

УДК 524.527-77

## ЭВОЛЮЦИЯ МАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ OH И H<sub>2</sub>O В ОБЛАСТИ АКТИВНОГО ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ NGC 2071

© 2020 г. Н. Т. Ашимбаева<sup>1</sup>, П. Колом<sup>2</sup>, В. В. Краснов<sup>3</sup>, Е. Е. Лехт<sup>1,\*</sup>, М. И. Пашенко<sup>1</sup>, Г. М. Рудницкий<sup>1</sup>, А. М. Толмачев<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

<sup>2</sup>Медонская обсерватория, Медон, Франция

<sup>3</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Астрокосмический центр, Москва, Россия

<sup>4</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Пушчинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН, Пушкино, Россия

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

Поступила в редакцию 13.02.2020 г.

После доработки 30.03.2020 г.

Принята к публикации 30.03.2020 г.

Представлены результаты наблюдений области звездообразования NGC 2071 в линиях молекул H<sub>2</sub>O на длине волны 1.35 см и OH на длине волны 18 см, полученных на 22-м радиотелескопе в Пушкино (Россия) и на Большом радиотелескопе в Нансэ (Франция) соответственно. Приведен каталог спектров мазерного излучения H<sub>2</sub>O за период с декабря 2010 по январь 2020 г. Переменность интегрального потока за весь мониторинг (1979–2020 гг.) имеет два близких по продолжительности цикла активности (около 20 лет), которые сопровождались сильными вспышками с интервалами от одного до четырех лет. Показано, что среда генерации мазерного излучения H<sub>2</sub>O сильно фрагментирована и в ней имеются мелкомасштабные турбулентные движения вещества. Наблюдаемый дрейф и скачки лучевой скорости эмиссионных деталей H<sub>2</sub>O могут быть следствием сложной, неоднородной структуры областей генерации мазерного излучения. Излучение OH в главных линиях 1665 и 1667 МГц и в спутной линии 1612 МГц в диапазоне лучевых скоростей 7–12 км/с является широкополосным. Соотношение интенсивностей отличается от равновесного. Приводится обоснование наблюдаемого соотношения интенсивностей этого излучения и поглощения в линии 1720 МГц. Мазерное излучение OH наблюдалось нами в 2007 г. в левой круговой поляризации в линии 1667 МГц на 13.02 и 13.55 км/с с плотностью потока около 0.3 Ян и шириной ~0.25 км/с для каждой из них.

DOI: 10.31857/S0004629920080022

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В комплексе Орион В находятся два гигантских молекулярных облака, одним из которых является газо-пылевое облако L 1630 [1, 2]. В нем расположена область активного звездообразования NGC 2071. Расстояние до NGC 2071 принимается равным 390 кпк [3]. В этой области находится отражательная туманность с таким же названием.

Область NGC 2071 отстоит от одноименной отражательной туманности на 4'. Она наблюдается как инфракрасный источник, который состоит из восьми ИК-источников [4], полная светимость которых равна ~520 L<sub>☉</sub> [5]. Наиболее яркими из них являются IRS1 и IRS3, которые совпадают с источниками радиоконтинуума на 5 ГГц. Излучение от IRS1 преобладает в близком ИК-диапазоне, а от IRS3 в далеком ИК-диапазоне [6]. ИК-из-

лучение от области NGC 2071 достаточно сильно поляризовано и степень поляризации варьируется от 3 до 7%. Это может подтверждать наличие вокруг ИК-источников плотной пылевой оболочки [7].

Проведенное картографирование области NGC 2071 в линии CO на волне 2.6 мм позволило обнаружить биполярный поток вещества с высокими лучевыми скоростями в окрестностях источника IRS1 [8, 9]. Биполярный поток ориентирован в направлении с северо-востока на юго-запад. Его протяженность составляет около 5', а ширина ~1.5' [10, 11]. Ядро молекулярного облака имеет лучевую скорость около 10 км/с. По наблюдениям в линиях молекул SO, SiO, H<sub>2</sub>CO<sub>4</sub>, CS и NH<sub>3</sub> вокруг скопления ИК-источников обнаружено малое плотное вращающееся газо-пылевое облако температурой 20 К, напоминающее по

своей структуре диск-“бублик-кольцо”. Причем ось вращения облака параллельна направлению биполярного потока.

Интерферометрические наблюдения в радио-континууме показали наличие трех областей ионизованного водорода Н II [6]. Две из них совпадают с ИК-источниками IRS1 и IRS3. Расстояние между этими областями НII составляет  $\sim 5''$ . При расстоянии до области NGC 2071  $d \sim 390$  пк, это соответствует  $9.7 \times 10^{-3}$  пк (2000 а.е.) в проекции на картинную плоскость.

Излучение молекул гидроксила OH на волне 18 см в NGC 2071 впервые наблюдали Юханссон и др. [12] в 1972 г. Было зарегистрировано широкополосное излучение в линиях 1612, 1665 и 1667 МГц на  $V_{\text{LSR}} \sim 9$  км/с и поглощение в линии 1720 МГц на скорости 8 км/с. Кроме того, наблюдалась двойная узкополосная мазерная деталь на  $V_{\text{LSR}} \sim 13\text{--}14$  км/с. Аналогичная картина имела место в 1973 г. в наблюдениях Тернера [13] – широкополосное излучение на  $V_{\text{LSR}} \sim 8.5$  км/с и узкополосное мазерное излучение на 13.1 км/с.

Мазерное излучение в линии молекулы H<sub>2</sub>O обнаружили Шварцц и др. [14]. Мазерные пятна водяного мазера в основном группируются в виде скоплений вблизи активных областей НII, совпадающих с ИК-источниками IRS1 и IRS3. VLA-наблюдения Тофани и др. [15] и Торреллеса и др. [16] позволили провести детальные исследования структуры и морфологии областей мазерного излучения H<sub>2</sub>O в направлении источников IRS1 и IRS3.

В области IRS1 мазерные пятна образуют шесть скоплений, они расположены вдоль высокоскоростного потока, т.е. образуют вытянутую структуру в пределах 300 а.е. Мазерные пятна также располагаются в полостях арочного типа. В области IRS3 выявлена морфологическая структура в виде протопланетного диска радиусом около 20 а.е. Согласно Сету и др. [17] структура в IRS3 достаточно сложная: кроме диска имеется высокоскоростной поток конической формы.

В направлении мазерного источника H<sub>2</sub>O в области NGC 2071 были выполнены регулярные наблюдения (мониторинг): в период 1979–2009 гг. [18–21] и в период 1987–2007 гг. [22].

Настоящая работа является продолжением наших предыдущих исследований. Проведены обобщения данных всего мониторинга с ноября 1979 по январь 2020 г. Также использованы результаты мониторинга Фелли и др. [22]. Кроме того, приведены результаты наблюдений в линиях гидроксила на волне 18 см.

## 2. АППАРАТУРА И НАБЛЮДЕНИЯ

Мониторинг мазерного источника водяного пара на волне 1.35 см в области активного звездообразования NGC 2071 проводится нами с конца 1979 г. на радиотелескопе РТ-22 в ПРАО (Пушино, Россия) в направлении:  $\alpha_{2000} = 05^{\text{h}}47^{\text{m}}04.8^{\text{s}}$ ,  $\delta_{2000} = 0^{\circ}21'42.8''$ . Ширина диаграммы направленности антенны на 1.35 см равна 2.6'. Чувствительность телескопа составляет 25 Ян/К для точечного источника с неполяризованным излучением. Шумовая температура системы составляла от 130 до 250 К в зависимости от условий наблюдений. Спектры исправлены за поглощение в земной атмосфере.

