

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕННОСТИ ПАРАМЕТРОВ СТОКСА И МАГНИТНОГО ПОЛЯ В G43.8–0.1 В ЛИНИИ ОН 1665 МГц

© 2023 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 Пушчинская радиоастрономическая обсерватория,

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

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

Поступила в редакцию 07.10.2022 г.

После доработки 11.11.2022 г.

Принята к публикации 08.12.2022 г.

Представлены результаты исследования переменности мазерного излучения в линии ОН 1665 МГц в области звездообразования G43.8–0.1 из наблюдений (мониторинга) в 2008–2022 гг. на Большом радиотелескопе в Нансэ (Франция). Обнаружена переменность всех параметров поляризации большинства спектральных деталей, которая носит монотонный регулярный характер. Проведено пространственное отождествление основных спектральных деталей ОН в линии 1665 МГц с мазерными пятнами (конденсациями) на VLA карте. Для Зеемановской пары на $V_{LSR} = 44.15$ км/с обнаружено монотонное изменение расщепления со временем в течение 2008–2022 гг. и, следовательно, изменение величины продольного магнитного поля H_{\parallel} . По нашим расчетам в эпоху конца 2012 г. произошло изменение направления магнитного поля на противоположное. Коррелированно с H_{\parallel} происходили изменения угла χ и, как следствие, изменения направления вектора поперечного магнитного поля H_{\perp} . Для мазерной детали 44.5 км/с обнаружено изменение H_{\perp} на 180° . В период 2016–2022 гг. произошла некоторая переориентация глобального магнитного поля (H_{\perp}) в G43.8–0.1. Поле стало менее хаотичным: в восточной части поле в мазерных конденсациях перпендикулярно дуге, а в западной части параллельно дуге. Предполагается, что глобальное магнитное поле во всей области U H II источника G43.8–0.1 имеет одно направление: вдоль оси (северо-восток) – (юго-запад).

Ключевые слова: звездообразование, мазеры ОН, поляризация, магнитное поле, индивидуальные объекты (G43.8–0.1)

DOI: 10.31857/S0004629923020019, EDN: CIZGVW

1. ВВЕДЕНИЕ

Источник мазерного излучения G43.8–0.1 находится в области активного звездообразования. В направлении на G43.8–0.1 сначала было обнаружено мазерное излучение в главных линиях ОН на волне 18 см (Кноулес и др. [1], Эванс и др. [2], Мэтьюз и др. [3]), а затем в линии H_2O на волне 1.35 см в 1976 г. (Генцел и Даунс [4]). Ввиду этого данный источник чаще всего называют ОН G43.8–0.1.

Все обнаруженные в этом источнике мазеры (ОН, H_2O и CH_3OH) связаны со сверхкомпактной областью H II (Куртс и др. [5], Аргон и др. [6]) и инфракрасным источником IRAS 19095+0930.

Наблюдения G43.8–0.1 в главных линиях гидроксидов на 18 см с угловым разрешением $1''$ были

выполнены в 1993 г. на VLA в НРАО [6]. Было определено абсолютное положение мазерных деталей. В 2001 г. на основе наблюдений на глобальной системе VLBA с угловым разрешением $17 \times 15 \text{ mas}^1$ Фиш и др. [7] построили более подробную карту расположения мазерных пятен. В линии 1665 МГц они зарегистрировали излучение от 45 эмиссионных деталей (мазерных пятен).

Фиш и др. [8] обратили внимание на то, что есть разворот дуги на севере области, вдоль которой расположены мазерные конденсации ОН, но нет разворота поперечного магнитного поля.

VLBI наблюдения в линии H_2O показали, что мазерные конденсации образуют организованную структуру. Так, например, VLBI-изображе-

¹ mas (milli arc second) – угловая миллисекунда дуги.

ние, полученное Даунсом и др. [9], показывает, что большинство деталей мазера H_2O расположены в дугообразной структуре с поперечным диаметром 200 mas. При расстоянии до G43.8–0.1, равном 2.8 кпк, это соответствует радиусу структуры около 10^{16} см.

Лучевые скорости самых сильных низкоскоростных деталей H_2O увеличиваются с востока на запад вдоль этой дуги. Высокоскоростные детали также встречаются в области 400 mas у открытого конца дуги. VLA-наблюдения Сарма и др. [10] показали, что имеются четыре мазерные детали, которые расположены в направлении восток–запад в пределах $0.3''$. Это является частью дуги, наблюдаемой Даунсом и др. [9] с VLBI.

Хонма и др. [11] по наблюдениям в пяти эпохах нашли расширение распределения мазерных пятен H_2O . Они пришли к заключению, что распределение мазерных пятен в G43.8–0.1 представлено не простой оболочкой, а может интерпретироваться как биполярная структура в направлении север–юг.

Уэй и др. [12] идентифицировали 12 различных пятен мазера водяного пара, распределенных в пределах $\approx 0.2''$. Согласно их исследованиям распределение и собственные движения этих мазерных пятен являются довольно случайными, и поэтому не могут моделироваться в виде молекулярного потока.

Мониторинг в линии 1.35 см показал, что в G43.8–0.1 более или менее регулярно происходили сильные вспышки мазерного излучения одиночных деталей с потоком более 4 кЯн (см., напр., [13–15]).

Исследования в линиях ОН позволяют получить параметры магнитного поля как поперечного, так и продольного. Как известно, на раннем этапе звездообразования магнитное поле играет большую роль. Поэтому изучение эволюции магнитного поля как глобального для данного источника, так и для каждой мазерной конденсации в отдельности представляет большой научный интерес. Результаты таких исследований были изложены, например, в работах Колом и др. [16], Ашимбаева и др. [17].

2. АППАРАТУРА И НАБЛЮДЕНИЯ

В настоящей работе проводятся исследования одного из многочисленных источников (связанных с областями активного звездообразования) нашего многолетнего мониторинга, проводимого в линиях 1.35 и 18 см.

Наблюдения в линиях ОН на 18 см в направлении источника G43.8–0.1 проводятся нами на Большом радиотелескопе в Нансэ (Франция) с 2006 г. Регулярные наблюдения (мониторинг)

проводятся с 2016 г. Чувствительность телескопа составила 1.4 К/Ян для точечного источника неполяризованного излучения. Ширина диаграммы направленности телескопа на данной волне равна $3.5' \times 19'$ по прямому восхождению и склонению соответственно.

Подробно методика наблюдений и регистрации сигнала излагались нами во всех работах, связанных с мониторингом источников на данном радиотелескопе (см., напр., [18]). Здесь мы приводим более краткое описание.

Анализ сигнала осуществлялся автокорреляционным спектроанализатором из 8192 каналов, разделенных на восемь батарей по 1024 канала в каждой из них. Приемная система радиотелескопа позволяет одновременно принимать излучение в двух круговых поляризациях (RC и LC) и двух ориентациях линейной поляризации ($L0$ и $L90$). После поворота облучателя на 45° осуществлялся прием излучения снова в круговых и в двух других направлениях линейной поляризации ($L45$ и $L135$). Таким образом, осуществлялась регистрация шести мод поляризации. Это позволило нам вычислить все параметры Стокса (I , Q , U и V), причем данные о круговых поляризациях являются избыточными.

В главных линиях ОН спектральное разрешение в 2008 г. составило 0.137 км/с, а с 2016 г. — 0.0686 км/с. Излучение в спутниковых линиях 1612 и 1720 МГц в наблюдениях 2008 г. мы не обнаружили. Величина среднеквадратичного уровня шумов (rms) при времени накопления сигнала 15 мин составила около 0.15 Ян. Кроме того, при корректировке нулевой линии спектра возможно некоторое увеличение верхней границы обнаружения слабого сигнала. Поскольку излучение ОН G43.8–0.1 в линии 1665 МГц достаточно сильное, величину rms оказалось возможным показать только на одном рисунке (см. ниже).

