22-м радиотелескопе в Пушинской радиоастрономической обсерватории. Обнаружены три мощные вспышки мазерного излучения на лучевых скоростях 69.7, 61.6 и 59.0 км/с с плотностью потока в максимумах 23.1, 29.4 и 66.1 кЯн соответственно. Первая и третья из них идентифицированы с главным источником (W51 Main). Вероятной причиной их возникновения может быть наложение на луче зрения двух мазерных конденсаций с близкими лучевыми скоростями. Также обнаружено большое число вспышек с плотностью потока выше 10 кЯн, большинство из которых идентифицировано с W51 North. Обсуждается механизм возникновения асимметрии линии самой мощной вспышки на лучевой скорости 59 км/с.

Ключевые слова: звездообразование, мазеры H_2O , молекулярные облака и биполярные потоки, индивидуальные объекты (W51 Main и North)

DOI: 10.31857/S0004629922110044

1. ВВЕДЕНИЕ

Область W51, первоначально обнаруженная Вестерхаутом (1958) [1], представляет собой одно из самых массивных гигантских молекулярных облаков в Галактике, обладающее очень сложной иерархической структурой. Она разделена на две гигантские области Н II: W51 A и W51 B, — которые в свою очередь распадаются на более мелкие источники — компактные (СН II) и сверхкомпактные (УСН II) области ионизованного водорода [2]. Согласно Гауме и др. [3] они обозначаются e1, e2 и т.д. Таким образом, область W51 включает в себя компактные и сверхкомпактные области Н II и большое число ИК-источников. Области СН II и УСН II содержат массивные молодые звездные объекты, находящиеся на различных стадиях эволюции. Лим и др. [4] провели исследования 41 такого объекта на 20 и 37 мкм. Согласно их исследованиям почти половина молодых звездных объектов находятся на очень ранней стадии эволюции и не имеют обнаруживаемого радиоизлучения в континууме на сантиметровых волнах.

Одним из самых ярких в области W51 А является источник W51e. В нем находится объект W51 Main, а немного южнее — W51 South. Поскольку компоненты источника W51 Main и South расположены очень близко друг к другу, нередко в литературе встречается название W51 Main/South и анализ проводится для всей этой области. По этой причине мы будем пользоваться таким обозначением при ссылках на соответствующие работы. По измерениям тригонометрического параллакса на частоте 22 ГГц мазера H_2O в направлении W51 Main/South было определено расстояние до комплекса, равное 5.4 ± 0.3 кпк [5].

В W51 А имеется биполярный СО поток, связанный с источниками e2E и e2W [6], ориентированный в направлении “северо-восток”—“юго-запад”.

В W51 Main/South обнаружены мазерные источники H_2O , OH, NH_3 и метанола в основном состоянии молекул, а мазеры OH — и в возбужденном состоянии. Также сильный водяной мазер обнаружен в северном источнике. Наиболее интенсивное излучение каждого источника наблюдается в диапазоне лучевых скоростей

~35–75 км/с. Необходимо добавить, что в W51 Main/South находятся два центра с высоким и примерно равным уровнем мазерного излучения H_2O и OH: e2-NW и e8 (W51 South). Наблюдения в основном (1665 и 1667 МГц) и возбужденном (6.035 ГГц) состояниях молекулы OH показали, что плотность вещества в W51 Main выше, чем в W51 South [7]. Мазеры в южной части W51 Main проявляют нитевидную структуру. Предполагается, что мазерные пятна прослеживают магнитное поле.

2. АППАРАТУРА И НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения (мониторинг) в линии 1.35 см в направлении источника W51 Main проводятся нами на 22-м радиотелескопе в ПРАО с 1981 г. Анализ результатов исследований с 1981 по 1998 г. опубликован в работе Самодурова и Логвиненко [8]. Мы проводим наблюдения в направлении каждого из двух основных мазерных компонентов (Main и North): $\alpha_{(2000)} = 19^{\text{h}}23^{\text{m}}39.3^{\text{s}}$, $\delta_{(2000)} = +14^{\circ}30'34.3''$ и $\alpha_{(2000)} = 19^{\text{h}}23^{\text{m}}35.3^{\text{s}}$, $\delta_{(2000)} = +14^{\circ}31'06.3''$ для Main и North соответственно. Угловое расстояние между ними составляет около $1.2'$.

Ширина диаграммы направленности нашего радиотелескопа на волне 1.35 см составляет $2.6'$. Таким образом, при наведении на один из источников излучение от другого ослаблено почти в 2 раза. Это позволило нам при наблюдениях в обоих направлениях определить принадлежность каждой спектральной детали к соответствующему источнику — Main или North. Поскольку антенна принимает линейно поляризованное излучение, а мазерное излучение H_2O в W51 M может иметь небольшую линейную поляризацию [9], по возможности мы проводили наблюдения при близких позиционных углах антенны. Шумовая температура системы находилась в пределах 190–300 К в зависимости от условий наблюдений. Чувствительность телескопа составляет 25 Ян/К.

