

УДК 524.527-77

## ЭВОЛЮЦИЯ МАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОН И H<sub>2</sub>O В ОБЛАСТИ АКТИВНОГО ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ IRAS 05358+3543 (S231)

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

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

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

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

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

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

Поступила в редакцию 27.04.2020 г.

После доработки 29.06.2020 г.

Принята к публикации 30.06.2020 г.

Представлены результаты наблюдений области звездообразования, расположенной в рукаве Персея и связанной с туманностью Шарплеса S231, в линиях молекул H<sub>2</sub>O на длине волны 1.35 см и ОН на длине волны 18 см, полученных на 22-м радиотелескопе в Пушино (Россия) и на Большом радиотелескопе в Нансэ (Франция) соответственно. Приведен каталог спектров мазерного излучения H<sub>2</sub>O за период с марта 2003 г. по март 2020 г. Переменность интегрального потока, вычисленного на основе мониторинга Фелли и др. (1987–2007 гг.) и нашего мониторинга (2003–2020 гг.), имеет квазициклический характер продолжительностью циклов от 4.3 до 7.7 г. В каждом цикле активности происходили вспышки мазерного излучения как одиночных, так и нескольких деталей. Среднее время роста и спада излучения вспышки составило  $0.30 \pm 0.02$  г. и  $0.35 \pm 0.02$  г. соответственно. Наблюдаемые дрейф и скачки лучевой скорости эмиссионных деталей H<sub>2</sub>O могут быть следствием воздействия на них ударных волн, возникающих при повышении активности протозвезды. Сложный характер переменности показывает, что среда генерации мазерного излучения H<sub>2</sub>O фрагментирована и в ней могут происходить мелкомасштабные турбулентные движения вещества. Мазерное излучение ОН наблюдалось нами в главных линиях 1665 и 1667 МГц и в спутной линии 1720 МГц. Обнаружено большое число эмиссионных деталей ОН и их переменность. Найдена одна зеемановская пара на  $-9.2$  км/с с небольшим расщеплением, при этом в период 2008–2020 гг. величина продольного магнитного поля монотонно уменьшалась от 0.24 до 0.10 мГс. Для трех самых интенсивных деталей вычислены степени линейной поляризации и позиционные углы. Обнаружена корреляция между активностью мазеров H<sub>2</sub>O и ОН.

DOI: 10.31857/S0004629920110018

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследуемые в настоящей работе мазерные источники H<sub>2</sub>O и ОН связаны с туманностью каталога Шарплеса S231 [1], где происходит процесс активного звездообразования. S231 является одной из четырех областей (S231, S232, S233 и S235), находящихся в гигантском молекулярном облаке G174+2.5. Расстояние до этого комплекса составляет около 1.8 кпс (см., напр., [2]). В этой области наблюдаются ИК-источник IRAS 05358+3543, СО биполярные потоки [2, 3], источники радио-континуума (см., напр., [4, 5]) и источники мазерного излучения СН<sub>3</sub>ОН, H<sub>2</sub>O и ОН. Болонет-

рическая светимость IRAS 05358+3543 составляет  $6300 L_{\odot}$ , что согласно [6] свидетельствует о том, что в этой области рождаются массивные звезды. В облаке имеются большие молекулярные сгустки. По оценкам Ладейщикова и др. [7] температура газа равна  $T \sim 16\text{--}30$  К, а плотность водорода  $(2.7\text{--}7.2) \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ .

Очень информативным для выявления крупномасштабной структуры гигантских молекулярных облаков являются исследования распределения СО, которые показывают общее распределение молекулярного газа в областях звездообразования. Согласно [2] пики излучения СО с синим (от

–30 до –21 км/с) и красным (от –12 до –6 км/с) смещениями совпадают между собой и совпадают с положением IRAS 05358+3543, что является неочевидным для биполярной структуры. Это возможно, если биполярный поток расположен вдоль луча зрения. Размер области излучения СО составляет несколько угловых минут в поперечнике.

Интерферометрические наблюдения на длине волны 2.6 мм выделили три пылевые конденсации (mm1, mm2 и mm3) размером  $9'' \times 4''$  ( $\approx 17100 \times 7200$  а.е.) и выявили, по крайней мере, три потока [3]. Самый большой из них имеет протяженность 1 пс и массу  $M > 10M_{\odot}$ . Кумар и др. [8] и Ханзаян и др. [9] наблюдали излучение молекулы  $H_2$  с узкой полосой на длине волны 2.2 мкм и также показали присутствие многочисленных потоков.

Исследования области IRAS 05358+3543 на различных длинах волн с высоким пространственным разрешением показали, что она имеет сложную структуру. Наблюдения Леурини и др. [10] на 338 ГГц с разрешением  $0.6''$  (линейное разрешение 1100 а.е.) показали, что mm1 имеет два пика излучения, т.е. распадается на два источника: mm1a и mm1b. Расстояние между ними составляет 1700 а.е. Источник mm2 состоит из нескольких субисточников, но только один из них (mm2a) является протозвездой. По мнению Леурини и др. [10], остальные субисточники связаны с потоками. Источник mm3 является единственным компактным ядром в области. Он самый холодный и наименее активный и пространственно неразрешенный [11].

На основе результатов наблюдений в линиях сложных молекул ( $CH_3OH$ ,  $CH_3CN$ ,  $H_2CS$ ,  $C^{34}S$  и др.) Леурини и др. [10] предположили, что mm1 может содержать массивный околозвездный диск с температурой ядра  $T \sim 220$  К. Другие источники находятся на более ранней стадии эволюции. Наименее активный источник, mm3, может быть беззвездным массивным ядром, так как оно холодное ( $T < 20$  К), и может быть большим резервуаром аккреционного вещества ( $M \sim 19M_{\odot}$ ).

Вблизи mm1a находится мазер метанола II класса. VLBI наблюдения этого мазера на частоте 6.7 ГГц, которые выполнили Миньер и др. [12], показали, что спектр излучения состоит из большого числа эмиссионных деталей в диапазоне лучевых скоростей от –15 до –11 км/с. Мазерные пятна группируются в три скопления: А, В и С. Скопление А образует вытянутую структуру протяженностью 40 mas (mas – milli arc second, угловая миллисекунда), что соответствует 100 а.е., с градиентом лучевой скорости вдоль нее.

Об открытии мазера  $H_2O$  в направлении S231 сообщалось в ряде работ [13–15]. Последующие

наблюдения 19 февраля 1988 г. показали, что спектр излучения  $H_2O$  состоял из трех деталей: одной сильной на –16.5 км/с с потоком 130 Ян и двух более слабых на –17.8 и –8.6 км/с с потоками 16 и 5 Ян соответственно. Тофани и др. [16] наблюдали мазерное излучение  $H_2O$  от четырех источников, находящихся внутри области размером порядка  $3''$ . В 1996 г., используя VLBA, Мигенес и др. [17] в направлении S231 наблюдали два компонента на лучевых скоростях –16.4 и –14.7 км/с, разделенных расстоянием 2.4 mas. Положения главных компонентов в наблюдениях Тофани и Мигенеса совпадают. Впоследствии Тринидад и др. [18] обнаружили переменность мазера  $H_2O$ . С 1987 г. по 2007 г. Фелли и др. [19] выполнили 20-летний обзор мазера  $H_2O$  в S231.

Мазерное излучение OH в S231 обнаружили Аргон и др. [20]. В 1992 г. в направлении S231 они наблюдали четыре детали в линии 1665 МГц в левой круговой поляризации. Наблюдения в обеих главных линиях OH 1665 и 1667 МГц в обеих круговых поляризациях выполнили Эдрис и др. [21] на радиотелескопе в Нансэ в 2002–2003 гг.

В предлагаемой работе наблюдения были выполнены нами также на радиотелескопе в Нансэ. Таким образом, имеется ряд однородных наблюдений, что представляет большой интерес.

## 2. АППАРАТУРА И НАБЛЮДЕНИЯ

Мы проводили наблюдения мазерного излучения  $H_2O$  и OH в области активного звездообразования IRAS 05358+3543 и, в частности, в направлении одной из сверхкомпактных областей НП S231. Поэтому в дальнейшем мы будем использовать именно это название исследуемого нами источника.

Мониторинг мазерного источника водяного пара на длине волны 1.35 см в S231 проводится нами с марта 2003 г. на радиотелескопе РТ-22 в ПРАО (Россия) в направлении:  $\alpha_{(2000)} = 05^h 39^m 12.9^s$ ,  $\delta_{(2000)} = 35^\circ 45' 51''$ . Ширина диаграммы направленности антенны на 1.35 см равна  $2.6'$ . Чувствительность телескопа составляет 25 Ян/К для точечного источника с неполяризованным излучением. Шумовая температура системы менялась от 130 до 250 К в зависимости от условий наблюдений. Спектры были исправлены за поглощение в земной атмосфере.