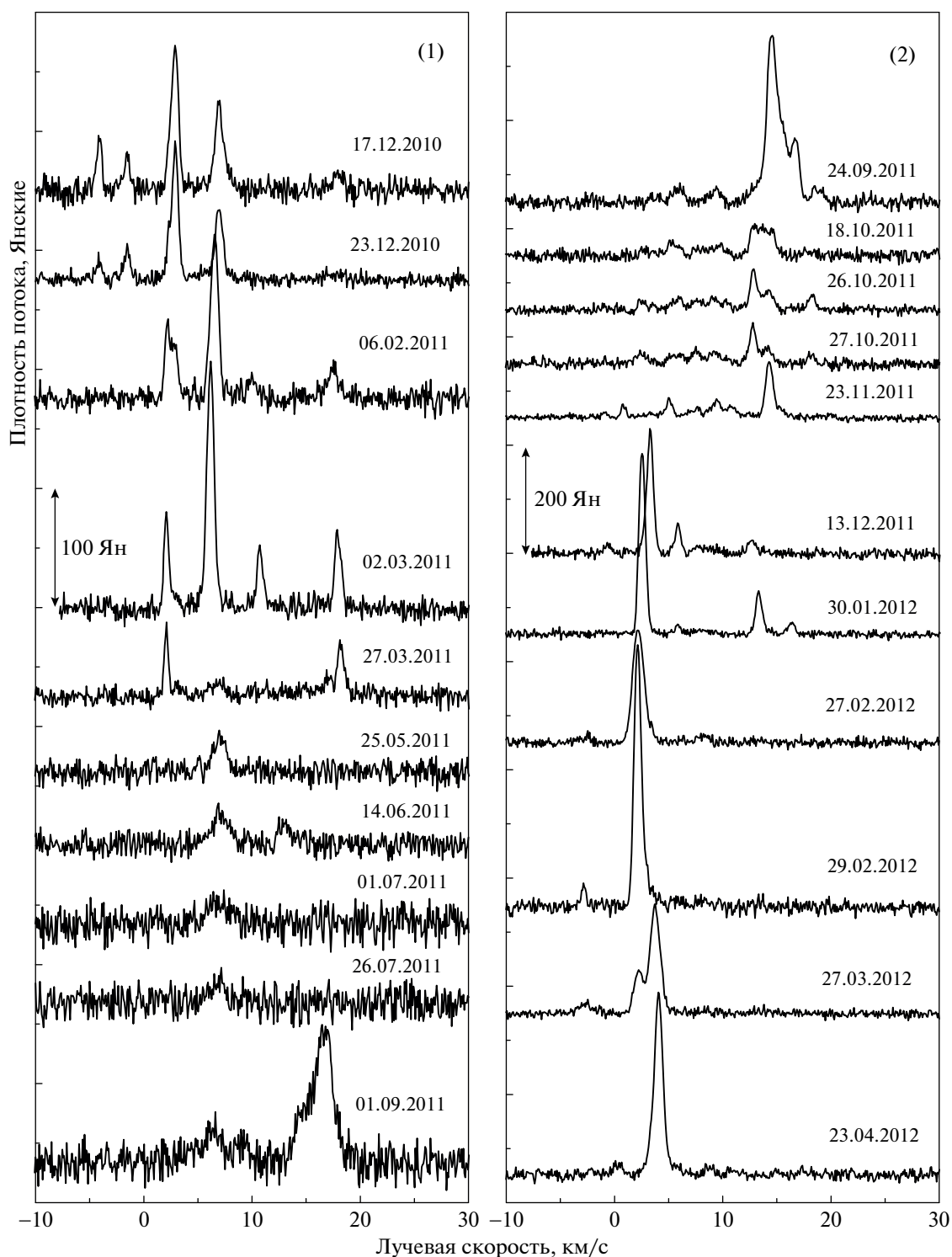
Регистрация сигнала осуществлялась сначала 128-канальным анализатором спектра фильтрового типа с разрешением по лучевой скорости 0.101 км/с, а с 2006 г. 2048-канальным автокоррелятором с разрешением 0.0822 км/с. Точность измерения лучевой скорости находилась в пределах 20–25 м/с.

Результаты наблюдений с 1979 по 2010 г. были опубликованы в ряде наших предыдущих работ [18–21]. В настоящей работе представлены результаты наблюдений с декабря 2010 по январь 2020 г. (см. рис. 1–6). Таким образом, полное время нашего мониторинга мазера H<sub>2</sub>O в NGC 2071 составило 40 лет. С мая 2006 по декабрь 2007 г. наблюдения не проводились по техническим причинам. Для восполнения этого пробела использовались результаты наблюдений Фелли и др. [22].

Также были выполнены наблюдения в линиях гидроксила на волне 18 см в 2007, 2014, 2015 и 2019 г. на радиотелескопе в Нансэ (Франция). Чувствительность телескопа составляет 1.4 Ян/К для точечного источника с неполяризованным излучением. Шумовая температура системы – от 35 до 60 К в зависимости от условий наблюдения. На склонении  $\delta = 0^{\circ}$  диаграмма направленности телескопа на данной волне равна  $3.5' \times 19'$  по прямому восхождению и склонению соответственно.

Спектральный анализ проводится автокорреляционным спектроанализатором из 8192 каналов. Эти каналы могут быть разделены на несколько батарей, каждая из которых проводит независимый анализ сигнала в одной из двух линий OH в одном из четырех направлений поляризации – двух линейных и двух круговых поляризациях (правой RC и левой LC).

В наших наблюдениях спектроанализатор был разделен на восемь батарей по 1024 канала. Проводились наблюдения двух круговых поляризаций (RC и LC) и четырех ориентаций линейной поляризации (L0/L90 и L45/L135) с поворотом облучателя на  $-45^{\circ}$ , что дает шесть мод поляризации. Это позволило определить все параметры Стокса.



**Рис. 1.** Спектры мазерного излучения  $\text{H}_2\text{O}$  в NGC 2071 в 2010–2012 гг. Двухсторонними вертикальными стрелками показана цена деления. Приведены эпохи наблюдений.

В наблюдениях 2007 г. частотная полоса анализа каждой батареи была 781.25 кГц, частотное разрешение 763 Гц. Это соответствует разрешению по лучевой скорости 0.137 км/с. В наблюде-

ниях 2014–2019 гг. разрешение было вдвое выше, 0.068 км/с.

Наблюдения в Нансэ представляют большой интерес, поскольку последние наблюдения NGC

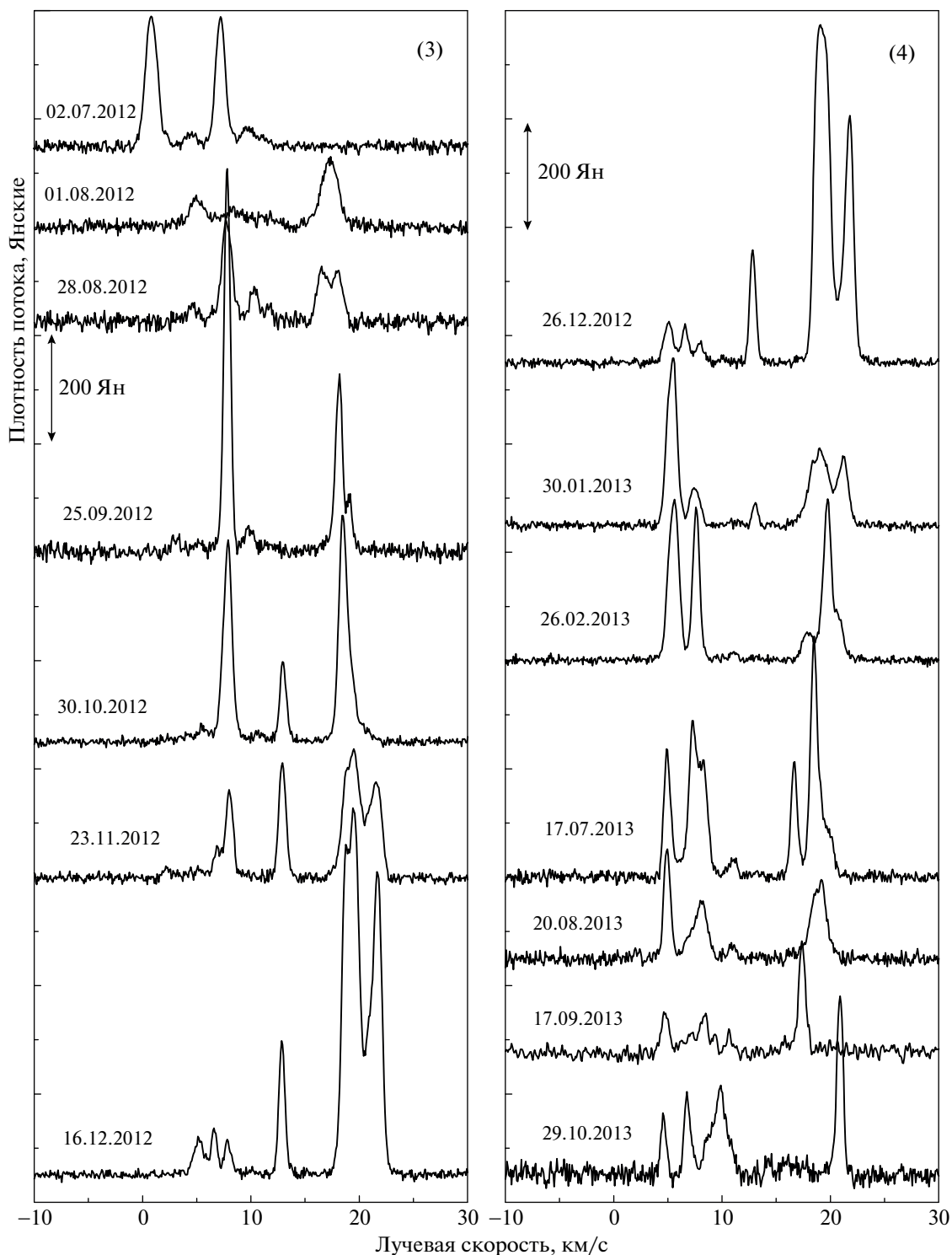


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для 2012–2013 гг.

2071 относится к эпохе 1988 г. Все наблюдения до 1988 г. показали, что мазерное излучение ОН происходило только в интервале лучевых скоростей 13–14 км/с и оно высоко переменное.