Регистрация сигнала осуществлялась 2048-канальным автокорреляционным приемником с разрешением 0.0822 км/с по лучевой скорости. Высокая стабильность гетеродина позволяет определять лучевую скорость сильных линий по их форме вблизи максимума с точностью 20–25 м/с. Интервалы между сеансами наблюдений составляли около одного месяца. Однако, когда происходили сильные вспышки, в пределах одного сеанса (3–4 дня) мы проводили несколько наблюдений.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Основная цель работы — поиск сильных вспышек мазерного излучения. Анализ данных нашего

мониторинга мы ведем с 2009 г., когда регулярно проводились наблюдения в направлении каждого из двух компонентов.

Спектры мазерного излучения H_2O в направлении W51 Main протяженные. Например, согласно Като и др. [5] излучение простирается от лучевой скорости –55 до 175 км/с. В наших наблюдениях при спектральном разрешении 0.0822 км/с мы регистрировали излучение в интервале лучевых скоростей от –20 до почти 150 км/с.

На рис. 1а приведены ближайшие по времени после измерения тригонометрического параллакса [5] спектры нашего мониторинга в направлении главного (жирная линия) и северного (тонкая линия) источников в области W51. Показаны только центральные части спектров. Видно, что самые интенсивные детали в эпоху декабря 2009 г. принадлежат северному источнику. Только излучение на 58.2 и 99.8 км/с главного источника немного сильнее, чем северного. Таким образом, в эту эпоху северный источник был более активным, причем в широком интервале лучевых скоростей. По этой причине невозможно было выделить эмиссионные детали, идентифицированные с деталями главного и южного центров мазерной активности, наблюдаемые в 2009 г. [5]. Кроме того, наши наблюдения, выполненные в 2009 г. только в направлении W51 Main, показали сильную переменность всего спектра, исключая наблюдаемую в течение всего 2009 г. деталь на лучевой скорости 58.2 км/с.

На рис. 2 показана переменность самых сильных эмиссионных деталей, потоки которых в максимумах превышали 3000 Ян. Приведены лучевые скорости деталей. На панели (а) вспыхивающие детали принадлежат северному компоненту, а на панели (б) — главному компоненту.

Самая сильная вспышка мазера H_2O в W51 за весь период его наблюдений в нашем мониторинге с 1981 г. началась во второй половине 2021 г. В это время более активным был уже главный источник (рис. 1б и 2).

Мы установили, что самая мощная вспышка происходила в главном источнике с августа 2021 г. по апрель 2022 г. на лучевой скорости 59.0 км/с. Все спектры этого периода нанесены на рис. 3. Весь период был разделен на два интервала. Границей раздела была эпоха, когда произошло небольшое уменьшение излучения (21 октября 2021 г.). Поскольку наблюдения проводились в обоих направлениях, то мы смогли определить принадлежность наиболее сильных спектральных деталей в этот период времени к источникам Main и North. На некоторых лучевых скоростях имеется одинаковый вклад от обоих источников. Для них введено обозначение $M = N$.

На рис. 4 показано наложение спектров разных эпох для центральной части, т.е. для вспых-

