

## НАБЛЮДЕНИЯ ГИДРОКСИЛА В ДИАПАЗОНЕ 18 см В ИСТОЧНИКЕ ONSALA 1

© 2023 г. Н. Т. Ашимбаева<sup>1</sup>, Е. Е. Лехт<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> Пушчинская радиоастрономическая обсерватория,

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

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

Поступила в редакцию 31.10.2022 г.

После доработки 16.12.2022 г.

Принята к публикации 24.01.2023 г.

Приведены результаты поляризационных наблюдений источника ON 1 в линиях гидроксила 1665, 1667 и 1612 МГц на Большом радиотелескопе в Нансэ (Франция). Проведено пространственное отождествление спектральных деталей OH в линиях 1665 и 1667 МГц с мазерными пятнами (конденсациями) на VLBI карте по данным Фиша и др. (2005). Обнаружено излучение от неизвестных ранее спектральных деталей в главной линии 1665 МГц на лучевых скоростях  $-2.98, 9.35$  и  $11.8$  км/с. Найдено пять Зеemanовских пар: четыре в линии 1665 МГц и одна в линии 1667 МГц. Векторы поперечного магнитного поля  $H_{\perp}$  ориентированы, в основном, вдоль дуги (в верхней и нижней частях области UC N II), а векторы продольного магнитного поля  $H_{\parallel}$  ориентированы в северной и центральной частях области UC N II от наблюдателя, а в южной – к наблюдателю.

*Ключевые слова:* звездообразование, мазеры OH, поляризация, магнитное поле, индивидуальные объекты (ON1)

DOI: 10.31857/S0004629923030027, EDN: PNLUMF

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Источник ON 1 является областью активного звездообразования. Расположен в плотном молекулярном облаке в созвездии Лебедь. Наиболее предпочтительным расстоянием до него считается 1.8 кпк (см., напр., [1, 2]). В центре области находится сверхкомпактная область NII UC N II [3, 4].

С западной стороны от UC N II находятся две области субмиллиметрового континуума SMA 1 (северный) и SMA 2 (южный), которые наблюдались на частоте 345 ГГц [5]. Соответственно с ними связаны два скопления мазерных пятен  $H_2O$  – северное WMC 1 и южное WMC 2 [6]. Расстояние между скоплениями составляет 2900 а.е. и они отстоят от области континуума UC N II на 3600 а.е. Впервые на разделение мазеров водяного пара на два скопления указали Даунс и др. [7] на основании РСДБ-наблюдений. Между SMA 1 и SMA 2 находятся источник ближнего ИК излучения и точечный источник дальнего ИК излучения [2]. Все это в совокупности рассматривается как скопление молодых звездных объектов.

В области ON 1 можно выделить два основных биполярных потока. Биполярный поток в линии

CO ( $J = 2-1$ ) локализован вблизи источника континуума WMC 1 в направлении восток-запад [2] и имеет скорость расширения  $69 \pm 11$  км/с [6]. С этим потоком связывают и собственные движения мазерных деталей в северном скоплении WMC 1.

Другой биполярный поток обнаружен в линиях  $NH_3$  и  $H^{13}CO$  на скорости 4.5 км/с в направлении (северо-восток)–(юго-запад). Некоторыми авторами этот поток интерпретируется как вращающееся кольцо или диск (см., напр., [3, 8]). По данным наблюдений в линии  $NH_3$  Кумар и др. [2] отдадут предпочтение модели биполярного потока.

Нагаяма и др. [6] предполагают, что северный источник SMA 1, в котором находятся северное скопление мазерных пятен  $H_2O$  и молодая звезда, образует с областью UC N II двойную систему с относительной скоростью  $\Delta V_{LSR} = 3$  км/с и общей массой  $\sim 37 M_{\odot}$ . С областью UC N II связано также и мазерное излучение гидроксила, причем его источники расположены, в основном, на периферии этой области [4, 9]. Также согласно [6] в ON 1 продолжается процесс звездообразования,

и идет он с запада области УС Н II на восточную сторону обоих скоплений мазеров  $\text{H}_2\text{O}$  – WMC 1 и WMC 2.

Согласно Фиш и др. [10] мазерные пятна ОН сконцентрированы в трех группах. Северная группа достаточно компактная. Лучевые скорости пятен находятся в интервале 3.5–5.0 км/с. Центральная группа самая компактная и самая малочисленная. Лучевые скорости пятен этой группы 13–14 км/с. Наиболее многочисленной является южная группа. Она достаточно протяженная в направлении восток-запад. Интересно отметить, что диапазон скоростей пятен составляет всего лишь 13–15 км/с. Считается, что северная и южная группы мазерных пятен расположены на границе области УС Н II, а центральная группа проецируется на нее.

Недалеко от северной группы найдены мазеры метанола и расщепление для двух Зеемановских пар. Однако их лучевые скорости выше на 10 км/с. Вероятно они связаны с другим источником.

## 2. АППАРАТУРА И НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения мазерного излучения ОН были проведены в 2021 г. на Большом радиотелескопе в Нансэ (Франция) в главных линиях 1665 и 1667 МГц и в спутниковой линии 1612 МГц. 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. Анализ сигнала осуществлялся автокорреляционным спектроанализатором со спектральным разрешением в линии 1665 МГц 0.0686 км/с. В линии 1612 МГц спектральное разрешение составило 0.0709 км/с.