На рис. 7 представлены результаты наблюдений в главных линиях ОН на волне 18 см в круговых поляризациях в эпоху 29 октября 2007 г., когда было зарегистрировано мазерное излучение

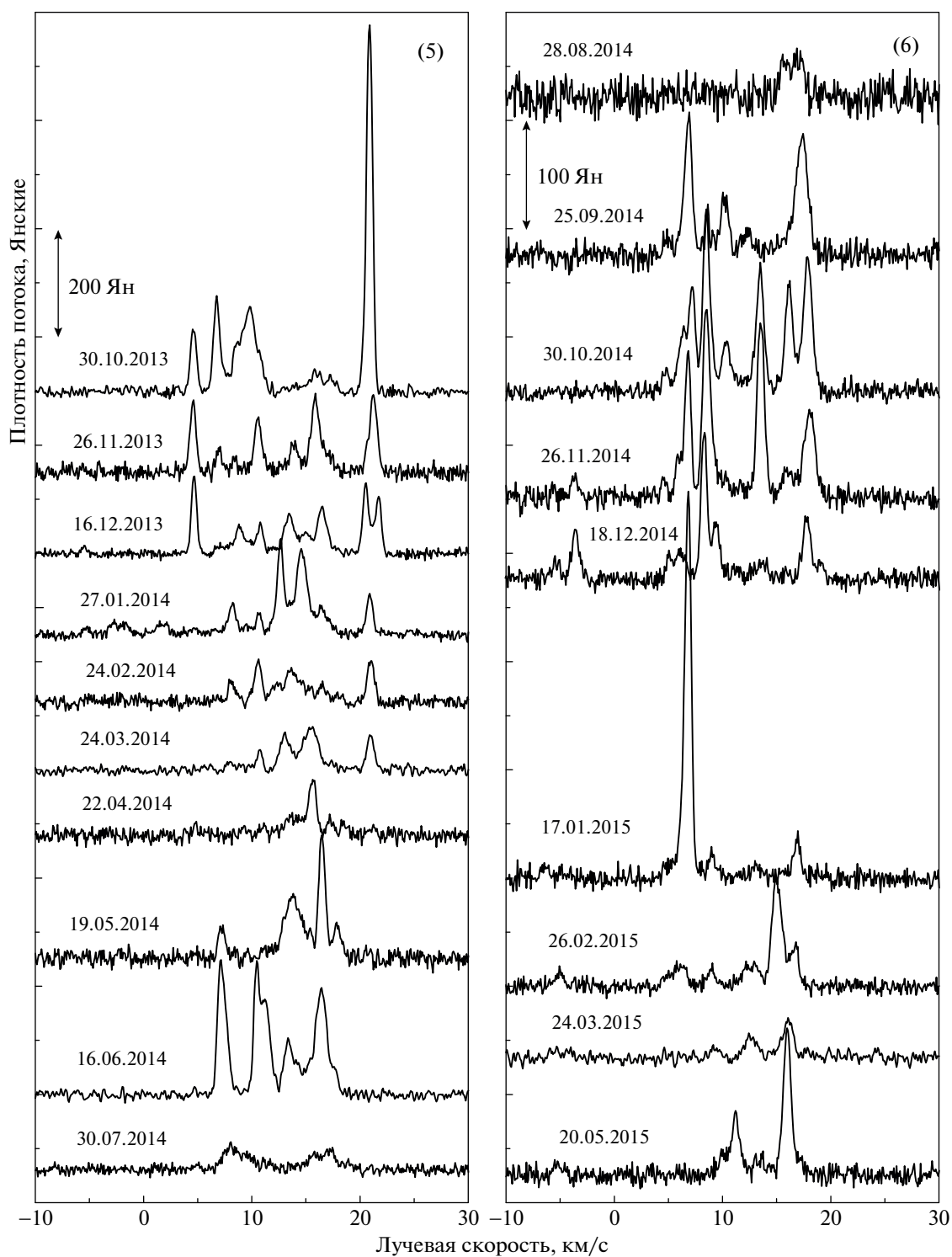


Рис. 3. То же, что на рис. 1, для 2013–2015 гг.

ОН. Приведен также параметр Стокса  $V$  (разница между излучением в правой и левой круговыми поляризациями).

### 3. ДИСКУССИЯ

NGC 2071 является источником, в направлении которого наблюдается тепловое и очень ред-

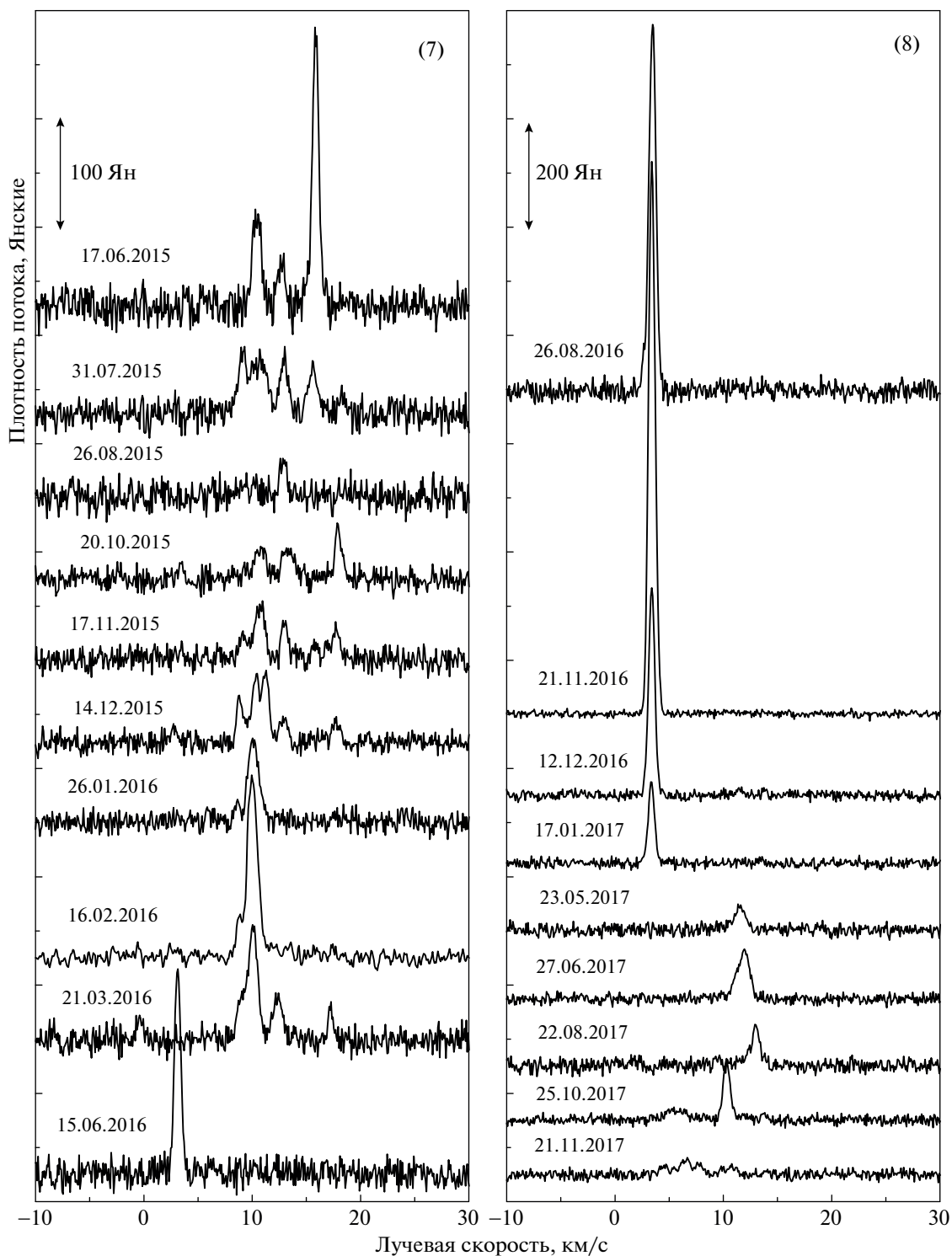


Рис. 4. То же, что на рис. 1, для 2015–2017 гг.

ко слабое быстропеременное мазерное излучение гидроксила в линии 1667 МГц.

Так, в 1975–1976 гг. Пантконин и др. [23] наблюдали в линии 1667 МГц мазерное излучение

на  $V_{LSR} \sim 14\text{--}15$  км/с, которое затем почти исчезло в апреле 1977 г. В 1981 г. Санделл и др. [24] вновь зарегистрировали мазер 1667 МГц на  $V_{LSR} \sim 13$  км/с, при этом наблюдалось гораздо бо-

