# ЭВОЛЮЦИЯ МАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОН В ОБЛАСТИ АКТИВНОГО ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ W75 N. II. ИССЛЕДОВАНИЯ В ЛИНИЯХ 1667 И 1720 МГц

© 2022 г. Н. Т. Ашимбаева<sup>1</sup>, Е. Е. Лехт<sup>1, \*</sup>, М. И. Пащенко<sup>1</sup>, В. В. Краснов<sup>2</sup>, А. М. Толмачев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия
 <sup>2</sup> Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия
 <sup>3</sup> Пущинская радиоастрономическая обсерватория, Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Пущино, Россия

\*E-mail: lekht@sai.msu.ru
Поступила в редакцию 14.05.2022 г.
После доработки 11.07.2022 г.
Принята к публикации 18.07.2022 г.

Представлены результаты мониторинга мазерного источника ОН W75 N в главной 1667 МГц и сателлитной 1720 МГц линиях, выполненного в 2007—2020 гг. на радиотелескопе в Нансэ (Франция). Период 2007-2009 гг. характерен высокой активностью мазера в целом во всех линиях, кроме 1612 МГц, где излучение имеет тепловой характер. В процессе выполнения мониторинга обнаружены сильные временные вариации плотности потока и параметров поляризации для большинства спектральных деталей. Обнаружено, что степень круговой поляризаци  $(m_C)$ , а также степень  $(m_1)$  и поляризационный угол (у) линейной поляризации меняются со временем по определенным закономерностям, либо меняются очень мало. Имеется корреляция переменности этих параметров с переменностью плотности потока. При этом лучевые скорости деталей меняются очень слабо. Проведено отождествление спектральных деталей в обеих линиях (1667 и 1720 МГц) с мазерными пятнами на VLBA картах, полученных в апреле 2008 г. С мазерными пятнами, проецируемыми на VLA 1 (молекулярный поток), мы отождествили семь спектральных деталей в линии 1667 МГц и одинналцать в линии 1720 МГц. Они расположены в разных частях большой дуги и хорошо иллюстрируют тот факт, что ориентация вектора магнитного поля более или менее монотонно меняется вдоль дуги. С мазерными пятнами, проецируемыми на VLA 2 (кеплеровский диск), отождествлено семь спектральных деталей в линии 1667 МГц. Они образуют малую дугу, которая направлена от VLA 2. Векторы магнитного поля, связанные с мазерными пятнами, ориентированы перпендикулярно к этой дуге. После вспышек излучения на 0.38 и 1.2 км/с векторы магнитного поля этих деталей стали ориентированы вдоль дуги. Для трех зеемановских пар в линии 1667 МГц (VLA 2) определена величина продольного магнитного поля. Во всех случаях поле направлено к наблюдателю. У двух деталей (-4.9 и 1.2 км/с) обнаружено монотонное изменение позиционного угла на величину 140° и 110°, при этом скорость поворота плоскости поляризации составляет 5°/мес и 7°/мес соответственно. Обнаружено, что во время кратковременной вспышки детали 5.3 км/с в VLA 1 изменялись все параметры поляризации, а после вспышки все они восстановились.

**DOI:** 10.31857/S000462992209002X

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Галактический источник W75 N (G81.871+0.781) является областью активного звездообразования. Согласно последним исследованиям он находится на расстоянии 1.3 кпс от Солнца [1]. W75 N включает в себя сверхкомпактные области

HII VLA 1, VLA 2 и VLA 3 [2] вокруг массивных молодых звезд и мазерные источники гидроксила (ОН), воды ( $H_2O$ ) и метанола ( $CH_3OH$ ). Мазеры ОН и  $H_2O$  являются высоко переменными. Наблюдается сильное ИК-излучение [3]. Считается, что три источника континуума VLA находятся на разных стадиях эволюции.

Источник VLA 1 отождествляется с радиоджетом (молекулярным потоком) [2]. Он сильно вытянут в направлении с северо-востока на юго-запад на 2000 а. е. В нем имеются плотные сгустки вещества. Источник VLA 2 пространственно не разрешен ( $\leq 0.08''$ ). Он ассоциируется с протопланетным диском. Масса его центральной звезды составляет  $\approx 10~M_{\odot}$ , а радиус системы около 160 а.е. Наблюдается расширяющаяся околозвездная оболочка со сложной иерархической структурой (см., напр., [4, 5]).

Мазеры ОН в W75 N сосредоточены, в основном, в двух центрах активности, которые располагаются вблизи VLA 1 и VLA 2. На картах ОН, полученных с высоким угловым разрешением, мазерные конденсации образуют вытянутую дугу, охватывающую источник континуума VLA 1. В качестве модели принимается тонкий вращающийся околозвездный диск, в котором сосредоточены мазерные конденсации. Следует отметить, что мазеры на 1720 МГц проецируются только на одну область, VLA 1. Согласно Фишу и др. [6] они связаны не с тонким диском, а с молекулярным потоком.

Для ОН-мазеров обнаружено собственное движение благодаря их высокой интенсивности и компактности и использованию интерферометрических данных со сверхдлинной базой (РСДБ) в нескольких эпохах измерений (см., напр., [7]). В большинстве источников эти исследования обнаруживают крупномасштабные упорядоченные движения ОН-мазеров. Более подробная и полная информация о структуре области W75 N была изложена в работе [8].

На ранней стадии формирования звезд, какими они являются в W75 N, а также на всех стадиях их эволюции важную роль играет магнитное поле. Определение величины и направления магнитного поля позволяет нам лучше понять роль магнитного поля в формировании околозвездных дисков. Согласно теории поляризации мазера линейно поляризованные компоненты излучения будут преимущественно видны в направлениях, ортогональных магнитному полю [9], а с круговой поляризацией – вдоль магнитного поля. Модели магнитного поля в W75 N на основании данных интерферометрии по наблюдениям отдельных мазерных конденсаций ОН рассмотрены в ряде работ (см., напр., [6, 10]). Предполагается, что в области VLA 1 линии магнитного поля закручены вращающимся диском.

Наблюдения показали преобладание круговой поляризации и дефицит линейной поляризации, что является давней проблемой в поляризационной теории мазеров. Для объяснения этого явления Голдрайх и др. [11] предложили модель, согласно которой в области мазерного излучения вращение Фарадея может уничтожать линейную

поляризацию и оставлять только круговую поляризацию. Наблюдаемая поляризационная структура ОН мазеров может быть размазанной также из-за недостаточного спектрального и углового разрешения, когда несколько соседних деталей смешиваются. На одиночной антенне это происходит из-за недостаточности углового разрешения и в ряде случаев ввиду невысокой активности мазерных пятен, когда крылья более сильных спектральных компонентов подавляют слабые компоненты.

В настоящей работе мы представляем результаты многолетнего мониторинга источника мазерного излучения ОН W75 N в главной 1667 и сателлитной 1720 МГц линиях с целью исследования эволюции параметров Стокса большинства спектральных деталей. Также представляет интерес исследование эволюции крупномасштабного магнитного поля и ее причины. Некоторые результаты наших исследований круговой поляризации были изложены ранее в работе [12], а исследования переменности поляризационных параметров излучения в главной линии 1665 МГц изложены нами в работе [8].

### 2. АППАРАТУРА И НАБЛЮДЕНИЯ

Мы осуществляем мониторинг мазерного источника W75 N в линиях гидроксила на длине волны 18 см на радиотелескопе в Нансэ (Франция). Наблюдения в главных линиях 1665 и 1667 МГц проводятся с 2007 г., а в сателлитной линии 1720 МГц с 2012 г. Излучение в линии 1612 МГц в эпоху 21.05.2010 оказалось неполяризованным, широкополосным. Есть все основания считать его тепловым, поэтому в дальнейшем наблюдения в этой сателлитной линии нами не проводились.

Чувствительность телескопа составляет 1.4 К/Ян. Шумовая температура системы находилась в пределах 35—60 К в зависимости от условий наблюдения. При склонении источника с  $\delta=0^\circ$  диаграмма направленности телескопа на данной волне равна  $3.5'\times19'$  по прямому восхождению и склонению соответственно.