Регистрация сигнала в 2003–2005 гг. осуществлялась 128-канальным анализатором спектра фильтрового типа с разрешением по лучевой скорости 0.101 км/с, а с середины 2005 г. – 2048-канальным автокоррелятором с разрешением 0.0822 км/с. Точность измерения лучевой скорости находилась в пределах 20–25 м/с.

Также были выполнены наблюдения в линиях гидроксила на длине волны 18 см в 2008, 2014, 2015 и 2020 г. на радиотелескопе в Нансэ (Франция). Чувствительность телескопа составляет 1.4 Ян/К для точечного источника с неполяризованным излучением. Шумовая температура системы составляла от 35–60 К в зависимости от условий наблюдения. При наблюдениях источников со склонением  $\delta = 35^\circ$  диаграмма направленности телескопа на данной волне равна  $3.5' \times 20'$  по прямому восхождению и склонению соответственно.

Спектральный анализ проводится автокорреляционным спектроанализатором из 8192 каналов. Спектроанализатор был разделен на восемь батарей по 1024 канала. Проводились наблюдения двух круговых поляризаций (*RC* и *LC*) и четырех ориентаций линейной поляризации (*L0/L90* и *L45/L135*) с поворотом облучателя на  $45^\circ$ , т.е. шесть мод поляризации. Это позволило определить все параметры Стокса (*I*, *Q*, *U* и *V*).

В наших наблюдениях 2008 г. частотная полоса анализа каждой батареи была равна 781.25 кГц, частотное разрешение 763 Гц. Это соответствует разрешению по лучевой скорости 0.137 км/с. В наблюдениях 2014, 2015 и 2020 г. разрешение было вдвое выше, 0.068 км/с. Погрешность определения лучевой скорости не превышала 15 м/с.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Результаты наблюдений мазерного излучения  $H_2O$  на длине волны 1.35 см (каталог спектров) с апреля 2003 г. по февраль 2020 г. представлены на рис. 1–6. По горизонтальной оси отложена скорость относительно местного стандарта покоя, а по вертикальной оси плотность потока в Янских. На каждой панели двойными вертикальными стрелками показана цена деления и приведены эпохи наблюдений. Полный интервал лучевых скоростей наблюдений находился в интервале от  $-97$  до  $70$  км/с. На рис. 1–6 приведены центральные части спектров, где наблюдалось мазерное излучение.

На рис. 7 представлены результаты наблюдений в главных линиях ОН на длине волны 18 см в круговых поляризациях. Основные детали пронумерованы, а вблизи самых интенсивных деталей приведены значения степени круговой поляризации. Знак “–” означает, что преобладает излучение в левой круговой поляризации. Для лучшего восприятия переменности излучения все графики приведены в одном масштабе по обеим координатам. Приведены эпохи наблюдений. Отрезками вертикальных линий показаны положения деталей согласно [20].

В октябре 2014 г. мы также провели наблюдения в сателлитной линии 1720 МГц в обеих круго-

вых и линейной поляризациях. Излучение было обнаружено только в левой круговой поляризации (см. рис. 8). Удалось выделить пять слабых деталей с потоками от 80 до 120 мЯн.

## 4. ДИСКУССИЯ

Изучение литературы по источнику S231 показало, что исследования мазеров водяного пара и гидроксила в этой области оказались недостаточными. Отсутствуют карты с расположением мазерных пятен как водяного пара, так и гидроксила. Можно назвать лишь карты с расположением четырех мазерных пятен ОН, полученных Аргон и др. [20] в 1992 г. Отсутствуют поляризационные измерения мазерного излучения. В связи с этим мы большое внимание уделили исследованию поляризации излучения ОН.

### 4.1. Интегральный поток мазера $H_2O$

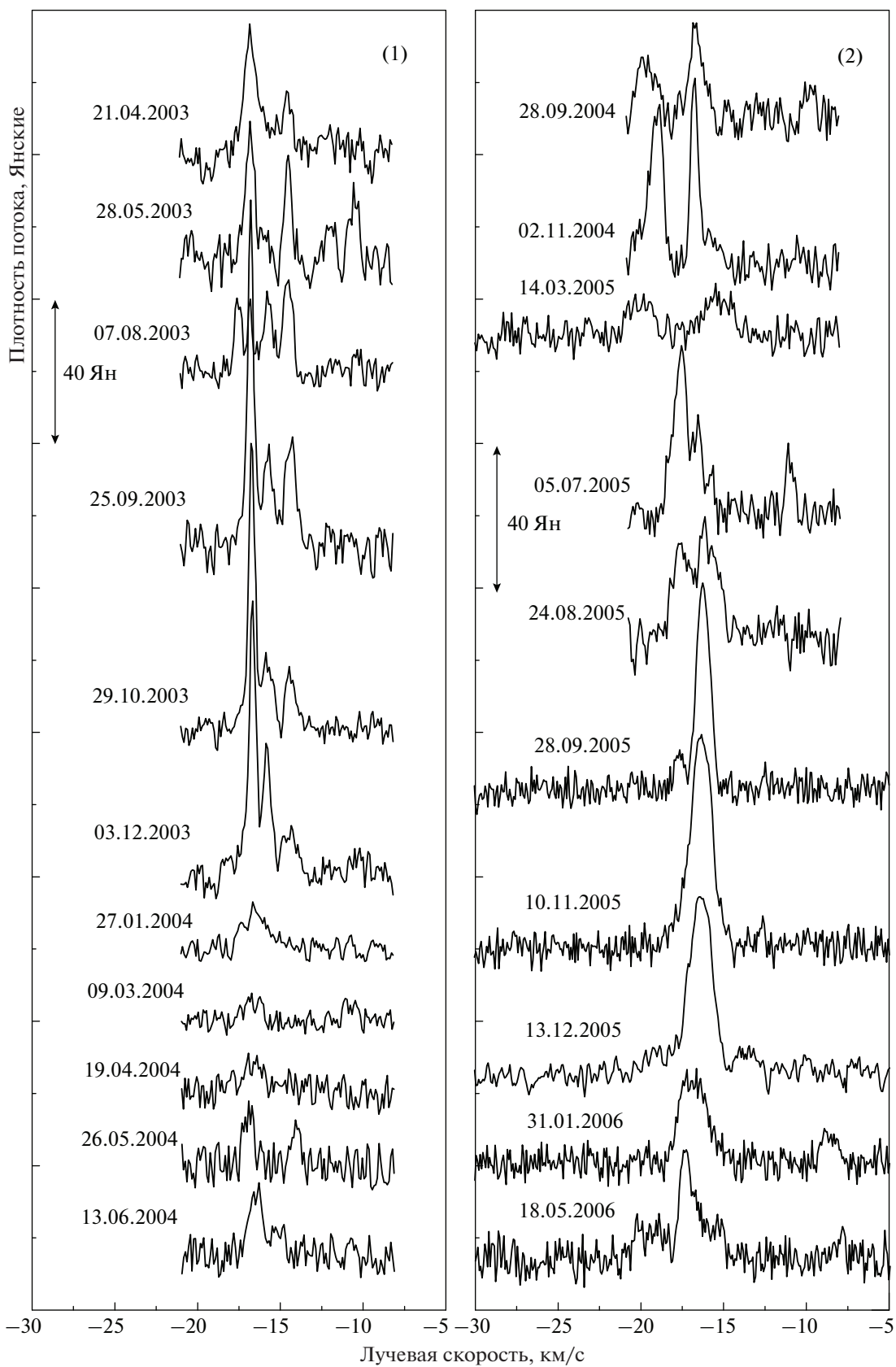
Переменность интегрального потока мазерного излучения  $H_2O$  в направлении S231 за все время его наблюдений с марта 1987 г. по март 2020 г. показана на рис. 9. Здесь включены результаты мониторинга Фелли и др. [19], полученные в 1987–2007 гг. и нашего мониторинга с апреля 2003 г. по март 2020 г. Переменность имеет циклический характер. Циклы неравнозначные как по уровню излучения, так и по продолжительности, и разделены между собой глубокими минимумами. Минимумы отмечены отрезками вертикальных линий. Два минимума, имеющие наибольшую продолжительность, помечены более тонкими линиями.

Чтобы весь интервал наблюдений разделить на циклы активности, необходимо также учитывать уровень мазерного излучения. По этим двум критериям скорее всего можно выделить пять полных циклов мазерной активности  $H_2O$ . Первый был неполным, наблюдался только на нисходящей ветви. Можно принять, что циклы активности разделены отрезками жирных линий и их продолжительность составляет от 4.3 до 7.7 года.

В каждом цикле активности имеются вспышки излучения отдельных эмиссионных деталей. Такой характер переменности мазерного излучения  $H_2O$  может быть следствием нестационарного процесса формирования протозвезды на ранней стадии ее эволюции. При этом аккреция и истечение вещества из протозвезды могут иметь квазипериодический характер.