Излучение регистрировалось одновременно в обеих круговых поляризациях ( $RC$  и  $LC$ ) и в линейной поляризации при направлениях плоскости поляризации антенны  $0^\circ$  и  $90^\circ$ . После поворота облучателя на  $45^\circ$  осуществлялся прием излучения снова в обеих круговых и в двух других направлениях линейной поляризации  $45^\circ$  и  $135^\circ$ . Таким образом, осуществлялась регистрация шести мод поляризации. Отметим, что данные об излучении в круговых поляризациях являются избыточными.

Подробно методика наблюдений и регистрации сигнала, а также связь между шестью модами поляризации, полученных из наблюдений, многократно излагались нами во всех работах, связанных с мониторингом источников мазерного излучения гидроксидов на данном радиотелескопе (см., напр., [11]).

В линиях 1665 и 1612 МГц наблюдения были проведены один раз, а в линии 1667 МГц два раза.

Результаты наблюдений приведены на рис. 1–3. Указаны эпохи наблюдений. На верхних панелях приведены спектры, полученные в обеих круговых поляризациях. Все выделенные детали пронумерованы. На панелях 2–5 приведены спектры ОН в линейной поляризации для различных положений плоскости поляризации антенны:  $PA = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  и  $135^\circ$ .

Мы также продолжаем наблюдения (мониторинг) ОН 1 в линии водяного пара на волне 1.35 см на 22-м радиотелескопе в Пушино. Результаты наблюдений за период 1981–2013 гг. были опубликованы нами в работе [12]. Для сравнения структуры спектров ОН и  $\text{H}_2\text{O}$  на рис. 4 представлена выборка спектров из наблюдений ОН 1 в 2021–2022 гг., полученных с разрешением по лучевой скорости 0.0822 км/с.

## 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

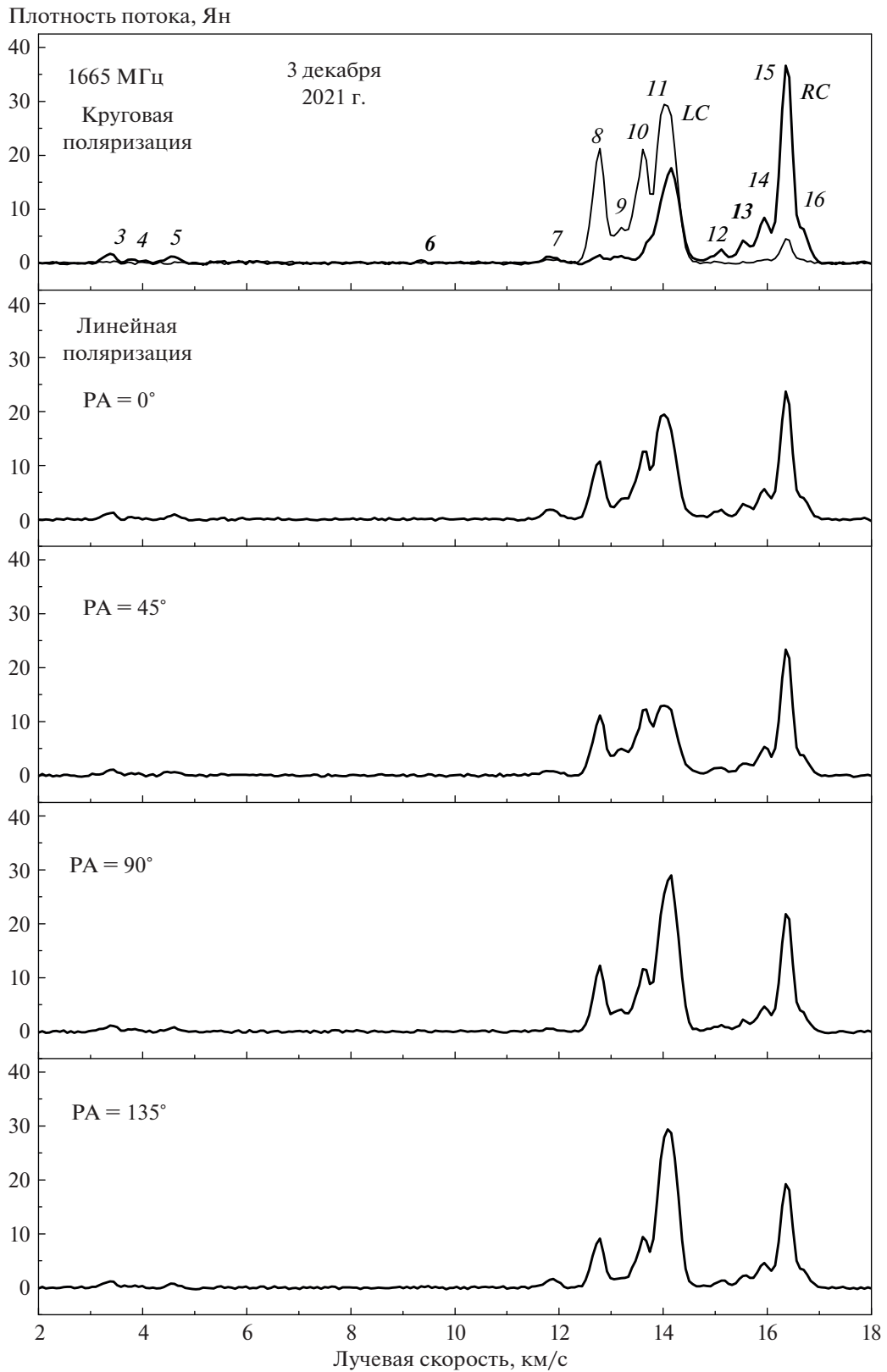
В настоящем разделе мы приводим более развернутые пояснения о том, какой интерес представляют результаты поляризационных измерений, какие выводы или предположения можно сделать, исходя из полученного материала (см. подразделы 3.1 и 3.3).