Как мы уже отмечали, из наблюдений мы получаем значения плотности потока $F(RC)$ и $F(LC)$ для круговой поляризации и $F(0^\circ)$, $F(45^\circ)$, $F(90^\circ)$ и $F(90^\circ)$ для линейной поляризации в четырех направлениях. Параметры Стокса вычисляются по формулам:

$$I = F(0^\circ) + F(90^\circ) = F(RC) + F(LC), \quad (1)$$

$$Q = F(0^\circ) - F(90^\circ), \quad (2)$$

$$U = F(45^\circ) - F(135^\circ), \quad (3)$$

$$V = F(RC) - F(LC). \quad (4)$$

Степень поляризации m_L и позиционный угол χ для линейной поляризации, степень круговой по-

ляризации m_C и степень полной поляризации p вычислялись по формулам:

$$m_L = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}, \quad (5)$$

$$\chi = 0.5 \arctg(U/Q), \quad (6)$$

$$m_C = V/I. \quad (7)$$

$$p = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I} = \sqrt{m_C^2 + m_L^2}. \quad (8)$$

Также отметим, что в линии ОН 1665 МГц при величине продольного магнитного поля 1 мГс расстояние между σ компонентами зеемановского расщепления $-\sigma$ и $+\sigma$ составляет 0.590 км/с (см., напр., [19]).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Основная цель работы – определение основных параметров поляризации (степень поляризации и позиционный угол для линейной поляризации) для наиболее интенсивных спектральных деталей источника G43.8–0.1 и исследование их переменности. Подробный анализ данных нашего мониторинга мы выполняли с 2016 г., когда регулярно проводились наблюдения этого источника.

Спектры мазерного излучения в главной линии ОН 1665 МГц показаны на рис. 1 и 2. Указаны эпохи наблюдений. Слева даны наложения спектров линейной поляризованного излучения для четырех направлений поляризации: $\chi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ и 135° . Спектры нанесены линиями одной толщины, т.к. смысл наложения спектров – показать пределы изменения интенсивности каждой детали в зависимости от позиционного угла антенны. Все сильные детали пронумерованы. Номерами с индексом “*” обозначены двойные спектрально близкие детали. Справа даны спектры в круговых поляризациях: жирной линией для правой (RC) и пунктирной для левой (LC) круговых поляризаций соответственно. Для полноты анализа мы включили четыре спектра линейно поляризованного излучения (рис. 1б), которые были опубликованы нами ранее [17].

Наиболее интенсивное излучение (более 2 Ян) находится в интервале лучевых скоростей 38–47 км/с, а полный интервал зарегистрированного нами излучения составляет 28–50 км/с. В самих спектрах выделяются три области с сильным мазерным излучением: 39.0–40.0, 41.2–42.2 и 43.5–44.7 км/с. Такая структура спектра сохраняется на протяжении многих лет.

Первые две области объединяет то, что основная деталь является суперпозицией двух спектрально близких компонентов. При наблюдениях на разных позиционных углах антенны мы на-

блюдаем как изменение амплитуды принятого излучения, так и смещение в спектре максимума излучения по лучевой скорости (см. рис. 3). Наблюдаемая картина немного усложняется тем, что линейно поляризованное излучение компонентов имеет разные позиционные углы χ . В третьей области основная деталь скорее всего является одиночной, но наблюдается несовпадение максимумов излучения в круговых поляризациях, что является следствием расщепления линии в продольном магнитном поле.

4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Проведем более глубокий анализ излучения основных деталей. Но прежде всего обратим внимание на следующее обстоятельство. Для одиночной линейно поляризованной детали при разных направлениях плоскости поляризации антенны будет меняться только амплитуда излучения. Положение в спектре самой детали, т.е. ее лучевая скорость, меняться не будет (см., например, [16]). В случае двойной детали при равных значениях угла χ и степени линейной поляризации m_L положение максимума излучения также не будет меняться.

4.1. Параметры мазерного излучения ОН отдельных деталей

Параметры эмиссионных деталей в линии 1665 МГц на эпохи 27 марта 2016 г. и 16 марта 2022 г., вычисленные по формулам раздела 2, приведены в табл. 1 и 2 соответственно. Номера деталей (столбец 1) соответствуют номерам на рис. 1 и 2. В столбце 2 слева приведены лучевые скорости, полученные в нашем мониторинге, а справа взяты из работы [6], поскольку отождествление мы проводили в основном по картам этой работы. Детали 10 и 11 были отождествлены по картам Фиша и др. [12]. В столбце 3 приведена плотность потока полного излучения, т.е. параметр Стокса I . В столбцах 4–7 приведены степени круговой (m_C) и линейной (m_L) поляризации, позиционный угол линейной поляризации χ и степень полной поляризации p соответственно.

Ниже подробно рассмотрена структура основных спектральных деталей ОН в линии 1665 МГц.

Деталь 1 (39.4 км/с). Излучение детали сильно поляризовано по кругу. Степень линейной поляризации небольшая (см. рис. 3). Деталь является двойной. Это отчетливо проявляется в правой круговой поляризации. В левой поляризации оба компонента имеют одинаковые потоки. Поэтому при небольшой разнице лучевых скоростей суммарный спектр имеет один максимум. Мы вписали в этот спектр две гауссианы, имеющие лучевые скорости 39.27 и 39.44 км/с. Наблюдается смеще-

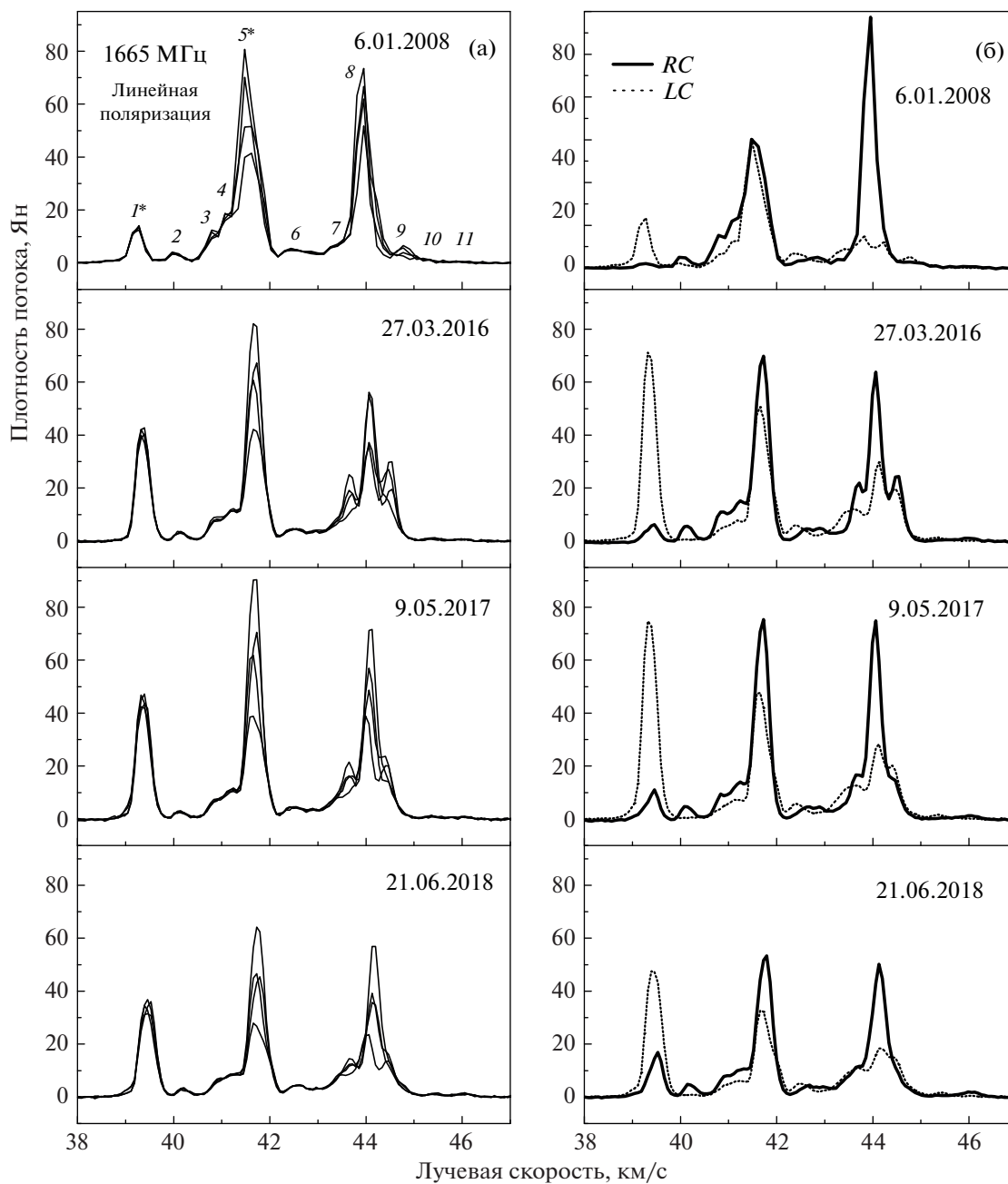


Рис. 1. Спектры мазерного излучения ОН в главной линии 1665 МГц в направлении G43.8–0.1. Слева дано наложение спектров в четырех направлениях линейной поляризации, а справа спектры в правой (жирная линия) и левой (пунктирная линия) круговых поляризациях для наблюдений в 2008, 2016, 2017 и 2018 гг. Детали пронумерованы. Номерами со звездочками обозначены двойные детали.

