

УДК 524.527-77

НАБЛЮДЕНИЯ МАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ G43.8–0.1. II. МАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ H₂O В ЛИНИИ 1.35 см

© 2019 г. П. Колом¹, Н. Т. Ашимбаева², Е. Е. Лехт^{2*},
М. И. Пашенко², Г. М. Рудницкий², В. В. Краснов³, А. М. Толмачев⁴

¹Медонская обсерватория, Медон, Франция

²Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга,
Москва, Россия

³Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН), Москва, Россия

⁴Пушчинская радиоастрономическая обсерватория,
Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, Пушкино, Россия

Поступила в редакцию 22.01.2019 г.; после доработки 26.04.2019 г.; принята к публикации 29.04.2019 г.

Представлены результаты наблюдений мазерного излучения водяного пара на длине волны 1.35 см в области звездообразования G43.8–0.1, выполненных на радиотелескопе РТ-22 Пушчинской радиоастрономической обсерватории. Показано, что интегральное излучение мазера имеет квазипериодическую переменность с характерным временем от 3.9 до 12.1 г, что может быть связано с изменением активности центральной звезды в G43.8–0.1 в процессе ее формирования. Обнаружено девять сильных вспышек с потоком в максимуме более 3000 Ян. Вспышки отождествлены с мазерными пятнами на картах, полученных с высоким угловым разрешением. Показано, что предпочтение следует отдать модели оболочечной структуры мазерного источника H₂O в G43.8–0.1.

DOI: 10.1134/S0004629919100049

1. ВВЕДЕНИЕ

Источник мазерного излучения H₂O в G43.8–0.1 связан с областью активного звездообразования. На картах континуума имеются два объекта: яркий источник на северо-западе и слабый на юго-востоке. Яркий источник представляет собой сверхкомпактную область III. Все мазерное излучение исходит из этого источника.

Сначала в этом направлении было обнаружено излучение гидроксила в линиях 1665 и 1667 МГц [1–3], а затем водяного пара в линии 1.35 см [4]. Ввиду этого данный объект чаще всего называют источником OH — G43.8–0.1. Все мазеры (OH, H₂O и CH₃OH), обнаруженные в этом источнике, связаны со сверхкомпактной областью III [5] и инфракрасным источником IRAS 19095+0930.

Многочисленные VLBI наблюдения в линии 1.35 см показали, что мазерные детали (конденсации) образуют некоторую организованную структуру. Так, VLBI-изображение, полученное Downes

et al. [6], показывает, что большинство деталей мазера H₂O расположено в дугообразной структуре с поперечным диаметром 200 mas (milliarcsecond, угл. мс). При расстоянии до G43.8–0.1, равном 2.8 кпк, это соответствует радиусу структуры около 10¹⁶ см.

Лучевые скорости самых сильных низкоскоростных деталей увеличиваются вдоль этой дуги с востока на запад. Высокоскоростные детали имеются в области 400 mas. VLA-наблюдения Sarma et al. [7] показали, что существует четыре мазерных источника (скопления пятен или отдельные пятна), которые расположены в направлении восток–запад в пределах 0.3". Это часть дуги, наблюдавшейся Downes et al. [6] с VLBI.

В самом сильном из этих четырех мазеров (в G43.8–0.1) обнаружен эффект Зеемана. В спектре H₂O в направлении на этот источник есть четыре компонента скорости. Эффект Зеемана был обнаружен в трех из этих компонентов.

Nonna et al. [8] по наблюдениям в пяти эпохах нашли расширение распределения мазерных пятен. Они пришли к заключению, что распределение

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

мазерных пятен в G43.8–0.1 представлено не простой оболочкой, а может интерпретироваться как биполярная структура в направлении север–юг.

Однако Wu et al. [9] идентифицировали 12 различных пятен мазера воды, распределенных в пределах $\approx 0.2''$, и пришли к другому выводу. Согласно их исследованиям распределение и собственные движения этих пятен являются довольно случайными и поэтому не могут моделироваться в виде молекулярного потока.