### 3.1. Анализ спектров

Наибольшее число деталей в спектре ОН наблюдалось в главной линии 1665 МГц. Мы выделили 16 деталей в интервале лучевых скоростей от  $-3.5$  до 17 км/с с минимальным значением плотности потока 0.4 Ян. Основная группа деталей сосредоточена в интервале скоростей 11.5–17 км/с с плотностью потока до 36 Ян. При этом с учетом степени поляризации параметр Стокса  $I$  достигает значения 46 и 41 Ян для деталей 11 и 15 соответственно. Детали второй группы находятся в интервале лучевых скоростей от  $-3.5$  до 4.8 км/с и имеют более слабое излучение, не превышающее 1.1 Ян. Детали 1 и 2 на рис. 1 не показаны.

Кроме того, между этими двумя группами имеется излучение одиночных деталей. Мы зарегистрировали 100% поляризованное по кругу излучение на 9.35 км/с с плотностью потока около 0.5 Ян (деталь 6). Отметим, что в работе Фиша и др. [9] сведения о деталях второй группы и деталях 6 и 7 отсутствуют. Обнаруженные нами детали на промежуточных скоростях не поддерживают модель вращения, в которой северная и южная группы мазеров находятся на концах вращения [10].

В линии 1667 МГц наблюдаются три детали в небольшом интервале лучевых скоростей. На 13.74 км/с излучение слабое, не более 0.34 Ян. На других скоростях излучение значительно сильнее



**Рис. 1.** Спектры мазерного излучения ОН в главной линии 1665 МГц в направлении ОН 1 в эпоху 5 декабря 2021 г. На верхней панели показаны спектры в правой (жирная линия) и левой (тонкая линия) круговых поляризациях. Детали пронумерованы. На остальных панелях даны спектры в линейной поляризации при положениях плоскости поляризации антенны (РА) 0°, 45°, 90° и 135°.

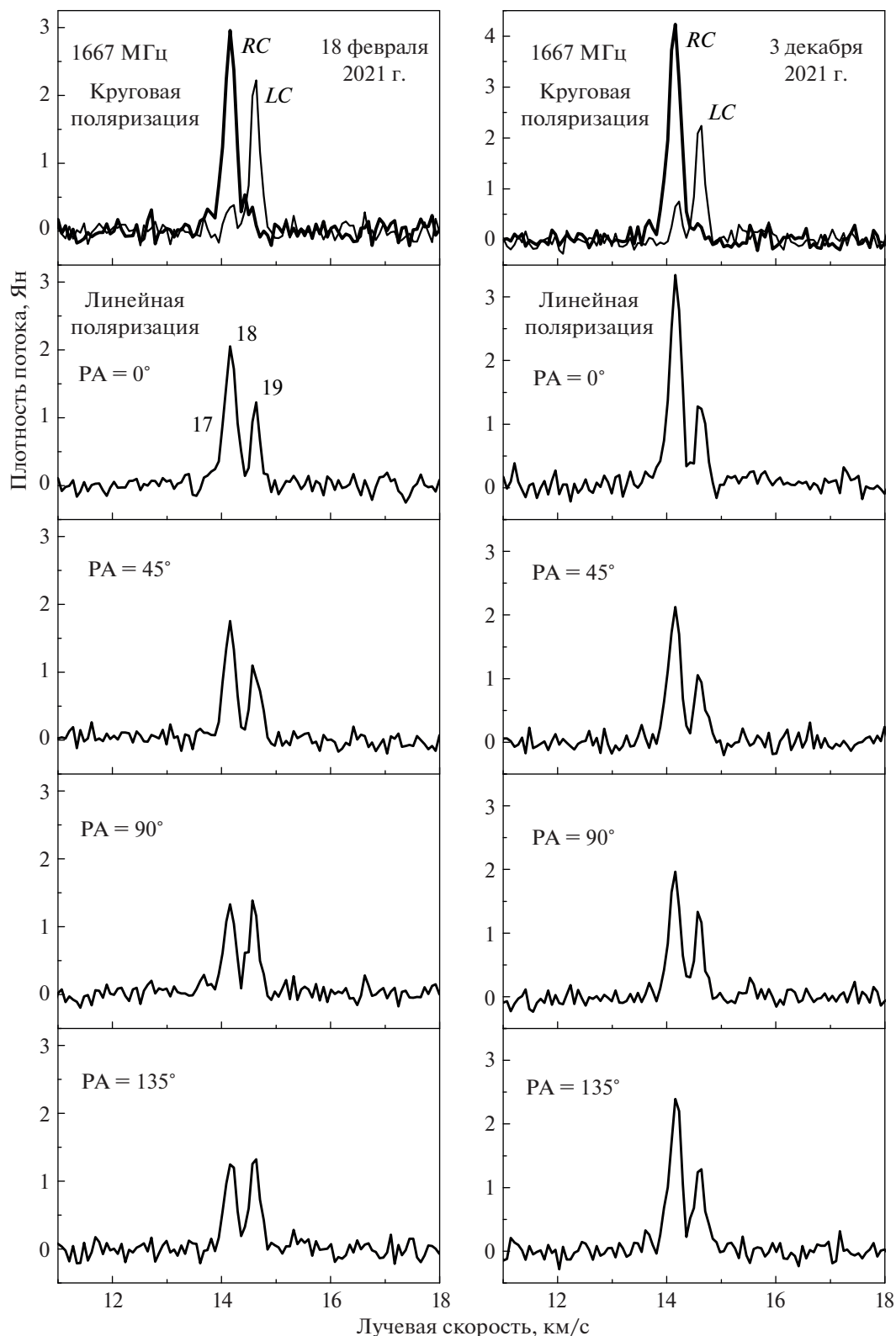


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но для линии 1667 МГц на две эпохи наблюдений.

