

УДК 524.527-77

ЭВОЛЮЦИЯ МАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ АКТИВНОГО ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ G43.8–0.1. I. МАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ОН НА ВОЛНЕ 18 см

© 2019 г. П. Колом¹, Н. Т. Ашимбаева², Е. Е. Лехт^{2*},
М. И. Пашенко², Г. М. Рудницкий², А. М. Толмачев³

¹Медонская обсерватория, Медон, Франция

²Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга, Москва, Россия

³Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
Пушчинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН, Пушкино, Россия

Поступила в редакцию 25.10.2018 г.; после доработки 11.02.2019 г.; принята к публикации 28.02.2019 г.

Представлены результаты наблюдений мазерного излучения гидроксила в области звездообразования G43.8–0.1. Показано, что несмотря на сильную переменность плотности потока в главных линиях 1665 и 1667 МГц, лучевые скорости спектральных деталей менялись незначительно. Проведено отождествление основных деталей с мазерными пятнами на картах, опубликованных для эпох 1993 и 2001 г. Сделано предположение, что области мазерного излучения могут иметь конфигурации, например, в виде вытянутых неоднородных структур с малым градиентом лучевой скорости (аналог структуры мазера водяного пара в виде волокон, но большего масштаба). Для двух зеэмановских пар определено значение продольного магнитного поля, которое практически сохранялось как минимум 17 лет.

DOI: 10.1134/S0004629919070041

1. ВВЕДЕНИЕ

Источник мазерного излучения G43.8–0.1 находится в области активного звездообразования. В направлении на этот источник сначала было обнаружено излучение гидроксила в линиях 18 см [1–3], а затем водяного пара в линии 1.35 см в 1976 г. [4]. По этой причине данный источник чаще всего называют как ОН G43.8–0.1. Мазеры связаны с компактной областью Н II и инфракрасным источником IRAS 19095+0930. Многочисленные VLBI наблюдения в линии H₂O показали, что мазерные детали (конденсации) образуют некоторую организованную структуру. Так VLBI-изображение, полученное Даунс и др. [5], показывает, что большинство деталей мазера H₂O расположены в дугообразной структуре с поперечным диаметром 200 mas (milli arc second — угловая миллисекунда). При расстоянии до G43.8–0.1, равном 2.8 кпк, это соответствует радиусу структуры около 10¹⁶ см.

Лучевые скорости самых сильных низкоскоростных деталей увеличиваются вдоль этой дуги с востока на запад. Высокоскоростные детали также

встречаются в области 400 mas у открытого конца дуги. VLA-наблюдения [6] показали, что имеются четыре мазерных детали, которые расположены в направлении восток-запад в пределах 0.3". Это является частью дуги, наблюдаемой на VLBI [5].

Ву и др. [7] идентифицировали 12 различных пятен мазера воды, распределенных в пределах ≈0.2". Согласно их исследованиям распределение и собственные движения этих пятен являются довольно случайными, и поэтому не могут моделироваться в виде молекулярного потока. Наблюдения G43.8–0.1 в линиях гидроксила на 18 см с высоким угловым разрешением были выполнены в 1993 г. [8] на VLA в НРАО и в 2001 г. на глобальной системе VLBA [9]. Карты расположения мазерных пятен имеют хорошее подобие, но во втором случае карта более подробная: в линии 1665 МГц имеется 45 эмиссионных деталей (пятен) против 15 у Аргон и др. [8].

2. АППАРАТУРА И НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения в настоящей работе были выполнены в главных и сателлитных линиях молекулы