### 4.2. Эволюция основных деталей $H_2O$

Переменность лучевой скорости и плотности потока эмиссионных деталей  $H_2O$  показана на рис. 10. Она имеет довольно сложный характер.



**Рис. 1.** Спектры мазерного излучения H<sub>2</sub>O в S231 в 2003–2006 гг. Двухсторонними вертикальными стрелками показана цена деления. Приведены эпохи наблюдений.

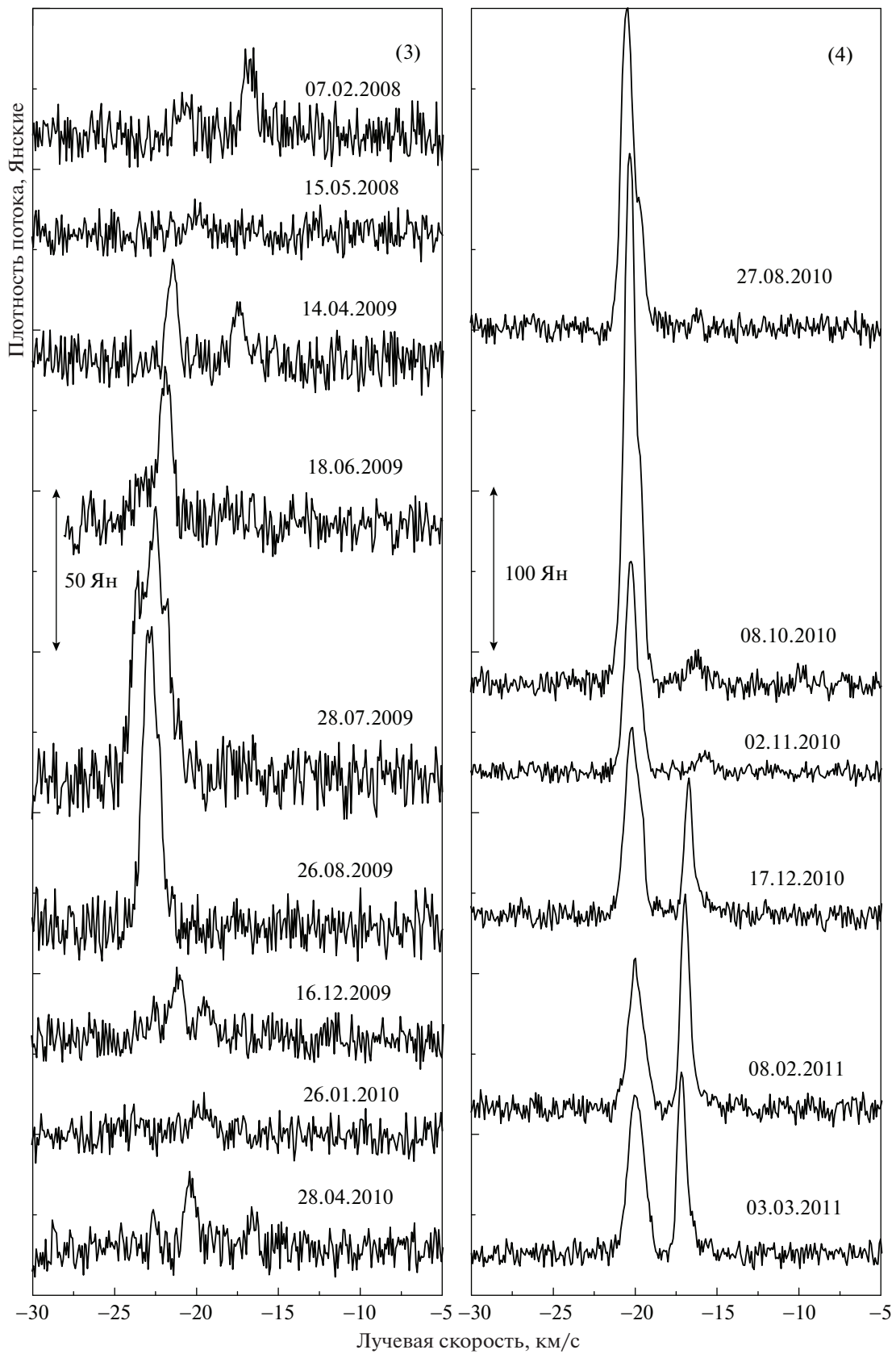


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для 2008–2011 гг.

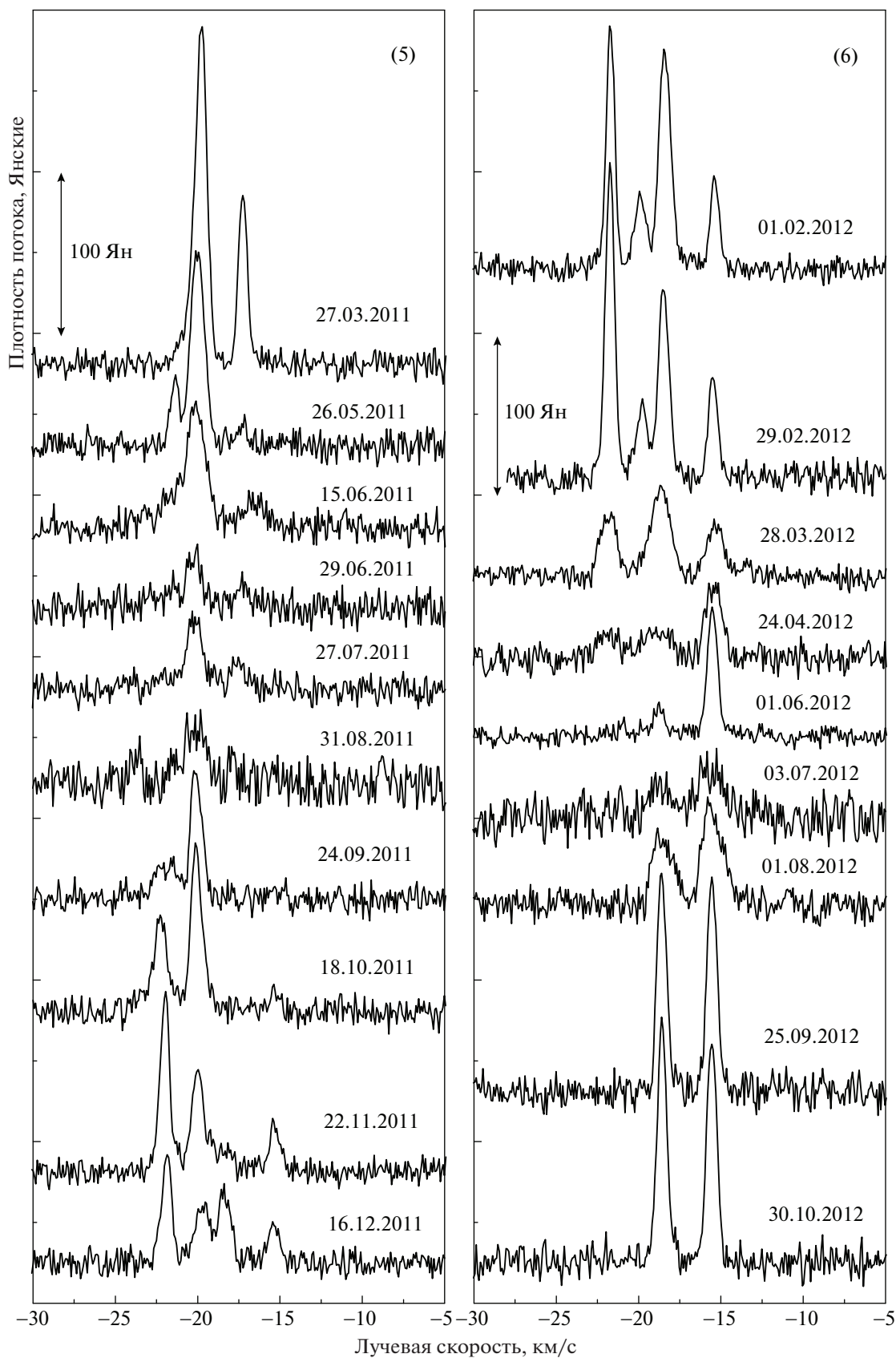


Рис. 3. То же, что на рис. 1, для 2011–2012 гг.