Спектральный анализ проводился автокорреляционным спектроанализатором из 8192 каналов, которые были разделены на восемь батарей по 1024 канала в каждой из них. Во всех наблюдениях проводилась регистрация плотности потока одновременно в двух круговых поляризациях (RC и LC) и в четырех ориентациях линейной поляризации (L0/L90 и L45/L135). При этом осуществлялся поворот облучателя на 45°. Таким образом осуществлялась регистрация шести мод поляризации. Это позволило нам вычислить все параметры Стокса (I, Q, U и V) согласно соотношениям:

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

$$Q = F(0^{\circ}) - F(90^{\circ}), \tag{2}$$

$$U = F(45^{\circ}) - F(135^{\circ}). \tag{3}$$

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

Разделение автокоррелятора на 8 батарей приводит к тому, что получаемые данные обладают избыточностью. Более подробное описание методики наших наблюдений на радиотелескопе в Нансэ изложено, например, в работах [8, 12].

В 2007—2009 гг. наблюдения проводились с разрешением по лучевой скорости 0.137 км/с. В наблюдениях 2010—2020 гг. разрешение было вдвое выше, т.е. 0.068 км/с. На рис. 1 приведены результаты наблюдений в линиях ОН 1667 и 1720 МГц в две избранные эпохи в круговых и линейной поляризациях (спектры) и параметр Стокса V. Спектры приведены для четырех ориентаций линейной поляризации. Все спектры нанесены линиями одной толщины, поскольку основная цель этих рисунков — показать, как сильно меняется сигнал в зависимости от позиционного угла для каждой спектральной детали, т.е. показать существование высокой степени линейной поляризации.

#### 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

### 3.1. Общие свойства мазеров ОН в линиях 1667 и 1720 МГц

Прежде всего отметим, что в W75 N спектры в линиях ОН 1667 и 1720 МГц имеют меньше деталей, чем в линии 1665 МГц. Также имеются различия между спектрами в линиях 1667 и 1720 МГц. Главное различие состоит в протяженности спектров и в числе деталей в спектре. В линии 1667 МГц основное (наиболее интенсивное) излучение приходило в интервале лучевых скоростей от —6 до 16 км/с. Однако временами наблюдались две слабые детали с лучевыми скоростями, достигающими 23 км/с. В линии 1720 МГц спектр уже, от 6 до 11 км/с.

Согласно Хантеру и др. [13], наблюдения излучения СS показывают, что лучевые скорости вещества на юго-восточной стороне источника VLA 1 составляют около  $10~\rm km/c$ . Скорости мазеров  $\rm H_2O$  ( $10-16~\rm km/c$ ) на этой стороне источника отличаются незначительно. Это указывает на то, что мазеры  $\rm H_2O$  находятся вблизи границы раздела радиоджета с окружающим веществом. Согласно Стрельницкому и др. [14], накачка мазеров происходит при турбулентных каскадных переходах энергии от крупномасштабного потока вещества до масштаба отдельных водяных мазеров.

Как мы уже отмечали, в наших наблюдених диапазон скоростей мазеров на частоте 1720 МГц составляет от 6 до 11 км/с, что перекрывает как диапазон скоростей водяных мазеров, так и ско-

рость окружающей среды. Таким образом, наблюдаемые свойства ОН мазеров подтверждают правдоподобность описанной выше модели.

В обеих линиях (1667 и 1720 МГц) наблюдается сильная переменность плотности потока большинства деталей. Имеются вспышки отдельных деталей. Особенно сильные вспышки (до 250 Ян) наблюдались в 2016—2017 гг. на 9.44 км/с и с конца 2019 г. на 9.04 км/с в линии 1720 МГц. Согласно Фиш и др. [6] сильное излучение (300 Ян) также наблюдалось в линии 1720 МГц в апреле 2008 г. на 8.47 км/с.

Для большинства спектральных деталей, как сильных, так и слабых, мы провели вычисление степени поляризации  $m_{\rm L}$  и позиционного угла  $\chi$  для линейной поляризации и степени круговой поляризации  $m_{\rm C}$  для разных эпох. Вычисления проводились по формулам:

$$m_{\rm L} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I},\tag{5}$$

$$\chi = 0.5 \arctan(U/Q), \tag{6}$$

где I, U и Q — параметры Стокса (см. раздел 2).

Степень круговой поляризации вычислялась по формуле:

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

И, наконец, по формуле:

$$p = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I} = \sqrt{m_{\rm C}^2 + m_{\rm L}^2},$$
 (8)

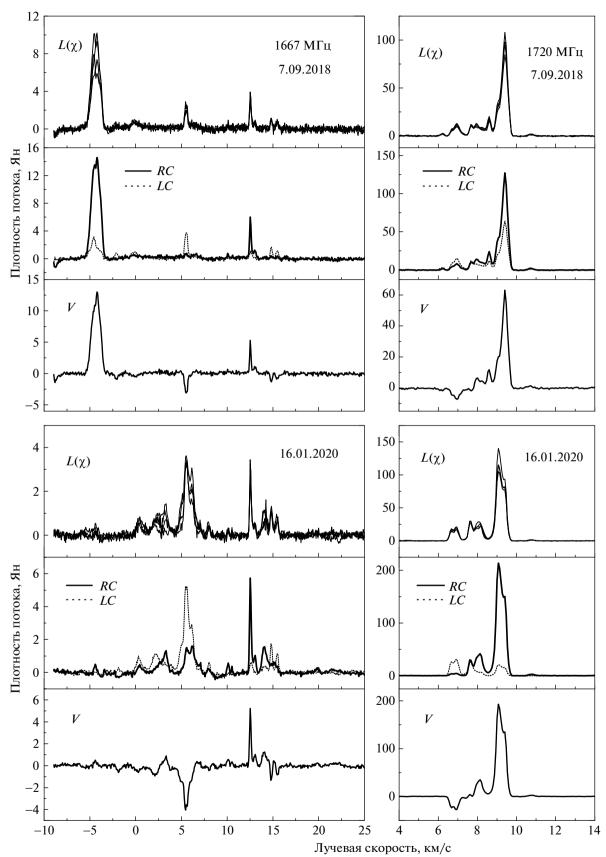
вычислялась степень полной поляризации.

На рис. 2(а) показан спектр нашего мониторинга в линии 1667 МГц на эпоху 17 апреля 2008 г., самую близкую к РСДБ-наблюдениям. На панели (б) приведен спектр в линии 1720 МГц, полученный в марте 2012 г., когда мы начали наблюдения W75N в этой линии. Для удобства анализа все выделенные в спектрах детали пронумерованы.

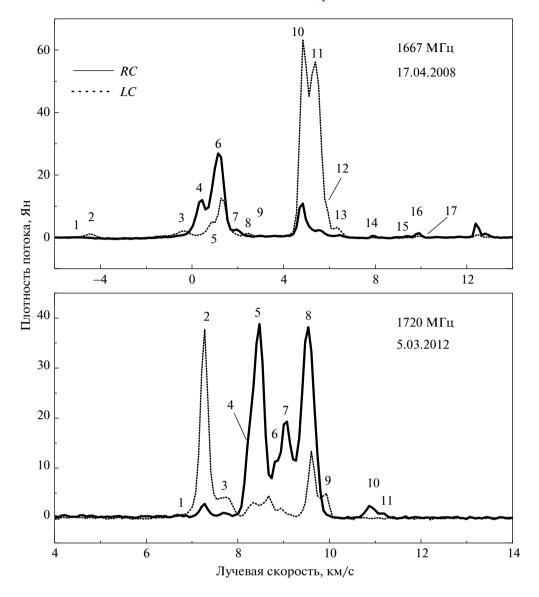
На рис. 3 приведены наложения на графиках степени круговой  $m_{\rm C}$  (а), линейной  $m_{\rm L}$  (б) поляризаций и позиционного угла  $\chi$  (в) для разных эпох наблюдений с 2010 по 2020 г. в главной линии 1667 МГц. На нижней панели справа для наглядности показаны направления плоскости линейной поляризации. На среднем графике (б) отрезками вертикальных линий выделены основные спектральные детали. Было выделено 18 спектральных деталей. Аналогично построен рисунок для результатов наблюдений в сателлитной линии 1720 МГц (см. рис. 4).

Однако также имеются существенные отличия параметров поляризации излучения на 1720 МГц от параметров на частоте 1667 МГц.