и имеет высокую степень круговой поляризации. Степень линейной поляризации существенно меньше.

В линии 1612 МГц мы зарегистрировали четыре детали. Они имеют сильную круговую поляризацию, но слабую линейную поляризацию. В от-

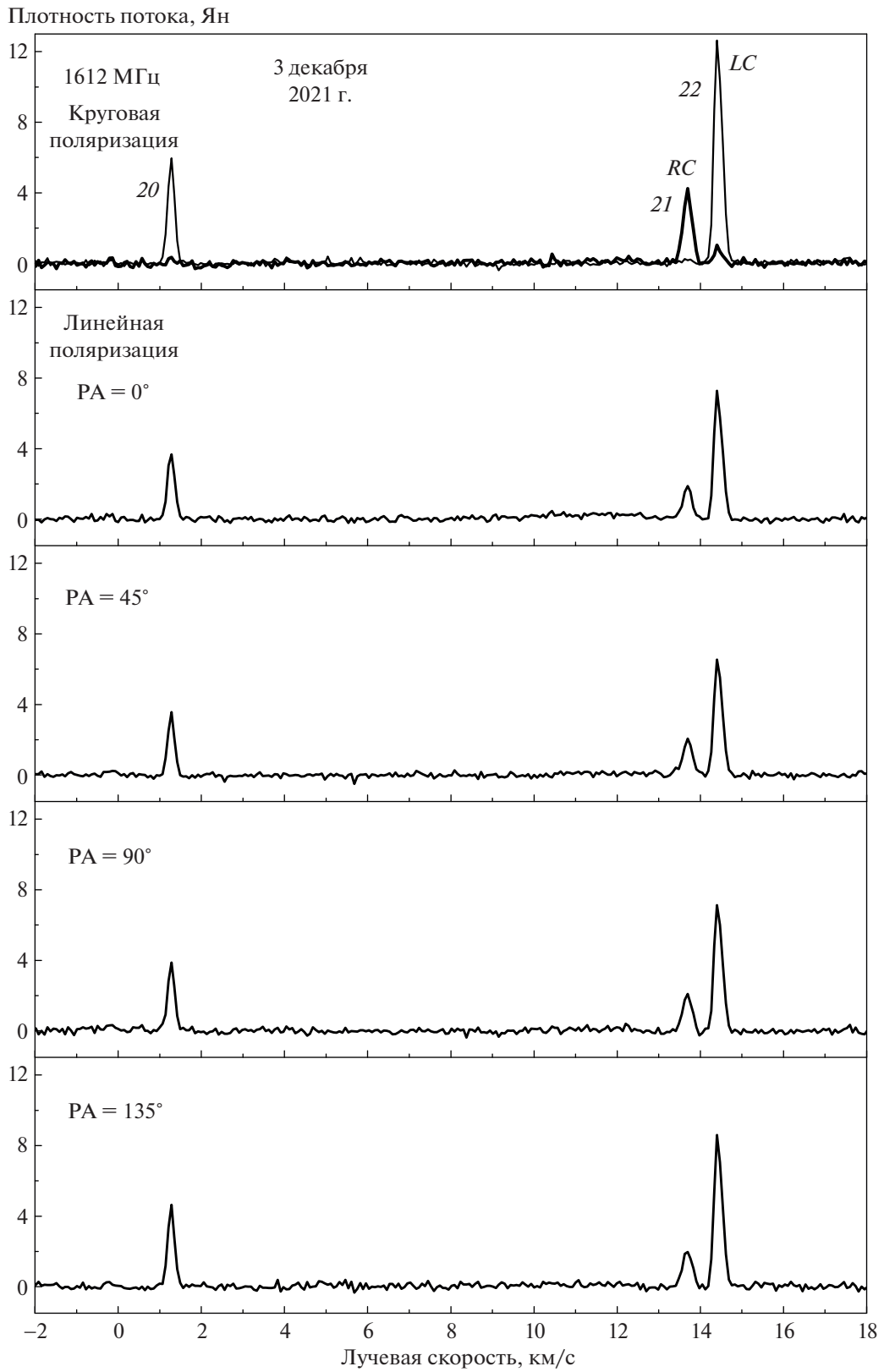


Рис. 3. То же, что на рис. 1, но для линии 1612 МГц на эпоху наблюдений 3 декабря 2021 г.