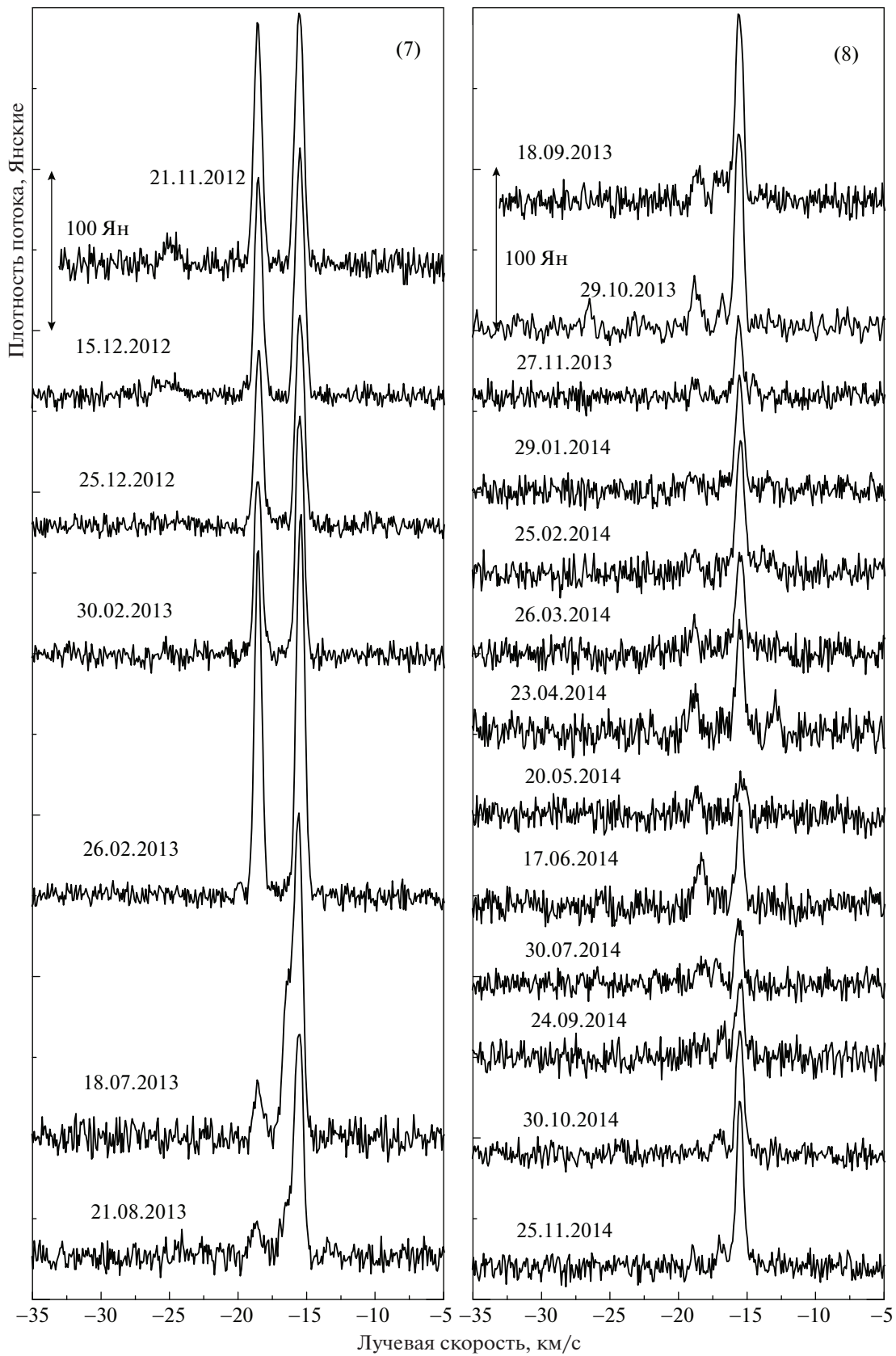


Рис. 4. То же, что на рис. 1, для 2012–2014 гг.



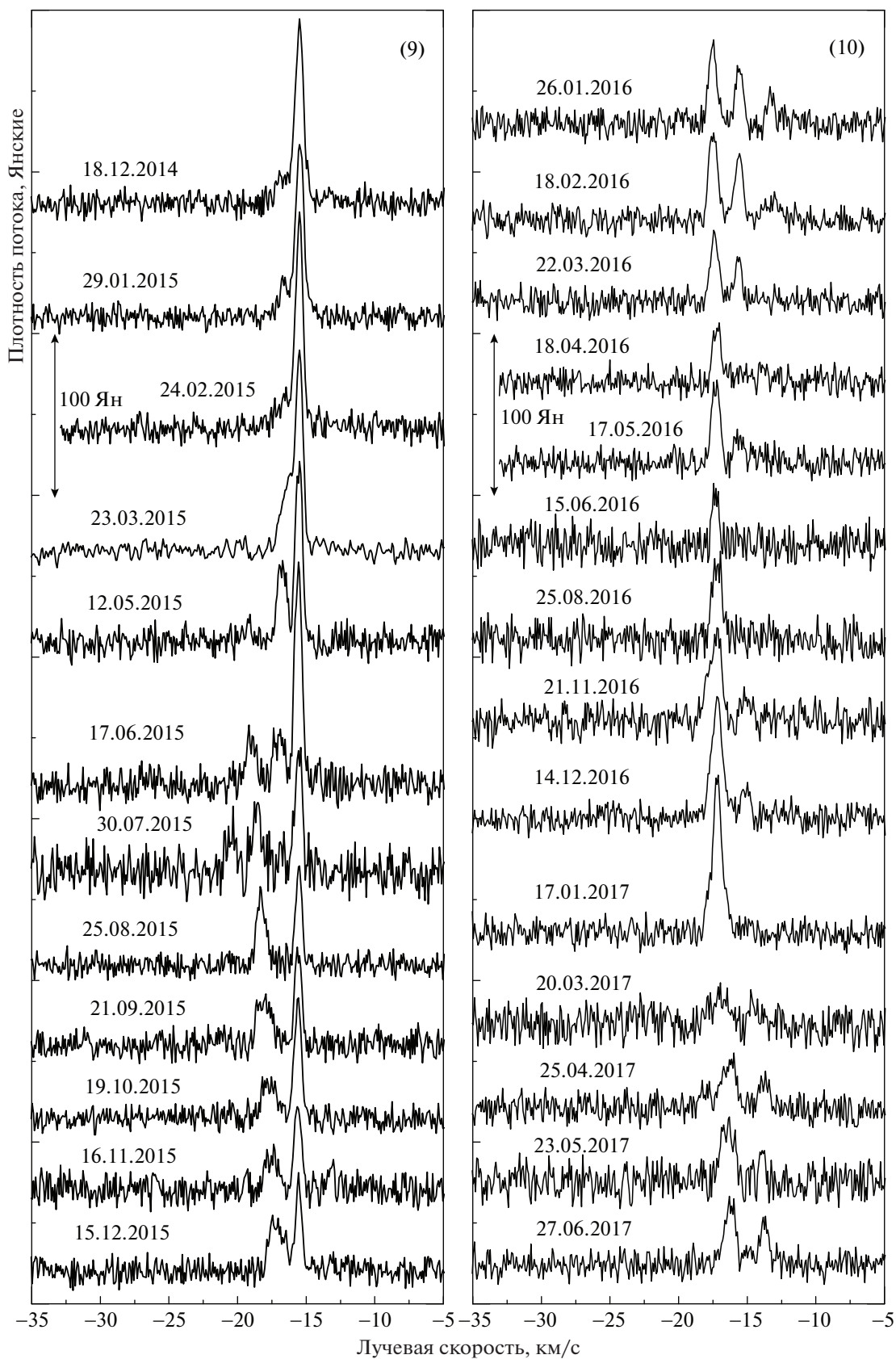


Рис. 5. То же, что на рис. 1, для 2014–2017 гг.