1. Для деталей  $V_{\rm LSR} \le 8$  км/с преобладает излучение в левой круговой поляризации, а для дета-



**Рис. 1.** Спектры мазерного излучения ОН в линейной и круговых поляризациях и параметр Стокса V в линиях 1667 и 1720 МГц в W75 N в эпохи 7.09.2018 и 16.01.2020. Спектры  $L(\chi)$  нанесены для четырех положений плоскости поляризации антенны:  $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$  и  $135^{\circ}$ .



**Рис. 2.** Спектры нашего мониторинга в направлении W75 N: (a) - в линии 1667 МГц на эпоху 17 апреля 2008 г., самую близкую к VLBA-наблюдениям; (б) - в линии 1720 МГц, полученный в марте 2012 г. Детали спектров пронумерованы.

лей с  $V_{\rm LSR} > 8$  км/с — в правой, исключая деталь на 9.93 км/с.

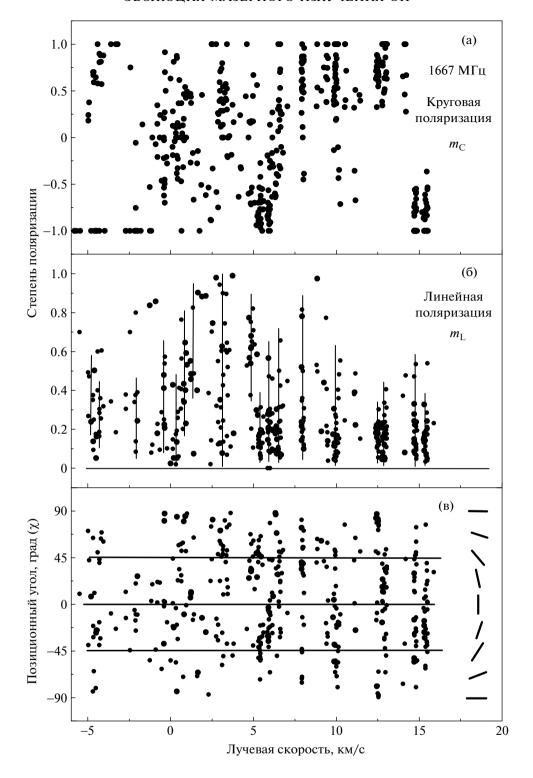
- 2. То же самое наблюдается для позиционного угла линейной поляризации. Разница значений между χ первой и второй групп деталей составляет в среднем около 90°. Также за исключением детали на 9.93 км/с.
- 3. Наблюдается более низкая степень линейной поляризации по отношению к круговой.

### 3.2. Переменность поляризационных характеристик излучения в линии 1667 МГц

Переменность плотности потока (параметра Стокса I) отдельных деталей в главной линии 1667 МГц показана на рис. 5. Для удобства анали-

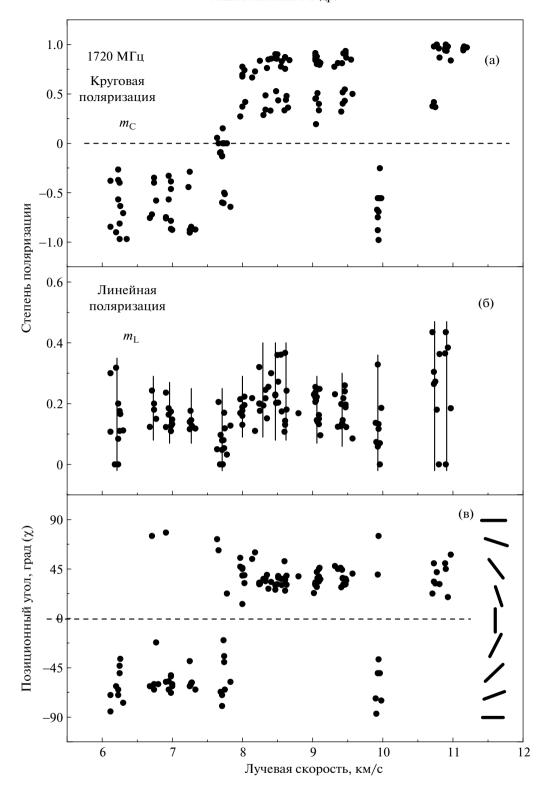
за и восприятия переменности спектр разделен на четыре части по лучевой скорости (а—г). Для деталей —0.34 и 1.2 км/с значения *I* для эпохи июль 2007 г. были вычислены на основании данных работы Слыша и др. [15]. Для каждой детали указана ее лучевая скорость. В течение мониторинга лучевые скорости большинства деталей изменялись в небольших интервалах, поэтому для удобства анализа на рисунках и в тексте мы приводим их средние значения. Вспышки происходили в 2007—2010 гг. и в 2016—2019 гг. В первом временном интервале вспышки коснулись большого числа деталей, а во втором всего лишь двух.

На рис. 6 отражена переменность степени круговой поляризации ( $m_{\rm C}$ ) всех 18 деталей. Чтобы иметь возможность проследить за эволюцией



**Рис. 3.** Наложение степени круговой (а) и линейной (б) поляризаций и позиционного угла для всех эпох наблюдений в нашем мониторинге в линии 1667 МГц. Отрезками вертикальных линий на панели (б) выделены основные эмиссионные детали. На панели (в) справа для наглядности показаны направления плоскости линейной поляризации.

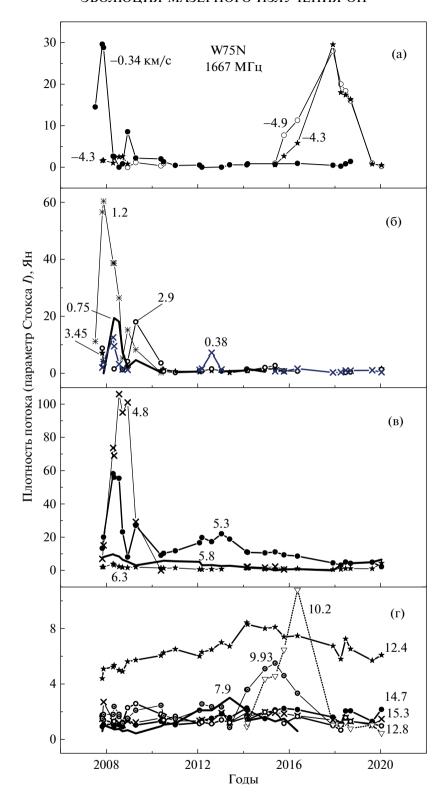
каждой детали, рисунок представлен в виде пяти панелей. Разделение деталей проведено по тому же принципу, что и на рис. 5, т.е. по участкам спектра. Для каждой детали указана лучевая скорость. На панели (в) символ "ВСП" означает, что для детали 5.3 км/с в этот период времени про-изошла вспышка излучения. Сильное отклонение значения степени круговой поляризации для



**Рис. 4.** То же, что на рис. 3 для линии 1720 МГц.

данной детали не является ошибкой измерения, а связано именно со вспышкой, также имеются детали как с низкой, так и с высокой степенью круговой поляризации, достигающей почти 100%.

Причем наблюдается 100% как левая, так и правая круговые поляризации. Также обратим внимание на больший разброс значений  $m_{\rm C}$ , чем для деталей в линии  $1665~{\rm M\Gamma L}$  [7]. Разброс  $m_{\rm C}$  относи-



**Рис. 5.** Переменность плотности потока отдельных спектральных деталей (параметр Стокса I) в линии 1667 МГц. Указаны величины лучевой скорости. Для деталей -0.34 и 1.2 км/с значения Iдля эпохи июль 2007 г. вычислены на основе данных работы Слыша и др. [15].

тельно нулевого уровня означает, что переменность потоков компонентов круговой поляризащии не является коррелированной.

На рис. 7 показана переменность степени линейной поляризации  $m_{\rm L}$  в линии 1667 МГц. Принцип размещения деталей на панелях рисунка и обозначения те же самые, что и на рис. 6. Видно, что характер переменности деталей различный. Чем выше лучевая скорость, тем меньше степень линейной поляризации. Для детали 5.3 км/с во время вспышки в 2009 г. также наблюдается скачок  $m_{\rm L}$  на 0.5.

