АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2019, том 96, № 12, с. 996–1008

УДК 524.527-77

ЭВОЛЮЦИЯ МАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ H_2O В ОБЛАСТИ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ S252A

© 2019 г. Н. Т. Ашимбаева[1], П. Колом[2], Е. Е. Лехт[1*], М. И. Пащенко[1], Г. М. Рудницкий[1], А. М. Толмачев[3],

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

[2] Медонская обсерватория, Медон, Франция

[3] Пущинская радиоастрономическая обсерватория, Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Пущино, Россия

Поступила в редакцию 06.06.2019 г.; после доработки 20.07.2019 г.; принята к публикации 22.07.2019 г.

Представлены результаты наблюдений области звездообразования S252A в линиях молекул H_2O на 1.35 см и OH на 18 см, полученных на 22-м радиотелескопе в Пущино (Россия) и на Большом радиотелескопе в Нансэ (Франция) соответственно. Приведен каталог спектров мазерного излучения H_2O за период 1995–2019 гг. Переменность интегрального потока имеет два компонента: циклический с временны́м интервалом между циклами ~30–35 лет и короткопериодический со средним периодом около 2.6 г. Это может отражать нестационарный процесс формирования протозвезды. Показано, что среда генерации мазерного излучения H_2O и теплового излучения OH сильно фрагментирована и в ней имеются мелкомасштабные турбулентные движения вещества, сравнимые с тепловыми. Наблюдаемый дрейф и скачки́ лучевой скорости эмиссионных деталей H_2O могут быть следствием сложной, неоднородной структуры мазерных конденсаций.

DOI: 10.1134/S0004629919120016

1. ВВЕДЕНИЕ

Источник мазерного излучения S252A находится в области активного звездообразования Шарплес 252, которая имеет сложную структуру, особенно в континууме. Согласно Лада и др. [1], в данной области происходит последовательное образование групп звезд, причем уже появившаяся группа стимулирует образование новой группы звезд. Фелли и др. [2], используя метод апертурного синтеза, обнаружили в направлении S252 несколько компактных групп областей HII. Достаточно интересной является группа A, состоящая из трех компонентов (A1, A2 и A3).

Все компактные области HII расположены внутри молекулярного облака, которое также имеет сложную конфигурацию и плотное ядро. Наблюдения в молекулярных линиях NH_3, ^{12}CO и ^{13}CO показали, что молекулярное облако является двойным [3]. Расстояние между пиками ^{12}CO и ^{13}CO составляет 2′. Наблюдения с высоким угловым разрешением, выполненные Плем и др. [4] в линии CS (переход $J = 7 \to 6$), позволили с большой точностью определить, что та часть молекулярного облака, в которой находится S252A, имеет лучевую скорость 9.4 км/с. Расстояние до сложной области S252 оценивается от 1.5 (Блитц и др. [5]) до 2.8 кпк (Ватерлейт и Бранд [6]). По измерениям тригонометрического паралакса метанольных мазеров Рейд и др. [7] оценили расстояние до S252A как 2.1 кпк.

В направлении на ~40″ к западу от компактной области S252A3 сначала Лада и Вуден [1], а затем Генцел и Даунс [8] обнаружили мазерное излучение H_2O. Лада и др. [9] на основании VLBI измерений в 1979 г. показали, что мазерное излучение H_2O локализуется в объеме 2.3″ и совпадает с максимумом излучения ^{12}CO, т.е. с ядром молекулярного облака. Результаты мониторинга водяного мазера в S252A за период 1981–1995 гг. были опубликованы в работе Берулиса и др. [10], а затем за период 1986–2006 гг. в работе Фелли и др. [11].

Мазерное излучение гидроксила в области Шарплес 252 было обнаружено значительно севернее (на 1°) компактной области HII S252A3, т.е. в направлении галактического источника G188.946+0.886 (Аргон и др. [12]). В этом же

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

направлении наблюдался мазер метанола класса II (см., напр., Брин и др. [13] и ссылки в этой работе). И, наконец, отметим, что вблизи мазера водяного пара, рассматриваемого в настоящей работе, также найден мазер метанола класса II (см., напр., Грин и др. [14] и ссылки в этой работе), но существенно слабее, чем в направлении на G188.946+0.886.

2. АППАРАТУРА И НАБЛЮДЕНИЯ

Мониторинг мазерного источника водяного пара на волне 1.35 см в области S252A проводится нами с 1981 г. на радиотелескопе РТ-22 в ПРАО (Россия) в направлении: $\alpha_{2000} = 06^{\rm h}08^{\rm m}35.5^{\rm s}$, $\delta_{2000} = 20°39'13''$. Чувствительность телескопа составляет 25 Ян/К для точечного источника с неполяризованным излучением. Шумовая температура системы составляла от 130 до 250 К в зависимости от условий наблюдений. Ширина диаграммы направленности антенны на 1.35 см равна 2.6′.

Регистрация сигнала осуществлялась сначала 128-канальным анализатором спектра фильтрового типа с разрешением по лучевой скорости 0.101 км/с, а с 2006 г. 2048-канальным автокоррелятором с разрешением 0.0822 км/с.

Результаты наблюдений с 1981 по 1994 г. были опубликованы в ряде наших ранних работ [10, 15, 16]. В настоящей работе представлены результаты наблюдений с середины 1995 г. по 2019 г. (см. рис. 1–6). Таким образом, полное время нашего мониторинга мазера H_2O в S252A составило 38 лет. С мая 2006 г. по декабрь 2007 г. наблюдения не проводились по техническим причинам, поэтому при построении графика переменности интегрального потока мы также использовали результаты наблюдений Фелли и др. [11] с апреля 2006 г. по февраль 2007 г.

В некоторые временны́е интервалы сигнал был очень слабый и не просматривался в одиночных спектрах. По этой причине мы вычисляли усредненные спектры для соответствующих временны́х интервалов. Это показано на рис. 1 и 2. На каждом рисунке двухсторонней стрелкой показан масштаб вертикальной оси. Для каждого спектра приведена эпоха наблюдений и для удобства проведена нулевая линия.

Также были проведены наблюдения в главных линиях гидроксила на волне 18 см на радиотелескопе в Нансэ (Франция) в 2008, 2014 и 2015 г. в линейных и круговых поляризациях в направлении мазерного источника H_2O. На склонении $\delta = 0°$ диаграмма направленности телескопа на длине волны 18 см составляет $3.5' \times 19'$ по прямому восхождению и склонению соответственно. Чувствительность телескопа для $\lambda = 18$ см и $\delta = 0°$ составляет 1.4 Ян/К для точечного источника с неполяризованным излучением.

В 2008 г. спектральное разрешение составило 0.137 км/с, а в 2014 и 2015 г. 0.069 км/с. В сателлитной линии 1612 МГц наблюдения проводились в 2014 и 2015 г., но излучение не было обнаружено. Результаты наблюдений в главных линиях представлены на рис. 7. Спектры приведены для полного излучения (сумма излучений в правой и левой круговых поляризациях, которые равны между собой при неполяризованном излучении).