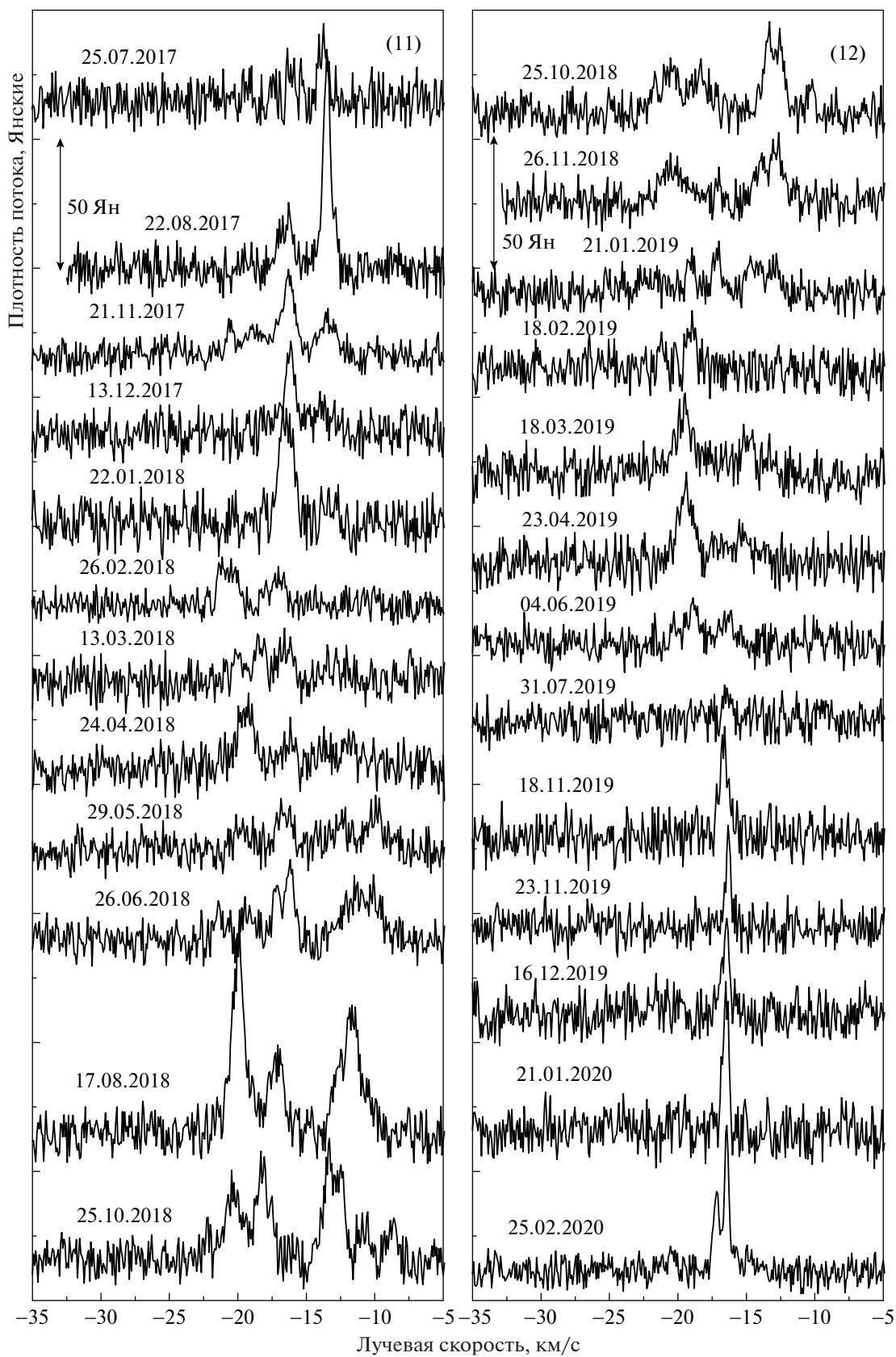
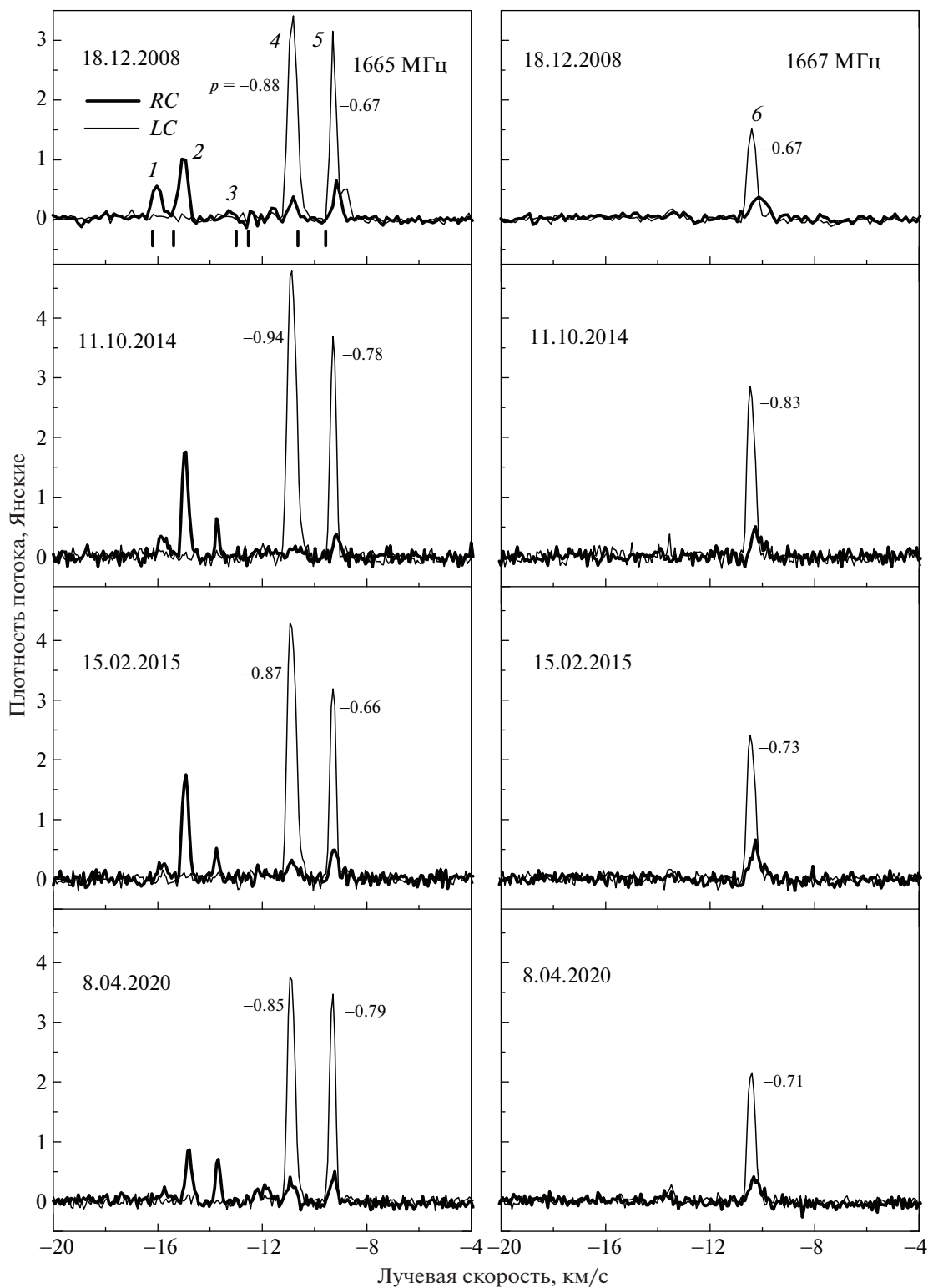
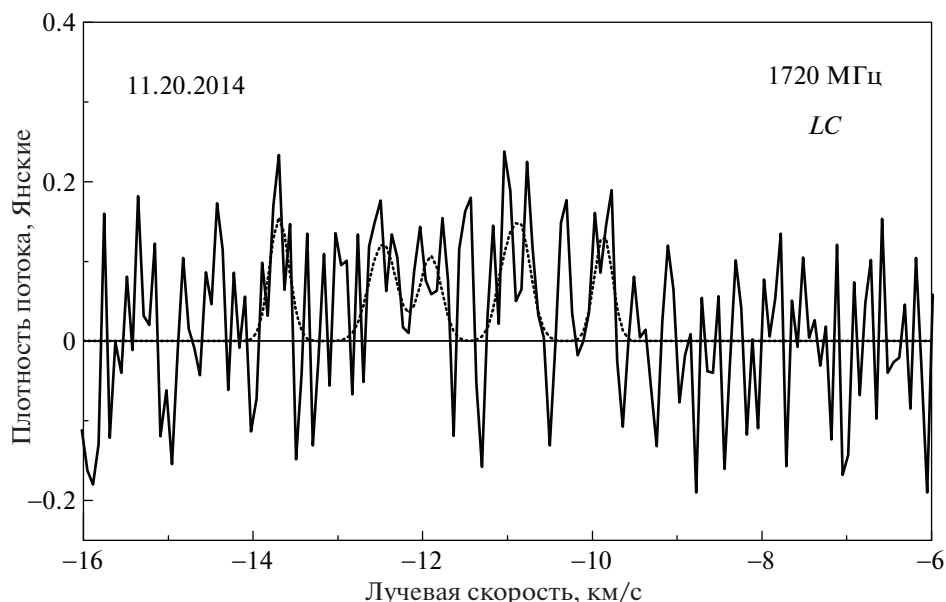