ние максимума линейно поляризованного излучения по лучевой скорости при изменении положения позиционного угла антенны. Это может происходить при разных значениях угла χ и/или m_L у компонентов двойной структуры наблюдаемой линии. Оценить степень линейной поляризации с достаточной точностью не представляется возможным. Мы вычислили этот параметр для совокупного излучения двойной детали.

Деталь 5 (41.7 км/с). На рис. 4 показано излучение, полученное 8 октября 2021 г. в обеих круговых поляризациях и четырех направлениях линейной поляризации, а также полное излучение (параметр Стокса I). Вертикальными стрелками и пунктирными линиями показаны положения двух выделенных компонентов: 41.62 и 41.75 км/с. Наблюдается смещение максимума линии при изменении положения плоскости линейной по-

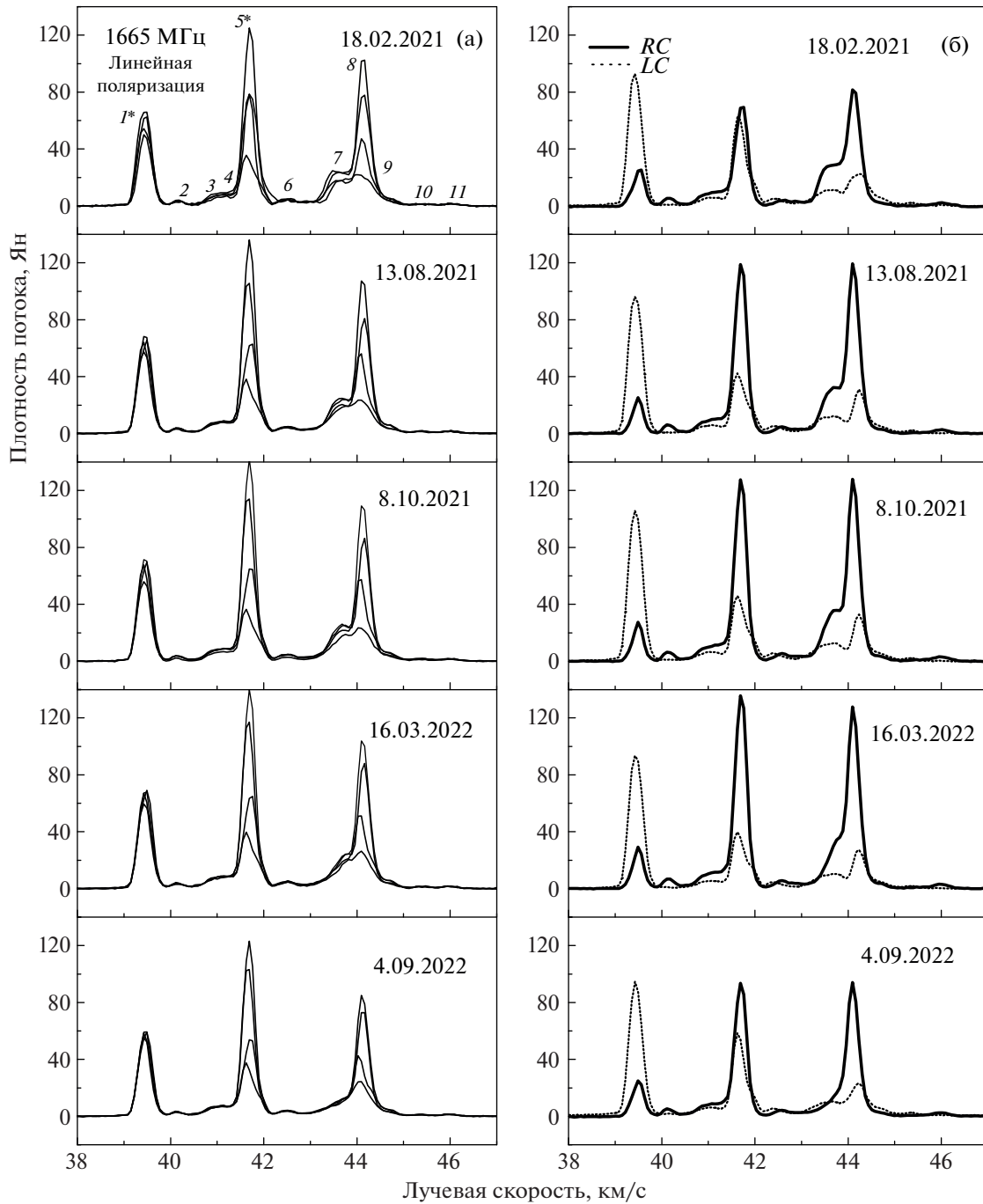


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но для наблюдений в 2021–2022 гг.

ляризации антенны. Вычисления показали, что линейно поляризованное излучение компонентов имеет близкие значения угла χ . Вероятнее всего, в данном случае смещение максимума излучения связано с разной степенью линейной поляризации m_L компонентов 41.62 и 41.75 км/с.

Деталь 6 (42.5 км/с). Фрагмент спектра в эпоху 13 августа 2021 г. показан на рис. 5. Справа внизу нанесена среднеквадратичная ошибка rms из-за

шумов системы, о которой упоминалось выше (раздел 2). Деталь расщепляется в магнитном поле на два компонента. На скоростях 42.4 и 42.6 км/с наблюдаются $-\sigma$ и $+\sigma$ компоненты соответственно. Первый имеет левую круговую поляризацию, а второй правую. Величина расщепления составляет $V(RC) - V(LC) = 0.2$ км/с, что соответствует величине продольного магнитного поля 0.34 мГс, направленного от наблюдателя. На скорости

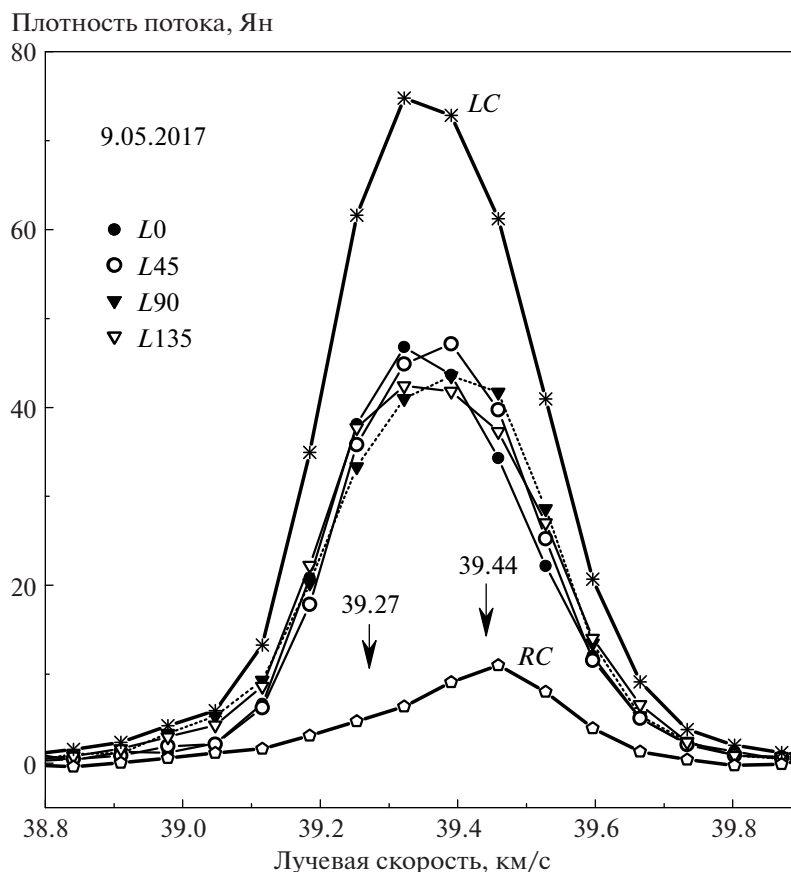


Рис. 3. Структура спектра 1665 МГц в эпоху 9 мая 2017 г. в диапазоне лучевых скоростей 38.8–39.9 км/с. Нанесены все моды поляризации: две круговые и четыре линейные. Каждая мода обозначена своим символом. Вертикальными стрелками показаны положения выделенных компонентов и приведены их лучевые скорости.