И, наконец, рассмотрим переменность позиционного угла линейной поляризации  $\chi$  (см. рис. 8). Принцип построения рисунка аналогичный. Обозначения те же самые. Наблюдаются значительные вариации  $\chi$ . Например, для детали 5.3 км/с во время вспышки  $\chi$  изменялся на  $90^{\circ}$ , а затем вернулся к первоначальному значению. Переменность  $\chi$  других деталей не является хаотической, а показывает большое разнообразие характера переменности: от дрейфа с разным темпом (с наложением некоторых флуктуаций на средний уровень) до вариаций более сложного характера (например, подобных детали 5.3 кm/c).

### 3.3. Переменность поляризационных характеристик излучения в линии 1720 МГц

Аналогичные исследования переменности поляризационных характеристик проведены для мазерного излучения W75 N в линии 1720 МГц. Переменность плотности потока (параметр Стокса *I*) отдельных деталей, степени круговой поляризации, степени линейной поляризации и позиционного угла представлены на рис. 9—12.

Плотность потока и все параметры поляризации всех эмиссионных деталей претерпевают временные изменения. Имеется разнообразие характера переменности. Наблюдается деталь со степенным спадом (7.27 км/с) и ростом (8.0 и 9.06 км/с) потока, линейным ростом (6.94 км/с), а также с более сложным видом переменности плотности потока.

Для большинства деталей наблюдаются значительные колебания значений степени круговой поляризации (см. рис. 10). Особенно это видно на примере деталей на скоростях 8.47, 9.06 и 9.44 км/с. Вид переменности  $m_{\rm C}$  этих деталей подобен. Мы вписали полином второй степени (I), который характеризует долговременную переменность  $m_{\rm C}$ . Примерное значение периода можно оценить около трех лет. Аналогичные вариации наблюдаются для системы двух деталей: 7.33 и 6.94 км/с. Разница состоит в том, что в первом случае преобладает правая круговая поляризация, а во втором левая. Также имеет место долговременная

переменность деталей 8.29 и 6.22 км/с, которая отражена прямыми линиями.

Похожая картина переменности наблюдается и для параметров линейной поляризации. Мы также аппроксимировали переменность степени линейной поляризации некоторых деталей полиномами первой и второй степени (см. рис. 11). Позиционный угол в линии 1720 МГц имеет иной характер вариаций, чем в линии 1667 МГц (см. рис. 12). Из девяти деталей только для двух (7.71 и 9.93 км/с) мы наблюдали существенный дрейф у. На скорости 7.71 км/с рост плотности потока сопровождался существенным изменением величины χ, на 60-70°. Более значительные изменения позиционного угла происходили для детали 9.93 км/с. Дрейф происходил более или менее равномерно с  $-90^{\circ}$  до  $+45^{\circ}$ . Никакой корреляции с изменением потока не прослеживается.

Для всех остальных эмиссионных деталей временные вариации  $\chi$  были незначительными, несмотря на существенные изменения плотности потока.

#### 4. ДИСКУССИЯ

Анализ переменности параметров поляризации в целом в течение 14 лет позволил сделать ряд важных выводов.

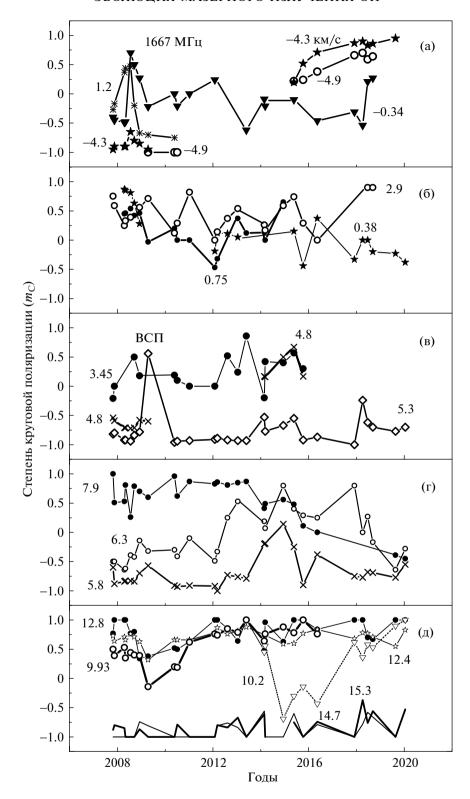
- 1. Подтверждается существование давней проблемы. Наблюдается преобладание степени круговой поляризации над степенью линейной поляризации в обеих линиях, 1667 и 1720 МГц (см., напр., [16]).
- 2. Имеются быстрые и долговременные вариации степени круговой и линейной поляризаций.
- 3. Наблюдается корреляция переменности всех параметров поляризации в периоды вспышек или быстрого изменения потока отдельных эмиссионных деталей в течение временного интервала порядка 1—2 года.

### 4.1. Отождествление эмиссионных деталей с мазерными пятнами

Область W75 N имеет сложную структуру и нам важно знать принадлежность эмиссионных деталей к основным источникам в этой области: VLA 1 и VLA 2.

Для проведения идентификации основных эмиссионных деталей мы воспользовались данными РСДБ-наблюдений в эпоху апрель 2008 г., изложенными в работе [6]. При идентификации мы использовали три критерия: близкие значения лучевых скоростей, по возможности близкие значения интенсивности излучения деталей и степени круговой поляризации.

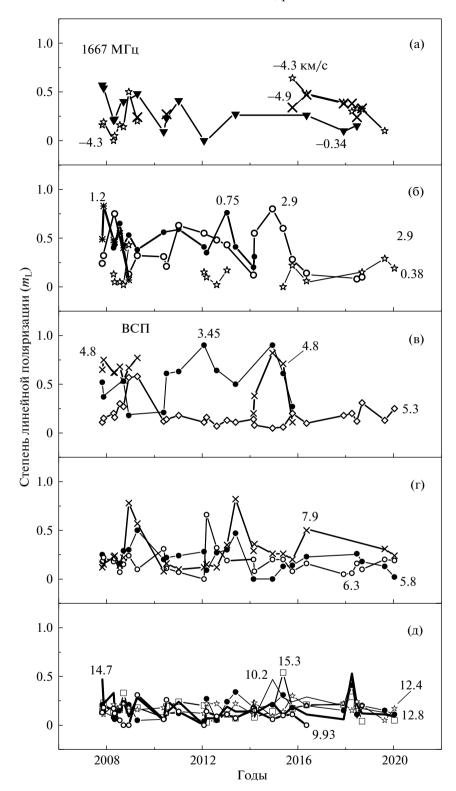
Результаты идентификации деталей спектра в линии 1667 МГц показаны на рис. 13, а в линии



**Рис. 6.** Переменность степени круговой поляризации отдельных спектральных деталей в линии 1667 МГц. Указаны их лучевые скорости. Символом "ВСП" обозначен момент вспышки детали 5.3 км/с.

1720 МГц на рис. 14. Слева вверху дана карта с расположением мазерных пятен. Большими крестиками показаны положения источников кон-

тинуума VLA 1 и VLA 2. Также даны фрагменты карт в увеличенном масштабе. Светлыми кружками показаны положения мазерных пятен соглас-



**Рис. 7.** Переменность степени линейной поляризации отдельных спектральных деталей в линии 1667 МГц. Обозначения те же, что на рис. 5.

но [6] и приведены их лучевые скорости, также взятые из [6]. Жирным шрифтом выделены идентифицированные детали нашего мониторинга.