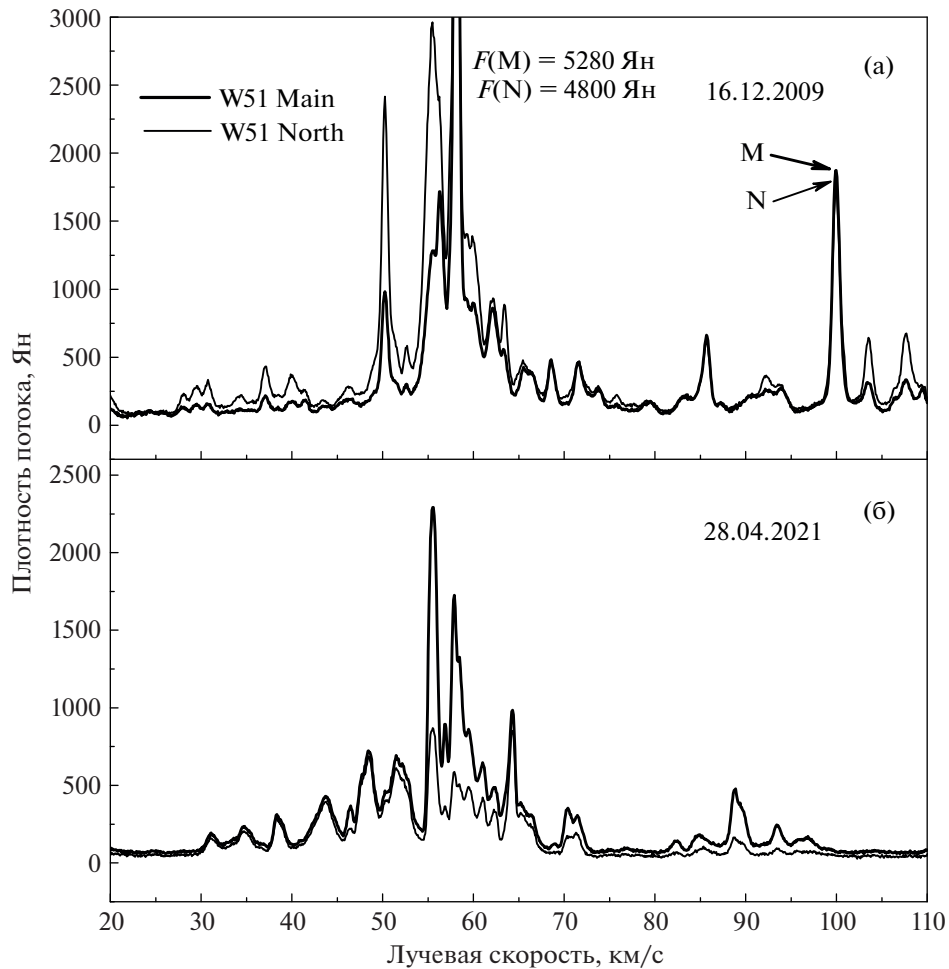


Рис. 1. Спектры мазерного излучения H₂O на волне 1.35 см в направлении W51 Main (жирная линия) и W51 North (тонкая линия) для двух эпох, предшествовавших мощной вспышке на лучевой скорости 59 км/с. Для излучения на 58.2 км/с указана плотность потока в максимуме в направлениях W51 Main и W51 North.

нувшей детали. Напротив максимума каждого спектра указана дата его получения: слева для нарастающего излучения, а справа для уменьшающегося излучения. Плотность потока в максимуме вспышки составила около 66 кЯн. К концу июня излучение этой детали сильно упало — примерно до 400–500 Ян, — что составляет лишь 0.7% относительно максимума. Более точно определить невозможно, поскольку на $V_{\text{LSR}} = 59.8 \text{ км/с}$ появилось излучение с плотностью потока на эпоху 26 июня 2022 г. 13 100 Ян. Линия немного асимметричная. Ее ширина по уровню 0.5 составила 0.81 км/с. Это излучение идентифицировано нами с северным источником (см. рис. 2а).

Мы провели анализ эволюции переменности плотности потока (рис. 5) и лучевой скорости (рис. 6) основных спектральных деталей, принадлежащих источнику W51 Main. Более крупными символами нанесены данные для главной вспыш-

ки на скорости 59.0 км/с. Переменность V_{LSR} деталей аппроксимирована отрезками прямых линий.

4. ДИСКУССИЯ

4.1. Цикличность мазерной активности

В каждом источнике (W51 Main и W51 North) в пределах временного интервала 2009–2022 гг. наблюдается чередование более активных циклов с менее активными. Различие между циклами состоит в том, что в первых (более активных) имеются сильные вспышки, в то время как в более спокойных циклах вспышки относительно “слабые” для области W51. Так, в W51 North в период более высокой мазерной активности наблюдались вспышки сильнее 10^4 Ян .

В главном источнике вспышки были слабее и, в основном, на уровне $(5\text{--}7) \times 10^4 \text{ Ян}$. В этом источнике в 2014–2016 гг. был период наиболее низкой мазерной активности, когда излучение лишь

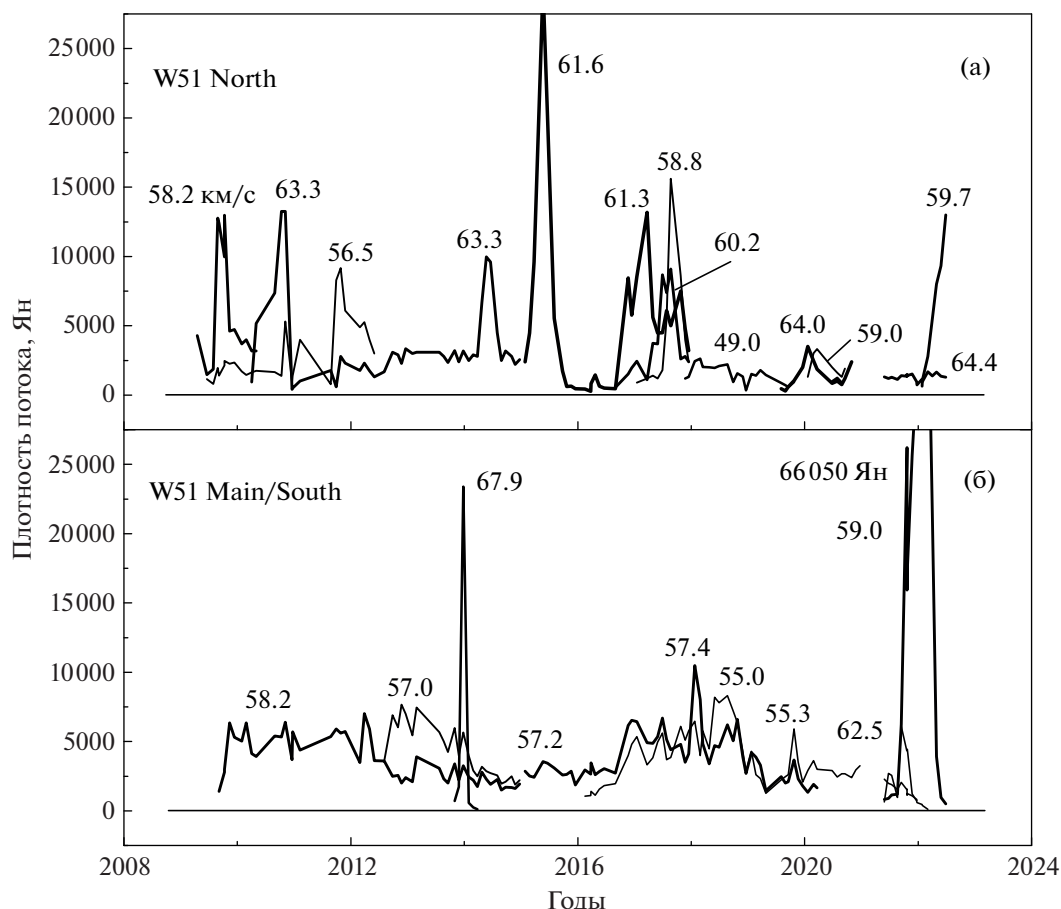


Рис. 2. Переменность мазерного излучения H₂O деталей с потоком в максимуме более 2 кЯн в направлении компонентов North (а) и Main (б). Приведены лучевые скорости деталей.