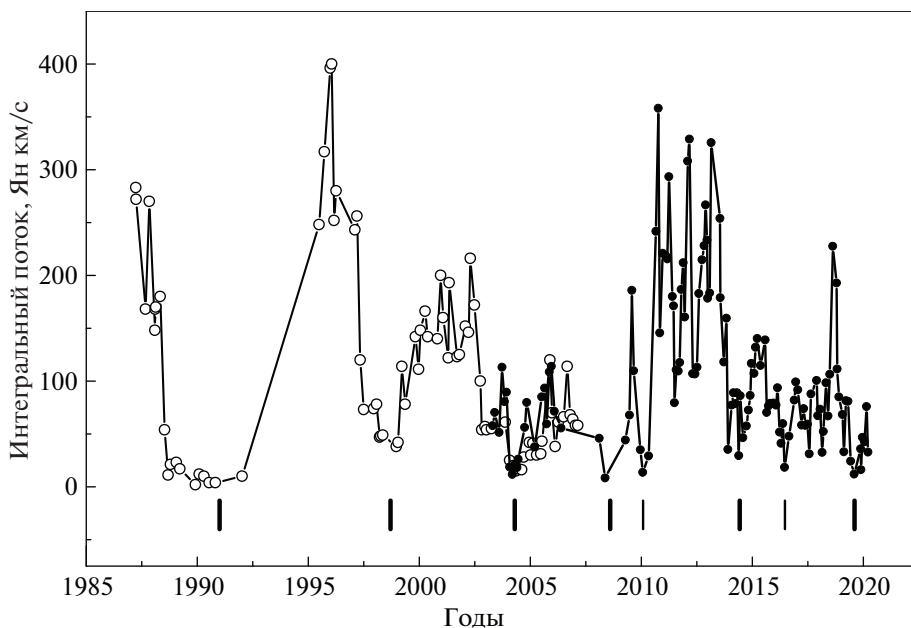
Рис. 6. То же, что на рис. 1, для 2017–2020 гг.



**Рис. 7.** Излучение ОН на длине волны 18 см в главных линиях в правой (жирная линия) и левой (тонкая линия) круговых поляризациях в направлении S231. Указаны эпохи наблюдений. Наиболее интенсивные детали пронумерованы. Для трех основных деталей даны степени круговой поляризации. Отрезками вертикальных линий на панели в левом верхнем углу показаны положения деталей согласно [20].



**Рис. 8.** Излучение ОН на длине волны 18 см в спутниковой линии 1720 МГц в левой круговой поляризации в направлении S231 на эпоху 11.10.2014. Пунктирной линией вписаны гауссианы.



**Рис. 9.** Переменность интегрального потока мазерного излучения  $H_2O$ . Внизу отрезками вертикальных линий отмечены минимумы.

Выделено 13 основных деталей. Для удобства анализа они пронумерованы. На рис. 10б, в показана переменность плотности потока 13 выделенных деталей, которая хорошо подчеркивает вспышечный характер излучения большинства деталей. Как правило, время жизни мазерных деталей в активной фазе было небольшим, т.е. происходил

быстрый рост излучения и затем быстрое их высвечивание. Для некоторых деталей в одном цикле активности наблюдались две-три вспышки. Мы выделили 12 наиболее сильных вспышек. Продолжительность роста потока находится в интервале 0.15–0.47 г., а спада – в интервале 0.18–0.54 г. Причем чем меньше время роста излуче-

ния, тем меньше время высвечивания. Это может быть связано с геометрией мазерных конденсаций (например, размер конденсации). Видно, что вспышки кратковременные. Средняя продолжительность роста и спада потока составила  $0.30 \pm 0.02$  и  $0.35 \pm 0.02$  г. соответственно. Разница оказалась незначительной. Протяженность такой усредненной детали (мазерной конденсации) вычисляется по формуле:

$$l = \tau V_c,$$

где  $\tau$  — время роста потока до максимального значения,  $V_c$  — скорость ударной волны.

Наиболее типичной скоростью ударной волны принимается значение  $\sim 15$  км/с [22]. Тогда протяженность усредненной мазерной конденсации составит  $\sim 1$  а. е.

Из всех выделяется деталь 8. Время нахождения ее в активном состоянии составила 4.6 г. Лучевая скорость на протяжении всего этого времени менялась незначительно, в пределах 0.4 км/с. Наблюдались две вспышки излучения. Расстояние между максимумами составило 2.0 г. Рост и спад потока в первой вспышке были нелинейными. Лучше всего подходит экспоненциальный закон. Такой характер роста плотности потока свидетельствует о ненасыщенном режиме мазера. Во время второй вспышки был быстрый рост потока и линейный спад до нуля.

Дрейф излучения по лучевой скорости имеет почти для всех деталей. Самый большой дрейф,  $-1.6$  и  $1.35$  км/с, наблюдается у деталей 3 и 9а соответственно. Для деталей 1а, 4 (две вспышки), 5, 9б, 11 и 12 дрейф скорости почти одинаковый и находится в интервале  $0.36-0.74$  км/с.

В некоторых деталях нет плавного дрейфа, а имеются небольшие колебания или скачки скорости. Скачки скорости указывают на существование вытянутых структур и наличия в них градиента лучевой скорости. Колебания скорости могут быть связаны со структурами, в которых скорости неоднородностей распределены случайным образом.

Таким образом, наши исследования показали, что даже при небольшом времени нахождения эмиссионных деталей в активной фазе имеет место дрейф лучевой скорости. Это может быть связано с реальным изменением скорости вещества при воздействии на него ударных волн.

#### 4.3. Излучение гидроксила

Как мы отмечали в разделе 2, используемый нами метод наблюдений позволил определить все четыре параметра Стокса для всех линий:

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

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

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

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

Степень линейной поляризации и позиционный угол, а также степень круговой поляризации вычислялись по формулам:

$$p(L) = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}, \quad (1)$$

$$\chi = (180^\circ/2\pi) \arctg(U/Q), \quad (2)$$

$$p(C) = \frac{V}{I} = \frac{F(RC) - F(LC)}{F(RC) + F(LC)} \quad (3)$$

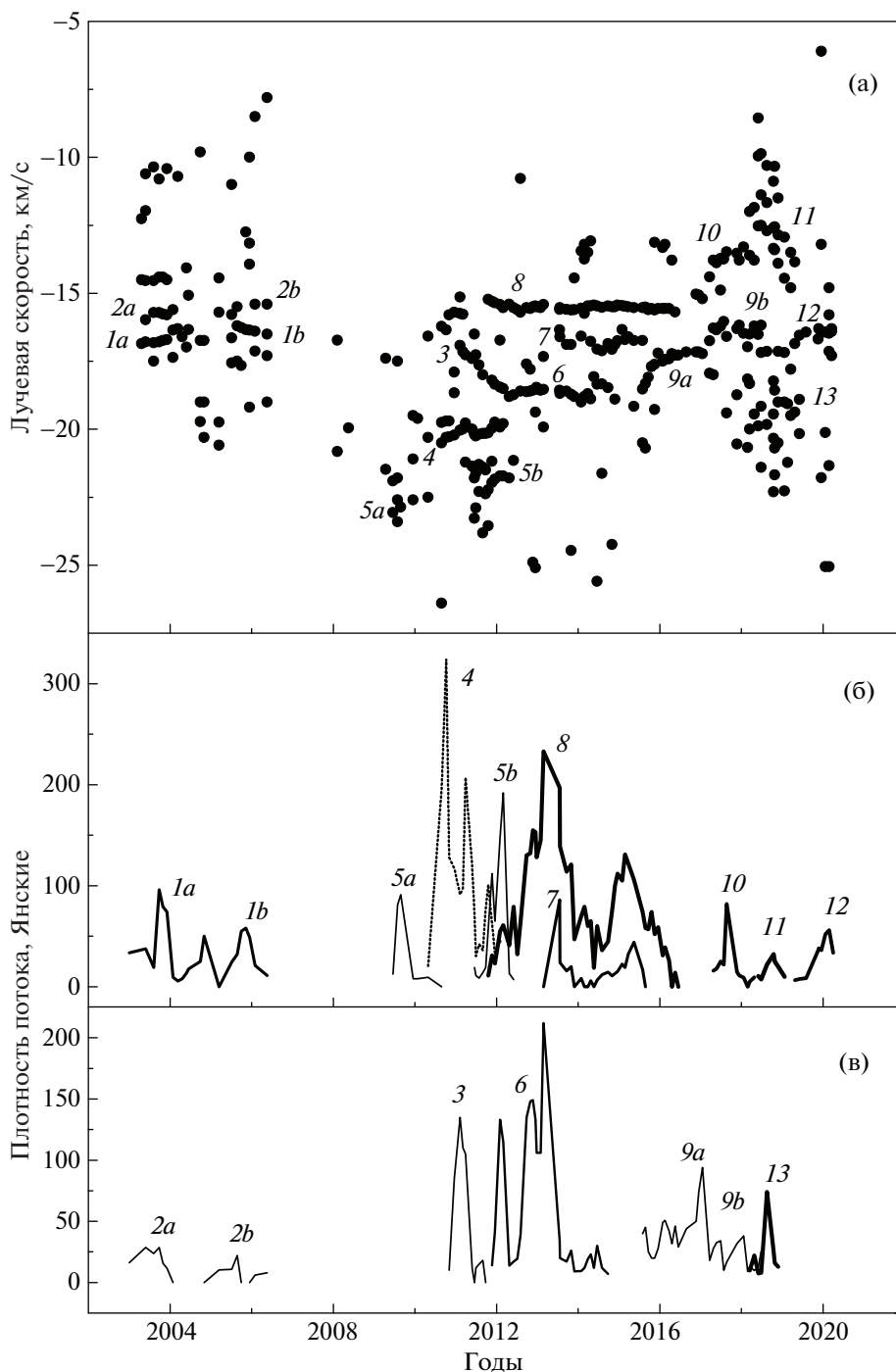
соответственно.