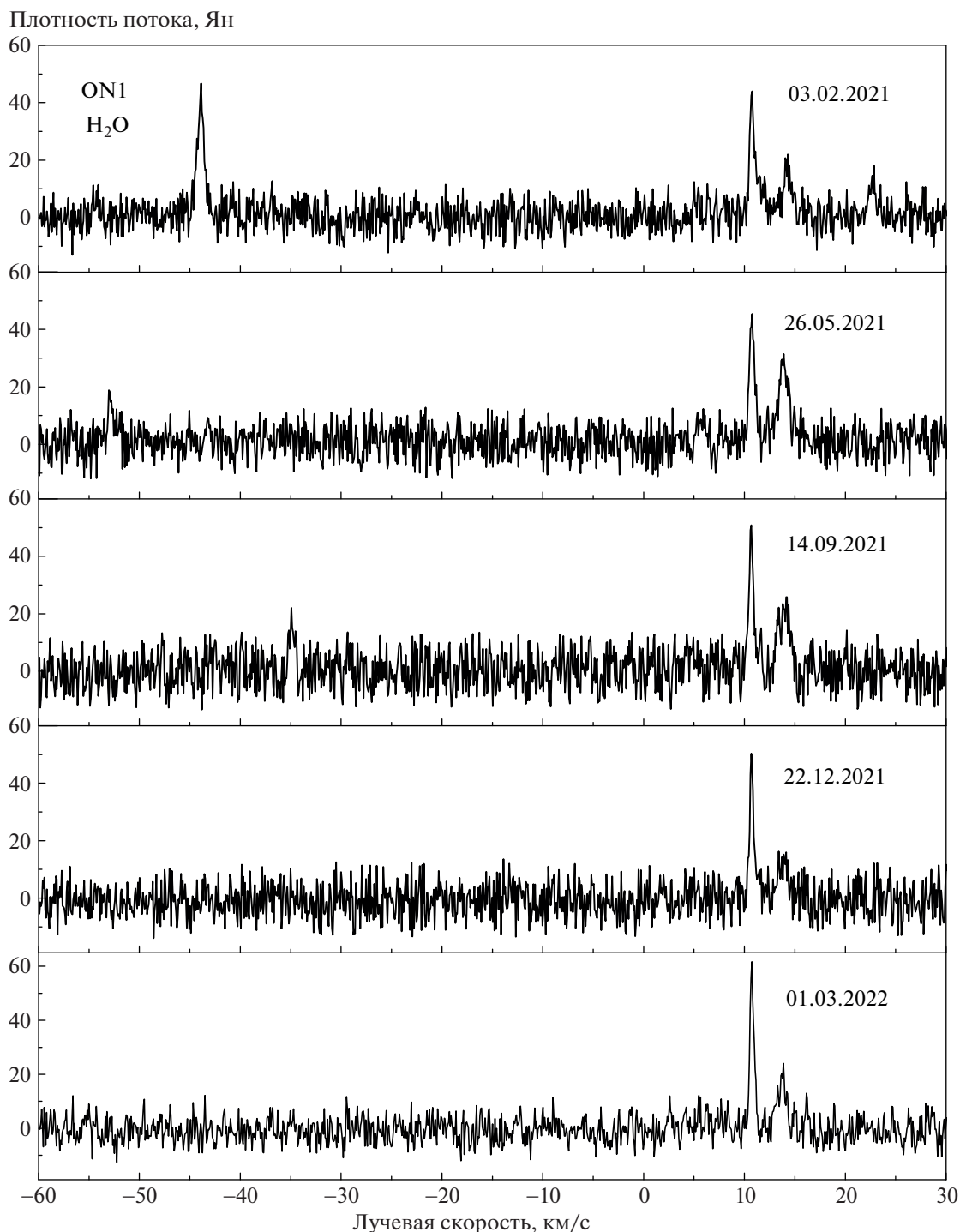


Рис. 4. Выборка спектров мазерного излучения  $\text{H}_2\text{O}$  в ON 1, полученных в 2021–2022 гг. на РТ-22 в Пушино.

личие от излучения в 1667 МГц, в линии 1612 МГц более низкоскоростная деталь сильно удалена в спектре от трех других.

Во всех обнаруженных деталях степень круговой поляризации выше степени линейной поляризации. Это свойство мазерного излучения ОН

характерно для большинства источников, связанных с областями звездообразования.

Параметры всех спектральных деталей в линиях 1665, 1667 и 1612 МГц приведены в табл. 1. В столбце 1 дан номер детали согласно рис. 1–3. Номерами со звездочкой отмечены зеемановские

**Таблица 1.** Параметры излучения отдельных деталей в линиях ОН

1 Номер детали	2 Частота, МГц	3 $V_{LSR}$ , км/с	4 $F$ , Ян		5 $m_C$	6 $m_L$	7 $\chi$ , °	8 $p$	9 $H_{  }$ , мГс	
			$RC$	$LC$						
										1
2	-3.0	0.41	0.12	0.55	0.51	-50	0.75			
3	3.40	0.30	1.71	-0.70	0.08	-15	0.71			
4	3.89	0.08	0.53	-0.74	0.14	58	0.75			
5*	4.56		1.16	-0.78	0.12	14	0.79	-0.22		
	4.69		1.14							
6	9.35	0.11	0.53	-0.66	0.62	62	0.91			
7	11.86	0.68	1.13	-0.25	0.48	-25	0.54			
8	12.77	21.0	1.32	0.88	0.10	62	0.87			
9*	13.14		1.38	0.62	0.34	52	0.71	-0.08		
	13.19	6.2								
10*	13.62	21.0		0.65	0.21	32	0.68	0.24		
	13.76		4.5							
11**	13.96	22.1	7.2	0.57	0.20	-20	0.60			
	14.14	22.4	14.5	0.22	0.33	-55	0.40			
12*	15.03	0.27		-0.77	0.16	15	0.79	0.07		
	15.07		2.04							
13	15.54	4.0	0.1	0.95	0.20	-15	0.97			
14	15.94	0.55	7.9	-0.87	0.12	14	0.88			
15	16.38	4.3	36.7	-0.79	0.12	20	0.81			
16	16.59	0.7	5.0	-0.75	0.10	24	0.76			
17	1667	13.74	0.28	0.12	0.33	0.33	-45	0.47		
18		14.17	2.93	0.36	0.79	0.27	20	0.83		
19*		14.46	0.42		-0.70	0.14	-70	0.71	0.42	
	14.61		2.21							
20	1612	0.24	0.29	0.04	0.76					
21		1.26	0.32	5.96	-0.90	0.21	-52	0.92		
22		13.67	4.28	0.21	0.90	0.09	67	0.91		
23		14.42	0.98	12.68	0.84	0.10	-40	0.85		