42.5 км/с наблюдается нерасщепленный компонент π с небольшой степенью линейной поляризации. На 42.87 км/с имеется еще одна деталь. После разделения данного участка спектра на отдельные компоненты мы вычислили параметры поляризации m_c , m_L и χ для детали 42.5 для всех эпох наблюдений (см. табл. 1 и 2). Имеет место случай $0 < \Theta < \pi/2$, где Θ – угол между лучом зрения и направлением магнитного поля в пространстве.

Деталь 8 (44.1 км/с). Скорее всего деталь является одиночной. Фрагмент спектра с этой деталью в эпоху 9 мая 2017 г. показан на рис. 6. В излучении в круговой поляризации наблюдается расщепление линии на $V(RC) - V(LC) = -0.06$ км/с. Это соответствует величине продольного магнитного поля -0.10 мГс, которое направлено к наблюдателю. Отметим, что точность определения лучевой скорости детали определялась по форме линии вблизи ее максимума. Для сигналов, существенно превышающих уровень шумового сигнала, она превышает величину спектрального разрешения. Вертикальной штриховой линией нане-

сено положение нерасщепленного компонента. Справа сверху в уменьшенном масштабе приведены линии только в круговых поляризациях. Отчетливо видно смещение одной линии относительно другой.

При изменении позиционного угла антенны наблюдается изменение величины плотности потока линейно поляризованного излучения этой детали, что естественно при наличии у нее линейно поляризованного излучения. Также имеет место смещение максимума излучения детали по лучевой скорости. Это, вероятно, связано с Зеемановским расщеплением линии. Максимальное значение скорости приходится на лучевую скорость, близкую к положению $+\sigma$ компонента (в нашем случае LC). При этом позиционный угол χ составляет 56° . Минимальное значение скорости находится близи лучевой скорости $-\sigma$ компонента (RC). При последующих наблюдениях эта картина повторялась. Здесь также имеется эллиптическая поляризация при $0 < \Theta < \pi/2$.

Рассмотрим более слабые эмиссионные детали, которые были отождествлены с мазерными

Таблица 1. Параметры излучения основных деталей в линии 1665 МГц в 2016 г.

1	2		3	4	5	6	7
№ детали	V_{LSR} , км/с		F , Ян	m_C	m_L	χ , °	p
1*	39.26	39.14	55.0	-0.86	0.04	0	0.86
	39.45	—	60.5	-0.84	0.04	65	0.84
2	40.13	40.16	6.4	0.84	0.16	45	0.86
3	40.70	40.88	16.2	0.34	0.12	70	0.36
4	41.22	41.30**	23.2	0.33	0.06	0	0.34
5*	41.62	41.52	47.1	0.12	0.33	45	0.35
	41.74	41.62	54.9	0.23	0.31	55	0.39
6	42.54	42.48	8.9	0.14	0.06	-10	0.39
7	43.70	43.29	33.4	0.28	0.37	0	0.46
8	44.09	44.14	93.0	0.37	0.28	66	0.46
9	44.50	44.74	44.3	0.10	0.35	-30	0.36
10	45.40	45.38	1.7	-0.48	0.18	20	0.51
11	46.00	46.04**	1.2	0.81	0.17	67	0.83

Примечание. В столбце 2 слева приведены лучевые скорости, полученные в нашем мониторинге, а справа взяты из работы [6]. * – у детали наблюдается двойная структура; ** – слабость детали не позволяет надежно определить ее расщепление.

Таблица 2. Параметры излучения основных деталей в линии 1665 МГц в эпоху 27 марта 2022 г.

1	2		3	4	5	6	7
№ детали	V_{LSR} , км/с		F , Ян	m_C	m_L	χ , °	p
1*	39.27	39.14	85.6	-0.67	0.11	20	0.68
	39.44	—	102	-0.36	0.11	73	0.38
2	40.13	40.16	7.4	0.90	0.18	44	0.92
3	40.70	40.88	12.7	0.28	0.18	45	0.33
4	41.23	41.30**	18.9	0.24	0.08	41	0.25
5*	41.62	41.52	115	0.36	0.59	27	0.69
	41.78	41.62	125	0.58	0.71	32	0.92
6	42.50	42.48	9.0	0.11	0.15	22	0.19
7	43.70	43.29	43.5	0.55	0.14	63	0.57
8	44.15	44.14	153	0.65	0.64	59	0.91
9	44.50	44.74	11.0	-0.18	0.33	19	0.38
10	45.40	45.38	2.8	-0.63	0.15	10	0.65
11	46.00	46.04**	3.4	0.79	0.12	50	0.80

Примечание. Обозначения те же, что в табл. 1.

конденсациями на картах [6, 7]. Они не сильно блендированы соседними деталями и поэтому есть возможность провести полный анализ их излучения.

Деталь 41.22 км/с. В спектрах всех эпох четко прослеживается, что максимумы правой и левой круговых поляризаций разнесены на ~ 0.06 км/с. Такому расщеплению линии соответствует продольное магнитное поле ~ 0.10 мГс, направленное от наблюдателя (см. пояснение к детали 44.1 км/с).

Также присутствует π компонент с небольшой степенью линейной поляризации ($m_L = 0.06$). Блендирование этой линии крылом более сильной линии на 41.7 км/с не позволяет определить расщепление с точностью возможной переменности этого параметра.

Детали на 45.5 и 46.0 км/с. Излучение на этих скоростях отождествляется с излучением деталей, наблюдаемых Фишем и др. [7]. На карте [6] их нет. Мы обнаружили монотонный рост излуче-

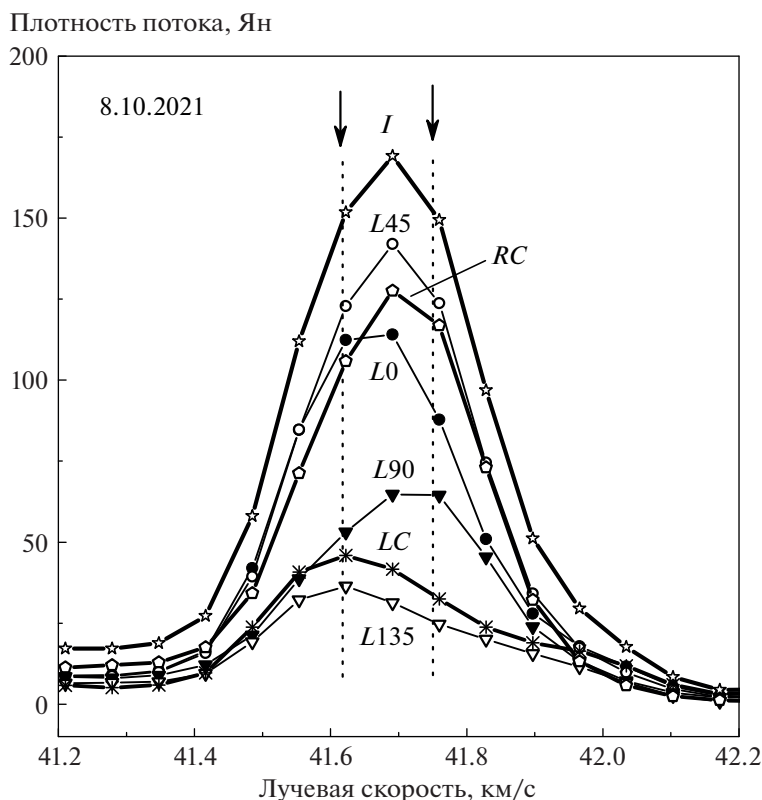


Рис. 4. То же, что на рис. 3, но для эпохи 8 октября 2021 г. и для диапазона лучевых скоростей 41.2–42.2 км/с. Вертикальными стрелками и пунктирными линиями показаны положения двух выделенных компонентов: 41.62 и 41.75 км/с.