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

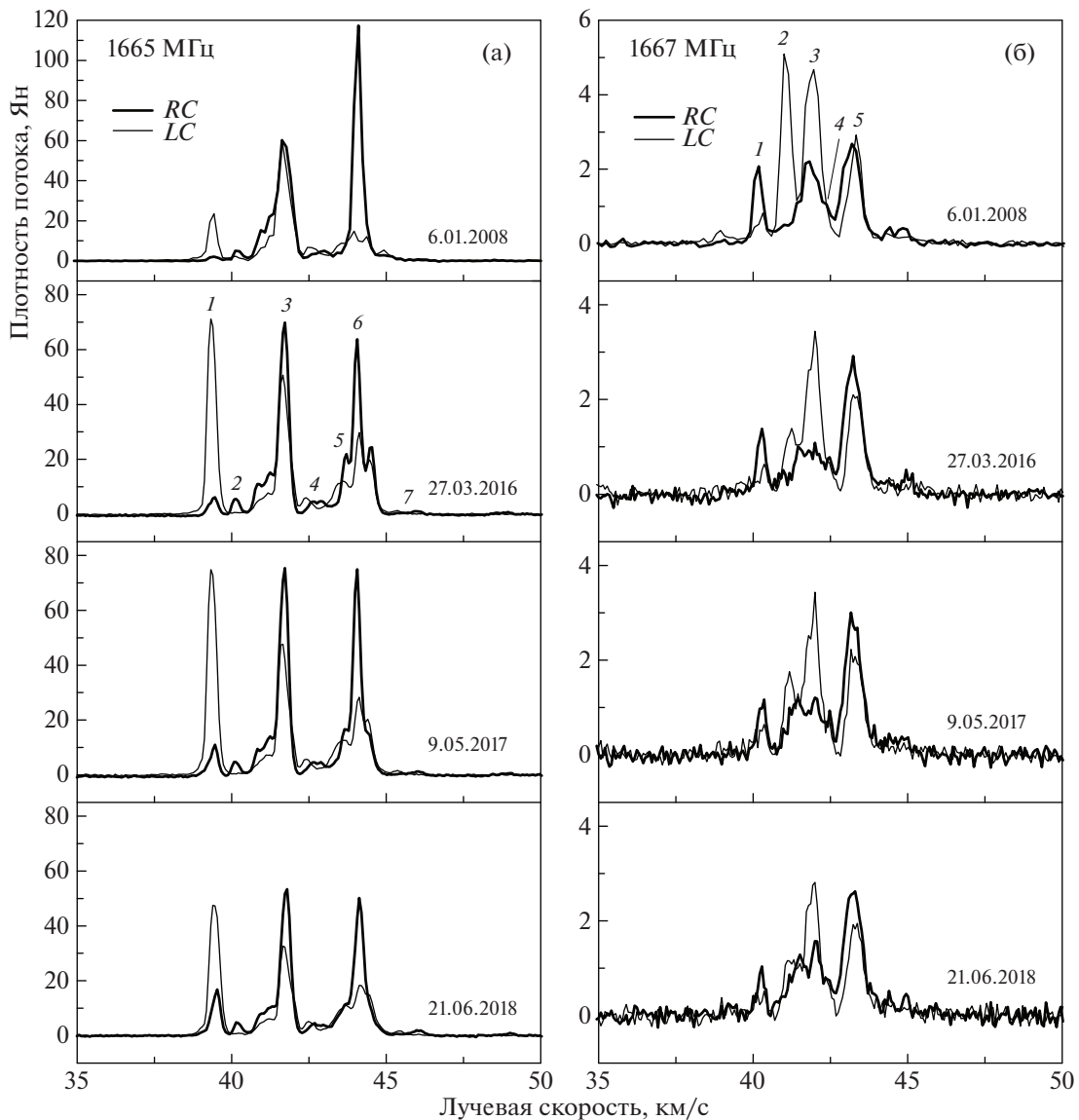


Рис. 1. Спектры мазерного излучения OH в линиях 1665 и 1667 МГц в правой RC и левой LC круговых поляризациях. Приведены эпохи наблюдений. Для удобства анализа основные детали пронумерованы.

гидроксила OH на волне 18 см на Большом радиотелескопе в Нансэ (Франция) для четырех эпох: 6 января 2008 г., 27 марта 2016 г., 29 мая 2017 г. и 21 июня 2018 г. Чувствительность телескопа составила 1.4 К/Ян для точечного источника неполяризованного излучения. На склонении $\delta = 0^\circ$ диаграмма направленности телескопа на данной волне равна $3.5' \times 19'$ по прямому восхождению и склонению соответственно. Анализ сигнала осуществлялся автокорреляционным спектроанализатором. Спектральное разрешение в 2008 г. составило 0.137 км/с, а в 2016–2018 гг. — 0.0686 км/с. В спутниковых линиях 1612 и 1720 МГц излучение не было обнаружено.