одной детали на скорости 57.2 км/с достигало 3500 Ян, что не так много для такого источника, как W51 Main. Остальные были слабее и подавлялись в спектрах более сильным излучением северного компонента.

Также отметим, что во время трех мощных вспышек мы не обнаружили одновременного значительного увеличения излучения других эмиссионных деталей. Можно лишь отметить незначительный рост потока деталей 48.9 и 63.4 км/с в период мощной вспышки на скорости 61.6 км/с в 2015 г.

4.2. Эволюция самой мощной вспышки на 59 км/с

Считается, что самая мощная вспышка мазера H₂O имела место в источнике Орион KL, достигающая плотности потока в максимуме почти 10⁷ Ян. Учитывая разницу расстояний до Ориона KL и W51 Main, вспышки в этих источниках сравнимы. Различие состоит только в продолжительности вспышки и в том, что в Орионе KL одновременно наблюдались две сильные эмиссионные детали,

чего не было в W51 Main. Видимо, есть различие и в природе вспышек.

Мощной вспышке в W51 Main/South, которая наблюдалась чуть более полугода, предшествовали последовательно две более слабые вспышки на лучевых скоростях 70.0 и 62.5 км/с с плотностью потока в максимуме 1120 и 6100 Ян соответственно. Больше не было никаких вспышек. Наблюдались детали с более или менее монотонным ростом и спадом излучения, а также со значительными вариациями потока относительно достаточно высокого среднего уровня излучения.

На начальной стадии вспышки наблюдался степенной рост плотности потока до уровня 26 кЯн в течение 2.5 мес. Затем в течение двух дней произошло резкое уменьшение плотности потока до уровня 17 кЯн. Такой резкий спад излучения является реальным, поскольку для подавляющего числа деталей изменения потоков были несущественными. Кроме этого немного менялись ширина и форма (величина асимметрии) линии. После этого возобновился быстрый рост излучения до уровня 66 кЯн в течение трех месяцев.