ния этих деталей. Вероятно в эпоху наблюдений [6] в 1993 г. они были очень слабыми.

Кроме того, наблюдалась изолированная деталь на лучевой скорости 34 км/с. Она имеет высокую степень круговой поляризации и более низкую степень линейной поляризации: $I = 3.3$ Ян, $m_C = -0.7$, $m_L = 0.2$, $\chi = 35^\circ$. В таблицах наблюдений [6, 7] ее нет. Так как отождествлять ее не с чем, мы не включили данную деталь в наши табл. 1 и 2.

4.2. Переменность мазерного излучения

На рис. 7 показана переменность плотности потока (параметр Стокса I) основных деталей. Указаны лучевые скорости. Обращает на себя внимание то, что с 2021 г. по начало 2022 г. наблюдался период более высокой активности мазера ОН в целом, чем в другие эпохи. Сильных вспышек не происходило.

На рис. 8 показана переменность степени круговой (а) и линейной (б) поляризации. Нумерация на графике соответствует номерам деталей согласно рис. 1 и 2. Наблюдаются более или менее монотонные изменения данных параметров для большинства деталей.

Рассмотрим возможные варианты корреляции переменности параметров m_C и m_L .

1. Детали 1 и 2 имеют сильную круговую, но слабую линейную поляризацию. При этом степень поляризации мало меняется со временем.
2. У деталей 5 и 8 наблюдается одновременный рост m_C и m_L .
3. У детали 7 имеет место обратная зависимость между переменностью m_C и m_L . При росте первого параметра второй уменьшается.
4. Слабо меняются оба параметра деталей 3 и 4, всего лишь в пределах 0.1.
5. При значительном монотонном уменьшении m_C у детали 9 происходят нерегулярные вариации m_L .

На рис. 9 показана переменность позиционного угла линейной поляризации самых сильных эмиссионных деталей. Приведены лучевые скорости деталей. Некоторые графики аппроксимированы прямыми линиями, что показывает тенденции долговременного и существенного изменения позиционного угла соответствующих

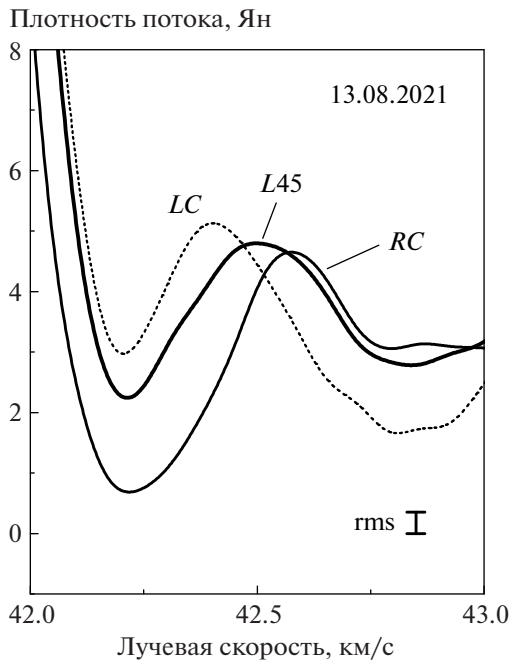


Рис. 5. Фрагмент спектра 1665 МГц с деталью 42.5 км/с на эпоху 13 августа 2021 г. Нанесены обе моды круговой поляризации и мода $L45$ линейной поляризации. Внизу справа нанесена величина среднеквадратичной ошибки.

деталей. На панели (в) внизу слева для детали — 44.5 км/с указано значение $\chi = -163^\circ$ для эпохи 2008 г.

Хаотических вариаций позиционного угла не наблюдается. Переменность χ имеет, в основном, регулярный характер и, как правило, в небольших пределах. Наибольшие изменения угла χ происходили у детали 7 на 43.7 км/с от 0° до 65° .

Значительные монотонные изменения угла χ в период 2008–2022 гг. происходили на лучевой скорости 44.5 км/с, от -163° до $+22^\circ$ с выходом на горизонтальное плато с середины 2021 г. (см. рис. 9в). Это соответствует изменению вектора поперечного магнитного поля на $\approx 180^\circ$. Для удобства введем для такого поля обозначение H_\perp , а для продольного магнитного поля H_\parallel .

Мы обнаружили, что величина зеемановского расщепления детали 44.15 км/с меняется со временем от 0.11 до -0.13 км/с (см. рис. 10а). При этом величина продольного магнитного поля меняется от 0.19 до -0.22 мГс. Смена направления магнитного поля H_\parallel может приходиться на конец 2012 г. (рис. 10б). Коррелированно с H_\parallel меняется угол χ линейной поляризации. Экстраполяция параметра круговой поляризации m_C на эпоху конец 2012 г. дает значение 0.25, а линейной поляризации m_L дает нулевое значение.

Для другой зеемановской пары (42.4 и 42.6 км/с) мы не обнаружили какого-то регулярного изменения расщепления. Наблюдались лишь хаотического характера вариации этого параметра в пределах 0.16–0.24 км/с, которое может быть связано

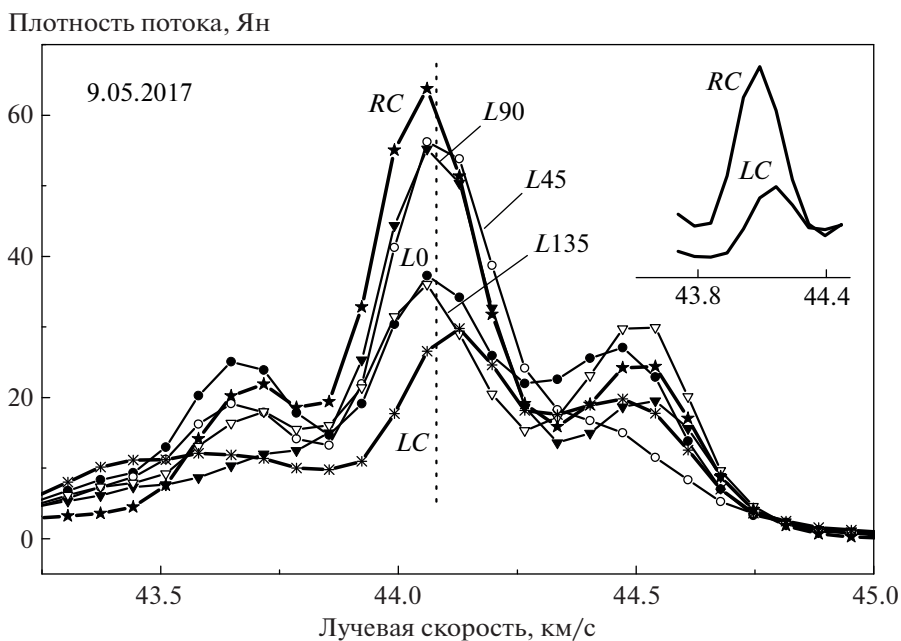


Рис. 6. То же, что на рис. 3, но для эпохи 9 мая 2017 г. и для диапазона лучевых скоростей 43.25–45.0 км/с. Справаверху в уменьшенном масштабе приведены линии в круговых поляризациях.