Видно, что спектры OH для всех эпох идентичны и линии достаточно широкие. Для повышения чувствительности для наблюдений в 2014 и 2015 г. в $\sqrt{2}$ раз мы провели усреднение сигналов попарно в соседних каналах, конечно, за счет уменьшения спектрального разрешения в 2 раза. Однако это не имеет принципиального значения в случае широких линий. В нижней части рисунка приведены также усредненные за эпохи наблюдений спектры.

3. ДИСКУССИЯ

В настоящей работе на основе почти 40-летнего мониторинга проведено исследование основных характеристик мазерного излучения H_2O: интегрального потока и переменности излучения отдельных эмиссионных деталей (плотности потока и лучевой скорости). Напомним, что от ближайшей области HII (S252A3) мазер H_2O отделяет около 40″. Это соответствует довольно значительному линейному расстоянию, равному $\sim 1.3 \times 10^{18}$ см при расстоянии до S252A 2.1 кпк. Можно предположить, что протозвезда, с которой связаны мазеры водяного пара и метанола, находится на очень ранней стадии эволюции, а область HII еще не сформировалась [9]. Поэтому большое значение имеют регулярные исследования основных характеристик мазерного излучения, в частности, интегрального потока, который может быть индикатором состояния протозвезды на ранней стадии ее формирования.

3.1. Интегральный поток

Переменность интегрального потока в спектральных деталях мазера H_2O за весь мониторинг показана на рис. 8. Мы также включили данные Фелли и др. [11] за 2006–2007 гг. Ввиду большого диапазона значений интегрального потока в верхней правой части рисунка сделана вставка в увеличенном масштабе.

Можно выделить два цикла высокой мазерной активности и один низкой активности. Первый продолжался до 1995 г. и характерен наиболее

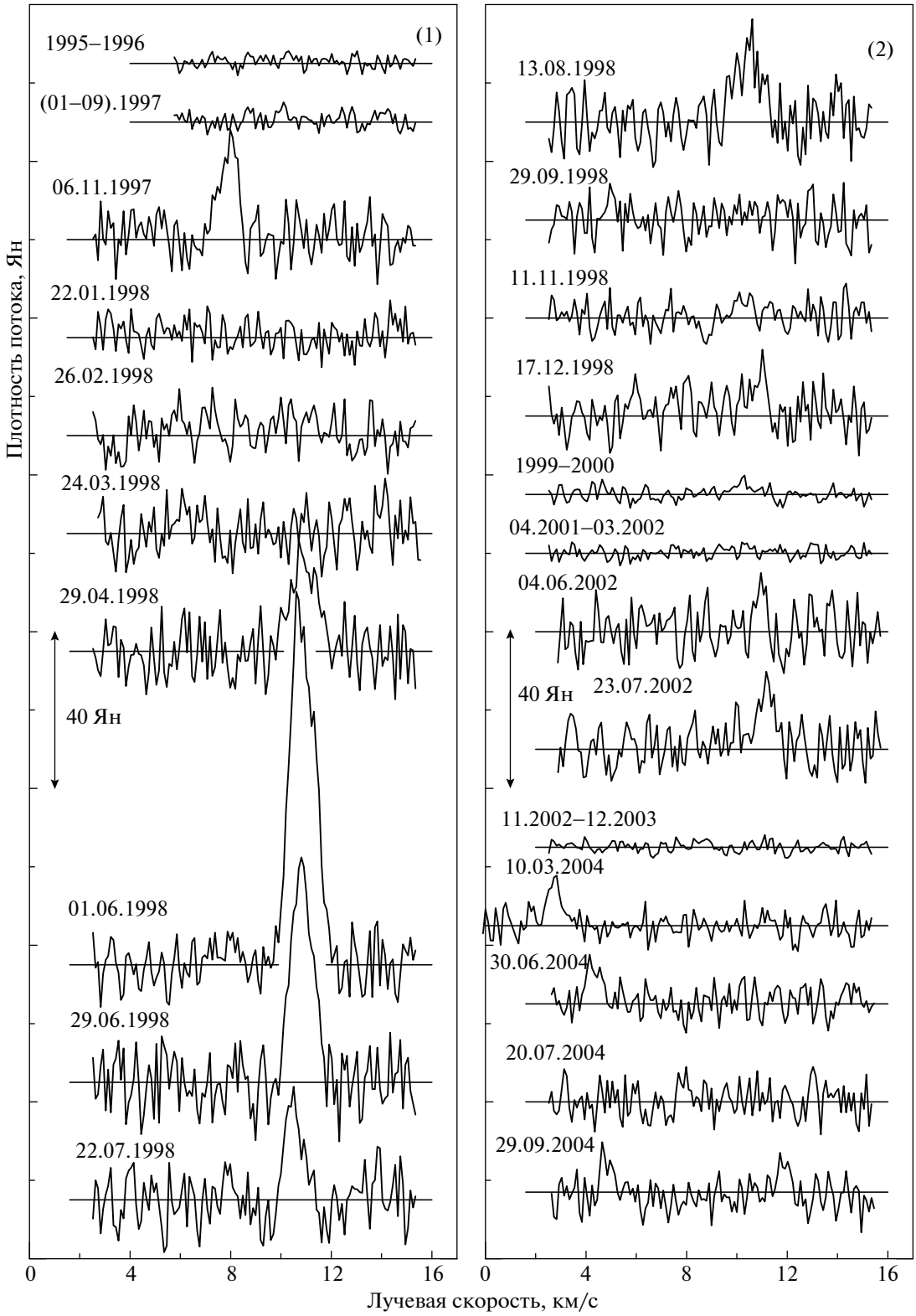

Рис. 1. Спектры мазерного излучения H_2O в S252A в 1995–2004 гг. Для каждого спектра проведена нулевая линия. Двухсторонними вертикальными стрелками показана цена деления. Приведены эпохи наблюдений.