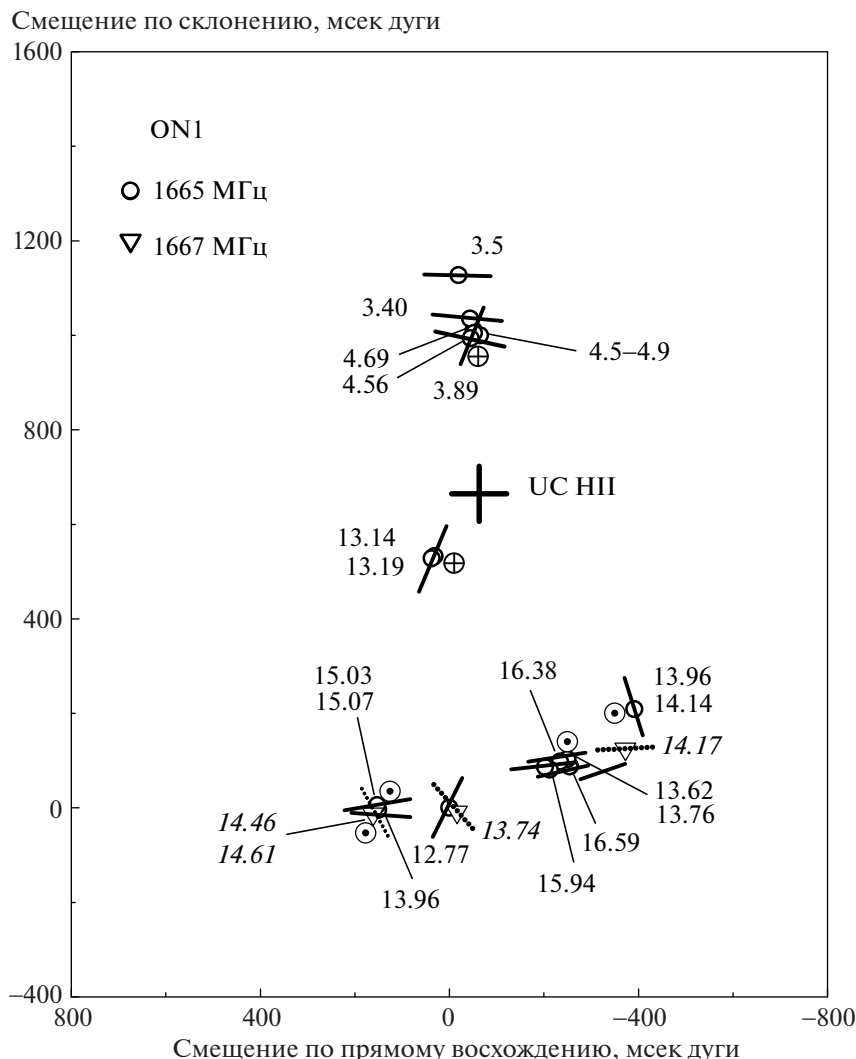
Примечание. Номерами со звездочкой отмечены зеемановские пары деталей. Деталь 11, отмеченная двумя звездочками, скорее является двойной, чем зеемановской парой.

пары деталей. Деталь 11, отмеченная двумя звездочками, скорее является двойной, чем зеемановской парой. В столбце 2 указана линия ОН, в которой проводились наблюдения. В столбцах 3–8 приведены лучевые скорости, плотности потоков (для правой  $RC$  и левой  $LC$  круговых поляризаций в отдельности), степень круговой  $m_C$  и линейной  $m_L$  поляризаций, позиционный угол  $\chi$  линейной поляризации, степень полной поляризации  $p$  и величины продольного магнитного поля  $H_{||}$  соответственно. Положительное значение соответ-

ствует полю, направленному от наблюдателя, а отрицательное – к наблюдателю.

### 3.2. Зеемановские пары

По смещению деталей одного вида круговой поляризации относительно другого (зеемановское расщепление) мы выделили шесть таких пар: пять в линии 1665 МГц и одну в линии 1667 МГц (см. табл. 1). При этом мы учитывали совпадение положений компонентов  $RC$  и  $LC$  на карте согласно работе [9].



**Рис. 5.** Карта расположения мазерных пятен в области ON 1. Нанесены все отождествленные с нашими наблюдениями детали в линиях 1665 (светлые кружочки) и 1667 МГц (светлые треугольники). Положения деталей взяты из работы [9]. Большим крестом показано положение центра источника континуума на 8.4 ГГц [4]. Прямым шрифтом указаны лучевые скорости деталей в линии 1665 МГц, а курсивом – в линии 1667 МГц. Отрезками сплошных прямых линий показаны векторы поперечного магнитного поля для деталей в линии 1665 МГц, а отрезками пунктирных линий – для деталей в линии 1667 МГц. Символом крестик в кружочке обозначено продольное магнитное поле, направленное от наблюдателя, а точкой в кружочке – поле, направленное к наблюдателю.