Из теории Зеемановского расщепления следует, что вектор магнитного поля ортогонален плоскости линейной поляризации излучения

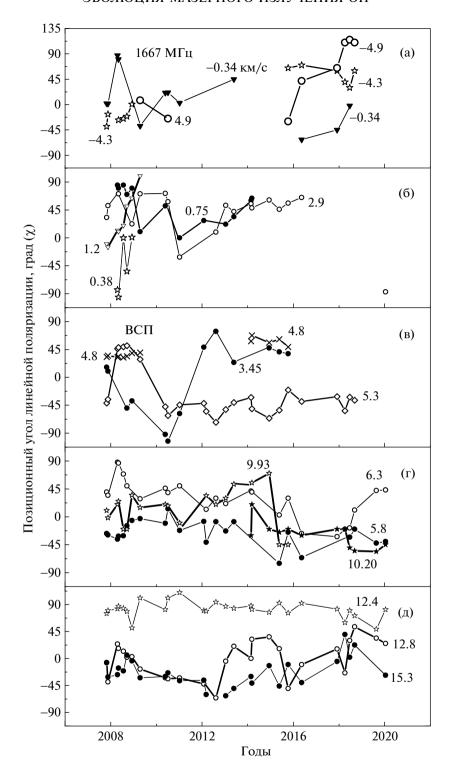
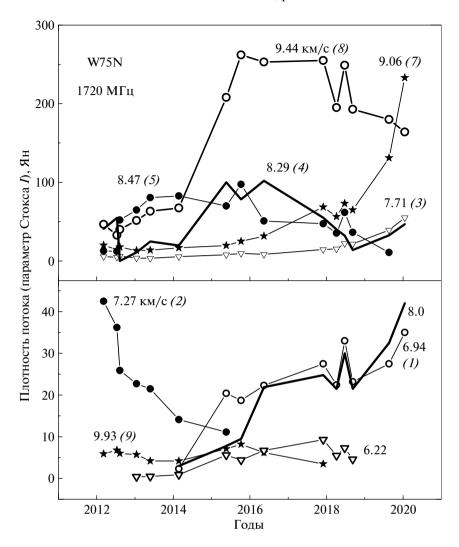


Рис. 8. Переменность позиционного угла линейной поляризации основных деталей в линии 1667 МГц.

ОН. На рис. 13 и 14 черточками показаны векторы направления магнитного поля (настоящая работа), относящиеся к эпохам наибольшей активности каждого мазерного пятна. Причем тонкими

линиями отражены векторы в начале вспышек, а жирными линиями в конце вспышек. Для сравнения справа вверху затемненными кружками нанесены мазерные пятна из работы [16]. Обра-



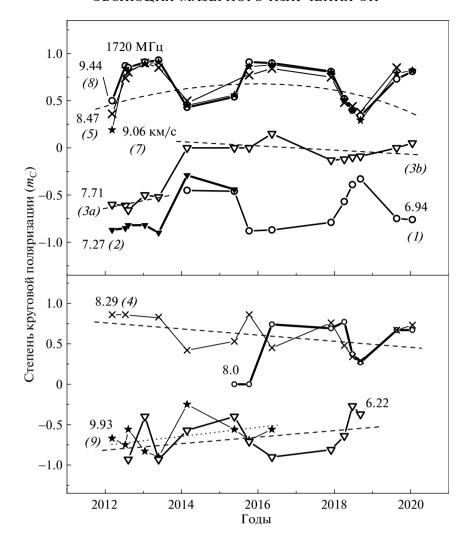
**Рис. 9.** Переменность плотности потока основных деталей в линии 1720 МГц. Указаны лучевые скорости деталей. Основные детали пронумерованы в порядке возрастания лучевой скорости.

тим внимание на то, что в сателлитной линии 1720 МГц все наблюдаемые мазерные пятна связаны только с источником VLA 1.

В течение нашего мониторинга в линии 1667 МГц мы наблюдали достаточно сильное мазерное излучение на отрицательных лучевых скоростях до -5 км/с. Значительным было излучение в конце 2007 г. детали на -0.34 км/с и в 2016—2019 гг. двух деталей на скоростях -4.9 и -4.3 км/с с потоками в максимуме около 30 Ян. Однако в эпохи наблюдений с высоким угловым разрешением излучение на  $V_{\rm LSR} < 0$  было слабым и не было идентифицировано с мазерными пятнами.

Параметры основных эмиссионных деталей в линииях 1667 и 1720 МГц, большинство из которых отождествлено с мазерными пятнами на VLBA карте, приведены в табл. 1 и 2. Номера деталей (столбец 1) соответствуют номерам на рис. 2. В столбце 2 слева приведены лучевые ско-

рости, полученные в нашем мониторинге, а справа взяты из работы [6]. Плотность потока (столбец 3) приведена, в основном, для максимумов во время вспышек. В случае отсутствия ярко выраженных вспышек приведены максимальные значения плотности потока деталей в течение всего мониторинга. В столбце 4 параметр  $\Delta t$  характеризует продолжительность вспышек, которые имели место в линии 1667 Мгц. В линии 1720 МГц кратковременных вспышек не наблюдалось, поэтому мы привели продолжительность нахождения детали в активной стадии излучения по уровню 0.5 относительно максимума плотности потока. В столбцах 5-8 приведены степени круговой  $(m_{\rm C})$  и линейной  $(m_{\rm I})$  поляризаций, позиционный угол линейной поляризации χ и степень полной поляризации р соответственно. Два значения перечисленных параметров соответствуют началу и концу вспышек. При отсутствии вспышек даны



**Рис. 10.** Переменность степени круговой поляризации основных деталей в линии 1720 МГц. Указаны лучевые скорости деталей. Для некоторых деталей кривые переменности аппроксимированы полиномами второй степени или прямыми линиями.

экстремальные значения  $m_{\rm C}$  и соответствующие им значения  $m_{\rm L}$ ,  $\chi$  и p. В столбце 2 табл. 1 также приведены параметры для кратковременной вспышки детали 5.3 км/с.

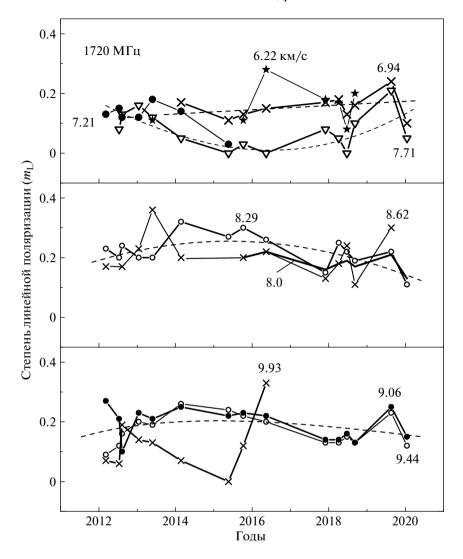
Ниже мы приводим описание эволюции излучения некоторых их этих деталей.

## 4.2. Эволюция излучения основных деталей в линии 1667 МГц, проецируемых на источник VLA 2 (кеплеровский диск)

Деталь –0.34 км/с является единственной с отрицательной лучевой скоростью, которая наблюдалась на VLBA [7]. Начало нашего мониторинга приходится на максимум ее излучения. Однако включение в график точки на эпоху июль 2007 г., вычисленную на основании данных работы [15], позволило проследить эволюцию данной детали.

Происходили быстрый рост и уменьшение плотности потока. Продолжительность этой фазы развития вспышки по уровню 0.5 составила около 0.6 года. При этом степень круговой поляризации не менялась ( $m_{\rm C}=-0.5$ ). Степень линейной поляризации менялась слабо, а позиционный угол изменился от 2° до 87°. Наблюдаемое излучение можно рассматривать как кратковременную вспышку. Такие вспышки более характерны для мазерного излучения водяного пара.

Излучение детали 0.38 км/с наблюдалось в течение почти всего мониторинга, за исключением небольших интервалов. Наиболее сильная вспышка была в 2007—2008 гг. и имела продолжительность 10 мес. Поток в максимуме достигал 12 Ян. В этот период степень круговой поляризации с 0.9 упала до 0.25 и затем после максимума вспышки к концу 2019 г. монотонно достигла значения —0.2. При этом линейная поляризация, в



**Рис. 11.** Переменность степени линейной поляризации основных деталей в линии 1720 МГц. Указаны лучевые скорости деталей. Здесь также по возможности вписаны полиномы второй степени.

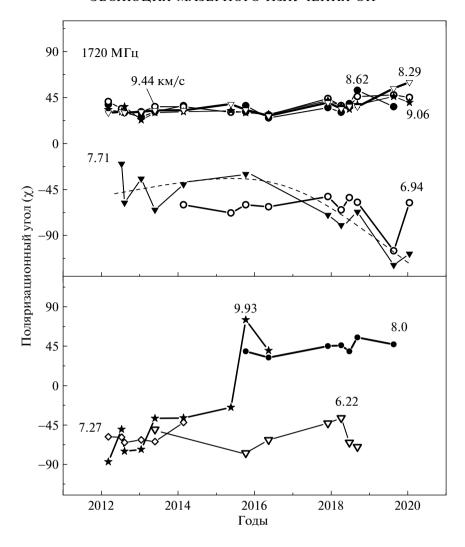
основном, отсутствовала. Лишь в некоторые эпохи  $m_{\rm L}$  достигала значения 0.25.