Результаты наблюдений в главных линиях 1665 и 1667 МГц в правой (жирная линия) и левой (тонкая линия) круговых поляризациях приведены на рис. 1. Указаны эпохи наблюдений. Для удобства анализа основные детали пронумерованы. Нумерация относится к деталям обеих круговых поляризаций, т.к. они имеют равные или очень близкие лучевые скорости. Для 1665 и 1667 МГц нумерация повторяется, но это разные детали. За основные мы приняли те детали, которые есть в наших наблюдениях в Нансе в 2008–2018 гг., в 1993 г. [8] или в 2001 г. [9].

3. ДИСКУССИЯ

3.1. Отождествление отдельных деталей

Хотя наблюдения G43.8–0.1 в линиях гидроксила 18 см выполнены нами только для четырех эпох, причем с существенно разными временными интервалами между наблюдениями, нам удалось выявить некоторые закономерности в переменности мазерного излучения гидроксила. Самое интенсивное излучение наблюдалось в главной линии 1665 МГц. Имеется значительная переменность потока излучения некоторых деталей. Очень важным для нас оказалось то, что лучевые скорости деталей сохранялись, либо менялись очень мало. Это облегчило отождествление большинства деталей в наших спектрах с деталями спектров, полученных Аргон и др. в январе 1993 г. [8] и Фиш и др. в 2001 г. [9].

Наблюдения [8] были выполнены в НРАО на VLA с конфигурацией А. Угловое разрешение с этой конфигурацией в направлении на источник G43.8–0.1 составляло $2.19'' \times 1.41''$. Погрешность положения отдельных мазерных пятен оценивается авторами как 10 mas.

Последующие наблюдения Фиш и др. [9] были выполнены со сверхдлинной базой (VLBA) с угловым разрешением 17 mas. Это позволило получить более тонкую структуру области. В общем, распределение мазерных пятен на картах [8, 9] имеет неплохое подобие. Конкретные детали мы сравнивали по двум критериям. Во-первых, это очень близкие лучевые скорости и, во-вторых, близкие координаты. И, конечно, учитывался вид круговой поляризации.

Проведенный нами анализ показал, что основные эмиссионные детали в спектрах сохранялись на протяжении 25 лет. Достаточно стабильными являются их лучевые скорости.

На рис. 2 и 3 в главных линиях 1665 и 1667 МГц, соответственно, нанесены наблюдаемые нами в Нансэ эмиссионные детали, которые отождествлены с деталями на карте [8]. Они отмечены светлыми кружками. Рядом с ними нанесены их лучевые скорости, взятые из наших спектров (2016 г., Нансэ). Крестиками нанесены близкие по лучевым скоростям и координатам детали из работы [9]. Также нанесены их лучевые скорости, которые взяты из той же работы [9]. Положения (смещения) деталей в работах Аргон и др. (эпоха 12 января 1993 г.) и Фиш и др. (эпоха 27 мая 2001 г.) даны относительно одной и той же основной детали на лучевой скорости 41.6 км/с в обеих круговых поляризациях. В наших спектрах в 2008, 2016, 2017 и 2018 г. эта деталь также является одной из основных.

Курсивом показаны номера деталей, взятые из рис. 1. В скобках дано расстояние между деталями

согласно картам двух эпох, 1993 и 2001 г. Детали, лучевые скорости которых указаны в скобках, наблюдали только Аргон и др. или Фиш и др., а также авторы настоящей работы в Нансэ в 2008–2018 г. Относительная ошибка положений мазерных пятен на карте [8] много меньше ширины синтезированной диаграммы направленности VLA и, как правило, она определяется отношением сигнал/шум. В результате может проявиться зависимость ошибки положения мазерного пятна от плотности потока.

Для выявления существования или отсутствия такой зависимости мы провели анализ для нанесенных на рис. 2 и 3 мазерных пятен двух эпох, 1993 и 2001 г., т.е. анализ отклонения положения мазерных пятен карт VLA относительно более точных координат на картах VLBA.