2. АППАРАТУРА И НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения (мониторинг) мазерного источника водяного пара на длине волны 1.35 см в направлении G43.8–0.1 на 22-метровом радиотелескопе ПРАО АКЦ ФИАН в Пушино (Россия) проводится нами с 1981 г. Чувствительность телескопа составляет 25 К/Ян 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 $2.6'$. Телескоп принимал сигнал с линейной (вертикальной) поляризацией. Влияние изменения угла между плоскостями поляризации телескопа и источника было рассмотрено в работе [10]. Наблюдения источника G43.8–0.1 проводились, как правило, на близких позиционных углах. Поэтому при наличии степени линейной поляризации, например, порядка 20%, вариации плотности потока не превышали $\approx (5-6)\%$, что примерно соответствует точности измерения плотности потока.

Регистрация сигнала осуществлялась 128-канальным анализатором спектра фильтрового типа с разрешением по лучевой скорости 0.101 км/с, а с 2005 г. — 2048-канальным автокорреляционным анализатором спектра с разрешением 0.0822 км/с. Все спектры были скорректированы за поглощение в атмосфере Земли. В программе расчета лучевых скоростей до марта 2018 г. скорость движения Солнца к апексу принималась равной 19.5 км/с. С марта 2018 г. мы приняли значение скорости 20 км/с. По этой причине лучевые скорости всех спектров, а также опубликованных ранее результатов наблюдений, которые использовались в настоящей работе, были скорректированы. Величина коррективы для G43.8–0.1 составила 0.4 км/с.

Результаты наблюдений с 1981 по 1999 г. были опубликованы в ряде наших ранних работ [11–13]. В настоящей работе представлены результаты наблюдений с середины 1999 по 2019 г. (см. рис. 1–9). Таким образом, полное время нашего мониторинга мазера H₂O в G43.8–0.1 составило 38 лет. На рис. 9 (панель 20) из-за сильной вспышки деталь

39.2 км/с в спектрах, начиная с июня 2018 г., ограничена и показана полностью на панели 21. Для каждого спектра проведена нулевая линия. Двухсторонними стрелками показан масштаб вертикальных осей. Приведены эпохи наблюдений.

3. АНАЛИЗ ДАННЫХ

Основные результаты анализа мониторинга мазерного излучения H₂O в направлении G43.8–0.1 показаны на рис. 10. Используются все данные нашего мониторинга с 1981 по 2019 г. На рис. 10а показана переменность интегрального потока. Минимумы активности мазерного источника показаны внизу (над горизонтальной осью) отрезками вертикальных линий. Над каждым максимумом активности приведено значение лучевой скорости одной или двух самых сильных деталей для данного периода активности.

На рис. 10б представлена переменность лучевой скорости наиболее интенсивных эмиссионных деталей (светлые кружки). Темными кружками отмечены эти же детали, когда их плотность потока превышала 1000 Ян. Большими светлыми кружками отмечены детали с потоком более 3000 Ян. Слева (косые кресты) показаны основные детали самых первых VLBI-наблюдений мазерного источника H₂O в направлении G43.8–0.1, выполненных 8 декабря 1977 г. [6].

Кроме того, мы использовали данные всех известных наблюдений с высоким угловым разрешением [7–9, 14]. Внизу отрезками вертикальных линий (над осью абсцисс) отмечены эпохи таких наблюдений. Анализ показал, что имеется достаточно хорошее совпадение лучевых скоростей, полученных другими авторами, с результатами наблюдений, представленных в настоящей работе. Однако имеются и небольшие систематические расхождения, составляющие около 0.2–0.3 км/с. Это может быть связано, например, с разными шкалами скоростей.

Отметим, что нередко и для других источников между результатами наблюдений разных авторов обнаруживаются расхождения значений лучевых скоростей. Они могут достигать 0.4 км/с. По этой причине мы минимизировали расхождения лучевых скоростей наших наблюдений и всех интерферометрических наблюдений, добавив к последним 0.25 км/с. Именно скорректированные данные интерферометрических наблюдений нанесены на рис. 10б. Крестиками обозначены основные детали. Самые интенсивные детали показаны звездочками.