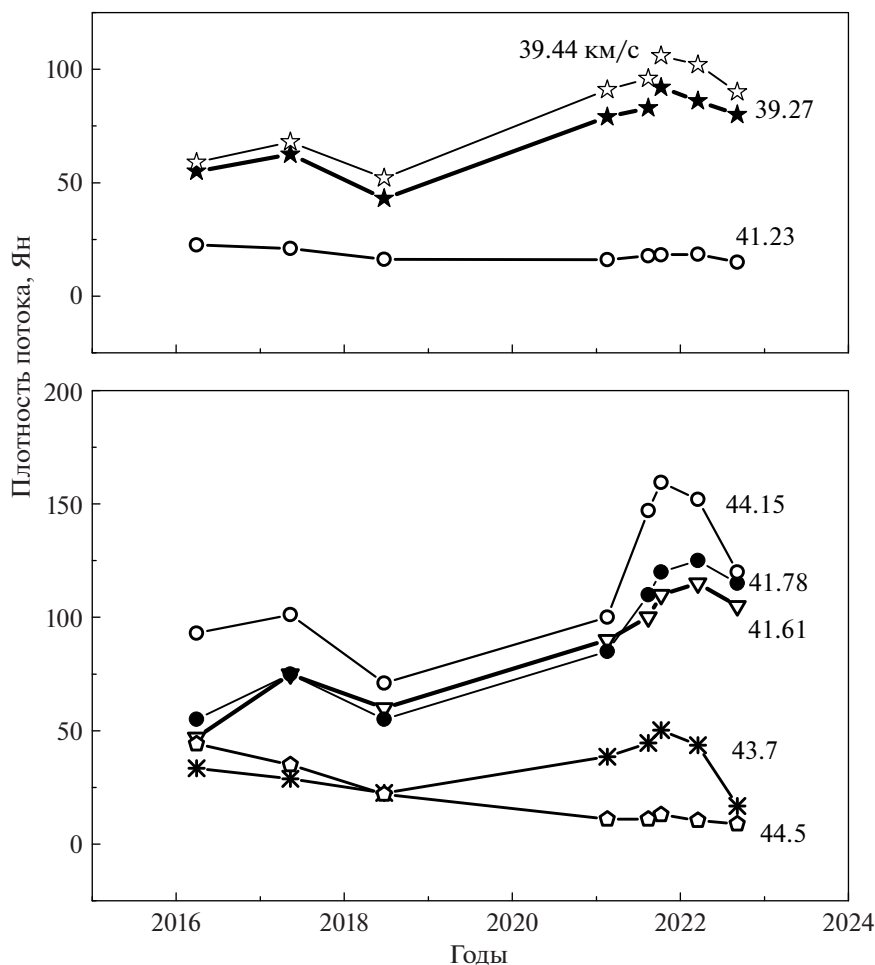


Рис. 7. Переменность плотности потока основных деталей. Указаны их лучевые скорости.

с влиянием излучения от крыльев соседних линий.

Таким образом, для двух мазерных деталей наблюдалось изменение направления магнитного поля на противоположное: для детали 44.15 км/с продольного поля (H_{\parallel}), а для детали 44.5 км/с – поперечного поля (H_{\perp}).

4.3. Пространственное отождествление мазерных деталей

Для пространственного отождествления мы использовали, в основном, VLA-данные [6], поскольку VLBA-данные [7] содержат избыточную для нас информацию при высоком угловом разрешении. Для отождествления некоторых слабых деталей мы также пользовались данными [7]. При отождествлении мы взяли три критерия: близкие лучевые скорости деталей, относительно близкие значения плотности потока и преобладание одного и того же типа круговой поляризации.

Распределение мазерных пятен на картах [6, 7] имеет хорошее подобие, несмотря на разницу между эпохами наблюдений в 8 лет. Ранее проведенный нами анализ показал, что основные эмиссионные детали в спектрах сохранялись на протяжении более 20 лет [20]. Как мы уже отмечали, достаточно стабильными являются их лучевые скорости. Это дает нам основания проводить отождествление с данными [6, 7].

На рис. 11 показаны карты расположения мазерных пятен (конденсаций) в линии 1665 МГц. На карту нанесены все мазерные пятна, полученные Аргон и др. [6] в линии 1665 МГц в правой (кружки) и левой (многоугольники) круговых поляризациях в эпоху 12 января 1993 г. Курсивом указаны их лучевые скорости. Абсолютные координаты центра карты составляют: $\alpha_{2000} = 19^{\text{h}}11^{\text{m}}54.01^{\text{s}}$, $\delta_{2000} = 9^{\circ}35'50''$. Большой крестик показывает положение центра источника радиоcontinuum. Детали, взятые из работы [7], снабжены индексом (**).

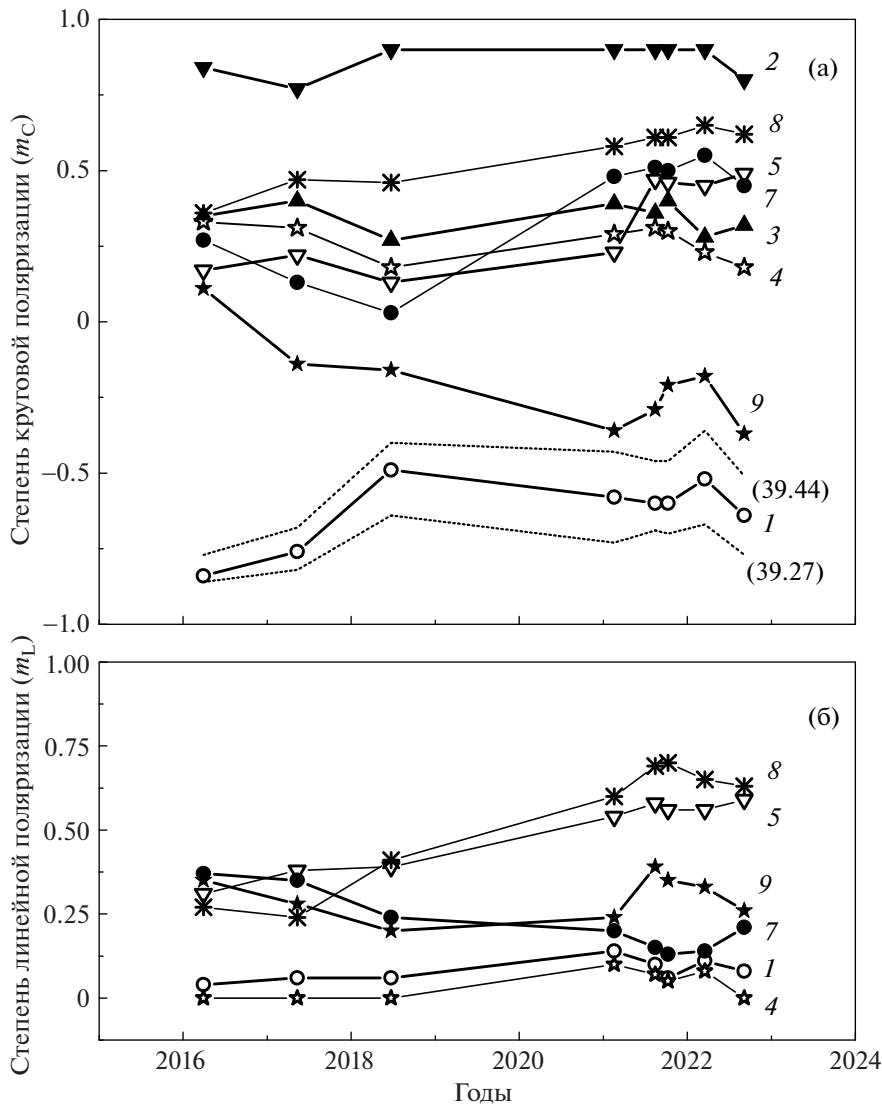


Рис. 8. Переменность степени круговой (а) и линейной (б) поляризации основных деталей. Указаны номера деталей согласно рис. 1 и 2. Для детали 1 на рис. (а) также нанесены данные для компонентов 39.27 и 39.44 км/с (пунктирные линии).

Жирным шрифтом на рис. 11 указаны лучевые скорости, полученные в настоящей работе. Черточками показаны векторы направления поперечного магнитного поля H_{\perp} в отдельных мазерных деталях, полученные в настоящей работе. Напомним, что по определению вектор H_{\perp} перпендикулярен направлению плоскости линейной поляризации, т.е. углу χ . Данные нашего мониторинга представлены для двух эпох: (а) – 27 марта 2016 г. и (б) – 16 марта 2022 г.

Мазерные конденсации расположены приблизительно вдоль дуги, напоминающей подкову, но на севере имеется резкий разворот дуги. Видно, что в 2016–2022 гг. произошли существенные изменения направления магнитного поля в

отдельных мазерных деталях. Если оценить в целом, то можно сказать, что произошла некоторая переориентация мелкомасштабной структуры глобального магнитного поля (компонент H_{\perp}). Оно стало менее хаотичным: в восточной части поле в мазерных конденсациях перпендикулярно дуге, а в западной части параллельно дуге. Таким образом, общая структура глобального магнитного поля мало изменилась. На основании этого можно предположить, что глобальное магнитное поле во всей области U Н II источника G43.8–0.1 имеет одно направление: вдоль оси (северо-восток) – (юго-запад).