Мы получили, что подобная зависимость выполняется только в линии 1665 МГц в левой круговой поляризации, исключая деталь 6 с лучевой скоростью 43.55 км/с. В остальных случаях такая корреляция не наблюдается.

Также отметим, что нам удалось обнаружить новые, отсутствующие в 1993 г., детали в обеих главных линиях в правой и левой круговых поляризациях. На рис. 2 и 3 они не нанесены, т.к. у нас нет их координат.

3.2. Переменность излучения гидроксила

Вновь обратим внимание на то, что переменность лучевой скорости обнаружить не удалось, несмотря на значительную переменность потока отдельных деталей. В каждой отождествленной детали лучевая скорость с 1993 по 2018 г. находилась в интервале менее 0.3 км/с, за исключением всего лишь двух деталей. Совпадение координат эпох 1993 и 2001 г. для большинства отождествленных деталей также достаточно хорошее.

Как мы отмечали выше, карты расположения мазерных пятен имеют хорошее подобие. Однако расстояния между идентифицированными деталями (числа в скобках на рис. 2 и 3, нанесенные курсивом) оказалось более 15 mas, за исключением всего лишь двух. Это требует слишком больших собственных движений мазерных пятен, что, конечно, нереально. Причиной может быть, например, то, что абсолютная точность положения центра карты 1993 г. составляет $0.3'' \times 0.5''$. Подбор различных значений центровки карт 1993 и 2001 г. не привел к минимизации расстояний между мазерными деталями.

На рис. 4 показана переменность плотности потока основных эмиссионных деталей в линиях 1665 и 1667 МГц в обеих круговых поляризациях. Мы также использовали данные [8, 9] 1993 и

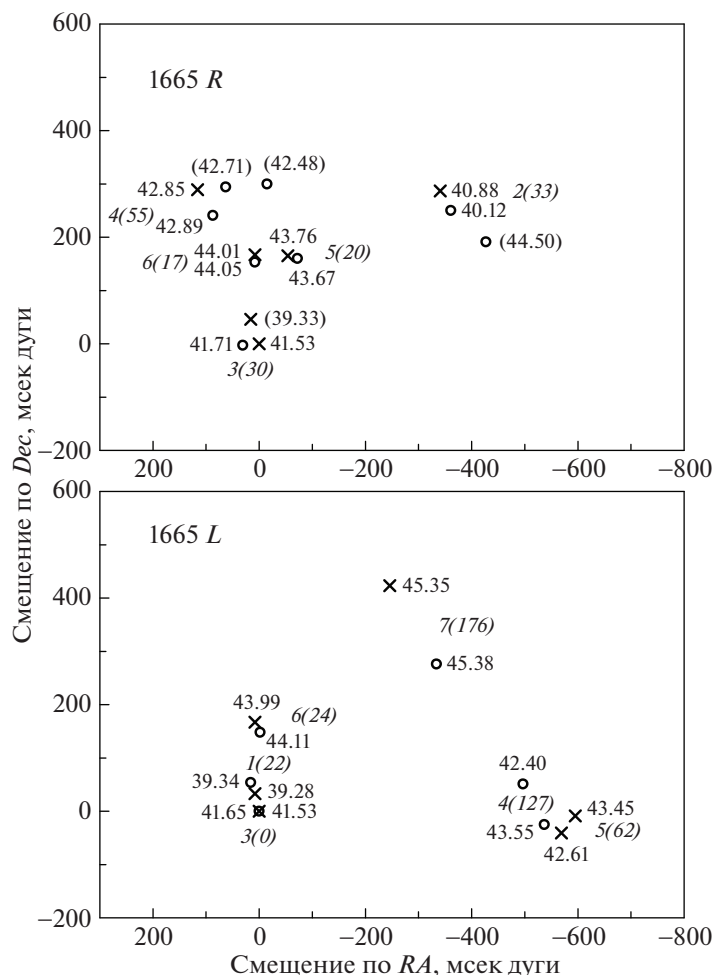


Рис. 2. Карты расположения основных мазерных пятен ОН в линии 1665 МГц согласно данным [8] (светлые кружки) для эпохи 1993 г. и [9] (крестики) для эпохи 2001 г. Около каждого из них приведено значение лучевой скорости. Курсивом показан номер детали, а в скобках расстояние между деталями с равными или очень близкими лучевыми скоростями между положениями из наблюдений [8, 9]. Центры карт взяты относительно одной и той же основной детали на лучевой скорости 41.6 км/с.