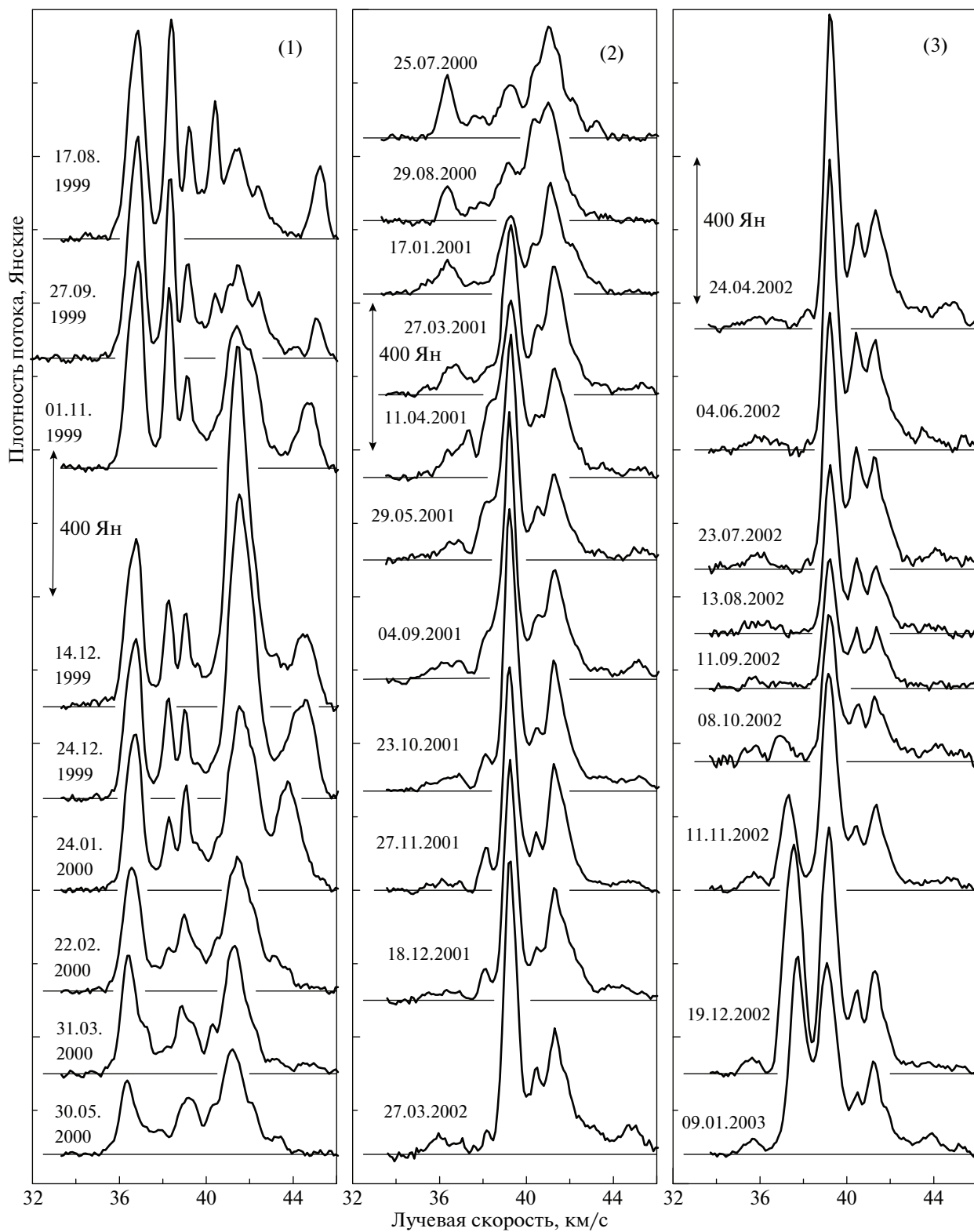


Рис. 1. Спектры мазерного излучения H_2O в G43.8–0.1 в 1999–2003 гг. Для каждого спектра проведена нулевая линия. Двухсторонними вертикальными стрелками показана цена деления.