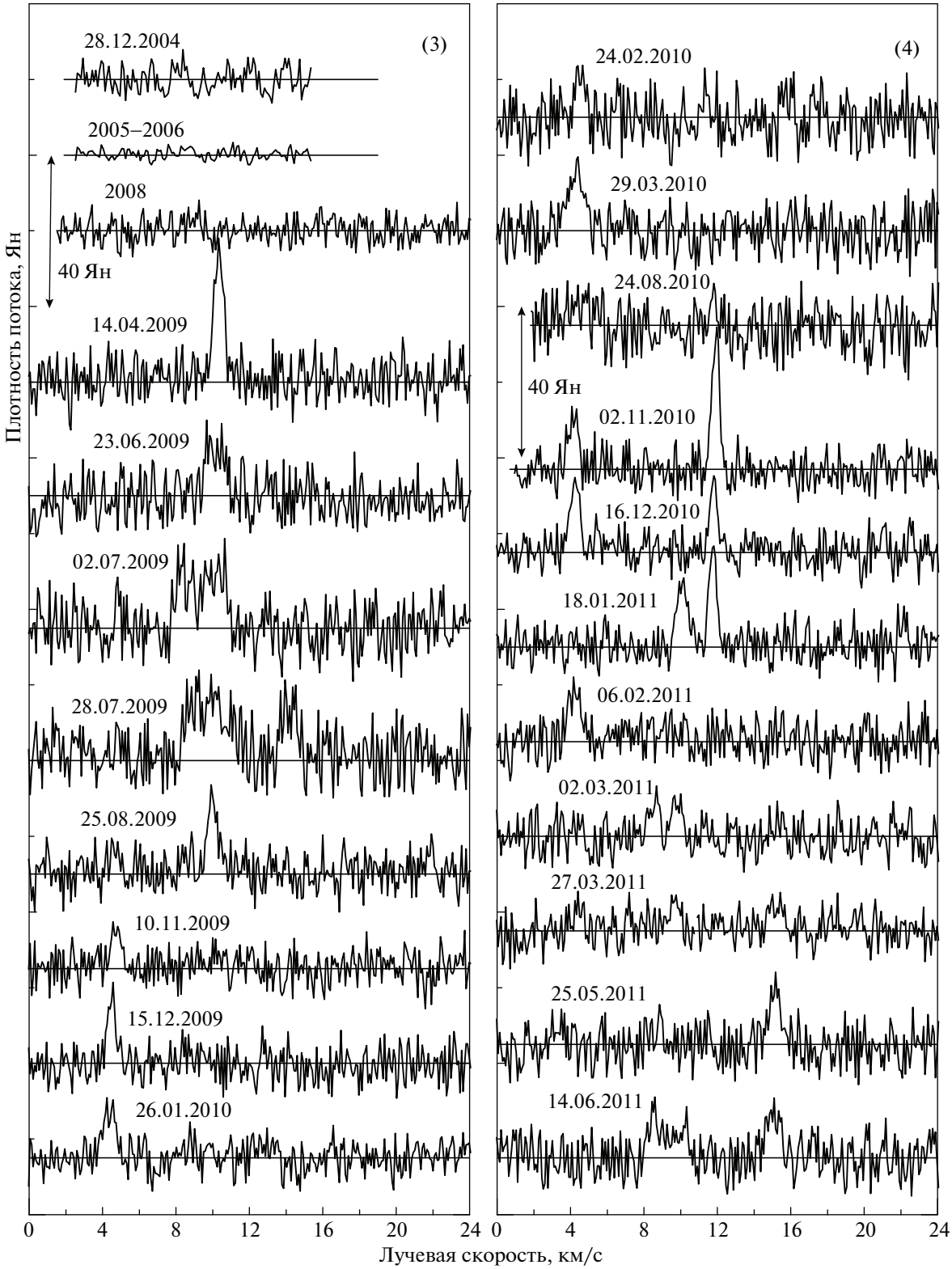

Рис. 2. То же, что на рис. 1, для 2004–2011 гг.

высокой мазерной активностью за весь наш 38-летний мониторинг. Второй имел низкий уровень мазерного излучения (минимум активности) и продолжался с 1995 по 2009 г. И, наконец, третий цикл имел место с 2010 по 2019 г. и характеризуется достаточно высоким уровнем мазерного излучения.

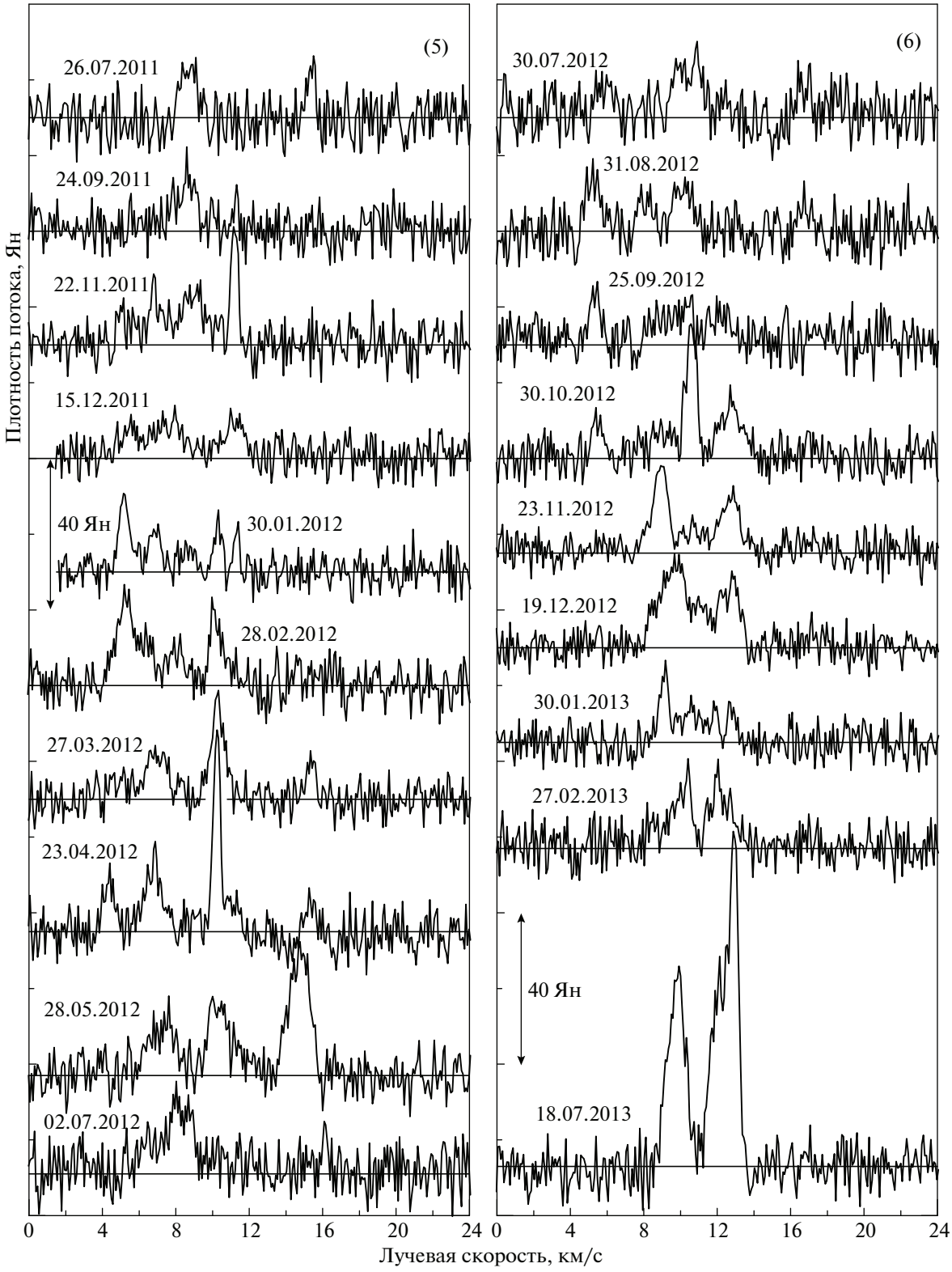

Рис. 3. То же, что на рис. 1, для 2011–2013 гг.

В свою очередь, в каждом из них имеются свои более короткие циклы активности продолжительностью от 1.3 до 4.7 г. Всего насчитывается 12 таких циклов.