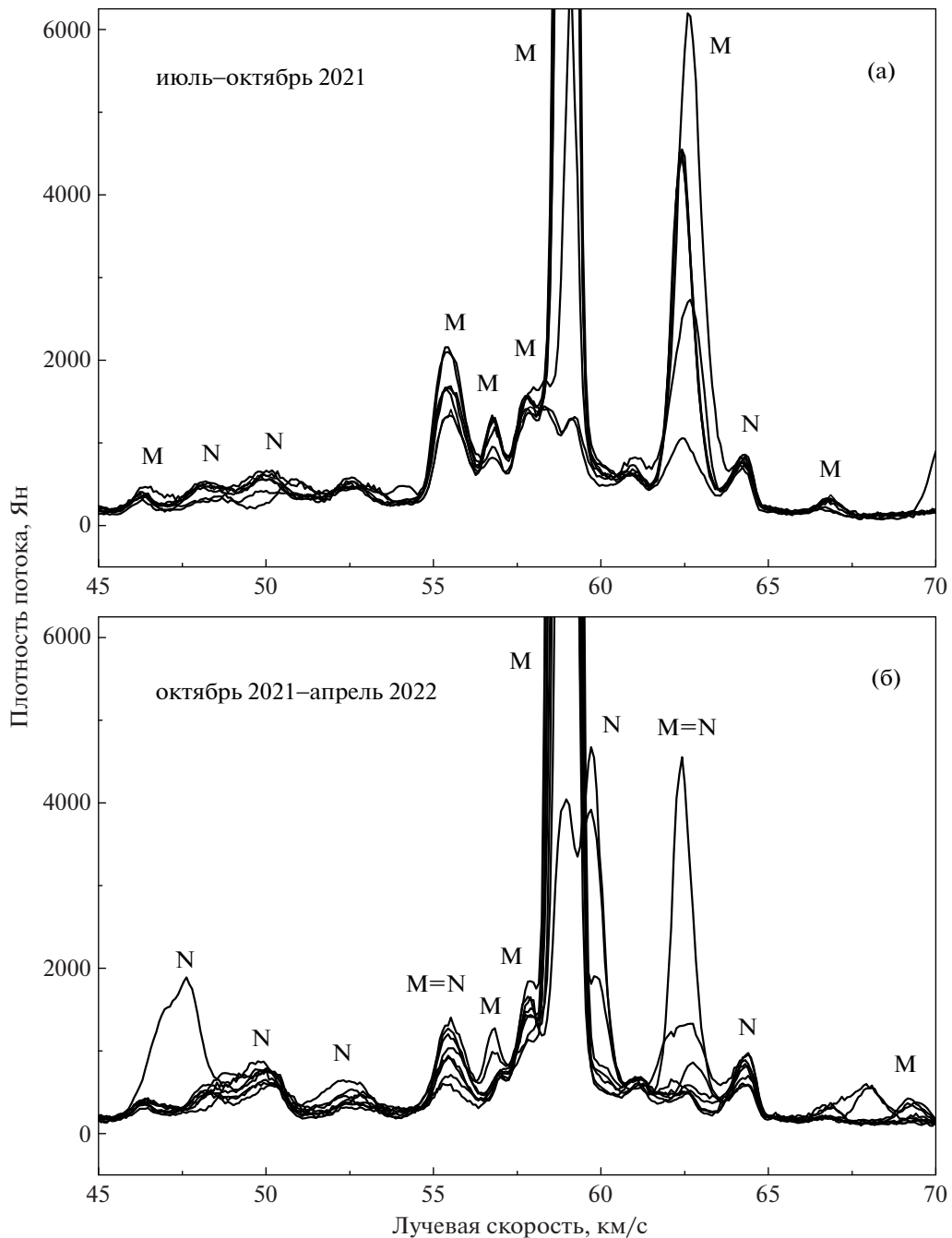


Рис. 3. Наложения спектров H_2O для двух временных интервалов мощной вспышки в W51. Указана принадлежность деталей к компонентам W51 Main (M) и W51 North (N). При равенстве излучения от компонентов введено обозначение $M = N$.

Спад излучения происходил быстрее, за три месяца излучение упало в 20 раз до ~ 3.5 кЯн. Проследить дальнейшую эволюцию этой детали не удалось, так как в северном источнике появилось сильное излучение на близкой скорости 59.7 км/с. В процессе эволюции этой вспышки кроме плотности потока также менялись лучевая скорость и ширина линии.

Никакой корреляции переменности излучения этой мощной вспышки с переменностью других деталей не прослеживается. Это означает, что вспышка имела локальный характер. Согласно, например, Генцелу и Даунсу [10], в W51 M имеются скопления мазерных конденсаций. В таких скоплениях могут иметь место значительные турбулентные движения вещества и не исключено

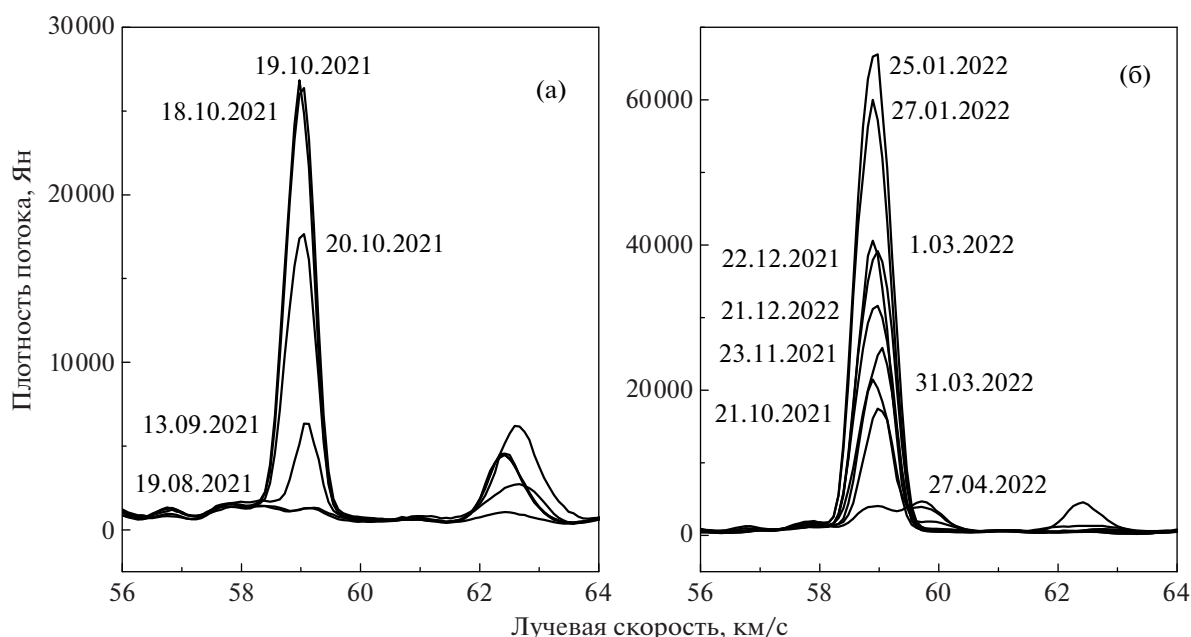


Рис. 4. Центральные части наложения спектров H₂O в направлении W51 Main. Напротив максимума излучения детали указана дата получения спектра.

наложение по лучу зрения, например, двух мазерных конденсаций, или просто неоднородностей с близкими лучевыми скоростями, что может привести к существенному увеличению оптической толщи инвертированного вещества и, как следствие, к сильному росту мазерного излучения. Можно предположить, что именно благодаря такому механизму произошла мощная вспышка в W51 Main.

4.3. Переменность формы линии

На рис. 7 показана переменность лучевой скорости, ширины и формы линии вспыхнувшей детали на 59 км/с в W51 Main. Под формой линии мы подразумеваем ее асимметрию, которая вычислялась по формуле:

$$A = \frac{\delta V_L - \delta V_R}{\delta V_L + \delta V_R} = \frac{\delta V_L - \delta V_R}{\delta V}, \quad (1)$$

где δV_L и δV_R — ширины левой и правой частей линии по уровню 0.5, отсчитываемые от положения максимума потока, δV — полная ширина линии.