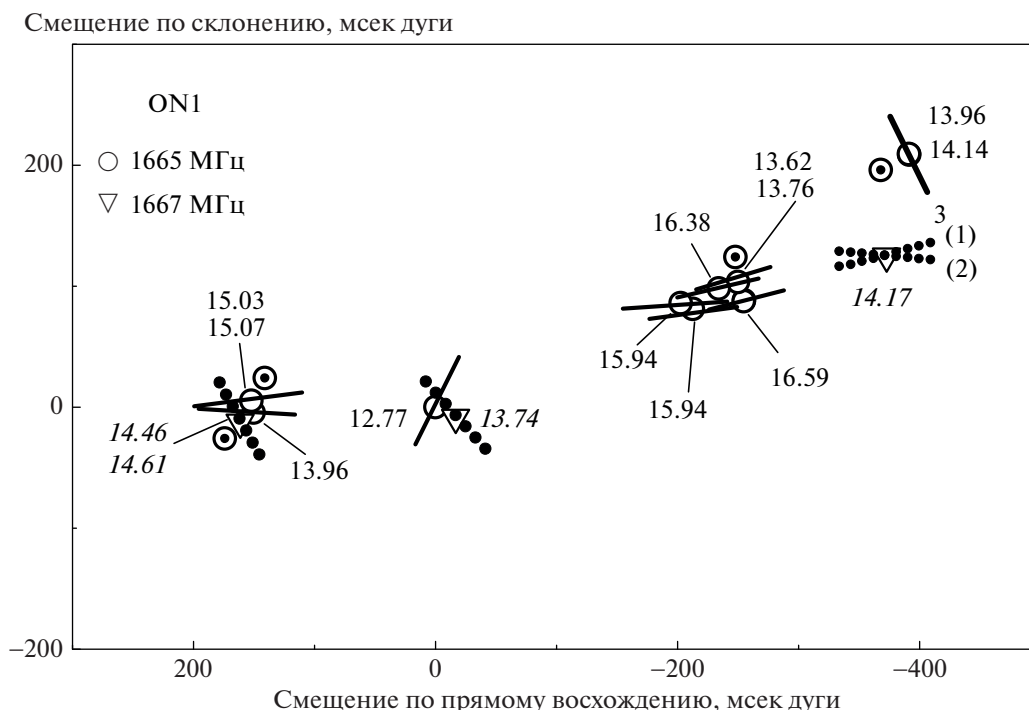
Используя высокую чувствительность и высокое разрешение по лучевой скорости для некоторых слабых деталей, мы обнаружили слабое продольное магнитное поле. Например, для детали 12 при плотности потока около 2 Ян величина  $H_{\parallel}$  составляет 0.07 мГс. Максимальная величина  $H_{\parallel} = 0.42$  мГс была обнаружена в линии 1667 МГц у детали 19 с расщеплением 0.15 км/с.

Для деталей, расположенных в центре и на севере UC III области, продольное магнитное поле направлено от наблюдателя, а на юге области – к наблюдателю.

### 3.3. Карта с мазерами ON

На рис. 5 изображена карта области ON 1, где находятся мазерные конденсации ON. Карта построена по данным Фиша и др. [9]. Нанесены те мазерные детали, с которыми отождествлены наблюдаемые нами спектральные детали настоящей работы. Приведены лучевые скорости деталей. Отрезками сплошных прямых линий показаны векторы поперечного магнитного поля  $H_{\perp}$  для деталей в линии 1665 МГц, а отрезками пунктирных линий – для деталей в линии 1667 МГц. Отметим, что векторы  $H_{\perp}$  перпендикулярны векторам позиционного угла  $\chi$ . Символом крестик в кружочке обозначено продольное магнитное по-





**Рис. 6.** Фрагмент карты в увеличенном масштабе, показанной на рис. 5. Обозначения те же. Для детали на скорости 14.17 км/с (1667 МГц) показаны векторы на две эпохи наблюдений: 18 февраля (1) и 3 декабря 2021 г. (2).

ле  $H_{\parallel}$ , направленное от наблюдателя, а точкой в кружочке – поле, направленное к наблюдателю. Величина магнитного поля приведена в столбце 9 табл. 1.

Большой крестик показывает положение центра сверхкомпактной области НП (УС Н II) согласно наблюдениям Аргон и др. [4] на частоте 8.4 ГГц. Центр карты (0; 0) соответствует координатам:  $\alpha_{2000} = 20^{\text{h}}10^{\text{m}}09.05^{\text{s}}$ ,  $\delta_{2000} = 1^{\circ}31'35.2''$ . На рис. 6 дан фрагмент карты в увеличенном масштабе. Обозначения те же, что на рис. 5. Для самой сильной детали в линии 1667 МГц ( $V_{\text{LSR}} = 14.17$  км/с) показаны два вектора: из наблюдений 18 февраля (1) и второй из наблюдений 3 декабря 2021 г. (2). Векторы поперечного магнитного поля ориентированы, в основном, вдоль дуги (верхняя и нижняя части области). Имеется некоторая закономерность в распределении лучевых скоростей деталей: мазерные детали с более низкими лучевыми скоростями расположены в северной части области, с более высокими – в южной.

Выделяются три компактные скопления мазерных пятен. Одно из них находится в северной части области, а два в южной. Обнаруживается общая тенденция ориентации поперечного магнитного поля вдоль дуги, расположенной на периферии области УС Н II. В некоторых мазерных деталях наблюдается отклонение вектора магнит-

ного поля от общего направления. Это может быть, например, в случае, когда мазерные детали пространственно разнесены.

Согласно Фишу и др. [10] в одном крайнем случае (например, W75 N) обнаруженные компоненты и углы положения поляризации мазерных пятен показывают некоторую упорядоченную структуру (см. также [13, 14]). В противоположном случае (напр., W51 e1/e2) линейная поляризация почти не обнаруживается, и происходит частичная деполяризация. Типичный источник обладает свойствами, промежуточными между этими двумя крайностями, без четкой закономерности в распределении позиционных углов поляризации. Исследование таких источников представляет научный интерес.