Таким образом, можно выделить два вида переменности: короткопериодическую со средним периодом около 2.6 г. и циклическую. Если не учитывать второй цикл с низкой активностью, то вре-

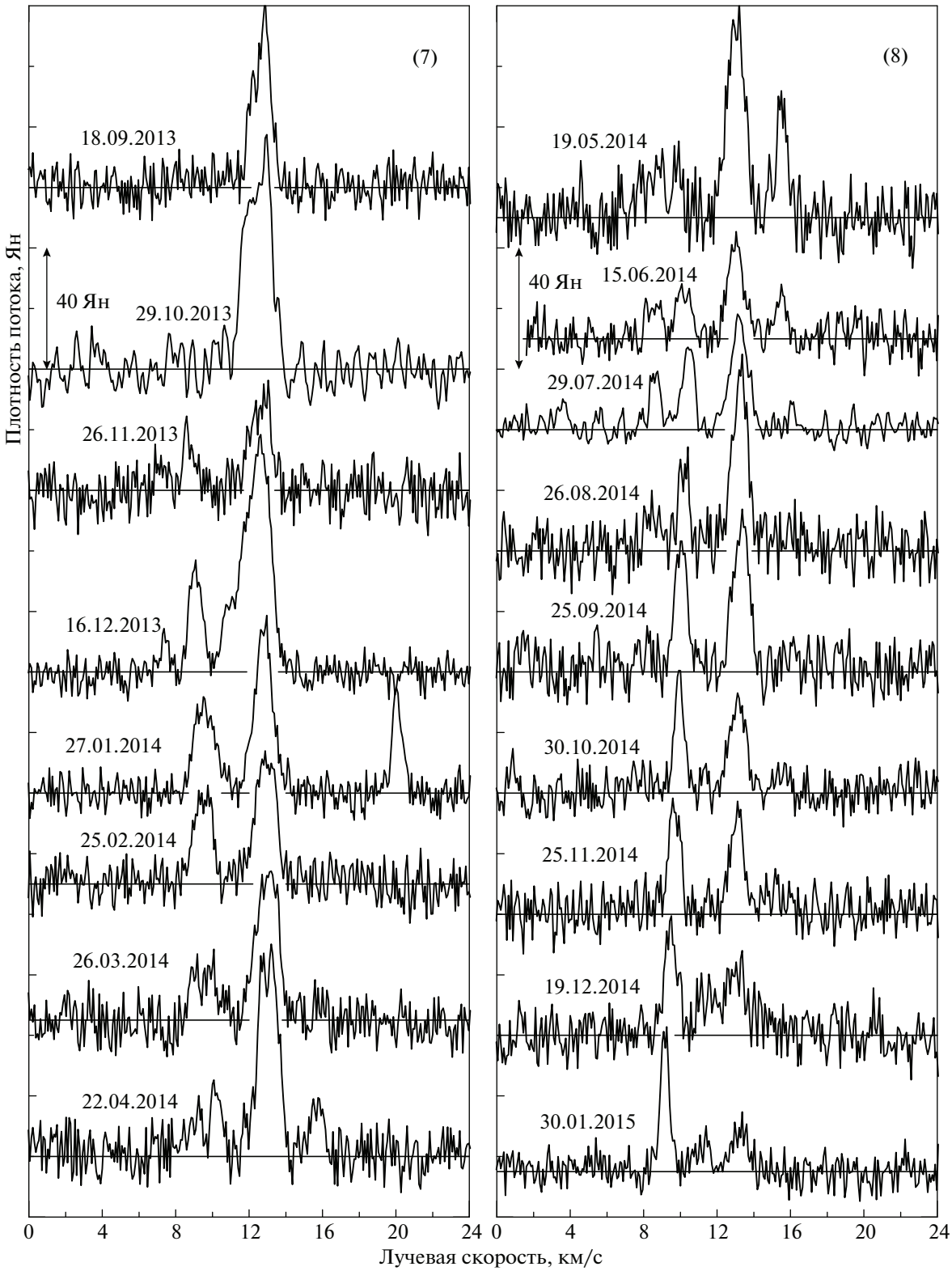

Рис. 4. То же, что на рис. 1, для 2013–2015 гг.

менно́й интервал между центрами основных циклов составляет ~30–35 лет. Также можно предположить, что наблюдаемый характер переменности мазерного излучения отражает нестационарный процесс формирования протозвезды. Аккреция, а также истечение вещества из протозвезды