2001 г. Нумерация эмиссионных деталей соответствует рис. 1. Несколько заниженные значения плотности потока деталей для эпохи 2001 г. могут быть вызваны тем, что наблюдения в эту эпоху были выполнены с высоким угловым разрешением и мы используем значения потоков от элементов тонкой структуры. В остальных случаях используются суммарные значения потоков от нескольких элементов тонкой структуры с близкими лучевыми скоростями. Также возможно уменьшение коррелированного потока каждой детали вследствие ее конечного размера.

Сильные изменения спектров наблюдались также в линии 1667 МГц особенно в 2017 и 2018 г. (см. рис. 1 и 4).

3.3. О модели

Для построения возможной модели мазера гидроксидла в источнике G43.8–0.1 воспользуемся по-

лученными в данной работе следующими результатами. Отдельные мазерные детали в спектрах ОН имеют большое время жизни, сильную переменность потока излучения и очень незначительные изменения лучевых скоростей. Кроме того, сравнивая карты VLA и VLBA наблюдений для большинства деталей (мазерных пятен), мы получили достаточно большие наблюдаемые расстояния между мазерными пятнами, которые существенно превышают допустимые значения собственных движений. Последнее обстоятельство может быть следствием различных ошибок при измерениях положения мазерных пятен с помощью VLA.

Можно предложить некоторое альтернативное объяснение. Рассмотрим модель мазерных пятен, например, в виде вытянутых неоднородных волокон с небольшим градиентом лучевой скорости. Это может быть аналогом мазерных пятен водяного пара (см., напр., [10]), но большего масштаба.

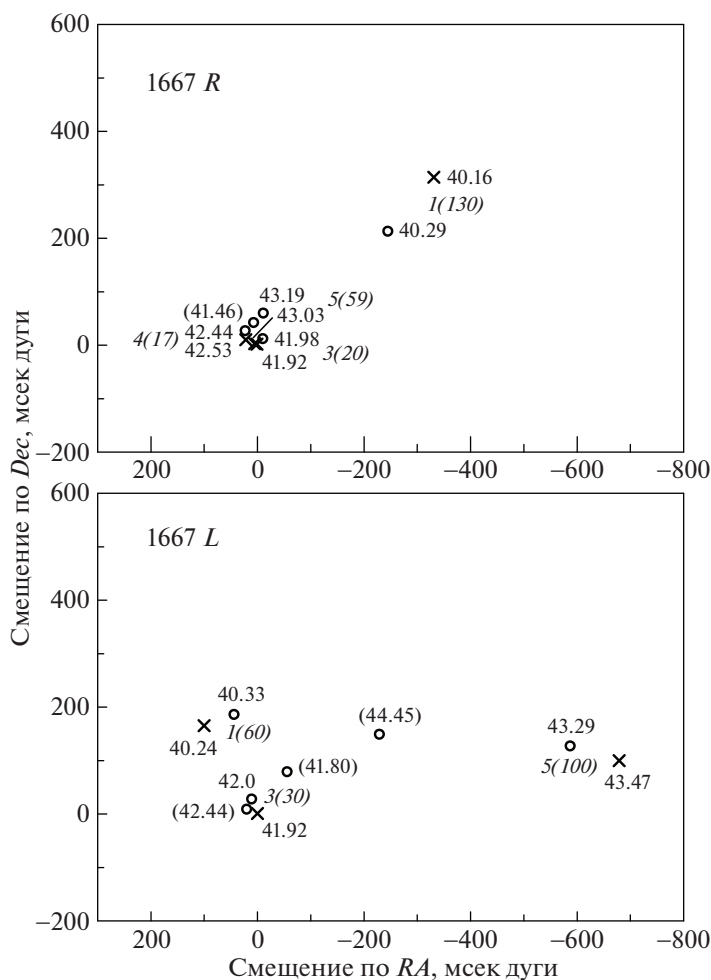


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для линии OH 1667 МГц.