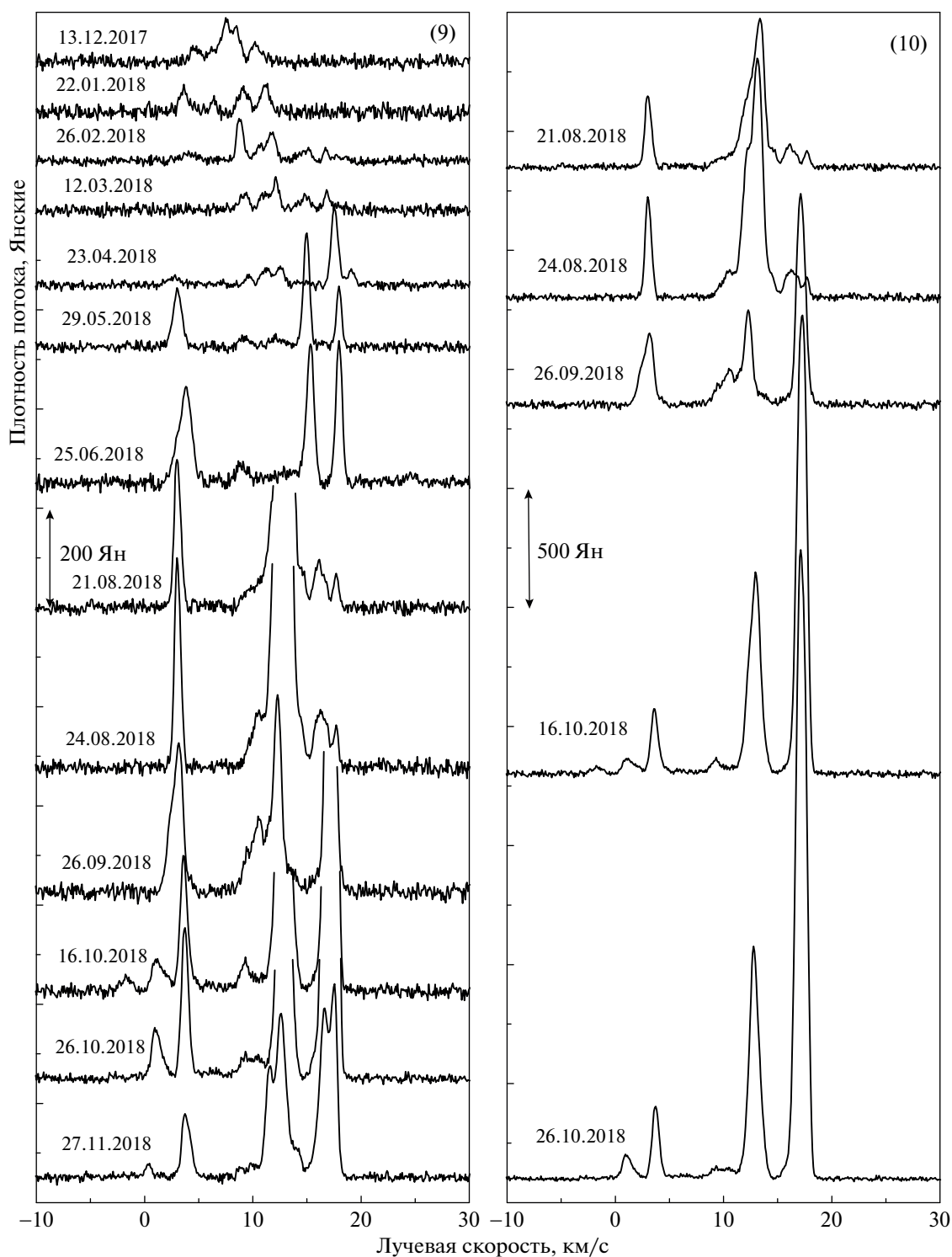


Рис. 5. То же, что на рис. 1, для 2017–2018 гг.

лее слабое, также мазерное излучение 1665 МГц на  $V_{\text{LSR}} \sim 15$  км/с. Это, вероятно, единственный случай, когда его удалось обнаружить. Кроме того, на  $V_{\text{LSR}} \sim 8$  км/с, т.е. вблизи лучевой скорости молекулярного облака, вместо поглощения най-

дена пара эмиссионных деталей, имеющих противоположную круговую поляризацию. Санделл и др. [24] интерпретировали ее как зеемановское расщепление линии и дали оценку напряженности магнитного поля в источнике 14 мГс.

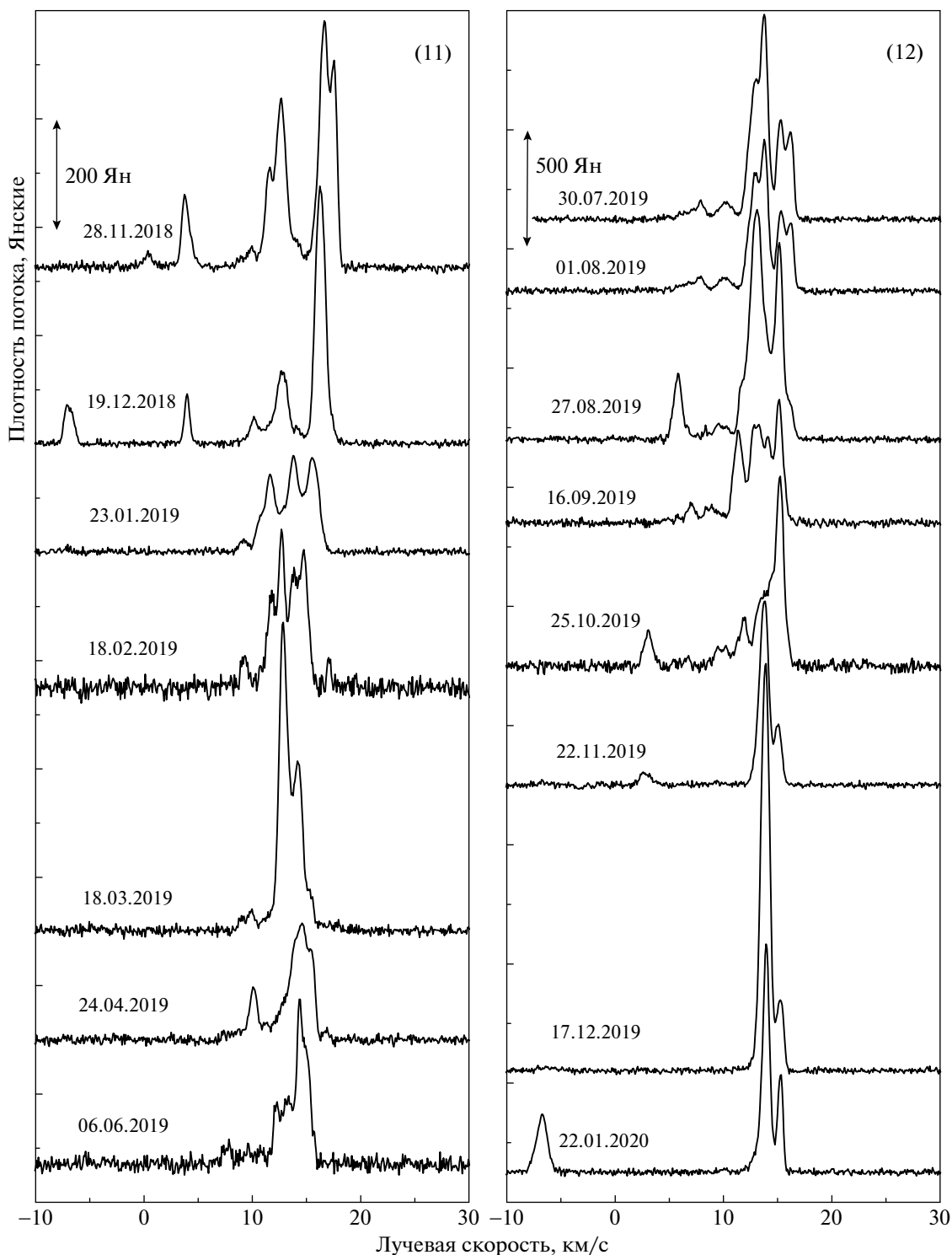


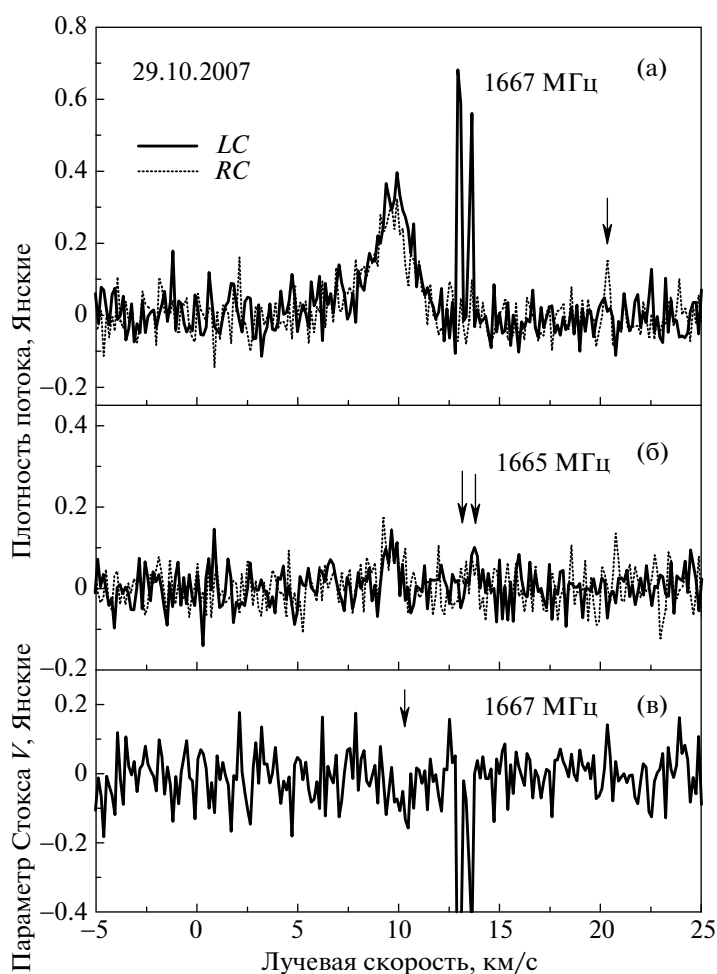
Рис. 6. То же, что на рис. 1, для 2018–2020 гг.

В 1987 г. Мирабель и др. [25] вновь не обнаружили узкополосного мазерного излучения в линиях 1667 или 1665 МГц на лучевых скоростях около 13 км/с. Наконец, в 1988 г. Руиз и др. [26] по наблюдениям поглощения в линиях ОН в протяженной области выявили наличие крупномас-

штабного биполярного выброса из молодого звездного объекта в NGC 2071.

После работы [26] мы не нашли в литературе других данных по наблюдениям NGC 2071 в линиях ОН.





**Рис. 7.** Излучение ОН в главных линиях на волне 18 см (а, б) и параметр Стокса  $V$  (в) в направлении NGC 2071 в эпоху 29 октября 2007 г. Вертикальными стрелками на панелях (а) и (б) отмечены возможные эмиссионные детали с потоками менее 0.1 Ян.