Несмотря на хорошее подобие карт 1993 и 2001 гг., все-таки расстояние между некоторыми

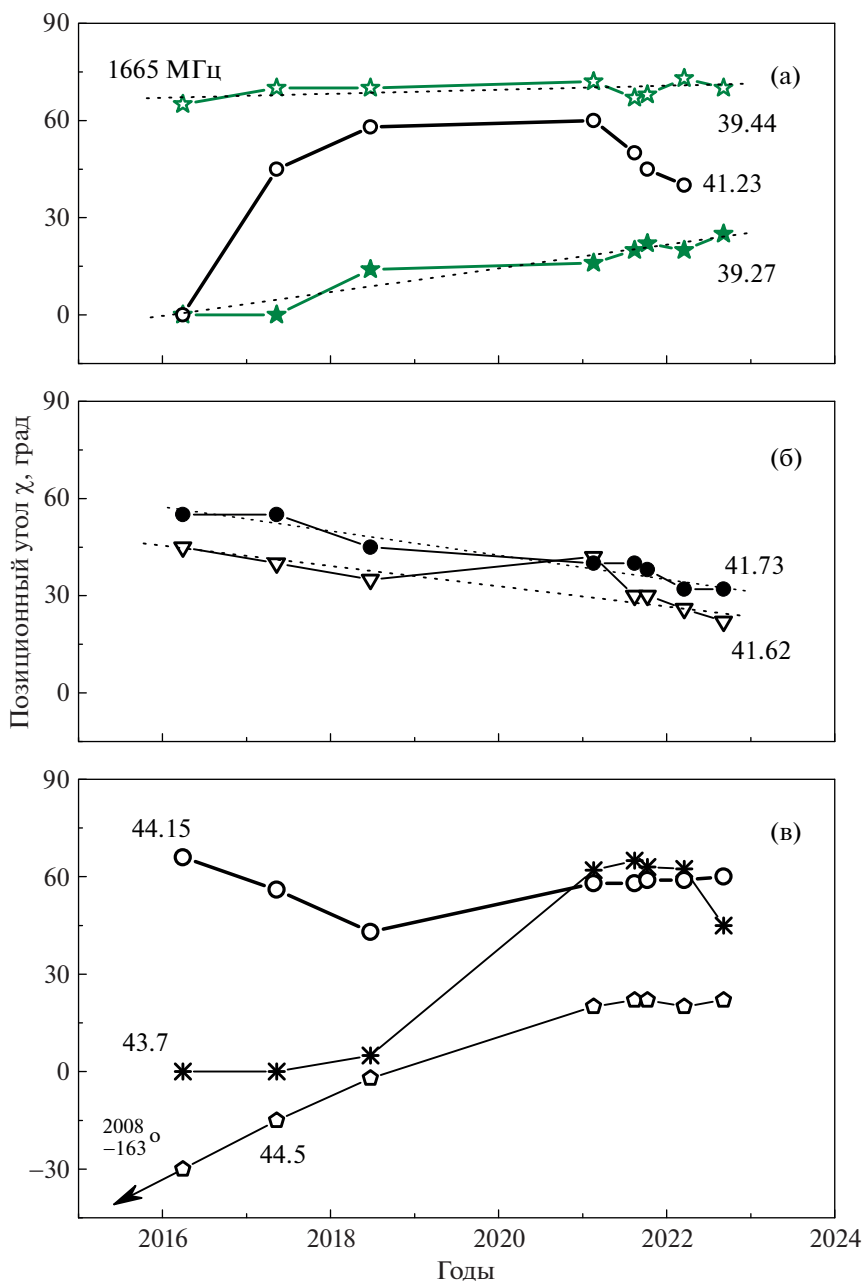


Рис. 9. Переменность позиционного угла χ линейной поляризации основных деталей. Указаны лучевые скорости деталей. Некоторые кривые аппроксимированы отрезками прямых линий. На панели (в) внизу слева для детали -44.5 км/с стрелкой указано направление на значение $\chi = -163^\circ$ для эпохи 2008 г. Пунктирные линии для некоторых деталей показывают аппроксимацию изменений позиционного угла χ линейными зависимостями.

одноименными мазерными пятнами двух эпох превышает допустимые значения собственных движений. Малые изменения лучевых скоростей деталей и долгое время их существования могут указывать на существование, например, вытянутых неоднородных структур с малым градиентом лучевой скорости. Это может быть аналогом структуры мазера водяного пара в виде волокон (или многозвенных цепочек), но большего мас-

штаба (см., напр., [21, 22]). Это также подтверждается существованием тонкой структуры некоторых мазерных пятен в наблюдениях Фиша и др. [7].

В разные эпохи максимум излучения может приходиться на разные участки таких структур. Волокно может находиться в неоднородном магнитном поле. Таким образом, при смещении активной зоны излучения ОН вдоль волокна будет наблюдаться изменение магнитного поля.

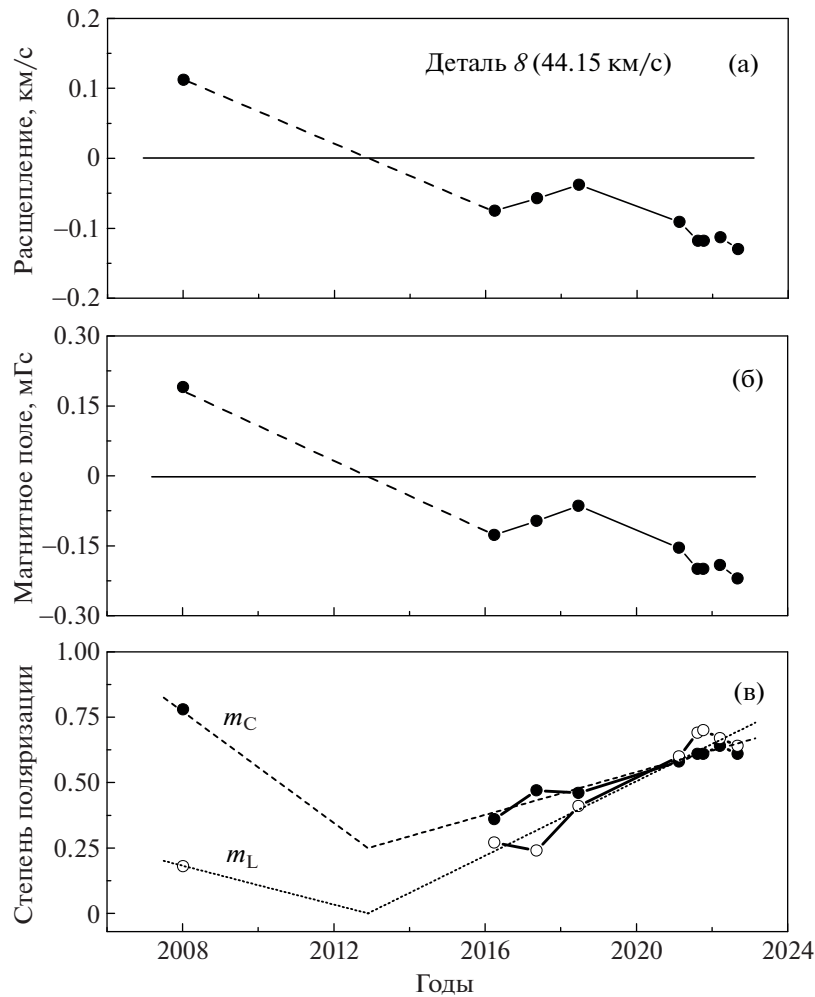


Рис. 10. Переменность основных параметров излучения зеемановской пары ($V_{\text{LSR}} = 41.15$ км/с) в линии 1665 МГц (см. текст).

5. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

За период мониторинга мазерного излучения ОН в главной линии 1665 МГц на радиотелескопе в Нансэ (Франция) в период 2008–2022 гг. в направлении источника G43.8–0.1 обнаружена переменность всех параметров поляризации большинства спектральных деталей. Перечислим наиболее важные результаты.

- Проведено пространственное отождествление основных спектральных деталей ОН в линии 1665 МГц с мазерными пятнами (конденсациями) на VLA карте.

- Обнаруженная переменность всех параметров поляризации носит, в основном, монотонный регулярный характер.

- Для зеемановской пары на $V_{\text{LSR}} = 44.15$ км/с обнаружено монотонное изменение расщепления со временем (2008–2022 гг.) и, следовательно, величины продольного магнитного поля H_{\parallel} .