### 3.4. Переменность мазерного излучения

Мониторинг мазера  $H_2O$  ON 1 показал, что переменность мазерной активности имеет долгопериодическую составляющую с периодом около 9 лет [12]. Экстраполяция показывает, что мазерное излучение водяного пара в 2021 г. находилось в минимуме своей активности. Это также подтверждается непосредственно из наблюдений  $H_2O$ , проведенных на РТ-22 в Пушино (см. рис. 4). На этом рисунке приведена выборка из пяти спектров  $H_2O$ , полученных с февраля 2021 г. по март 2022 г. Видно, что число деталей в спектре

постепенно уменьшалось. Интегральный поток при этом к концу 2021 г. уменьшился с 144 до 42 Ян · км/с, что является абсолютным минимумом за все время нашего мониторинга ON1. Основная группа мазерных деталей находится в интервале лучевых скоростей 4–18 км/с и ассоциируется с северным WMC 1 и южным WMC 2 скоплениями мазерных пятен.

Таким образом, величина мазерного излучения связана с активностью звезд двойной системы в ON 1, одной из которых является звезда в UC H II. С ней непосредственно связаны мазерные детали (конденсации) гидросила.

Самые значительные изменения мазерного излучения ON с февраля до декабря 2021 г. произошли с деталью 14.17 км/с. Плотность потока в правой круговой поляризации увеличилась с 2.9 до 4.2 Ян. Степени круговой и линейной поляризации практически сохранились, а вектор поперечного магнитного поля изменил свое направление с +20° до –10° (см. рис. 6). Изменение параметров излучения остальных деталей в линии 1667 МГц было менее существенным.

Представляет интерес исследование переменности поляризационных параметров деталей (особенно угла  $\chi$ ) в линии 1665 МГц, где наблюдается большое число эмиссионных деталей. Такие исследования позволят дать информацию о структуре магнитного поля об области UC H II.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перечислим основные результаты, полученные в настоящей работе из поляризационных наблюдений в Нансэ (Франция) области активного звездообразования ON 1 в линиях молекулы OH на длине волны 18 см.

– Проведено пространственное отождествление спектральных деталей OH в линиях 1665 и 1667 МГц с мазерными пятнами (конденсациями) на VLBI карте по данным Фиша и др. [9].

– Обнаружено излучение от неизвестных ранее спектральных деталей в главной линии 1665 МГц на лучевых скоростях –2.98, 9.35 и 11.8 км/с, что не поддерживает модель, в которой северная и южная группы мазеров находятся на концах вращения.

– Найдено пять зеемановских пар: четыре в линии 1665 МГц и одна в линии 1667 МГц.

– Векторы поперечного магнитного поля  $H_{\perp}$  ориентированы, в основном, вдоль дуги (в верхней и нижней частях UC H II области).

– Векторы продольного магнитного поля в северной и центральной частях UC H II области

ориентированы от наблюдателя, а в южной – к наблюдателю.

Мониторинг мазерного излучения OH в ON 1 важен тем, что позволяет проследить за эволюцией структуры магнитного поля. Важно установить, какой процесс происходит: развитие некоторых упорядоченных структур магнитного поля в источнике или частичная деполяризация.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам Радиоастрономической обсерватории в Нансэ (Франция) за большую помощь в проведении наблюдений по программе многолетнего мониторинга источников мазерного излучения OH на Большом радиотелескопе в Нансэ (Франция). Авторы также благодарны сотрудникам радиоастрономической обсерватории в Пушкино за помощь в проведении наблюдений (мониторинг) в линии 1.35 см.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G. C. MacLeod, E. Jr. Scalise, S. Saedt, J. A. Galt, and M. J. Gaylard, *Astron. J.* **116**, 1897 (1998).
2. M. S. N. Kumar, M. Tafalla, and R. Bachiller, *Astron. and Astrophys.* **426**, 195 (2004).
3. X. W. Zheng, P. T. P. Ho, M. J. Reid, and M. H. Schneps, *Astrophys. J.* **293**, 522 (1985).
4. A. L. Argon, M. J. Reid and K. M. Menten, *Astrophys. J. Suppl.* **129**, 156 (2000).
5. Y. N. Su, S. Y. Liu, J. Lim, N. Ohashi, et al., *Astrophys. J. Letters* **616**, L39 (2004).
6. T. Nagayama, A. Nakagawa, H. Imai, T. Omodaka, and Y. Sofue, *Publ. Astron. Soc. Japan* **60**, 183 (2008).
7. D. Downes, R. Genzel, I. M. Moran, K. J. Johnston, et al., *Astron. and Astrophys.* **79**, 233 (1979).
8. J. Lim, M. Choi, and P. T. Ho, *ASP Conf. Ser.* **267**, 385 (2002).
9. V. L. Fish, M. J. Reid, A. L. Argon, and X. W. Zheng, *Astrophys. J. Suppl.* **160**, 220 (2005).
10. V. L. Fish and M. J. Reid, *Astrophys. J. Suppl.* **164**, 99 (2006).
11. В. И. Слыш, М. И. Пащенко, Г. М. Рудницкий, В. М. Витрищак, П. Колом, *Астрон. журн.* **87**(7), 655 (2010).
12. Е. Е. Лехт, В. В. Краснов, А. М. Толмачев, *Письма в Астрон. журн.* **40**, 611 (2014).
13. П. Колом, Н. Т. Ашимбаева, Е. Е. Лехт, М. И. Пащенко, Г. М. Рудницкий, А. М. Толмачев, *Астрон. журн.* **98**(1), 50 (2021).
14. Н. Т. Ашимбаева, Е. Е. Лехт, М. И. Пащенко, В. В. Краснов, А. М. Толмачев, *Астрон. журн.* **99**(8), 628 (2022).