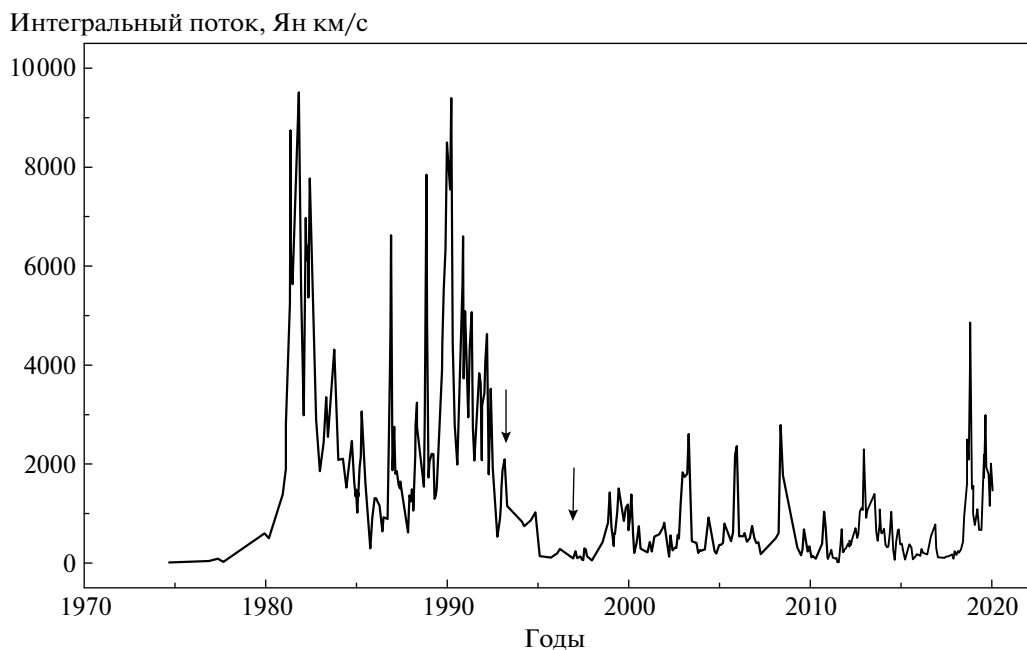
В то же самое время в направлении NGC 2071 имеется сильное мазерное излучение водяного пара. Особенностью NGC 2071 является существование двух областей мазерного излучения  $H_2O$  с расстоянием между ними всего лишь 2000 а.е. Как мы отмечали во введении, одна из них связана с биполярным потоком (IRS1), а другая — с кеплеровским диском (IRS3). Обе они погружены в плотное вращающееся газо-пылевое облако с температурой 20 К. Мы обращаем внимание на это потому, что спектры  $H_2O$ -мониторинга являются суперпозицией излучения двух указанных выше областей. Несмотря на это в одни и те же эпохи наблюдений, т.е. практически одновременно, имел место низкий уровень мазерной активности обоих источников, IRS1 и IRS3 (см. рис. 8).

### 3.1. Интегральный поток

Переменность интегрального потока мазерного излучения  $H_2O$  в направлении NGC 2071 за

весь мониторинг с декабря 1979 по январь 2020 г. показана на рис. 8. Мы также включили данные, полученные до нашего мониторинга [14, 23, 27], и данные Фелли и др. [22] за 2006–2007 гг., когда наш мониторинг не проводился. Переменность имеет циклический характер, т.е. наблюдается чередование максимумов и минимумов интегрального потока. В принципе, продолжительность циклов мазерной активности можно было бы оценить как по максимумам активности, так и по минимумам.

Однако прежде всего следует обратить внимание на то, что по уровню мазерной активности можно выделить два временных интервала. Первый длился с 1977 по 1997 г. и характеризуется своей высокой мазерной активностью. В течение второго временного интервала (1997–2017 гг.) интегральный поток имел более низкий уровень мазерного излучения. В течение всего мониторинга более или менее периодически наблюдались вспышки излучения, разделенные глубокими минимумами. Расстояния между минимумами со-



**Рис. 8.** Переменность интегрального потока мазерного излучения  $H_2O$ . Стрелками отмечены эпохи VLA наблюдений Тофани и др. [15] и Торреллеса и др. [16].

ставляют в первом интервале около одного года, а во втором от 3 до 4.4 года. Назовем их циклами вспышечной активности. С середины 2017 г. начинается этап новой активизации мазера  $H_2O$  в области NGC 2071.

Таким образом, несмотря на некоторое различие в характере и уровне мазерного излучения временных интервалов, их объединяет то, что в течение всего времени происходили кратковременные сильные вспышки, и, как правило, наблюдалось несколько эмиссионных деталей.

Вспышечный характер переменности мазерного излучения  $H_2O$  может быть следствием нестационарного процесса формирования протозвезды (в IRS1 и/или в IRS3) на ранней стадии эволюции, при этом аккреция и истечение вещества из протозвезды могут иметь квазипериодический характер.

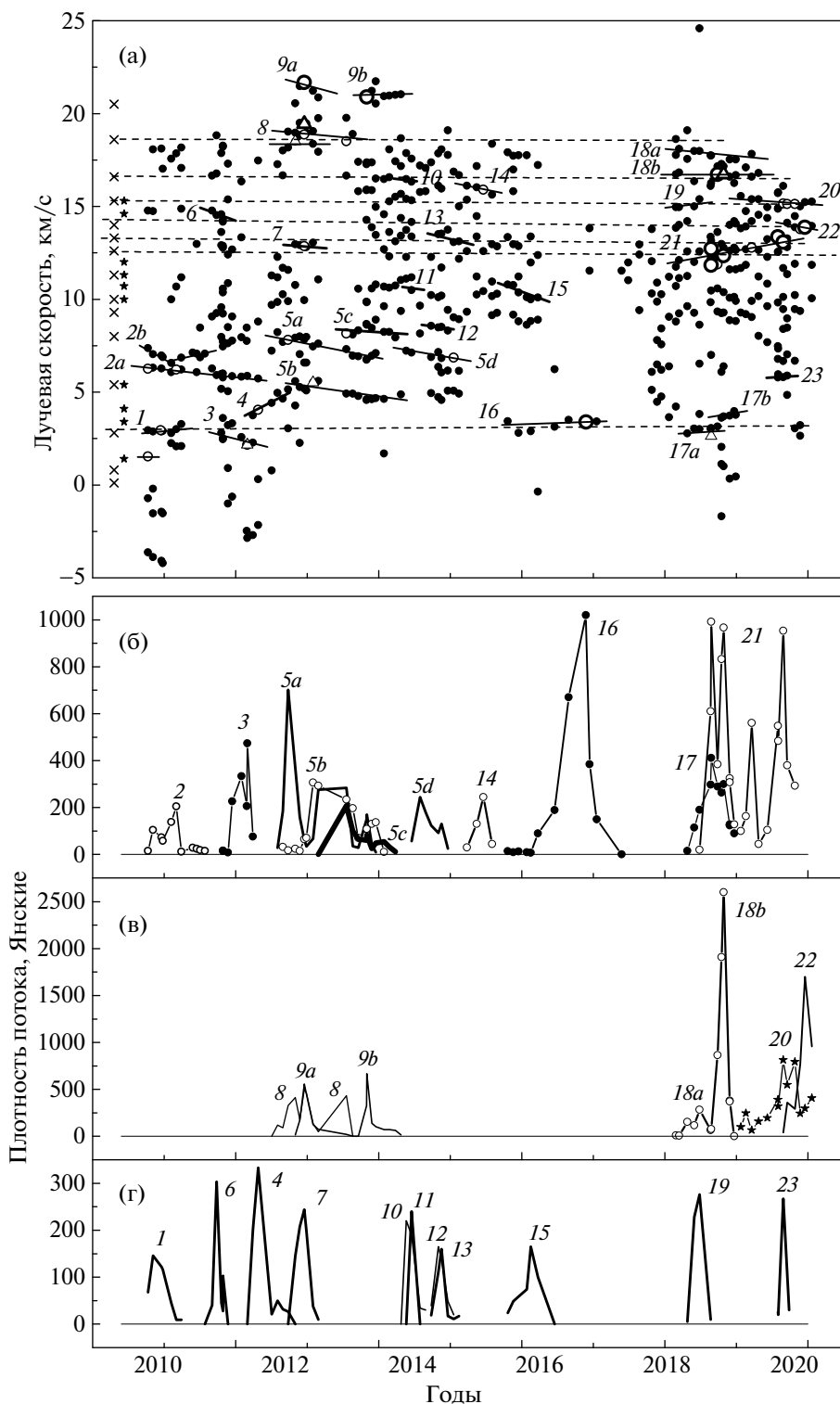
### 3.2. Эволюция основных деталей $H_2O$

Переменность основных характеристик излучения эмиссионных деталей  $H_2O$  показана на рис. 9. Она имеет довольно сложный характер. Переменность лучевой скорости основных спектральных деталей аппроксимирована отрезками прямых линий (см. рис. 9а). Для удобства анализа все они пронумерованы. Максимумы излучения отмечены светлыми кружками. В некоторых случаях детали в максимумах состояли из двух тесных компонентов. Они нанесены на рисунке