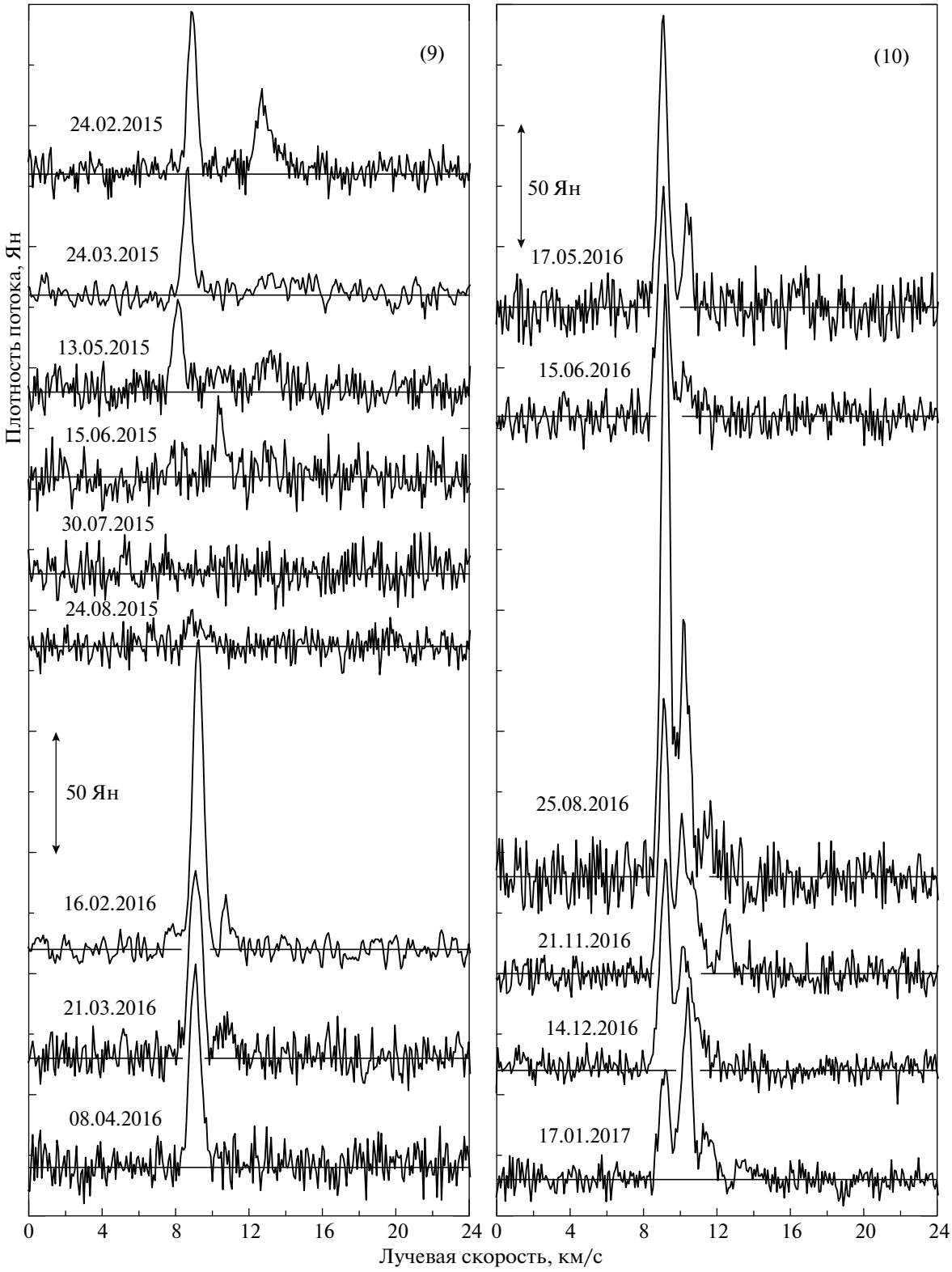

Рис. 5. То же, что на рис. 1, для 2015–2017 гг.

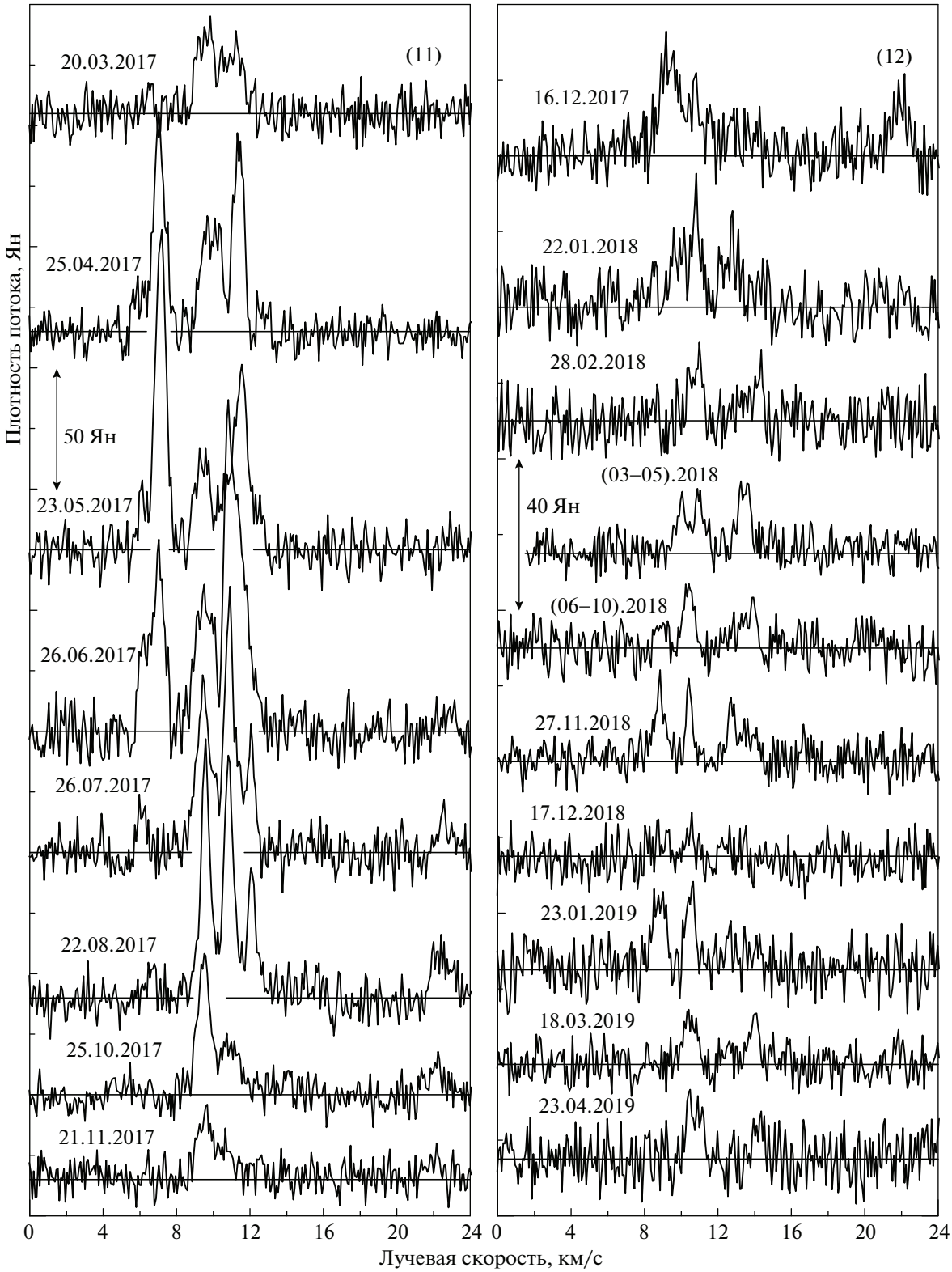

Рис. 6. То же, что на рис. 1, для 2017–2019 гг.