Природа возникновения асимметрии линии рассматривалась во многих работах. Наиболее приемлемой нам представляется модель, предложенная в работе Силантьева и др. [11]. Согласно этой модели мазерная конденсация движется от звезды к наблюдателю в радиальном направлении, нагребая перед собой некоторый слой неинвертированного вещества. Это приводит к увеличению плотности в слое и возникновению гради-

ента лучевой скорости. Причем скорость слоя немного меньше скорости конденсации. При достаточном числе молекул в слое возникает селективное поглощение мазерного излучения — более высокоскоростное крыло линии будет испытывать большее поглощение, чем низкоскоростное. Переменность параметров линии на 59 км/с (см. рис. 7) хорошо вписывается в эту модель.

4.4. Другие вспышки

Другая, также мощная, но очень кратковременная вспышка произошла в W51 Main в конце 2013 г. (см. рис. 26). Мы можем оценить только верхнюю границу продолжительности вспышки, которая составила менее одного месяца. Плотность потока в максимуме достигала 23.4 Ян, а за месяц до и после этого максимума всего лишь 830 и 610 Ян соответственно. Маловероятно, что такие вспышки могут быть связаны с изменениями каких-либо физических параметров в мазерных конденсациях. Аналогичный характер переменности наблюдался, например, в IRAS 182316 для излучения на $V_{LSR} = 42.1$ км/с [12]. Причиной такой мощной кратковременной вспышки также может быть, например, наложение на луче зрения двух мазерных конденсаций с близкими лучевыми скоростями при их относительном движении в картинной плоскости.

Более мощная вспышка с плотностью потока в максимуме 29.4 кЯн произошла на лучевой скорости 61.6 км/с в 2015 г. в северном источнике. Продолжительность вспышки можно оценить

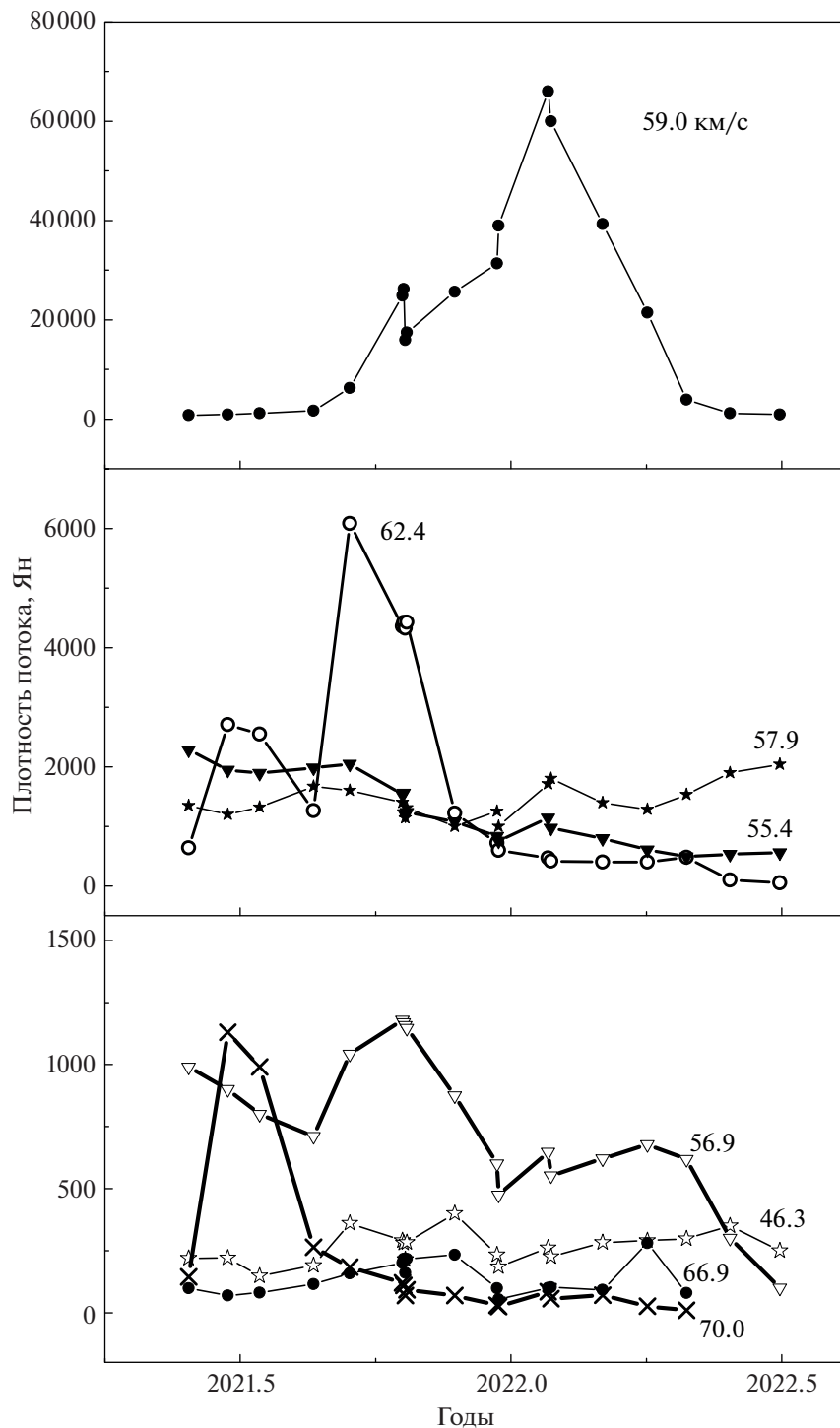


Рис. 5. Переменность плотности потока основных деталей H_2O , идентифицированных с W51 Main в период самой мощной вспышки в области W51. Приведены лучевые скорости деталей.