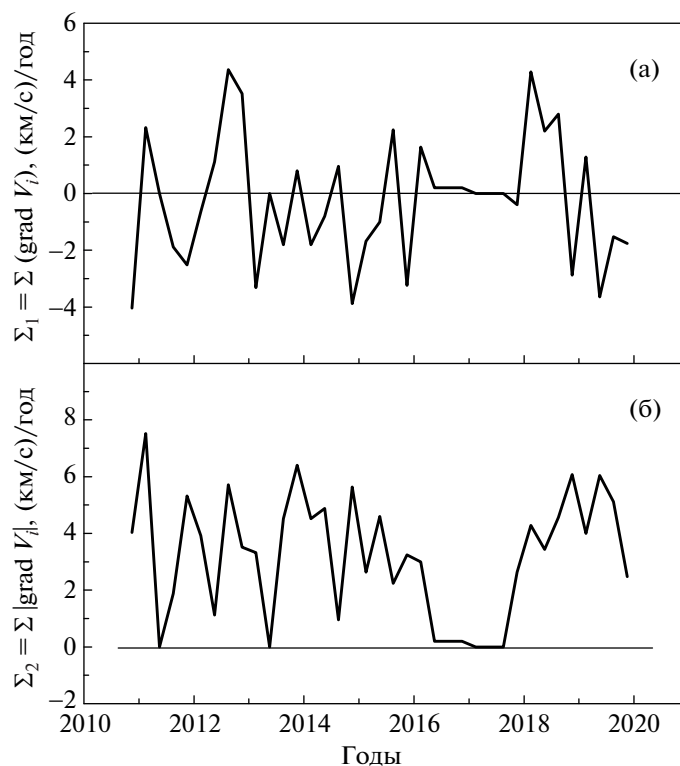
светлыми треугольниками. Слева крестиками и звездочками нанесены положения основных деталей из работы Торреллеса и др. [16] по результатам VLA-наблюдений в НРАО в декабре 1996 г. в направлении источников IRS1 и IRS3 соответственно.

На рис. 9б–г показаны изменения плотности потока 23 выделенных деталей, которые хорошо подчеркивают вспышечный характер излучения всех деталей. Время жизни мазерных деталей в активной фазе небольшое, т.е. происходит быстрый рост излучения и затем также быстрое их высвечивание. Наиболее сильные вспышки происходили в интервале лучевых скоростей 11.5–17 км/с. В конце 2016 г. наблюдалась одиночная сильная вспышка на 3 км/с.

Наблюдается дрейф лучевой скорости деталей, а также некоторые скачки лучевой скорости. Вероятно, все это вызвано не только реальным изменением лучевой скорости мазерных конденсаций, но и тем, что имеются неоднородности в самих мазерных конденсациях с незначительно различающимися случайным образом лучевыми скоростями в них. Также возможны структурные образования других конфигураций, например, неоднородные волокна с градиентом лучевой скорости и др. При прохождении ударной волны через такие структуры мы последовательно принимаем излучение от разных частей неоднородной конденсации. В таких структурах также неизбежно присутствуют мелкомасштабные турбулентные движения вещества.



**Рис. 9.** Переменность лучевой скорости (а) и плотности потока (б, в, г) эмиссионных деталей мазерного излучения  $\text{H}_2\text{O}$ . Вариации скоростей наиболее интенсивных деталей аппроксимированы отрезками прямых линий. Детали пронумерованы. Максимумы излучения отмечены светлыми кружками, а для двойных линий – светлыми треугольниками. Слева крестиками и звездочками нанесены положения основных деталей из работы Торреллеса и др. [16] по наблюдениям в НРАО в 1996 г. в направлении источников IRS1 и IRS3 соответственно. Смысл горизонтальных штриховых линий описан в тексте.



**Рис. 10.** Переменность суммы дрейфов (а) и суммы модулей дрейфов (б) лучевой скорости эмиссионных деталей мазерного излучения  $\text{H}_2\text{O}$ .

Для подтверждения сказанного выше мы провели оценку дрейфа излучения всех выделенных эмиссионных деталей на временных масштабах 0.25 г. Для каждого такого интервала были вычислены суммы  $\Sigma_1$  и суммы модулей  $\Sigma_2$  дрейфа эмиссионных деталей по лучевой скорости. Результаты такого анализа даны на рис. 10. Подобный анализ впервые был проведен нами для источника ON2 [28].

В отличие от ON2 в NGC 2071 никакого систематического смещения суммы дрейфа эмиссионных деталей не наблюдается. Практически нет различия вычисленных параметров  $\Sigma_1$  и  $\Sigma_2$  в эпохи сильных вспышек и более низких уровней активности. Можно сделать вывод, что наблюдаемый дрейф деталей больше связан со структурой мазерного источника в целом, а не с отдельными мазерными конденсациями.

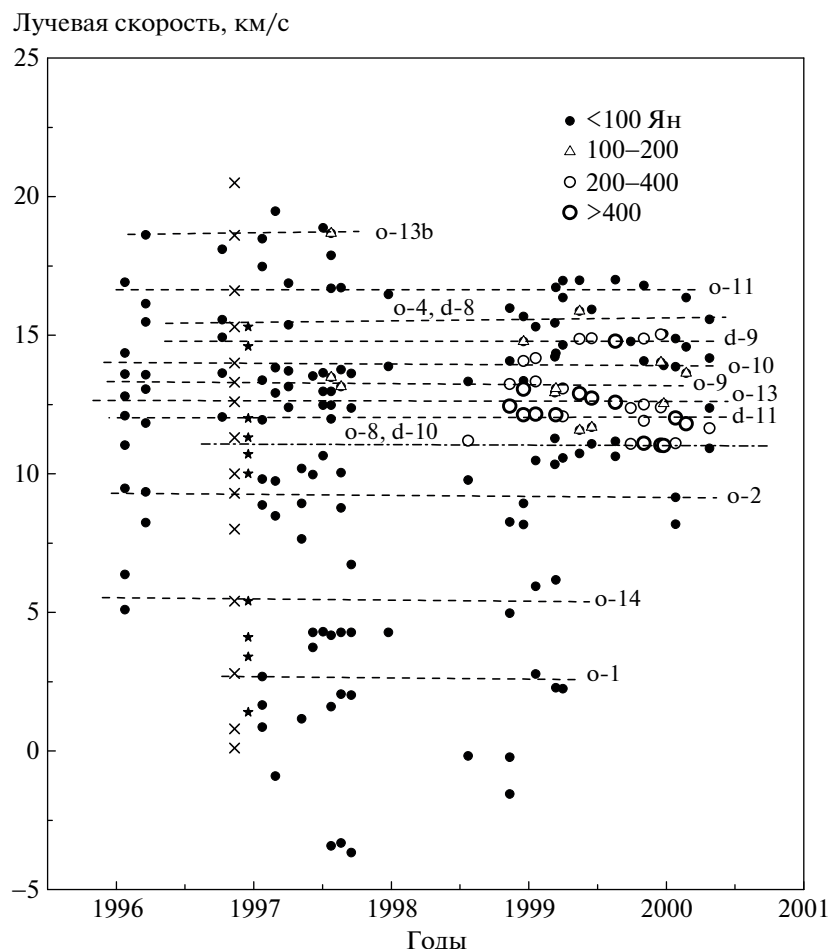
### 3.3. Пространственное отождествление основных деталей

Как мы установили выше, несмотря на сильные и быстрые вариации потоков, регулярные изменения лучевых скоростей эмиссионных деталей не являются значительными. Это несколько облегчает процедуру возможного определения

принадлежности спектральных деталей к мазерным пятнам на VLA картах и, следовательно, к источникам IRS1 и IRS3.

Пространственное отождествление сначала выполним для временного интервала 1996–2000 гг., соответствующего эпохе VLA наблюдений в декабре 1996 г. [16] и, следовательно, одному из циклов вспышечной активности мазера. Отождествление проводилось по близким значениям лучевых скоростей. Отметим, что ширина спектрального канала при VLA наблюдениях составляла 0.65 км/с. Поэтому погрешность при отождествлении можно принять порядка 0.2–0.3 км/с.

Результат разделения спектров на отдельные компоненты в 1996–2000 гг. показан на рис. 11. Точки на рисунке нанесены разными символами в зависимости от величины потока. Также нанесено большинство мазерных деталей (мазерных пятен) из работы Торреллеса и др. [16]. Штриховыми линиями объединены основные детали мониторинга, которые можно отождествить с мазерными пятнами VLA-карты. Для каждой линии введено обозначение, где буква означает принадлежность к источнику (o – молекулярный поток, d – кеплеровский диск), а число – номер детали, взятый из [16, табл. 2, 3]. Наиболее сложный ха-



**Рис. 11.** Переменность лучевой скорости эмиссионных деталей мазерного излучения  $\text{H}_2\text{O}$  в 1996–2000 гг. Указаны интервалы потоков и соответствующие им символы. Крестиками и звездочками нанесены положения основных деталей из работы Торреллеса и др. [16] по наблюдениям в НРАО 24 декабря 1996 г. в направлении источников IRS1 и IRS3 соответственно. Штриховыми линиями показано возможное отождествление основных деталей мониторинга с мазерными пятнами VLA-карты (см. текст).

рактически характер переменной данного цикла вспышечной активности приходится на временной интервал 1999–2000 гг. В это время происходили вспышки с потоками более 400 Ян в интервале скоростей 11–15 км/с, т.е. достаточно близким к интервалу скоростей сильных вспышек в 2008–2018 гг.