По нашим расчетам в эпоху конца 2012 г. произошло изменение направления магнитного поля на противоположное. Коррелированно с H_{\parallel} происходили изменения угла χ и, следовательно, изменения направления вектора поперечного магнитного поля H_{\perp} .

- Для мазерной детали 44.5 км/с обнаружено изменение поперечного магнитного поля H_{\perp} на 180° за период 2008–2022 гг.

- Рассмотрена возможная причина наблюдаемой переменности магнитного поля в мазерных конденсациях.

- В период 2016–2022 гг. произошла некоторая переориентация глобального магнитного поля (компонент H_{\perp}) в G43.8–0.1. Поле стало менее хаотичным: в восточной части поле в мазерных конденсациях перпендикулярно дуге, а в западной части параллельно дуге. Предполагается, что глобальное магнитное поле во всей области U H II

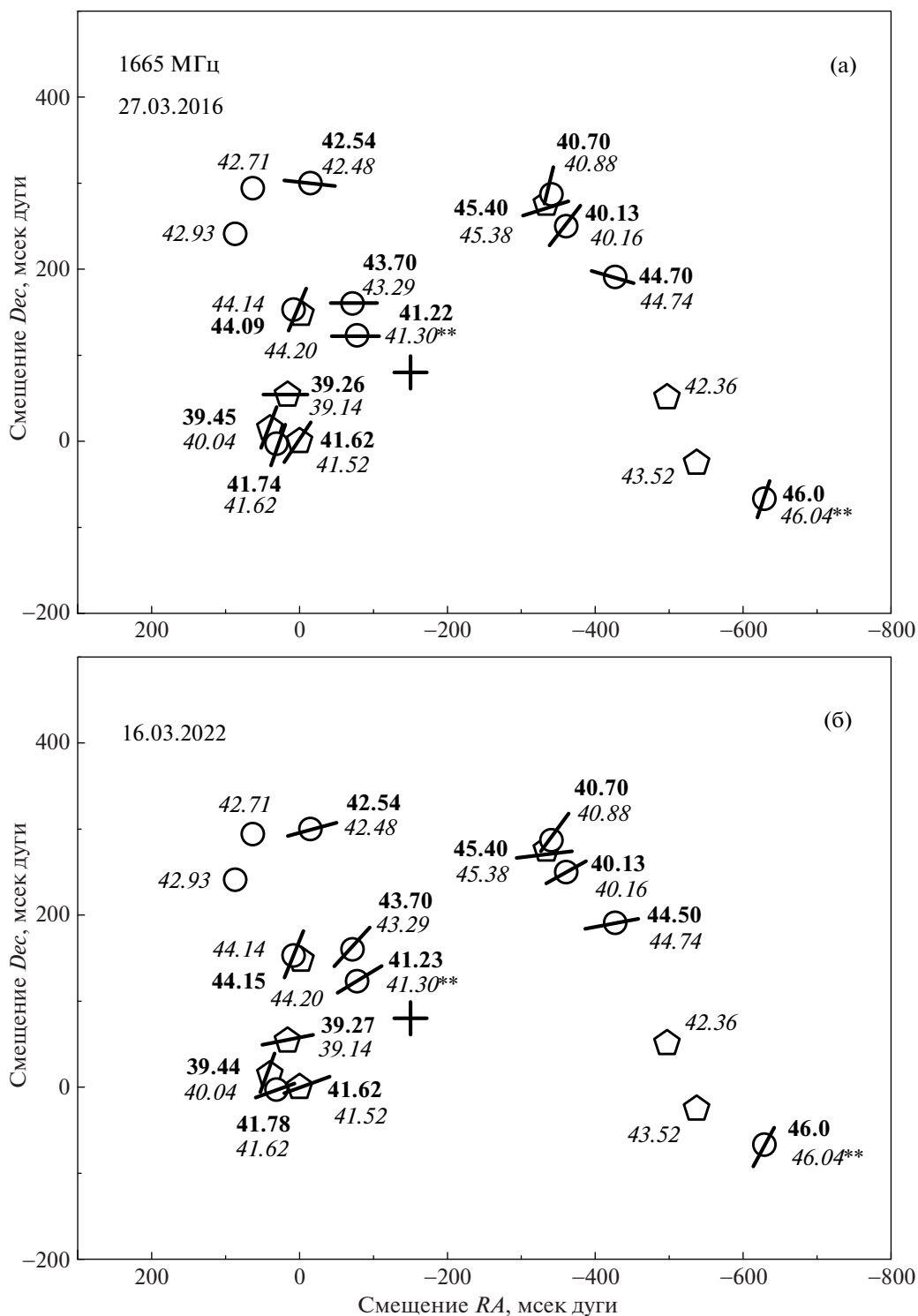


Рис. 11. Карта расположения мазерных пятен в области G43.8–0.1 в линии 1665 МГц для эпох 27 марта 2016 г. (а) и 16 марта 2022 г. (б). Большим крестиком показано положение центра источника континуума. Светлыми кружками и многоугольниками показаны положения мазерных пятен в правой и левой круговых поляризациях. Курсивом и жирным шрифтом указаны лучевые скорости из работы [6] и в настоящей работе соответственно. Черточками показаны векторы направления магнитного поля в отдельных мазерных деталях (настоящая работа).

источника G43.8–0.1 имеет одно направление: вдоль оси (северо-восток)–(юго-запад).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам Радиоастрономической обсерватории в Нансэ (Франция) за большую помощь в проведении наблюдений по программе многолетнего мониторинга источников мазерного излучения на Большом радиотелескопе в Нансэ.

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. *S. Kurtz, E. Churchwell, and D. O. S. Wood*, Astrophys. J. Suppl. **91**, 659 (1994).
6. *A. L. Argon, M. J. Reid, and K. M. Menten*, Astrophys. J. Suppl. **129**, 227 (2000).
7. *V. L. Fish, M. J. Reid, A. L. Argon, and X-Wu. Zheng*, Astrophys. J. Suppl. **160**, 220 (2005).
8. *V. L. Fish and M. J. Reid*, Astrophys. J. Suppl. **164**, 99 (2006).
9. *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).
10. *A. P. Sarma, T. H. Troland, R. M. Crutcher, and D. A. Roberts*, Astrophys. J. **580**, 928 (2002).
11. *M. Honma, T. Bushimata, Y. K. Choi, T. Fujii, et al.*, Publ. Astron. Soc. Japan **57**, 595 (2005).
12. *Y. W. Wu, M. Sato, M. J. Reid, L. Moscadelli, et al.*, Astron. and Astrophys. **566**, id. A17 (2014).
13. *E. E. Lехт*, Астрон. журн. **71**, 59 (1994).
14. *E. E. Lekht*, Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. **141**, 185 (2000).
15. *П. Колом, Н. Т. Ашимбаева, Е. Е. Лехт, М. И. Пащенко, Г. М. Рудницкий, В. В. Краснов, А. М. Толмачев*, Астрон. журн. **96** (10), 815 (2019).
16. *П. Колом, Н. Т. Ашимбаева, Е. Е. Лехт, М. И. Пащенко, Г. М. Рудницкий, А. М. Толмачев*, Астрон. журн. **98** (1), 50 (2021).
17. *Н. Т. Ашимбаева, Е. Е. Лехт, М. И. Пащенко, В. В. Краснов, А. М. Толмачев*, Астрон. журн. **99** (8), 628 (2022).
18. *В. И. Слыш, М. И. Пащенко, Г. М. Рудницкий, В. М. Витрищак, П. Колом*, Астрон. журн. **87** (7), 655 (2010).
19. *R. D. Davies*, in *Galactic Radio Astronomy*, Proc. IAU Symp. No. 60, Maroochydore, Queensland, Australia, 3–7 September, 1973, edited by F. J. Kerr, S. C. Simonson (Dordrecht-Holland, Boston: D. Reidel, 1974), p. 275.
20. *П. Колом, Н. Т. Ашимбаева, Е. Е. Лехт, М. И. Пащенко, Г. М. Рудницкий, А. М. Толмачев*, Астрон. журн. **96** (7), 563 (2019).
21. *P. Colom, N. T. Ashimbaeva, E. E. Lekht, M. I. Pashchenko, G. M. Rudnitskij, V. V. Krasnov, and A. M. Tolmachev*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **507**, 3285 (2021).
22. *J. M. Torrelles, N. A. Patel, G. Anglada, J. F. Gómez, et al.*, Astrophys. J. Letters **598**, L115 (2003).