Такое наше предположение подтверждается наличием тонкой структуры некоторых мазерных пятен в наблюдениях Фиш и др. [9]. В такой модели в разные эпохи обычно излучает наиболее активная часть волокна. При вспышках (повышении активности центральной звезды) будет происходить последовательное смещение активной области волокна. Это приводит к видимому смещению мазерного пятна, величина которого может превышать величину его допустимого собственного движения. Для подтверждения нашего предположения о существовании структур в виде волокон необходимы VLBA или VLA наблюдения хотя бы еще на одну эпоху.

Наибольшая активность мазера OH проявляется в западной части источника. Детали 3 правой и левой круговых поляризаций, а также детали 6, совпадают по координатам.

Согласно общепринятым в настоящее время критериям мазерные пятна, образующие зеemanовскую пару, должны находиться в области менее

10^{15} см. По этим критериям Фиш и др. [9] нашли 6 зеemanовских пар в линии 1665 МГц и одну в линии 1667 МГц. По данным наших наблюдений мы смогли отождествить две зеemanовские пары.

Согласно [9] деталь 39.28 км/с в линии 1665 МГц в левой круговой поляризации, плотность потока которой сильно возросла в период наших наблюдений, составляет зеemanовскую пару с деталью 40.92 км/с в правой круговой поляризации. Магнитное поле составляет 2.8 мГс и направлено к нам. В наших наблюдениях скорости этих деталей составляют 39.34 и 40.88 км/с соответственно. Зеemanовское расщепление равно 1.54 км/с, т.е. изменилось несущественно. Величину продольного магнитного поля можно оценить как 2.6 мГс.

Аналогичный анализ зеemanовской пары 6 показывает, что магнитное поле также не изменилось за 17 лет и составляет -0.6 мГс, т.е. поле направлено от нас.