Согласно [6] на месте пятна 0.38 км/с (по Фишу [6] 0.52 км/с), имеющего практически 100% правую круговую поляризацию, находится пятно на скорости 6.49 км/с с излучением в левой круговой поляризации. Их можно рассматривать как зеемановскую пару. Сложность анализа эволюции этой пары заключается в том, что на близкой скорости второго пятна находятся два мазерных пятна также с излучением в левой поляризации, но которые связаны с VLA 1.

Тем не менее сравнение вариаций плотности потока деталей 0.38 и 6.49 км/с показывает наличие корреляции в эпохи двух вспышек в 2008 и 2016 г. и антикорреляции в 2012 г. Это может быть дополнительным подтверждением существования зеемановской пары, т.е. σ компонентов кру-

говой поляризации. Поскольку центральный компонент (3.4 км/с) не наблюдается, то магнитное поле является продольным, его величина составляет около 17 мГс и поле направлено к наблюдателю.

Детали 1.2 и 1.4 км/с мы наблюдали в правой и в левой круговых поляризациях соответственно в максимуме излучения. Здесь также включена точка на основании работы Слыша и др. [15]. Это позволило определить продолжительность вспышки, которая по уровню 0.5 составила 0.8 г. В процессе эволюции деталей их потоки менялись сложным образом (параметра Стокса *I*). Переменность основных параметров излучения этих деталей отображена на рис. 15. Также происходило монотонное изменение степени круговой поляризации. Вариации степени линейной поляризации имели более сложный характер. Угол



**Рис. 12.** Переменность позиционного угла линейной поляризации основных деталей в линии 1720 МГц. Указаны лучевые скорости деталей.

 $\chi$  в течение вспышки монотонно изменился более чем на на  $110^\circ$  (см. рис. 7). Скорость поворота плоскости поляризации составила около  $7^\circ$  в месян

Эти две детали имеют практически одинаковые координаты [7], т.е. соответствуют критериям для зеемановской пары. Расщепление находится в пределах 0.13-0.40 км/с. Это соответствует продольному магнитному полю  $\sim 0.37-1.13$  мГс, направленному к наблюдателю.

Необходимо отметить, что мазерное излучение ОН в W75 N в области лучевых скоростей 0—2 км/с оказалось высоко переменным и, что является самым важным, после вспышки появилось излучение от других деталей, принадлежность которых установить не было возможным из-за отсутствия наблюдений с высоким угловым разрешением после 2008 г. По этой причине мы не смогли проследить за эволюцией параметров

поляризации этой зеемановской пары после вспышки 2008 г.

Рассмотрим деталь 4.8 км/с. Самое интенсивное излучение на этой лучевой скорости наблюдалось нами в 2008 г. с плотностью потока в максимуме 100 Ян (параметр Стокса І). Во время вспышки, которая длилась около одного года, все параметры поляризации более или менее сохранялись. После вспышки наблюдались достаточно значительные некоррелированные вариации этих параметров. Согласно [6] имеются два мазерных пятна на лучевых скоростях 4.91 и 5.07 км/с, имеющие очень близкие координаты, но противоположные круговые поляризации. Эти детали также рассматриваются как зеемановская пара с расщеплением 0.16 км/с, которому соответствует направленное к наблюдателю магнитное поле 0.45 мГс.

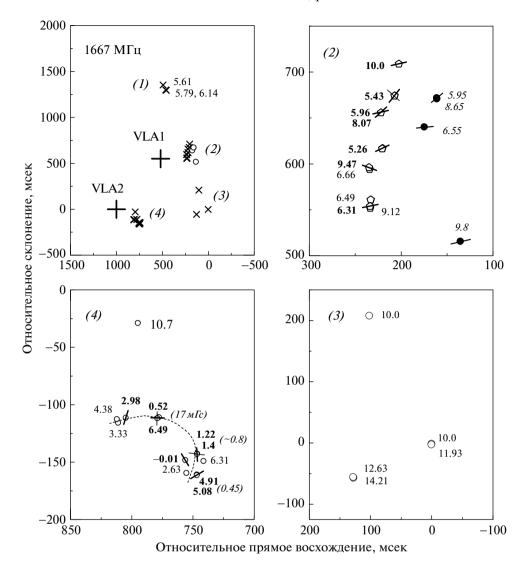


Рис. 13. Слева вверху дана карта расположения мазерных пятен в области W75 N в линии 1667 МГц. Большими крестиками показаны положения источников континуума VLA 1 и VLA 2. Справа и снизу даны фрагменты карт в увеличенном масштабе. Светлыми кружками показаны положения мазерных пятен и их лучевые скорости согласно [6]. Жирным шрифтом выделены идентифицированные детали нашего мониторинга. Черточками показаны векторы направления магнитного поля в отдельных мазерных деталях (настоящая работа). Справа вверху затемненными кружками нанесены мазерные пятна из работы [16]. На панели внизу слева расположение мазерных пятен на карте аппроксимировано полиномом (штриховая линия). Для трех Зеемановских пар курсивом в скобках приведено значение продольного магнитного поля в мГс.

Таким образом, в трех мазерных пятнах продольное магнитное поле имеет одно направление, к наблюдателю. Величина магнитного поля для всех трех Зеемановских пар приведена на рис. 13 курсивом в скобках.

В процессе эволюции вспышек в мазерных пятнах изменение позиционного угла линейной поляризации составило более 90°, т.е. имел место поворот плоскости линейной поляризации. Также происходили значительные изменения степени круговой поляризации.

Достаточно интересно происходила эволюция излучения деталей на лучевых скоростях —4.9 и —4.3 км/с, которые не были идентифицированы с мазерными пятнами. Вспышка излучения наблюдалась у обеих деталей с середины 2015 по конец 2019 г. При этом имели место синхронный рост и спад плотности потока (рис. 5(а)), а также увеличение степени круговой поляризации с нулевой до почти полной (рис. 6). Степень линейной поляризации уменьшалась с 0.5 до 0.25 для обеих деталей (рис. 7). При этом позиционный угол излучения на —4.3 км/с менялся незначительно, а на —4.9 км/с претерпевал существенное монотонное

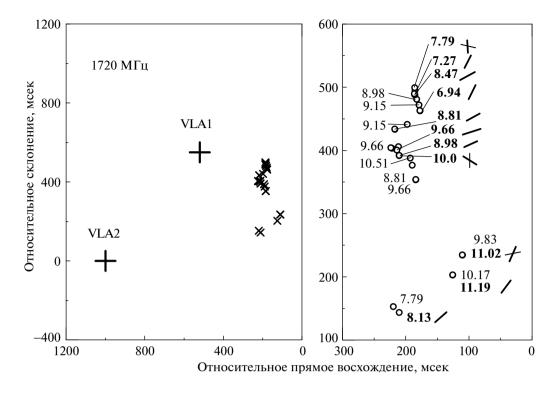


Рис. 14. То же, что на рис. 13, но для излучения в сателлитной линии 1720 МГц (см. текст).

изменение от  $-30^{\circ}$  до  $110^{\circ}$  (рис. 8). Таким образом, скорость вращения плоскости линейной поляризации в мазерном пятне на лучевой скорости -4.9 км/с составила около  $5^{\circ}$  в месяц.

### 4.3. Эволюция излучения основных деталей в линии 1667 МГц, связанных с VLA 1 (радиоджет)

Для детали 5.3 км/с наблюдались две вспышки: одна более интенсивная с потоком в максимуме 59 Ян и продолжительностью около 0.7 года и кратковременная, во время которой плотность потока с 10 увеличилась до 28 Ян.

Во время первой вспышки менялись все параметры поляризации:  $m_{\rm C}$  в интервале от -0.95 до -0.75,  $m_{\rm L}$  с 0.12 до 0.25 и  $\chi$  от  $-45^{\circ}$  до  $+45^{\circ}$ , т.е. на  $90^{\circ}$ .