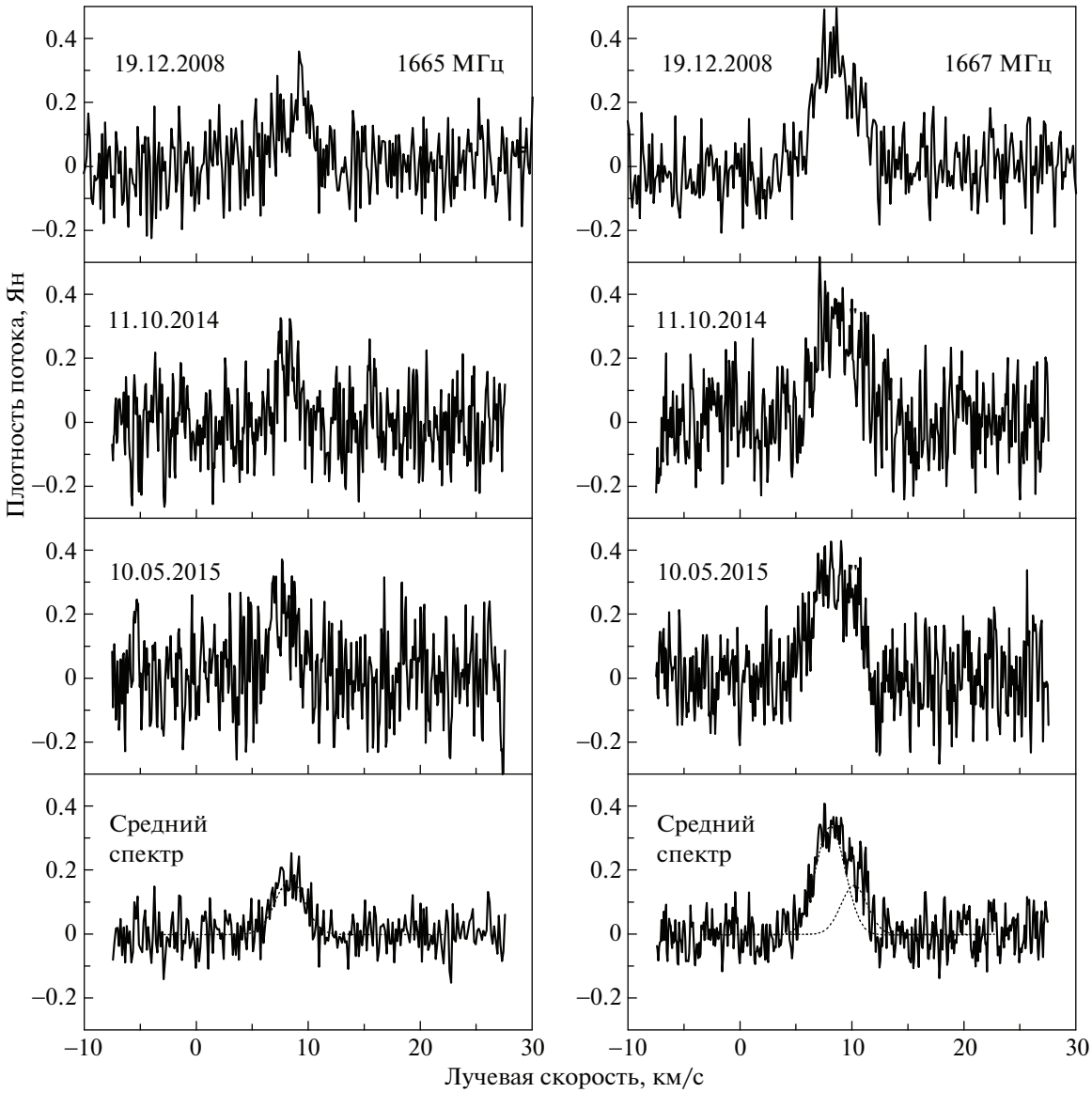

Рис. 7. Спектры излучения в S252A в главных линиях OH на волне 18 см в разные эпохи. На нижних панелях приведены средние спектры, в которые вписаны гауссианы.

могут иметь периодический или циклический характер [17].

3.2. Эволюция основных деталей

Эволюция всех выделенных в спектрах H_2O эмиссионных деталей с 1995 по 2019 г. показана на рис. 9(a). Погрешность определения лучевой скорости определяется первым гетеродином приемника и находится в пределах 25–30 м/с. На первый взгляд появление и исчезновение деталей носит хаотический характер. Также обратим внимание на то, что вариации скорости слабых деталей временами превышают точность определения лучевых скоростей. Существование этого эффекта было отмечено в работе Лехта и др. [16] по результатам наблюдений в 1981–1995 гг. Поэтому для удобства анализа эволюции отдельных деталей в нижней части рисунка (рис. 9(b)) в увеличенном масштабе нанесены детали с плотностями потоков более 30 Ян. Интервалы плотностей потоков и соответствующие им символы показаны в левой части рисунка. Здесь же слева отрезками горизонтальных линий отмечены лучевые скорости наиболее интенсивных деталей, наблюдаемых нами в период 1981–1994 гг. Толщина линии пропорциональна интенсивности излучения. Крестиками и буквами вблизи них показаны положения деталей из VLBI наблюдений Лада и др. [9], выполненных в 1979 г.

Выделяются некоторые детали, время жизни которых достаточно большое, порядка двух лет.

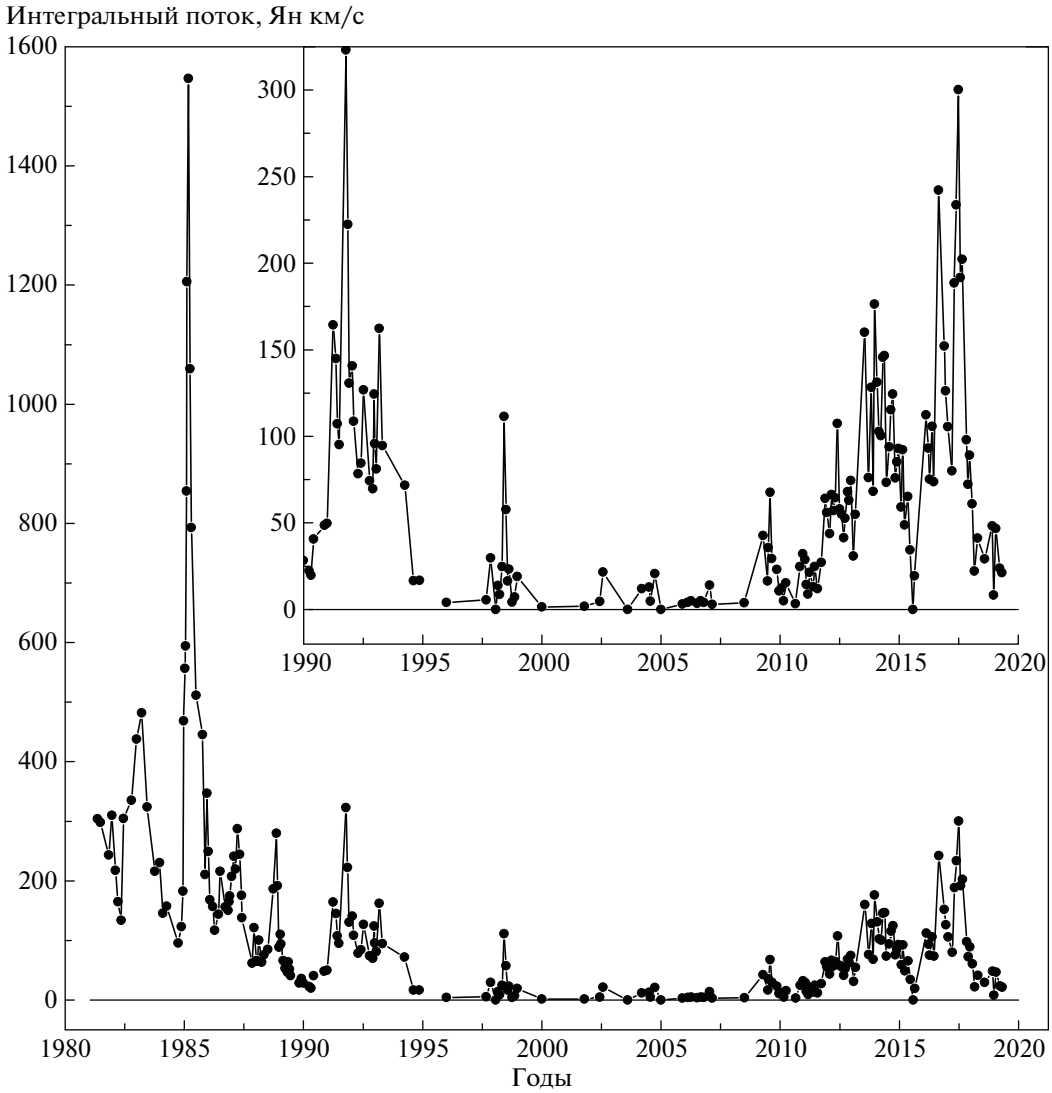

Рис. 8. Переменность интегрального потока мазерного излучения H_2O, приведенная в двух масштабах.