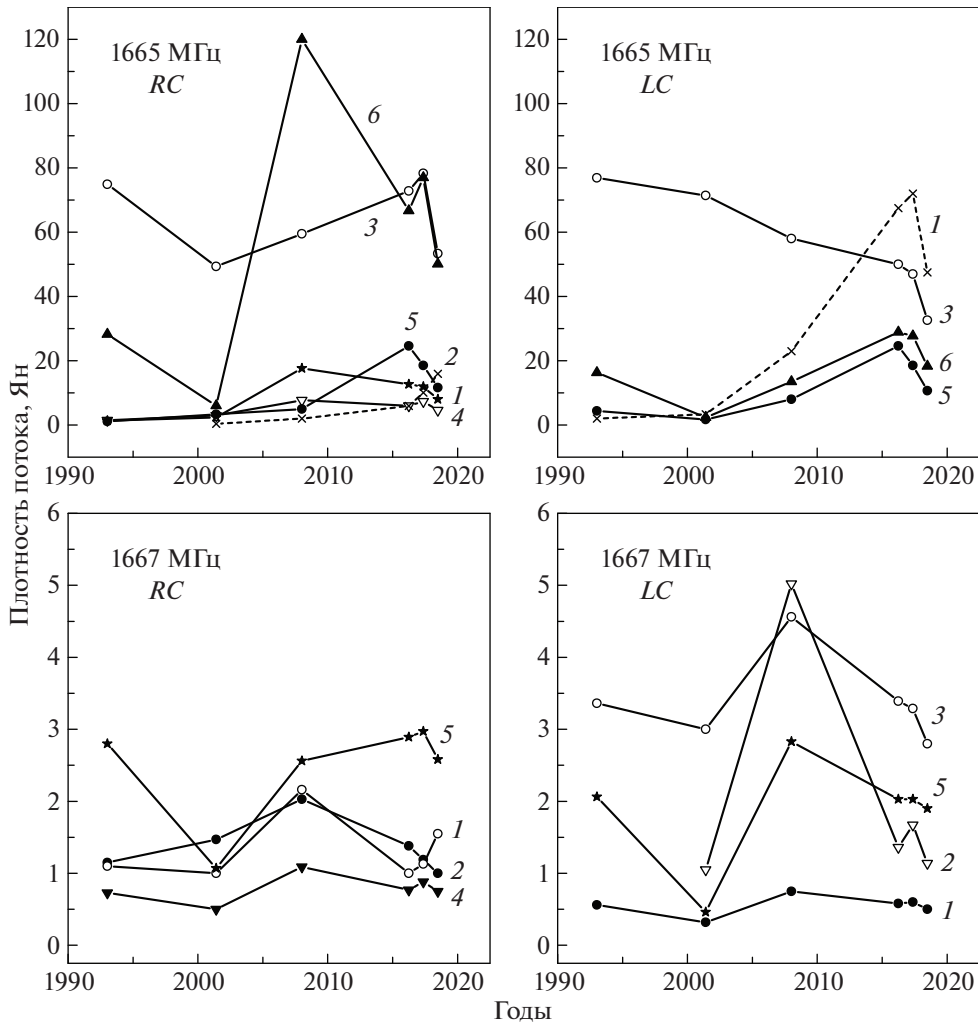


Рис. 4. Переменность плотности потока основных эмиссионных деталей мазера ОН в линиях 1665 и 1667 МГц в правой и левой круговых поляризациях. Номера эмиссионных деталей приведены согласно рис. 1.

4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Перечислим основные результаты, которые были получены в настоящей работе, где были использованы данные наших наблюдений в линии ОН на волне 18 см (мониторинга) на Большом радиотелескопе в Нансэ (Франция), а также результаты наблюдений в линиях ОН с высоким угловым разрешением, выполненными Аргон и др. [8] и Фиш и др. [9].

- Излучение в линии 1665 МГц существенно интенсивнее, чем в линии 1667 МГц.
- В спутниковых линиях 1612 и 1667 МГц излучение не обнаружено.
- Обнаружена сильная переменность излучения в обеих главных линиях.

- Идентифицированы основные спектральные детали с мазерными пятнами на картах, полученных с высоким угловым разрешением.
- Установлено, что лучевые скорости большинства эмиссионных деталей сохранялись или менялись незначительно на протяжении не только нашего мониторинга, но и с 1991 г.
- На основании характера переменности излучения основных деталей и данных, полученных из VLBI наблюдений, сделано предположение, что области мазерного излучения могут иметь конфигурации, например, в виде вытянутых неоднородных структур с малым градиентом лучевой скорости (аналог структуры мазера водяного пара в виде волокон, но большего масштаба).

- Для двух зеэмановских пар определено значение продольного магнитного поля (0.6 мГс), которое практически сохранялось как минимум 17 лет.

Представляет интерес проведение однородных с точки зрения углового разрешения наблюдений в линиях гидроксила для нескольких эпох, чего практически не проводилось для G43.8–0.1. Это позволило бы выявить наличие/отсутствие собственного движения мазерных пятен и уточнить их структуру.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. H. Knowles, J. L. Caswell and W. M. Goss, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **175**, 537 (1976).
2. N. J. Evans, S. Beckwith, R. L. Brown, and W. Gilmore, *Astrophys. J.* **227**, 450 (1979).
3. H. E. Matthews, P. A. Shaver, W. M. Goss, and H. J. Habing, *Astron. and Astrophys.* **63**, 307 (1978).
4. R. Genzel and D. Downes, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **30**, 145 (1977).
5. D. Downes, R. Genzel, J. M. Moran, K. J. Jonston, L. I. Manveyenko, L. R. Kogan, V. I. Kostenko, and B. Rönnäng, *Astron. and Astrophys.* **79**, 233 (1979).
6. A. P. Sarma, T. H. Troland, R. M. Crutcher, 1 and D. A. Roberts, *Astrophys. J.* **580**, 928 (2002).
7. Y. W. Wu, M. Sato, M. J. Reid, L. Moscadelli, et al., *Astron. and Astrophys.* **566**, id. A17 (2014).
8. A. L. Argon, M. J. Reid, and K. M. Menten, *Astrophys. J. Suppl.* **129**, 227 (2000).
9. V. L. Fish, M. J. Reid, A. L. Argon, and X-W. Zheng, *Astrophys. J. Suppl.* **160**, 220 (2005).
10. Е. Е. Лехт, В. И. Слыш, В. В. Краснов, *Астрон. журн.* **84**, 1070 (2007).