Во время второй кратковременной вспышки произошел скачок  $m_{\rm C}$  с -0.75 до 0.5. Таким образом, во время второй вспышки существовали два одинаковых компонента с обеими круговыми поляризациям. Также значительно увеличилась степень линейной поляризации (до 0.55), при этом позиционный угол немного упал. Самое интересное то, что после вспышек все параметры поляризации излучения детали (мазерной конденсации) восстановились.

Мазерное излучение на скорости около 10.0 км/с было более слабым, но структура линии оказалась более сложной. Плотность потока не превышала

5 Ян. Деталь отождествляется с одним из мазерных пятен (рис. 13). Сначала деталь была двойной и суммарный профиль линии имел колоколообразную форму. Вблизи максимума излучения четко проявилась двойная структура детали. Это произошло за счет сужения линии каждого компонента. В период более высокой активности (2014—2017 гг.)  $m_{\rm C}$  сохранялась на уровне 0.7,  $m_{\rm L}$  менялась в пределах всего лишь 0—0.2, а позиционный угол  $\chi$  рос более или менее монотонно в период 2008—2014 гг. с 0° до 45° (рис. 5—8).

В конце 2014 г. появилась новая более интенсивная деталь на скорости около  $10.2 \, \mathrm{km/c}$  с плотностью потока в максимуме  $10.9 \, \mathrm{Ян}$ . Ширина линии составила всего лишь  $0.15 \, \mathrm{km}$ , что много меньше типичной ширины линий других наблюдаемых нами деталей  $(0.5-0.6 \, \mathrm{km/c})$ . В процессе эволюции этой вспышки значительно сильнее менялся поток компонента с левой круговой поляризацией, чем с правой (рис. 6). В связи с этим сильно менялся параметр поляризации  $m_{\mathrm{C}}$ . Степень и позиционный угол линейной поляризации менялись монотонно от  $0.3 \, \mathrm{дo} \, 0.1 \, \mathrm{u}$  от  $0^{\circ} \, \mathrm{дo} \, 50^{\circ} \, \mathrm{co}$  ответственно.

### 4.4. Эволюция излучения основных деталей в линии 1720 МГц

Из 14 выделенных в спектрах  $H_2O$  мазерных деталей в линии 1720 М $\Gamma$ ц нам удалось идентифи-

Таблица 1. Параметры поляризации излучения основных деталей в линии 1667 МГц

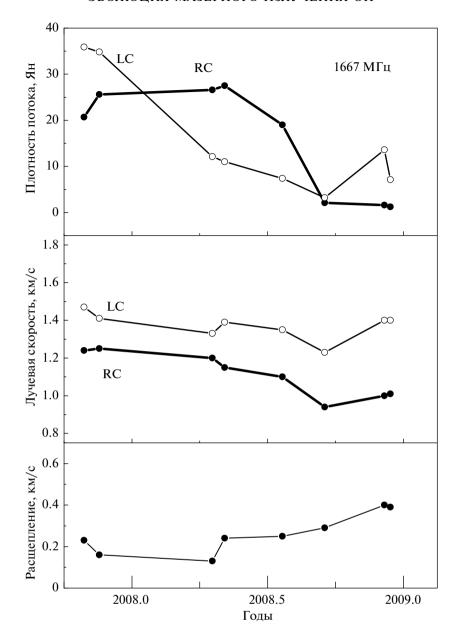
1	2		3	4	5	6	7	8
Номер	$V_{ m LSR}$ , km/c		<i>F</i> , Ян	$\Delta t$ , год	$m_{\rm C}$	$m_{ m L}$	χ, °	p
детали	н.р.	[6]				_		
1	-4.9	_	28	3.4	0.25/0.75	0.40/0.25	-40/115	0.47/0.79
2	-4.3	_	29	2.6	0.20/0.85	0.60/0.30	0.50	0.63/0.90
3a	-0.34	_	30	0.75	-0.5	0.50	2/87	0.70
3b	0	-0.01	1.3	0.3	0.63	0.02	-54	63
4	0.38	0.52	16	0.35	0.9/-0.2	0	-90/0	0.9/0.2
5	0.93	_	19.4	0.65	0.45/0.55	0.42/0.62	80	0.62
6	1.2	1.22	60	1.0	-0.26/0.50	0.7/0.1	-15/90	0.51
7	1.9	_	3.6	0.2	0.45	0.86	-13	0.97
8	2.41	_	19.8	0.6	-0.88	0.08	55	0.88
9	2.9	2.98	7.8	0.9	0.42	0.58	68	0.72
10	4.8	4.91	105	1.0	-0.63	0.65	40	90
11	5.3	5.43	59	0.7	-0.95/-0.75	0.12/0.25	-45/45	0.96/0.79
	5.3	(ВСП)	28	< 0.5	0.5	0.55	45	0.74
12	5.84	5.96	9.7	_	-0.8	0.19	21	0.82
13	6.30	6.31	3.9	_	-0.6	0.19	28	0.63
14	7.94	8.07	3	_	0.7	0.3	49	0.75
15	9.45	9.47	2.4	_	0.74	0.15	-30	0.76
16	9.93	10.0	5.5	2.1	-0.75/0.50	0.25/0.55	45/25	0.79/0.74
17	10.2	_	9.6	1.7	0.68	0.69	22	0.97

Примечание. Во втором столбце (н.р.) приведены данные настоящей работы, в третьем столбце — результаты из работы [6]. В 4-м столбце приведена плотность потока в Янских (F). Символом (ВСП) обозначен момент вспышки детали 5.3 км/с (см. текст).

Таблица 2. Параметры поляризации излучения основных деталей в линии 1720 МГц

1	2		3	4	5	6	7	8
Номер детали	$V_{ m LSR}$ , км/с		. <i>F</i> , Ян	$\Delta t$ , год	$m_{\rm C}$	$m_{ m L}$	χ, °	p
	н.р.	[6]	1,7111	Д, 10Д	m <sub>C</sub>	<i>™</i> L	<i>د</i> ،	P
1a	6.22	_	9.0	~3	-0.8/-0.5	0.15	-50	0.52/0.81
1b	6.94	6.94	33	4	-0.44/-0.86	0.11/0.24	<b>-55</b>	0.45/0.89
2	7.27	7.27	43	1.5	-0.87/-0.30	0.12	-65	0.88/0.37
3	7.71	7.79	51	>1	-0.60/0	0/-0.20	-25/-90	0.6/0.2
4a	8.0	_	42	>3	0/0.70	0.15	45	0.15/0.72
4	8.29	8.13	101	2.8	0.75/0.45	0.25/0.16	35	0.79/0.48
5	8.47	8.47	85	3.6	0.50/0.80	0.23	30	0.55/0.83
6	8.80	8.81	13	_	0.36/0.44	0.87	40/50	0.94/0.98
7	9.06	8.98	240	>1	0.20/0.91	0.20/0.15	25/45	0.28/0.92
8	9.44	9.66	262	~5	0.34/0.93	0.10/0.22	35	0.35/0.96
9	9.93	10.0	8.2	_	-0.74/-0.51	0.20/0.05	-90/-45	0.75/0.53
10	10.9	11.02	3.6	_	0.36/0.44	0.87	40/50	0.84/0.98
11	11.19	11.19	1.5	_	0.84	0.07	45	0.87

Примечание. Во втором столбце (н.р.) приведены данные настоящей работы, в третьем столбце — результаты из работы [6]. В 4-м столбце приведена плотность потока в Янских (F).



**Рис. 15.** Переменность плотности потока и лучевой скорости эмиссионных деталей Зеемановской пары (1.2 и 1.4 км/с) в линии 1667 МГц.

цировать с мазерными пятнами 11 деталей (рис. 14). Некоторые детали не идентифицированы, поскольку излучение в линии 1720 МГц имеет высокую переменность и не наблюдалось в эпоху проведения VLBA измерений, либо в начале нашего мониторинга. Например, детали 6.22, 6.94 и 8.0 км/с с плотностями потоков в максимумах 10, 35 и 42 Ян соответственно (рис. 9). Ввиду малого изменения лучевой скорости деталей, можно считать, что деталь 8.13 км/с из наблюдений Фиша и др. [6] и 8.29 км/с из нашего мониторинга это одна и та же деталь.