как ~ 7 мес по уровню 0.1. Наблюдался дрейф излучения в спектре от 61.46 до 61.90 км/с, что является естественным при вспышке.

Кроме таких мощных вспышек в источниках W51 Main и W51 South наблюдались вспышки в несколько раз слабее и они происходили значи-

тельно чаще. Напомним, что в этих источниках наблюдаются также мазеры ОН. Мониторинг в линиях ОН, например, в источнике W75 N, выполненный нами на радиотелескопе в Нансэ (Франция), показал существенные вариации магнитного поля в отдельных мазерных конденса-

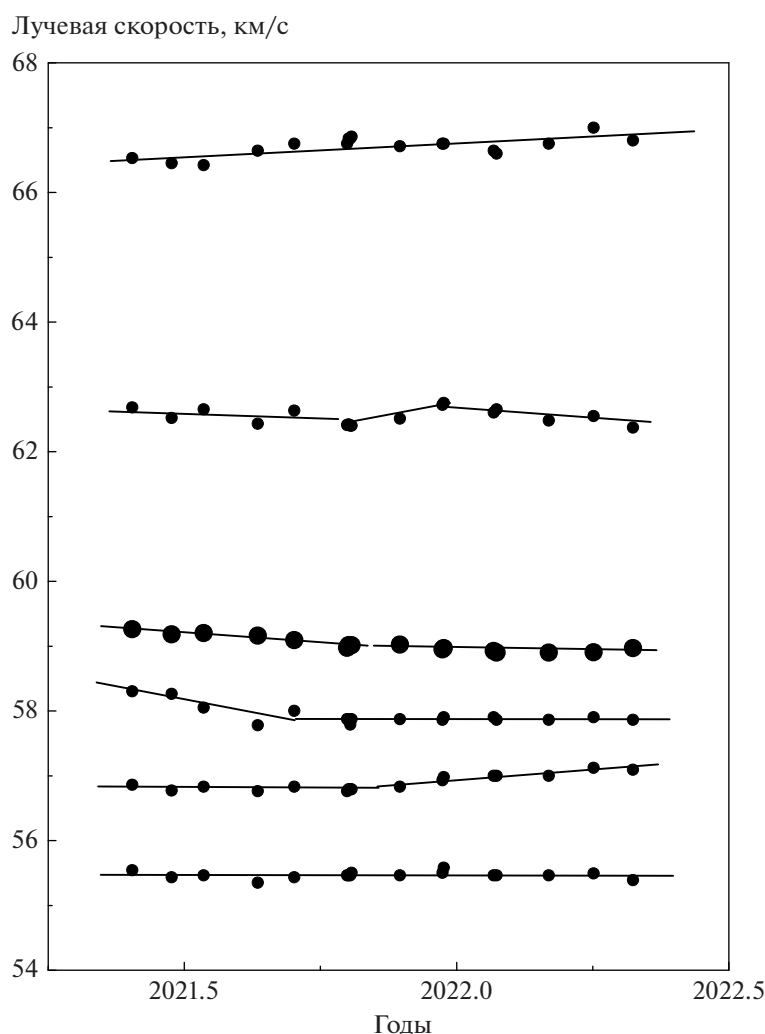


Рис. 6. Переменность лучевой скорости основных деталей H_2O в W51 Main. Графики аппроксимированы отрезками прямых линий.

ях во время вспышек, даже не очень сильных [13]. Поэтому мониторинг таких сильных вспышек в H_2O и OH представляет большой научный интерес, тем более, что мазеры OH в южной части W51 Main проявляют нитевидную структуру [7]. Предполагается, что мазерные пятна OH в таких структурах прослеживают магнитное поле.

Результаты таких исследований в линиях OH в W51 Main/South и в ряде других источников (например, в G43.8-0.1), связанных с областями активного звездообразования, будут опубликованы нами в последующих работах.

5. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

За период мониторинга мазерного излучения H_2O на радиотелескопе РТ-22 в период 2009–2022 гг. в направлении источников W51 Main и W51 North обнаружено три мощные вспышки на

лучевых скоростях 69.7, 61.6 и 59.0 км/с с плотностью потока в максимумах 23.1, 29.4 и 66.1 кЯн соответственно. Первая и третья из них идентифицированы с главным источником, а вторая с северным.

Наиболее вероятной причиной возникновения таких вспышек может быть наложение на луче зрения двух мазерных конденсаций с близкими лучевыми скоростями. Обсужден механизм возникновения асимметрии линии самой мощной вспышки на лучевой скорости 59 км/с.

Обнаружено большое число вспышек с плотностью потока выше 10 кЯн. Большинство из них идентифицировано с W51 North.