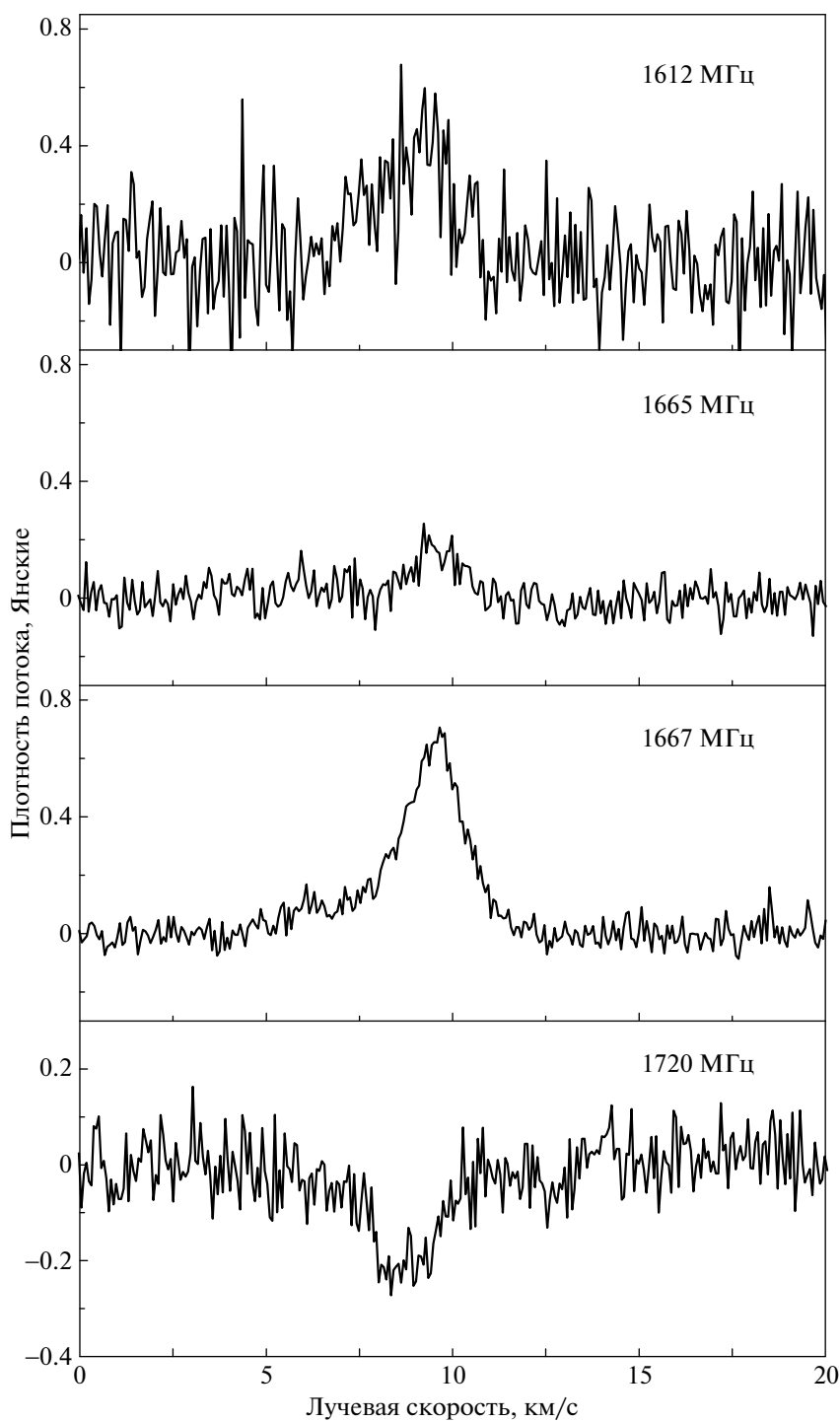
В результате возможного отождествления мы приходим к выводу, что в период 1999–2000 гг. достаточно активными были детали, связанные как с биполярным потоком (IRS1), так и с кеплеровским диском (IRS3). Таким образом, можно предположить, что имеется какая-то корреляция между активностью мазеров обоих источников.

Привести аналогичное пространственное отождествление эмиссионных деталей 2010–2020 гг. существенно сложнее из-за возможной эволюции структуры областей генерации мазерного излучения  $\text{H}_2\text{O}$ . Возможно лишь сопоста-

вить наблюдаемые детали данной эпохи с деталями (мазерными пятнами) VLA-карты с близкими лучевыми скоростями, как это было сделано в первом случае. Наибольший интерес представляет интервал лучевых скоростей 11–17 км/с, где происходили сильные вспышки мазерного излучения  $\text{H}_2\text{O}$ . На рис. 9а проведены горизонтальные штриховые линии, соответствующие лучевым скоростям основных мазерных деталей из VLA наблюдений Торреллеса и др. [16]. Большое обилие эмиссионных деталей позволяет предположить, что они принадлежат обоим источникам (IRS1 и IRS3).

#### 3.4. Излучение гидроксила

Первые спектры линий ОН на 18 см для NGC 2071 были получены нами 29 октября 2007 г. (см. рис. 7). В линии 1667 МГц присутствуют ши-



**Рис. 12.** Средние профили линий гидроксила в направлении NGC 2071. Приведены полные плотности потоков (суммы правой и левой поляризации).

рокая деталь на  $V_{\text{LSR}} \sim 9.5$  км/с и две узких мазерных детали на  $V_{\text{LSR}} \sim 13.0$  и  $13.6$  км/с, имеющих 100% левую круговую поляризацию. Широкая деталь, видимо, возникает в молекулярном облаке, окружающем мазер. В линии 1665 МГц также

имеется широкая деталь на 9.5 км/с, и, видимо, слабое узкополосное мазерное излучение на 13.20 и 13.75 км/с.

В дальнейшем мы наблюдали NGC 2071 в линиях ОН в эпохи 15.09.2014, 31.10.2014, 10.05.2015,

**Таблица 1.** Параметры линий гидроксила в источнике NGC 2071

Линия	Отн. интенсивность	Плотность потока, Ян	$V_{\text{LSR}}$ , км/с	$\Delta V_{0.5}$ , км/с
1612 МГц, $F = 1^+ \rightarrow 2^-$	1	0.38	8.96	2.43
1665 МГц, $F = 2^+ \rightarrow 2^-$	5	0.16	9.54	1.53
1667 МГц, $F = 1^+ \rightarrow 1^-$	9	0.61	9.46	2.11
1720 МГц, $F = 2^+ \rightarrow 1^-$	1	-0.22	8.70	1.95

Примечание.  $F$  – квантовое число подуровневой сверхтонкой структуры. Индексы  $\pm$  обозначают четность подуровней (см. схему уровней в [29]). В столбце 2 относительная интенсивность – это ожидаемое соотношение интенсивностей линий при локальном термодинамическом равновесии.

08.04.2018, 04.02.2019 и 10.11.2019. Ни в одном случае мазерное излучение на 1665 или 1667 МГц в интервале  $V_{\text{LSR}} \sim 13\text{--}14$  км/с не обнаружено.

На рис. 12 представлены профили линий излучения ОН в NGC 2071 и профиль линии поглощения 1720 МГц. Линию 1612 МГц мы наблюдали только один раз, 4 февраля 2019 г. Для остальных линий приведены спектры, усредненные по всем сеансам наблюдений. Усреднение проводилось с весом, пропорциональным времени накопления сигнала в данном сеансе (от 4 до 10 мин). Линии 1665 и 1720 МГц наблюдались в сеансе один раз, линия 1667 МГц – дважды или трижды. Всего усреднение для линии 1665 МГц проведено по 6 спектрам, для 1667 МГц – по 12 и для 1720 МГц – по 5 спектрам. Профили были аппроксимированы гауссовыми кривыми. Полученные параметры кривых приведены в табл. 1.

Отношение интенсивностей главных линий ОН 1665 и 1667 МГц равно 0.26, что ниже равновесного 5/9. В то же время интенсивность спутной линии 1612 МГц превышает интенсивность линии 1665 МГц и составляет 0.62 от интенсивности линии 1667 МГц, что гораздо выше равновесного отношения 1/9. Центры тяжести спутных линий 1612 и 1720 МГц смещены в сторону отрицательных лучевых скоростей. Это указывает на присутствие дополнительного излучения на  $V_{\text{LSR}} \sim 5\text{--}7$  км/с, которое, возможно, связано с еще одним молекулярным облаком на луче зрения. В линии 1667 МГц на этих скоростях также имеется некоторый избыток излучения. Кампбел [27] на основе картографирования облака L1630 в линии 1667 МГц (см. Госс и др. [30]) также указал на существование повышенного теплового излучения ОН к северо-западу от NGC 2071.

Если имеет место болцмановское распределение населенностей уровней сверхтонкой структурой,

$$\frac{n_u}{n_l} = \frac{g_u}{g_l} \exp\left(-\frac{h\nu_{ul}}{kT}\right), \quad (1)$$

где  $n_u, n_l$  – населенности, соответственно, верхнего и нижнего уровней перехода  $u \rightarrow l$ ,  $g_u, g_l$  – статистические веса уровней ( $g = 2F + 1$ ),  $T$  – температура возбуждения перехода, то для газа, оптически тонкого в переходах ОН, равновесное соотношение интенсивностей четырех линий диапазона 18 см составит 1 : 5 : 9 : 1 (см. табл. 1). При этом величина  $T$  одинакова для всех четырех переходов.