В отличие от мазерного излучения в линии 1667 МГц, излучение в линии 1720 МГц не имело характер кратковременных вспышек. Продолжительность активной фазы излучения деталей была больше, чем в линии 1667 МГц. Видимо, с этим связан характер переменности поляризационных параметров мазерного излучения в линии 1720 МГц. Например, многим деталям свойственны долговременные дрейфы параметров поляризации, которые аппроксимируются полиномами второй степени, либо линейным дрейфом.

Рассмотрим эволюцию деталей 6.94 и 8.0 км/с. Они имеют почти одинаковые кривые роста

плотности потока (рис. 9). Имеются слабые изменения степени линейной поляризации при среднем уровне  $m_L = 0.15$ . Значения позиционного угла меняются незначительно и составляют  $\chi = -55^\circ$  и 45° для деталей 6.94 и 8.0 км/с соответственно. Только степень круговой поляризации имела более существенные вариации, причем в детали 6.94 км/с преобладало излучение с левой круговой поляризацией, а в детали 8.0 км/с с правой. Согласно нашей идентификации с мазерными пятнами VLBA-карты [6] деталь 6.94 расположена в плотной группе в северной части источника VLA 1 (рис. 13). Близкую по скорости к 8.0 км/с деталь в работе [6] мы не нашли. Вероятно, излучение этой детали в 2008 г. было на низком уровне.

### 5. О МОДЕЛИ МАЗЕРА ОН В W75 N

С мазерными пятнами VLA 1 (молекулярного потока) мы отождествили семь спектральных деталей в линии 1667 МГц (рис. 13) и одиннадцать в линии 1720 МГц (рис. 14). Они расположены в разных частях большой дуги и хорошо иллюстрируют, что направление вектора магнитного поля более или менее монотонно меняется вдоль дуги. Это хорошо согласуется с результатами Слыша и др. [16].

С мазерными пятнами, расположенными на VLBA карте вблизи источника VLA 2 (кеплеровский диск), идентифицировано семь спектральных деталей в линии 1667 МГц (рис. 13). Все пятна (кроме 10.0 км/с) образуют малую дугу, которая направлена от VLA 2. Мы аппроксимировали это распределение полиномом (штриховая линия). Можно считать, что векторы магнитного поля мазерных пятен до вспышек излучения были ориентированы перпендикулярно к этой дуге, хотя имеется небольшой разброс. После вспышек в деталях на 0.38 и 1.2 км/с (согласно [6] 0.52 и 1.22 км/с) векторы магнитного поля этих деталей стали ориентированы вдоль дуги. Несмотря на то что мазерные пятна образуют организованную структуру в виде дуги и вспышки происходили в каждом мазерном пятне, никакой корреляции в последовательности возникновения вспышек вдоль дуги не прослеживается.

Разделение деталей в линии 1720 МГц на графике рис. 4 на две группы относительно  $\chi=0^\circ$  и  $V_{\rm LSR}=8$  км/с может быть также следствием пространственного разделения мазерных пятен (конденсаций). Однако недостаточное число наблюдаемых мазерных пятен в эпоху проведения VLBA наблюдений не позволило нам отождествить все детали спектра 1720 МГц на лучевых скоростях ниже 8 км/с и уверенно подтвердить наше предположение. Вкрапление в верхнюю группу мазерных пятен (рис. 14) со скоростями выше 8 км/с может быть вызвано случайной проекцией или

более сложной структурой скопления мазерных конденсаций в трехмерном пространстве. Тем более, что радиоджет и связанное с ним магнитное поле могут быть закрученными. Подобные структуры были обнаружены в мазерном источнике  $H_2O$  в W75 N (см., напр., [5]).

#### 6. ВЫВОЛЫ

Приведем здесь основные результаты анализа мониторинга мазерного излучения, проведенного нами на радиотелескопе в Нансэ на длине волны 18 см.

- Подтверждается существование давней проблемы: наблюдается преобладание степени круговой поляризации над степенью линейной поляризации в линиях гидроксила 1667 и 1720 МГц.
- Для трех мазерных пятен, которые находятся вблизи VLA 2, по величине Зеемановского расщепления в линии 1667 МГц было определено продольное магнитное поле. Оно направлено к наблюдателю и составляет 0.45, 0.8 и 17 мГс (см. рис. 13).
- В процессе эволюции вспышек в нескольких мазерных пятнах в линии 1667 МГц изменение позиционного угла линейной поляризации составило более 110°, т.е. имел место монотонный поворот плоскости линейной поляризации. Также происходили значительные изменения степени круговой поляризации.
- Обнаружено, что во время кратковременной вспышки детали 5.3 км/с в линии 1667 МГц в VLA 1 изменялись все параметры поляризации, а после вспышки все они восстановились.
- Проведено отождествление спектральных деталей излучения ОН в линиях 1667 и 1720 МГц с мазерными пятнами на VLBA карте. С мазерными пятнами VLA 1 (молекулярного потока) отождествлено шесть спектральных деталей в линии 1667 МГц и одиннадцать в линии 1720 МГц. Они расположены в разных частях большой дуги и хорошо иллюстрируют, что направление вектора магнитного поля более или менее монотонно меняется вдоль дуги.
- С мазерными пятнами в области VLA 2 (кеплеровский диск) отождествлено семь спектральных деталей в линии 1667 МГц. Все пятна (кроме 10.0 км/с) образуют малую дугу, которая направлена от VLA 2. Векторы магнитного поля мазерных пятен перпендикулярны к этой дуге. После вспышек мазерного излучения деталей на скоростях 0.38 и 1.2 км/с векторы магнитного поля этих деталей стали ориентированы вдоль дуги.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам Медонской Радиоастрономической обсервато-

рии (Франция) за большую помощь в проведении наблюдений на Большом радиотелескопе в Нансэ в течение длительного времени проведения мониторинга. Авторы также выражают благодарность анонимному рецензенту за полезные замечания и предложения, которые позволили улучшить качество нашей статьи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. K. L. J. Rygl, A. Brunthaler, K. M. Menten, M. J. Reid, et al., Proc. of the 10th European VLBI Network Symp. and EVN Users Meeting VLBI and the new generation of radio arrays, September 20–24, 2010 (Manchester, UK), http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid= 125, p. id. 103.
- 2. J. M. Torrelles, J. F. Gómez, L. F. Rodrígez, P. T. P. Ho, S. Curiel, and R. Vazquez, Astrophys. J. 489, 744 (1997).
- 3. C. G. Wynn-Williams, E. E. Becklin, and G. Neugebauer, Astrophys. J. 187, 473 (1974).
- J. M. Torrelles, L. A. Patel, G. Anglada, J. F. Gómez, et al., Astrophys. J. 598, L115 (2003).
- 5. *Е. Е. Лехт, В. И. Слыш, В. В. Краснов*, Астрон. журн. **84**, 1070 (2007).
- V. L. Fish, M. Gray, W. M. Goss, and A. M. S. Richards, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 417, 555 (2011).

- 7. V. L. Fish, M. J. Reid, A. L. Argon, and X-W. Zeng, Astrophys. J. Suppl. **160**, 220 (2005).
- 8. П. Колом, Н. Т. Ашимбаева, Е. Е. Лехт, М. И. Пащенко, Г. М. Рудницкий, А. М. Толмачев, Астрон. журн. **98**, 50 (2021).
- 9. *M. D. Gray and D. Field*, Astron. and Astrophys. **298**, 243 (1995).
- R. D. Davies, R. S. Booth, and J.-N. Perbet, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 181, 83 (1977).
- 11. P. Goldreich, D. A. Keely, and J. Y. Kwan, Astrophys. J. 179, 111 (1973).
- 12. В. И. Слыш, М. И. Пащенко, Г. М. Рудницкий, В. М. Витрищак, П. Колом, Астрон. журн. **87**(7), 655 (2010).
- T. R. Hunter, G. B. Taylor, M. Felli, and G. Tofani, Astron. and Astrophys. 284, 215 (1994).
- 14. V. S. Strelnitski, J. Alexander, S. Gezari, B. P. Holder, J. M. Moran, and M. J. Reid, Astrophys. J. **581**, 1180 (2002).
- V. I. Slysh, A. V. Alakoz, and V. Migenes, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 404, 1121 (2010).
- V. I. Slysh, V. Migenes, I. E. Val'tts, S. Yu. Lyubchenko, S. Horiuchi, V. I. Altunin, E. B. Fomalont, and M. Inoue, Astrophys. J. 564, 317 (2002).