Сначала проведем анализ излучения, поляризованного по кругу. На рис. 7 показаны спектры в главных линиях 1665 и 1667 МГц в правой (жирные линии) и левой (тонкие линии) круговых поляризациях. Наблюдается переменность плотности потока деталей в обеих линиях и в обеих круговых поляризациях. При этом лучевые скорости основных деталей либо вовсе не изменялись, либо изменялись слабо. Это мы обсудим ниже. Нанесенные около наиболее интенсивных эмиссионных деталей степени круговых поляризаций вычислялись по формуле (3).

В линии 1665 МГц в спектрах правой круговой поляризации насчитывается восемь эмиссионных деталей в интервале лучевых скоростей от  $-22.5$  до  $-9.0$  км/с. В левой круговой поляризации излучение интенсивнее, но число деталей меньше (шесть) и диапазон лучевых скоростей уже, от  $-14.0$  до  $-8.5$  км/с. Переменность плотности потока шести основных эмиссионных деталей (см. рис. 7) показана на рис. 10а. Мы также включили результаты наблюдений 1992 г. [20] и 2002–2003 гг. [21]. Детали 1–3 имеют преобладающее излучение в правой круговой поляризации, а 4–6 — в левой.

В нижней части рис. 11б по шкале лучевых скоростей показаны положения всех наблюдаемых нами эмиссионных деталей в главных линиях 1665 и 1667 МГц в обеих круговых поляризациях и в спутниковой линии 1720 МГц в левой круговой поляризации. Взяты усредненные по всем наблюдениям лучевые скорости. Номерами отмечены детали, переменность которых показана в верхней части рисунка. Имеется хорошее совпадение лучевых скоростей большинства деталей в правой и левой круговых поляризациях в линиях 1665, 1667 и 1720 МГц.

Обращает на себя внимание прежде всего существование трех деталей, которые были достаточно интенсивными в 2008–2020 гг. Сравнение с наблюдениями Аргон и др. [20] показывает, что в 1992 г. мазер находился на более низком уровне активности и было меньше эмиссионных деталей, чем в наших наблюдениях. В то же время в

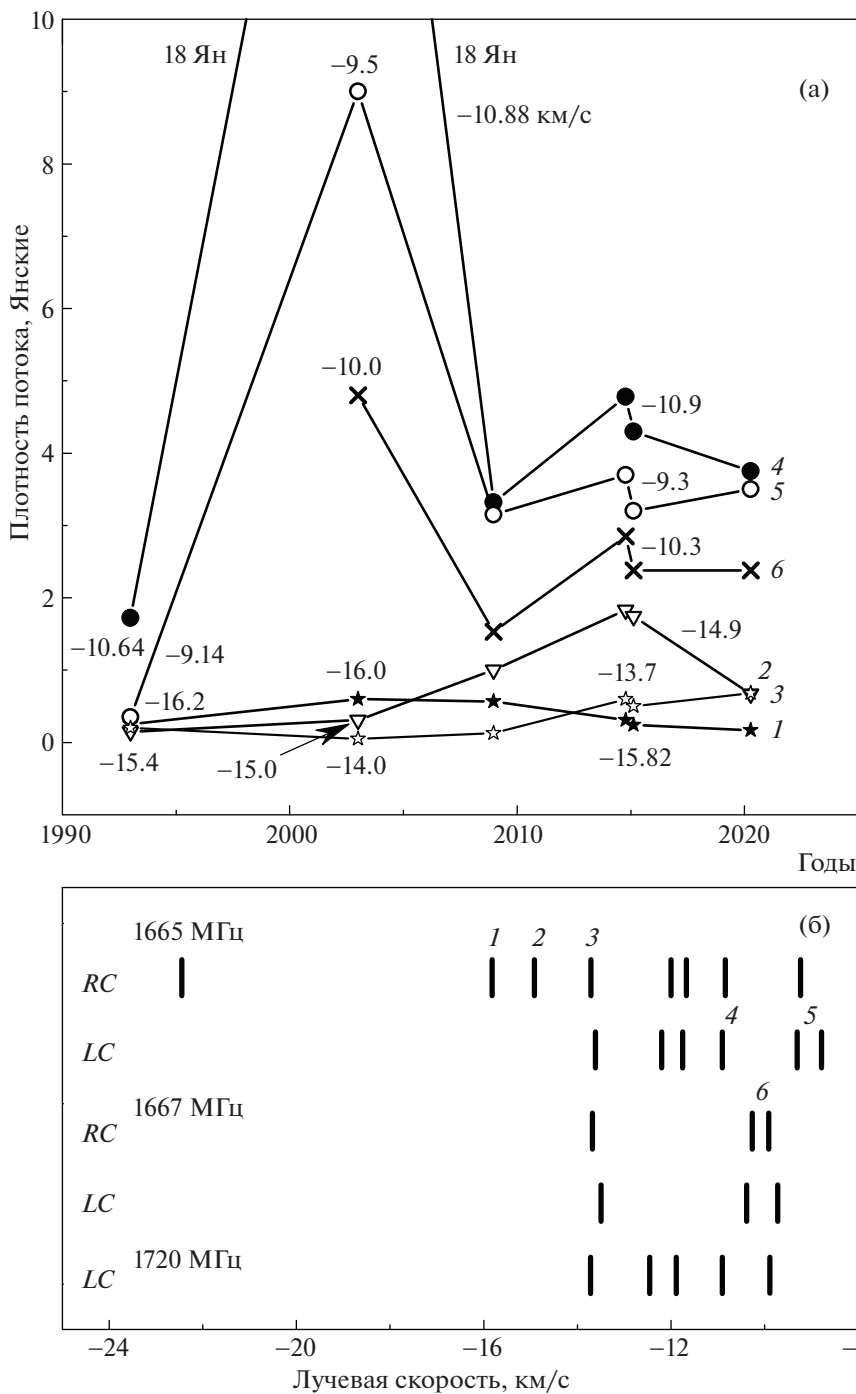


**Рис. 10.** Переменность лучевой скорости (а) и плотности потоков (б, в) эмиссионных деталей мазерного излучения  $H_2O$ . Основные детали пронумерованы.

1992 г. имелись слабые детали на лучевых скоростях  $-12.88$  и  $-12.53$  км/с, которые отсутствуют в спектрах 2002–2020 гг. Именно эти две детали и детали с номерами 4 и 5 были на карте, полученной Аргон и др. [20] на VLA. К сожалению, никаких других карт расположения мазерных конденсаций ОН в области S231 не имеется. VLA наблю-

дения, когда большое число эмиссионных деталей находится в активной фазе излучения, позволили бы выявить структуру мазерного источника ОН в S231.

Мы также заметили, что для детали 5 на  $V_{LSR} = -9.2$  км/с имеет место монотонное уменьшение разницы между скоростями излучения в



**Рис. 11.** Переменность излучения основных эмиссионных деталей мазерного излучения ОН. Указаны номера деталей (курсивом) согласно рис. 7 и их лучевые скорости в соответствующие эпохи. Точки на графике для 1992 и 2003 гг. взяты из работ [20] и [21] соответственно.

круговых поляризациях ( $V_{LSR}(RC) - V_{LSR}(LC)$ ) с  $-0.14$  км/с в 2008 г. до  $-0.06$  км/с в 2020 г. Можно предположить, что имеется одна мазерная конденсация и под воздействием продольного магнитного поля линия излучения расщепляется на два компонента (зеemanовское расщепление), ко-

торые имеют чисто круговую поляризацию противоположных направлений – правую и левую. Величина расщепления в линии 1665 МГц в продольном поле напряженности  $B$  составляет:

$$\Delta\nu = \frac{5 g_J \mu_0}{2 h} B,$$

**Таблица 1.** Параметры основных деталей в спектрах ОН в источнике S231

Эпоха наблюдений, день, мес, год	Линия, МГц	$V_{LSR}$ , км/с	Параметры Стокса, Ян			Степень поляризации, %	Позиционный угол, градусы
			$I$	$Q$	$U$		
18.12.2008	1665	-10.82	4.06	0.74	-0.36	20	-26
	1665	-9.32	3.60	0.17	0	5	0
	1667	-10.40	1.84	0.10	-0.04	6	-22
11.10.2014	1665	-10.88	4.95	0.56	-0.29	13	-27
	1665	-9.27	4.0	-0.15	0	5	0
	1667	-10.35	3.35	0	-0.37	11	-45
15.02.2015	1665	-10.88	4.6	0.66	-0.35	16	-28
	1665	-9.29	3.8	0	0	0	
	1667	-10.45	2.80	0	-0.20	7	-45
8.04.2020	1665	-10.90	4.3	0.58	-0.18	14	-17
	1665	-9.31	3.5	0	0	0	
	1667	-10.40	2.40	0.10	-0.13	16	-38

где  $g_J$  – фактор Ланде (0.935 для обеих линий),  $\mu_0$  – магетон Бора,  $h$  – постоянная Планка; численно  $\mu_0/h = 1.39967$  кГц мГс<sup>-1</sup>; расщепление  $\sigma$ -компонентов, выраженное в единицах лучевой скорости, составляет 0.590 км с<sup>-1</sup> мГс<sup>-1</sup> для линии 1665 МГц.