Для каждого из источников W51 (Main и North) наблюдается чередование более высоких периодов активности мазера H_2O с менее высокими.

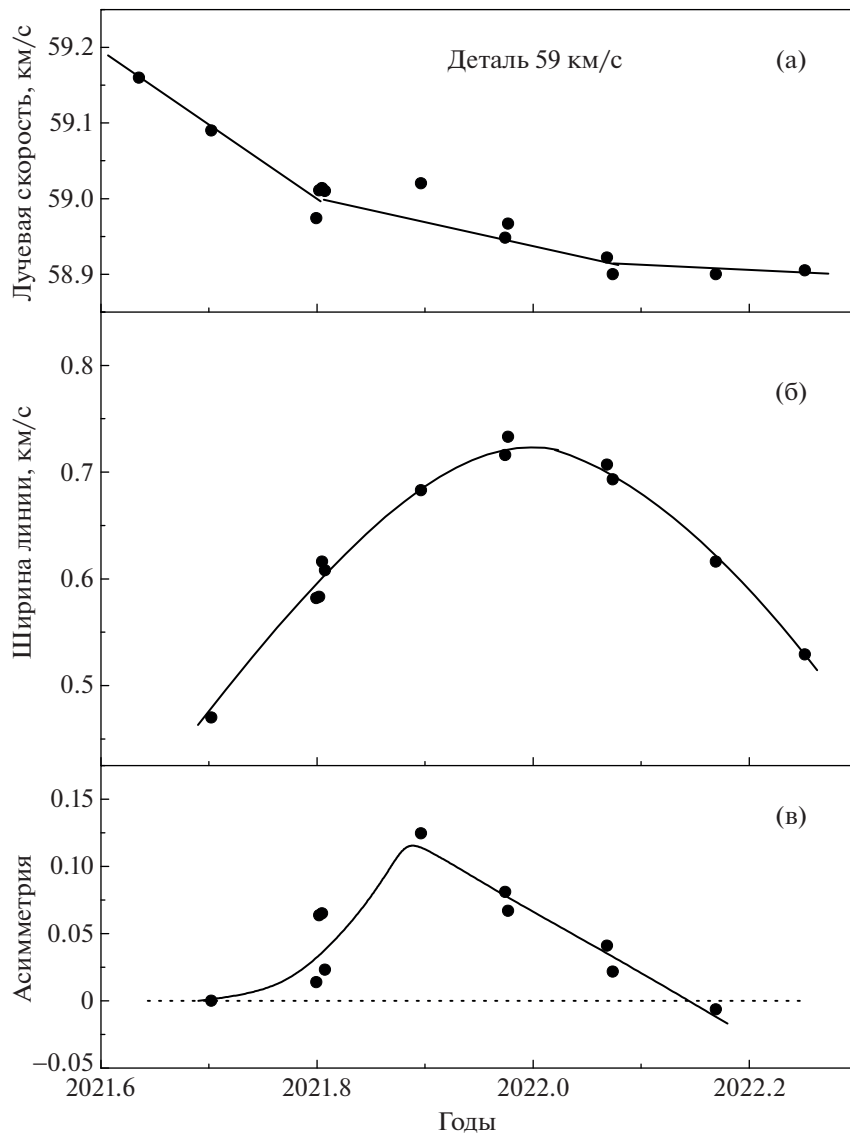


Рис. 7. Переменность основных параметров линии самой мощной вспышки H_2O на 59 км/с в W51 Main (см. текст).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам Пушинской Радиоастрономической обсерватории за большую помощь в проведении наблюдений по программе многолетнего мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G. Westerhout, *Bull. Astron. Inst. Netherland* **14**, 215 (1958).
2. D. M. Merhinger, *Astrophys. J. Suppl.* **91**, 713 (1994).
3. R. A. Gaume, K. L. Johnston, and T. L. Wilson, *Astrophys. J.* **417**, 645 (1993).
4. W. Lim and J. M. De Buizer, *Astrophys. J.* **873**, id. 1 (2019).
5. M. Sato, M. J. Reid, A. Brunthaler, and K. M. Menten, *Astrophys. J.* **720**, 1055 (2010).
6. H. Shi, J.-H. Zhao, and J. L. Han, *Astrophys. J.* **718**, L181 (2010).
7. S. Etoka, M. D. Gray, and G. A. Fuller, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **423**, 647 (2012).
8. V. A. Samodurov and S. V. Logvinenko, *Astron. Rep.* **45**, 339 (2001).
9. R. Barvanis and S. Deguchi, *Astron. J.* **97**, 1089 (1979).
10. R. Genzel and D. Downes, *Astron. and Astrophys.* **61**, 117 (1979).
11. N. A. Silant'ev, E. E. Lekht, J. E. Mendosa-Torres, and A. M. Tolmachev, *Astron. Letters* **28**, 217 (2002).
12. Н. Т. Ашимбаева, В. В. Краснов, Е. Е. Лехт, М. И. Пащенко, Г. И. Рудницкий, А. М. Толмачев, *Астрон. журн.* **97**, 18 (2020).
13. П. Колом, Н. Т. Ашимбаева, Е. Е. Лехт, М. И. Пащенко, Г. М. Рудницкий, А. М. Толмачев, *Астрон. журн.* **98**, 50 (2021).