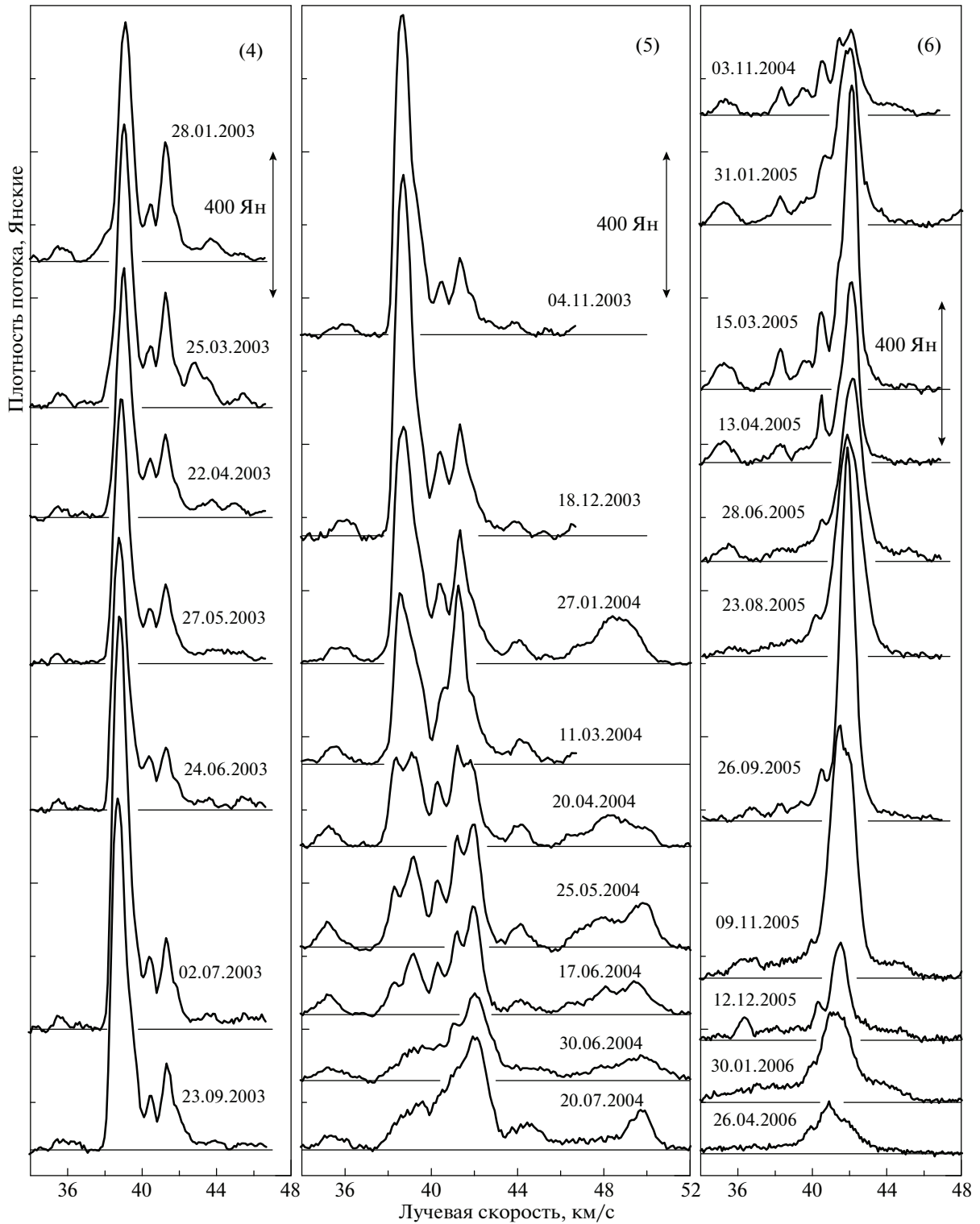


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для 2003–2006 гг.

3.1. Интегральный поток

Переменность мазерного излучения в целом хорошо демонстрирует интегральный поток. Как видно из рис. 10а, наблюдаются многочисленные максимумы излучения.