Населенности подуровневой сверхтонкой структуры основного состояния молекулы ОН  ${}^2\Pi_{3/2}$ ,  $J = 3/2$  чувствительны к наличию поля дальнего ИК-излучения в области 30–100 мкм. При возбуждении молекул ИК-излучением на лежащие выше вращательные уровни и при последующих каскадных переходах вниз в зависимости от формы спектра ИК-излучения могут возникать отклонения населенностей подуровневой сверхтонкой структуры состояния  ${}^2\Pi_{3/2}$ ,  $J = 3/2$  от равновесных, описываемых распределением (1) (см., напр., Литвак [31]). В случае NGC 2071 присутствует поле дальнего ИК-излучения, создаваемого нагретой пылью молекулярного облака [25]. Облучение молекул ОН этим полем приводит к перенаселению верхнего уровня  $F = 1^+$  перехода 1612 МГц и, как следствие, к более высокой температуре возбуждения  $T$  относительно температуры возбуждения главных линий. Поэтому интенсивность линии 1612 МГц повышена и почти равна интенсивности линии 1665 МГц. Напротив, перенаселенным оказывается нижний уровень  $F = 1^-$  перехода 1720 МГц, что снижает температуру возбуждения перехода и приводит к тому, что линия 1720 МГц наблюдается в поглощении на фоне радиоконтинуума источника NGC 2071.

Таким образом, важную роль в создании аномальных соотношений интенсивностей спутных линий ОН 1612 и 1720 МГц в NGC 2071 играет поле ИК-излучения.

Источник NGC 2071 обладает особенностями, отличающими его от других источников излучения ОН. Как правило, в областях звездообразова-

ния мазерная линия 1665 МГц интенсивнее, чем линия 1667 МГц. В NGC 2071 мазерное излучение 1667 МГц наблюдается лишь время от времени, а мазерное излучение 1665 МГц слабое или отсутствует совсем. В спутниковых линиях ОН в NGC 2071 наблюдаются особенности, вызванные отклонениями распределения населенностей подуровней сверхтонкой структуры от равновесного. Представляет интерес наблюдавшийся в 1981 г. эпизод появления в спутниковой линии 1720 МГц на лучевой скорости окружающего молекулярного облака зеэмановской пары эмиссионных деталей [24].

В завершение анализа широкополосного излучения обратимся к рис. 7в, на котором представлен параметр Стокса  $V$  для главной линии 1667 МГц. Он показывает, что профили линии излучения в правой и левой круговых поляризациях немного различаются. Различие наблюдается только в правой части профилей. Оно невелико, составляет в максимуме 80 мЯн, приходится на лучевую скорость 10.2 км/с и является более узкополосным (1.1 км/с), чем сами линии (1.9 км/с). Это может быть следствием того, что мы наблюдаем излучение ОН как минимум от двух молекулярных облаков с отличающимися физическими параметрами.

Вполне вероятно, что имеется слабое мазерное излучение ОН в линии 1665 МГц также и в левой круговой поляризации. Возможное излучение показано стрелками на рис. 7б. Параметры его следующие: лучевые скорости 13.20 и 13.75 км/с, плотности потоков 40 и 50 мЯн соответственно. Как мы отмечали выше, слабое излучение в линии 1665 МГц наблюдалось только в 1981 г. [24]. Нельзя исключить, что слабое мазерное излучение имеется в линии 1665 МГц в обеих круговых поляризациях на скорости 20 км/с. Источник NGC 2071 заслуживает дальнейшего мониторинга во всех четырех линиях ОН диапазона 18 см.

#### 4. ВЫВОДЫ

Перечислим основные результаты, полученные в настоящей работе из наблюдений области активного звездообразования NGC 2071 в линиях молекул  $H_2O$  и ОН.

1. Представлен каталог спектров мазерного излучения  $H_2O$  за 2010–2019 гг. Таким образом, полное время мониторинга источника NGC 2071 составило 40 лет (1979–2020 гг.).

2. Показано, что переменность мазерного излучения  $H_2O$  имеет два основных цикла активности: 1977–1997 гг. и 1997–2017 гг. Они различаются по уровню мазерного излучения, но одинаковые по продолжительности.

3. Характерной особенностью мазеров водяного пара в NGC 2071 является то, что мазерное из-

лучение представляет собой постоянные кратковременные вспышки со средним периодом повторения один год в первом цикле и около четырех лет во втором.

4. Вспышечный характер переменности мазерного излучения  $H_2O$  может быть следствием нестационарного процесса формирования протозвезды в областях, связанных с IRS1 и IRS3, на ранней стадии их эволюции. При этом аккреция и истечение вещества из протозвезды могут иметь квазипериодический характер. Кратковременность вспышек свидетельствует о том, что среда генерации мазерного излучения  $H_2O$  сильно неоднородная.

5. Излучение ОН в линиях 1612, 1665 и 1667 МГц в диапазоне лучевых скоростей 7–12 км/с является широкополосным. Соотношение интенсивностей отличается от равновесного. Приведено обоснование наблюдаемого соотношения интенсивностей этого излучения и поглощения в линии 1720 МГц. Мазерное излучение ОН наблюдалось нами в левой круговой поляризации в линии 1667 МГц на двух лучевых скоростях 13.02 и 13.55 км/с с плотностью потока около 0.3 Ян и шириной  $\sim 0.25$  км/с для каждой из них.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам Медонской (Франция) и Пушкинской (Россия) радиоастрономических обсерваторий за большую помощь в проведении наблюдений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *M. L. Kutner, K. D. Tucker, G. Chin, and P. Thaddeus*, *Astrophys. J.* **215**, 521 (1977).
2. *R. Launhardt, P. G. Mezger, C. G. T. Haslam, E. Kreysa, R. Lemke, A. Sievers, and R. Zylka*, *Astron. and Astrophys.* **312**, 569 (1996).
3. *B. J. Anthony-Twarog*, *Astron. J.* **87**, 1213 (1982).
4. *D. M. Walther, E. I. Robson, C. Aspin, and W. R. F. Dent*, *Astrophys. J.* **418**, 310 (1993).
5. *H. M. Butner, N. J. Evans, II, P. M. Harvey, L. G. Mundy, A. Natta, and M. S. Randich*, *Astrophys. J.* **364**, 164 (1990).
6. *R. L. Snell and J. Bally*, *Astrophys. J.* **303**, 683 (1986).
7. *P. A. Heckert and M. Zeilik*, *Astron. J.* **89**, 1379 (1984).
8. *S. M. Lichten*, *Astron. J.* **253**, 593 (1982).
9. *J. Bally*, *Astron. J.* **261**, 558 (1982).
10. *S. Zhou, N. J. Evans, II, and L. G. Mundy*, *Astrophys. J.* **355**, 159 (1990).
11. *J. M. Torrelles, L. F. Rodriguez, J. Cantó, P. Carral, J. Marcaide, J. M. Moran, and P. T. P. Ho*, *Astrophys. J.* **274**, 214 (1983).
12. *L. E. B. Johansson, B. Höglund, A. Winnberg, Nguyen-Q-Rieu, and W. M. Goss*, *Astrophys. J.* **189**, 455 (1974).



13. *B. E. Turner*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **37**, 1 (1979).
14. *R. L. Schwartz and D. Buhl*, *Astrophys. J.* **201**, L27 (1975).
15. *G. Tofani, M. Felli, G. B. Taylor, and T. R. Hunter*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **112**, 299 (1995).
16. *J. M. Torrelles, J. F. Gómez, L. F. Rodriguez, S. Curiel, G. Anglada, and P. T. P. Ho*, *Astrophys. J.* **505**, 756 (1998).
17. *A. C. Seth, L. J. Greenhill, and B. P. Holder*, *Astrophys. J.* **581**, 325 (2002).
18. *Е. Е. Лехт, М. И. Пащенко, Г. М. Рудницкий, Р. Л. Сороченко*, *Астрон. журн.* **59**, 276 (1982).
19. *И. И. Берулис, Е. Е. Лехт, Г. М. Рудницкий*, *Астрон. журн.* **73**, 44 (1996).
20. *Р. Л. Сороченко, И. И. Берулис, В. А. Гусев, Е. Е. Лехт, Л. М. Нагорный, Г. Т. Смирнов*, *Труды ФИАН* **159**, 50 (1985).
21. *Е. Е. Лехт, В. А. Муницын, А. М. Толмачев, В. В. Краснов*, *Астрон. журн.* **88**, 931 (2011).
22. *M. Felli, J. Brand, R. Cesaroni, C. Codella, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **476**, 373 (2007).
23. *V. Pantkonin, A. Winnberg, and R. S. Booth*, *Astron. and Astrophys.* **58**, L25 (1977).
24. *G. Sandell, L. A. Nyman, A. Haschick, and A. Winnberg*, *Lecture Notes in Physics* **237**, 234 (1985).
25. *I. F. Mirabel, L. F. Rodriguez, and A. Ruiz*, *Astrophys. J.* **346**, 180 (1989).
26. *A. Ruiz, L. F. Rodriguez, J. Cantó, and I. F. Mirabel*, *Astrophys. J.* **398**, 139 (1992).
27. *P. D. Campbell*, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **90**, 262 (1978).
28. *A. Márquez, J. E. Mendoza-Torres, and E. E. Lekht*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **128**, 1 (1998).
29. *Д. А. Варшалович, В. В. Бурдюжа*, *Астрон. журн.* **52**, 1178 (1975).
30. *M. W. Goss, A. Winnberg, L. E. B. Johansson, and A. Fournier*, *Astron. and Astrophys.* **46**, 1 (1976).
31. *M. M. Litvak*, *Astrophys. J.* **156**, 471 (1969).