В нашем случае при изменении расщепления с -0.14 до -0.06 км/с продольная составляющая магнитного поля будет меняться (уменьшаться) от 0.24 до 0.10 мГс и поле будет направлено от наблюдателя.

Результаты анализа поляризационных наблюдений, связанных с линейной поляризацией, даны в табл. 1. Анализ выполнен для трех самых интенсивных деталей: двух в линии 1665 МГц и одной в линии 1667 МГц. Как видно из табл. 1, параметры Стокса  $Q$  и  $U$  были небольшими по сравнению с параметром  $I$ . Кроме того, на точность их измерения большое влияние оказывают собственные шумы аппаратуры. Поэтому для повышения точности параметров Стокса в каждую эмиссионную деталь, полученную в четырех направлениях (0°, 45°, 90° и 135°), вписывалась гауссиана.

Наблюдается хорошая повторяемость во времени степени поляризации и позиционного угла для детали -10.90 км/с. Деталь на -9.3 км/с имела небольшую степень линейной поляризации, а с 2015 г. излучение оказалось неполяризованным. Степень поляризации излучения в линии 1667 МГц на -10.40 км/с была небольшой и менялась в небольших пределах, а позиционный угол практически сохранялся с 2014 г.

Таким образом, большой интерес представляют VLA наблюдения для получения подробной карты распределения мазерных конденсаций в

S231, а также проведение поляризационных измерений с высокой чувствительностью для большого числа мазерных деталей. Это позволило бы оценить, каким является магнитное поле в S231: локальным или глобальным.

Теперь сравним изменения активности мазеров водяного пара и гидроксила. Согласно рис. 9 и 11 самые глубокие минимумы активности для обоих мазеров совпадают и приходятся на 1992 г. В 2002 г. оба мазера имели более высокий уровень излучения. Также относительно невысокие уровни излучения наблюдались для обоих мазеров в 2014–2015 гг. и в 2020 г.

Таким образом, имеется корреляция в активности источников мазерного излучения H<sub>2</sub>O и ОН. Это указывает на общий источник, стимулирующий мазерное излучение, и на то, что в какой-то степени они пространственно совпадают.

### 5. ВЫВОДЫ

Перечислим основные результаты, полученные в настоящей работе из наблюдений области активного звездообразования S231 в линиях молекул H<sub>2</sub>O и ОН на длинах волн 1.35 и 18 см соответственно.

1. Приведен каталог спектров мазерного излучения H<sub>2</sub>O за период с марта 2003 г. по март 2020 г.

2. Переменность интегрального потока, численного на основе данных мониторинга Фелли и др. [19] в 1987–2007 гг. и нашего мониторинга (2003–2020 гг.), имеет циклический характер. Продолжительность циклов составляет от 4.3 до 7.7 года. Каждый цикл активности сопровождается вспышками мазерного излучения как одиночных, так и нескольких деталей. Среднее время ро-



ста и спада излучения вспышки составило  $0.30 \pm 0.02$  и  $0.35 \pm 0.02$  г. соответственно. Вспышечный циклический характер переменности мазерного излучения  $\text{H}_2\text{O}$  может быть следствием нестационарного процесса формирования протозвезды на ранней стадии ее эволюции.

3. Обнаружен дрейф лучевой скорости большинства эмиссионных деталей  $\text{H}_2\text{O}$ , который может быть связан с реальным изменением скорости вещества в мазерных конденсациях при воздействии на него ударных волн, возникающих при повышении активности протозвезды.

4. Наблюдаемые скачки и колебания лучевой скорости указывают на существование вытянутых неоднородных структур с градиентом лучевой скорости, а также неоднородных структур со случайным распределением в них лучевых скоростей.

5. Мазерное излучение ОН наблюдалось нами в главных линиях 1665 и 1667 МГц. Обнаружены большое число эмиссионных деталей и их переменность. В линии 1720 МГц было обнаружено слабое излучение в левой круговой поляризации. В спектре выделено пять деталей с потоками от 80 до 120 мЯн.

6. Найдена одна зеемановская пара на  $-9.2$  км/с с небольшим расщеплением, при этом в период 2008–2020 гг. величина продольного магнитного поля монотонно уменьшалась от 0.24 до 0.10 мГс. Поле направлено от наблюдателя.

7. Для трех самых интенсивных деталей вычислены степени линейной поляризации и позиционные углы. Имеется хорошая повторяемость этих параметров от эпохи к эпохе.

8. Обнаружена корреляция между активностью мазеров  $\text{H}_2\text{O}$  и ОН.

### БЛАГОДАРНОСТИ

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *S. Sharpless*, *Astrophys. J. Suppl.* **4**, 257 (1959).
2. *R. L. Snell, R. L. Dickman, and Y.-L. Huang*, *Astrophys. J.* **352**, 139 (1990).
3. *H. Beuther, P. Schilke, F. Gueth, M. McCaughrean, M. Andersen, T. K. Sridharan, and K. M. Menten*, *Astron. and Astrophys.* **387**, 931 (2002).
4. *F. R. Israel and M. Felli*, *Astron. and Astrophys.* **63**, 325 (1978).
5. *H. Beuther, P. Schilke, K. M. Menten, F. Motte, T. K. Sridharan, and F. Wyrowski*, **566**, 945 (2002).
6. *A. Porras, I. Cruz-González, and L. Salas*, *Astron. and Astrophys.* **361**, 660 (2000).
7. *D. A. Ladeyschikov, M. S. Kirsanova, A. P. Tsvilev, and A. M. Sobolev*, *Astrophys. Bull.* **71**, 208 (2016).
8. *M. S. N. Kumar, R. Bachiller, and C. J. Davis*, **576**, 313 (2002).
9. *T. Khanzadyan, M. D. Smith, C. J. Davis, and T. Stanke*, *Astron. and Astrophys.* **418**, 163 (2004).
10. *S. Leurini, H. Beuther, P. Schilke, F. Wyrowski, Q. Zhang, and K. M. Menten*, *Astron. and Astrophys.* **475**, 925 (2007).
11. *H. Beuther, S. Leurini, P. Schilke, F. Wyrowski, K. M. Menten, and Q. Zhang*, *Astron. and Astrophys.* **466**, 1065 (2007).
12. *V. Minier, R. S. Booth, and J.E. Conway*, *Astron. and Astrophys.* **362**, 1093 (2000).
13. *R. Cesaroni, F. Palagi, M. Felli, M. Catarzi, G. Comoretto, S. Di Franco, C. Giovanardi, and F. Palla*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **76**, 445 (1988).
14. *E. Scalise Jr., L. F. Rodríguez, and E. Mendoza-Torres*, *Astron. and Astrophys.* **221**, 105 (1989).
15. *G. Comoretto, F. Palagi, R. Cesaroni, M. Felli, et al.*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **84**, 179 (1990).
16. *G. Tofani, M. Felli, G. B. Taylor, and T. R. Hunter*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **112**, 299 (1995).
17. *V. Migenes, S. Horiuchi, V. I. Slysh, I. E. Val'ts, et al.*, *Astrophys. J. Suppl.* **123**, 487 (1999).
18. *M. A. Trinidad, V. Rojas, J. C. Plascencia, A. Ricalde, S. Curiel, and L. F. Rodríguez*, *Revista Mexicana Astron. Astrof.* **39**, 331 (2003).
19. *M. Felli, J. Brand, R. Cesaroni, C. Codella, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **476**, 373 (2007).
20. *A. L. Argon, M. J. Reid, and K. M. Menten*, *Astrophys. J. Suppl.* **129**, 227 (2000).
21. *K. A. Edris, G. A. Fuller, and R. J. Cohen*, *Astron. and Astrophys.* **465**, 865 (2007).
22. *G. Surcis, W. H. T. Vlemmings, S. Curiel, B. Hutawarakorn Kramer, J. M. Torrelles, and A. P. Sarma*, *Astron. and Astrophys.* **527**, id. A48 (2011).