При этом для большинства из них лучевые скорости не менялись, либо мало менялись. Существенным исключением является мазерная деталь с номером *2* со значительным дрейфом лучевой скорости, сначала от 9.0 до 10.5 (*2a*), а затем от 10.5 до 8.1 км/с (*2b*). Темп дрейфа на восходящей и нисходящей ветвях одинаковый и составляет по модулю 2.9 (км/с)/год, а плотность потока в максимуме излучения достигала 55 Ян. Такой характер дрейфа вызван сложной структурой области генерации мазерного излучения, т.е. мазерной конденсации. Скорее всего имеется компактное скопление мазерных конденсаций, образующих, например, вытянутое волокно. Возможны образования более сложных конфигураций (см., напр., Торрелес и др. [18], Лехт и др. [19]).

Для деталей *1* и *3* имели место скачки́ лучевой скорости, равные 0.35 и 0.38 км/с соответственно, т.е. они имеют достаточно близкие значения. Скачки́ скорости можно объяснить последовательным возбуждением мазерных конденсаций распространяющейся ударной волной. Наиболее интенсивной за весь последний цикл мазерной активности была деталь *3a*. В процессе ее эволюции менялись ширина и форма линии. Ширина линии была минимальной (0.57 км/с) в эпоху максимума излучения (245 Ян). В 2017 г., т.е. после скачка́ скорости, форма линии была более сложной. Это вызвано тем, что в 2017 г. линия уже́ не была одиночной. Вариации ширины линии связаны не с режимом работы мазера, а с неоднородностью мазерной конденсации. Параметры основных эмиссионных деталей H_2O в периоды максимумов их излучения даны в табл. 1. Номер детали приводится согласно рис. 9(b). В столбце 4 дано значение ширины детали по уровню 0.5 по плотности потока.

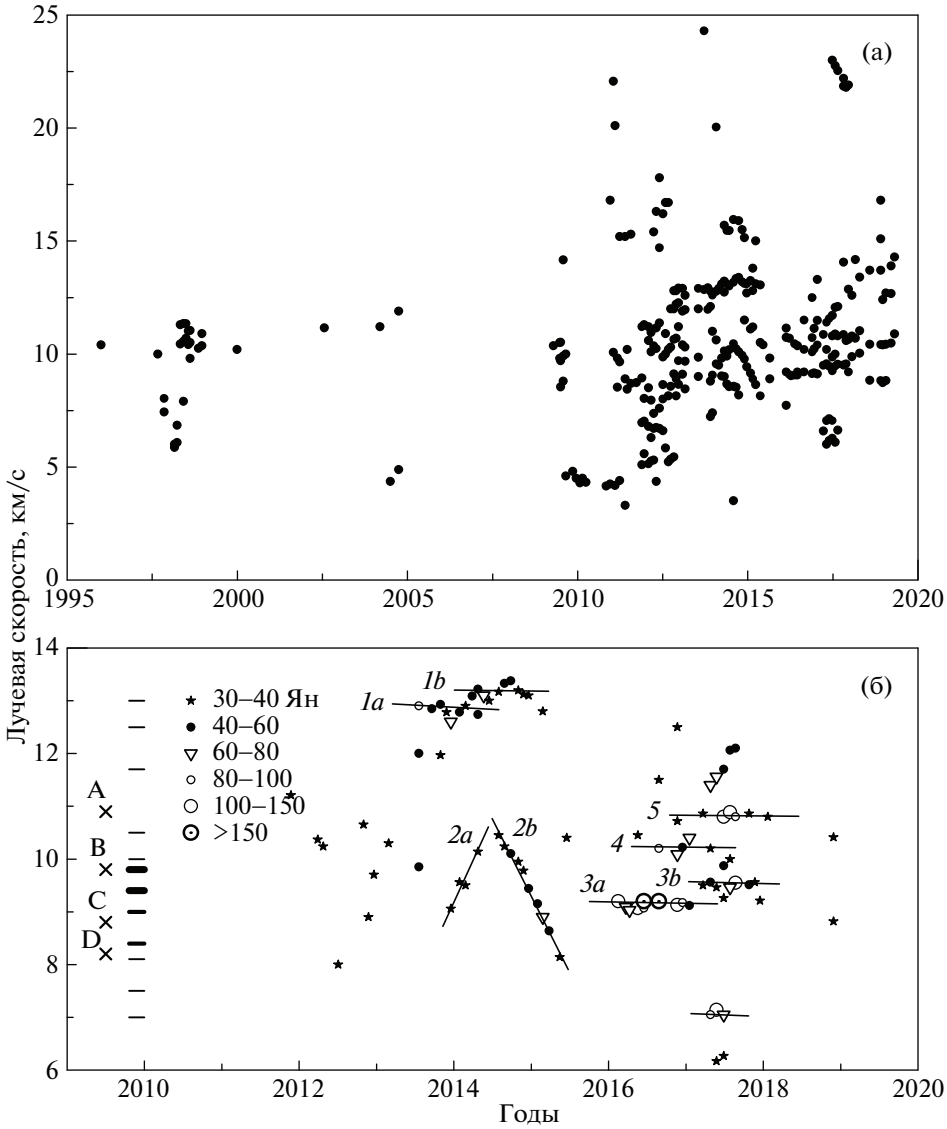

Рис. 9. Переменность лучевой скорости всех зарегистрированных деталей мазерного излучения H_2O (a) и деталей с потоками более 30 Ян (b). Интервалы плотностей потоков и соответствующие им символы показаны в левой части рисунка. Здесь же слева отрезками горизонтальных линий отмечены лучевые скорости наиболее интенсивных деталей в период 1981–1994 гг. Толщина линии пропорциональна интенсивности излучения. Крестиками и буквами вблизи них показано положение детали из VLBI наблюдений Лада и др. [9], выполненных в 1979 г.

Погрешность значения лучевой скорости находится в пределах 25–30 м/с, а плотности потока около 10%. Просматривается слабая обратная зависимости между плотностью потока и шириной линии.

Существование короткоживущих деталей в спектрах H_2O может быть связано с тем, что среда локализации источников мазерного излучения сильно фрагментирована и оптическая толща среды в отдельных фрагментах недостаточна для продолжительного поддержания в них инверсной заселенности уровней молекул H_2O при существующем уровне накачки.

3.3. Пространственное отождествление основных спектральных деталей мазера H_2O

Несмотря на сильную переменность излучения большинства деталей и некоторого разброса лучевых скоростей (как мы выяснили в предыдущем разделе — из-за неоднородностей среды), их лучевые скорости, в целом, менялись слабо. Это видно на рис. 9(b). Благодаря этому можно провести отождествление основных деталей мазера H_2O с результатами VLBI измерений, выполненных Лада и др. [9].

Видимо, с мазерным пятном A отождествляется деталь *5*, а с пятнами B и C отождествляются

Таблица 1. Параметры основных деталей мазера H_2O

Номер детали	Дата	$V_{\rm LSR}$, км/с	δV, км/с	Плотность потока, Ян	Интегральный поток, Ян км/с
–	23.05.2017	7.12	0.71	131	98
1a	29.10.2013	12.9	0.89	76	81
1b	19.05.2014	13.2	0.90	64	78
2a	16.12.2013	9.1	0.86	35	136
2b	24.02.2015	8.9	0.59	66	42
3a	25.08.2016	9.2	0.57	245	152
3b	22.08.2017	9.55	0.50	102	70
4	25.08.2016	10.2	0.76	105	71
5	26.07.2017	10.85	0.57	103	82

детали *4* и *3* соответственно. С пятном D может быть связано сильное излучение на скорости 8.4 км/с, наблюдаемое нами в 1981 г., и более слабое излучение на 8.1–8.3 км/с в 1984–1985 гг. и в 2012–2013 гг.

Конечно, для полной уверенности в справедливости нашего отождествления желательно иметь VLA карты хотя бы еще на одну эпоху.

3.4. Излучение гидроксила

Излучение гидроксила во все эпохи наших наблюдений в направлении S252A было неполяризованным. Как мы уже отмечали в разделе 2, излучение в линии 1612 МГц не обнаружено. Основные параметры излучения лучше всего получить из средних спектров, в которых отношение сигнал/шум лучше, чем в одиночных спектрах. В обеих линиях, 1665 и 1667 МГц, правое крыло более пологое, чем левое. Вероятно, линии состоят из двух компонентов. В средние спектры вписаны гауссианы. В средний спектр 1667 МГц вписаны две гауссианы, а в 1665 МГц только одна ввиду худшего соотношения сигнал/шум. Лучевая скорость составила около 8.2 км/с, а плотность потока 0.16 и 0.33 Ян для 1665 и 1667 МГц соответственно. Это близко к классическому соотношению при тепловом излучении. Средняя лучевая скорость составляет около 9.4 км/с, т.е. совпадает со скоростью молекулярного облака CO. Вероятнее всего излучение гидроксила имеет тепловой характер.

Линии достаточно широкие, около 3 км/с. Если считать, что максимальная температура молекулярного облака, где локализованы молекулы гидроксила, равна ~120 K, то соответствующая ей тепловая ширина линии составит 1.4 км/с. Уширение линии до 3 км/с (доплеровская ширина) вызвано наличием мелкомасштабных турбулентных движений вещества в молекулярном облаке. Доплеровская, тепловая и турбулентная ширины линий связаны соотношением $u_D = \sqrt{u_{th}^2 + u_{turb}^2}$, где $u_{th}^2 = 3kT/m$ и $u_{turb}^2 = \langle u^2(\mathbf{r}, t)\rangle$ есть квадраты дисперсий тепловой и мелкомасштабной турбулентной скоростей. Отсюда $u_{turb} \approx 2.6$ км/с (см., напр., Силантьев и др. [20]).

Таким образом, результаты наблюдений мазерного излучения водяного пара и теплового излучения гидроксила свидетельствуют о том, что среда сильно фрагментирована и в ней имеются мелкомасштабные турбулентные движения вещества, сравнимые с тепловыми.

4. ВЫВОДЫ

Перечислим основные результаты, полученные в настоящей работе из наблюдений области активного звездообразования S252A в линиях молекул H_2O и OH.

1. Представлен каталог спектров мазерного излучения H_2O за 1995–2019 гг. Таким образом, полное время мониторинга источника S252A составило около 40 лет.

2. Показано, что переменность мазерного излучения H_2O имеет сложный характер. Имеются два компонента переменности: циклический с возможным периодом 30–35 лет и короткопериодический со средним периодом 2.6 г. Это может быть следствием нестационарного процесса формирования протозвезды на ранней стадии эволюции, при этом аккреция и истечение вещества из протозвезды могут иметь квазипериодический характер.

3. Излучение гидроксила, наблюдаемое нами на волне 18 см, является тепловым. Доплеровские ширины линий достаточно большие и они определяются суперпозицией двух механизмов — тепловых и мелкомасштабных турбулентных движений молекул.

4. Существование микротурбулентных движений, сравнимых с тепловыми, и вариаций лучевых скоростей слабых деталей, превышающих точность их измерений, свидетельствуют о том, что среда является сильно фрагментированной.

5. Проведено возможное отождествление основных деталей в спектрах H_2O с мазерными пятнами VLBI измерений, выполненных в 1979 г.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам Медонской (Франция) и Пущинской (Россия) радиоастрономическим обсерваториям за большую помощь в проведении наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. J. Lada and D. Wooden, Astrophys. J. **232**, 158 (1979).
2. M. Felli, H. J. Habing, and F. P. Israel, Astron. and Astrophys. **59**, 43 (1977).
3. L. Haikala, Astrophys. Space Sci. **128**, 125 (1986).
4. R. Plume, D. T. Jaffe, and N. J. Evans II, Astrophys. J. Suppl. **78**, 505 (1992).
5. L. Blitz, M. Fich, and A. A. Stark, Astrophys. J. Suppl. **49**, 183 (1982).
6. J. G. A. Wouterloot and J. Brand, Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. **80**, 149 (1989).
7. M. J. Reid, K. M. Menten, A. Brunthaler, X. W. Zheng, L. Moscadelli, and Y. Xu, Astrophys. J. **693**, 397 (2009).
8. R. Genzel and D. Downes, Astron. and Astrophys. **72**, 234 (1979).
9. C. J. Lada, L. Blitz, M. J. Reid, and J. M. Moran, Astrophys. J. **243**, 769 (1981).
10. И. И. Берулис, Е. Е. Лехт, Э. Мендоса-Торрес, Астрон. журн. **73**, 367 (1996).
11. M. Felli, J. Brand, R. Cesaroni, C. Codella, et al., Astron. and Astrophys. **476**, 373 (2007).
12. A. L. Argon, M. J. Reid, and K. M. Menten, Astrophys. J. Suppl. **129**, 227 (2000).
13. S. L. Breen, S. P. Ellingsen, J. L. Caswell, J. A. Green, M. A. Voronkov, G. A. Fuller, L. J. Quinn, and A. Avison, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **426**, 2189 (2012).
14. J. A. Green, J. L. Caswell, G. A. Fuller, A. Avison, et al., Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **420**, 3108 (2012).
15. Е. Е. Лехт, Астрон. журн. **73**, 695 (1996).
16. Е. Е. Лехт, И. И. Берулис, Э. Мендоса-Торрес, Астрон. журн. **73**, 844 (1996).
17. H. W. Yorke and E. Krügel, Astron. and Astrophys. **54**, 183 (1977).
18. J. M. Torrelles, N. A. Patel, G. Anglada, J. F. Gómez, et al., Astrophys. J. **598**, L115 (2003).
19. Е. Е. Лехт, В. И. Слыш, В. В. Краснов, Астрон. журн. **84**, 1070 (2007).
20. N. A. Silant'ev, E. E. Lekht, and G. A. Alexeeva, Astrophys. J. **696**, 1972 (2009).