Оценить величины периодов или квазипериодов в данном случае сложно. Дело в том, что активность мазера H_2O в G43.8–0.1 всегда находится на высоком уровне. Кроме того, имеются периоды, когда сильно повышается поток, в основном, одной

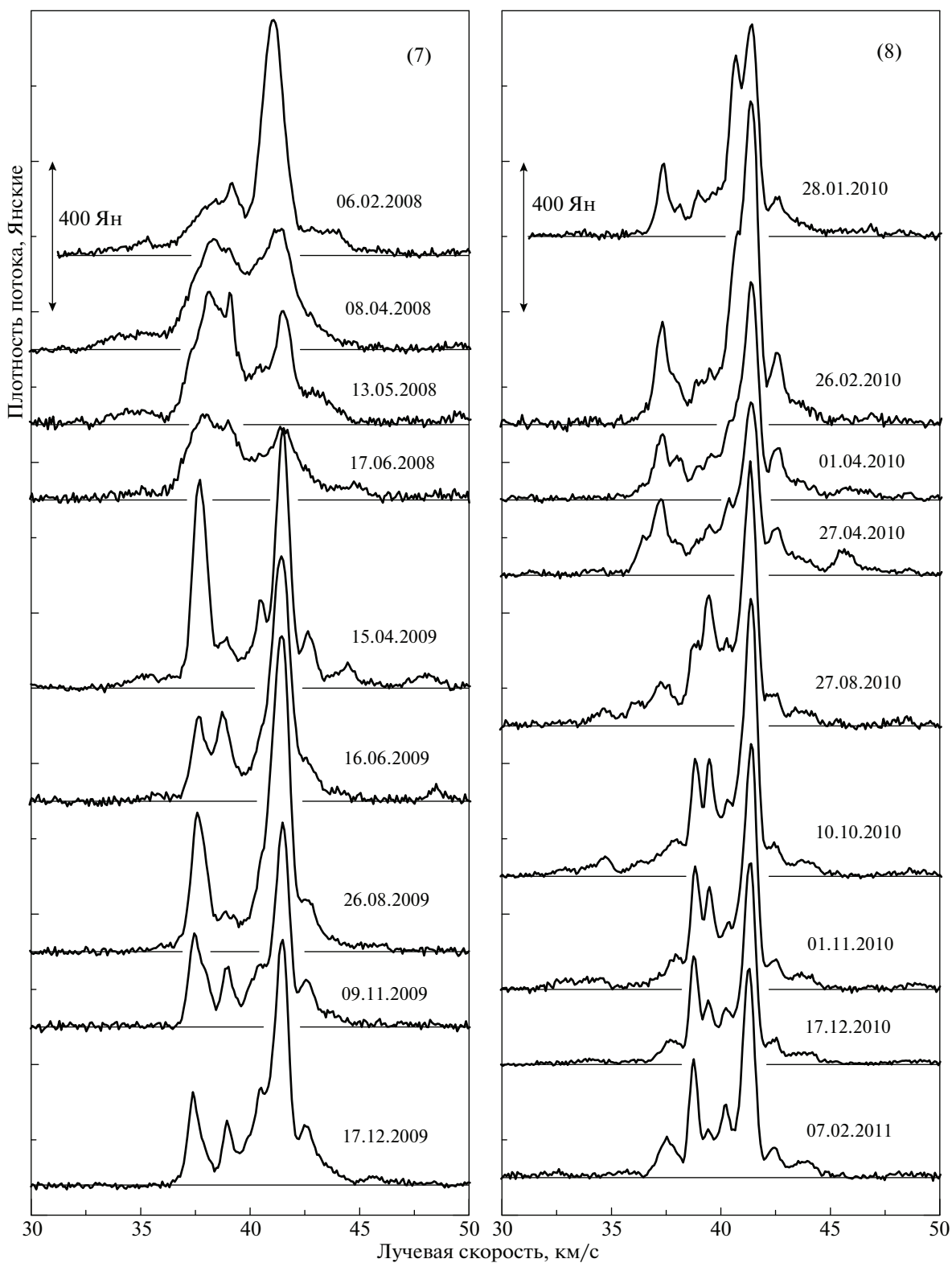


Рис. 3. То же, что на рис. 1, для 2008–2011 гг.

или двух деталей при достаточно высоком уровне излучения других деталей. Немного проще оценить наличие возможной циклической активности

по минимумам интегрального потока. Есть достаточно глубокие минимумы, но они очень кратковременные. Мы выбрали более продолжительные

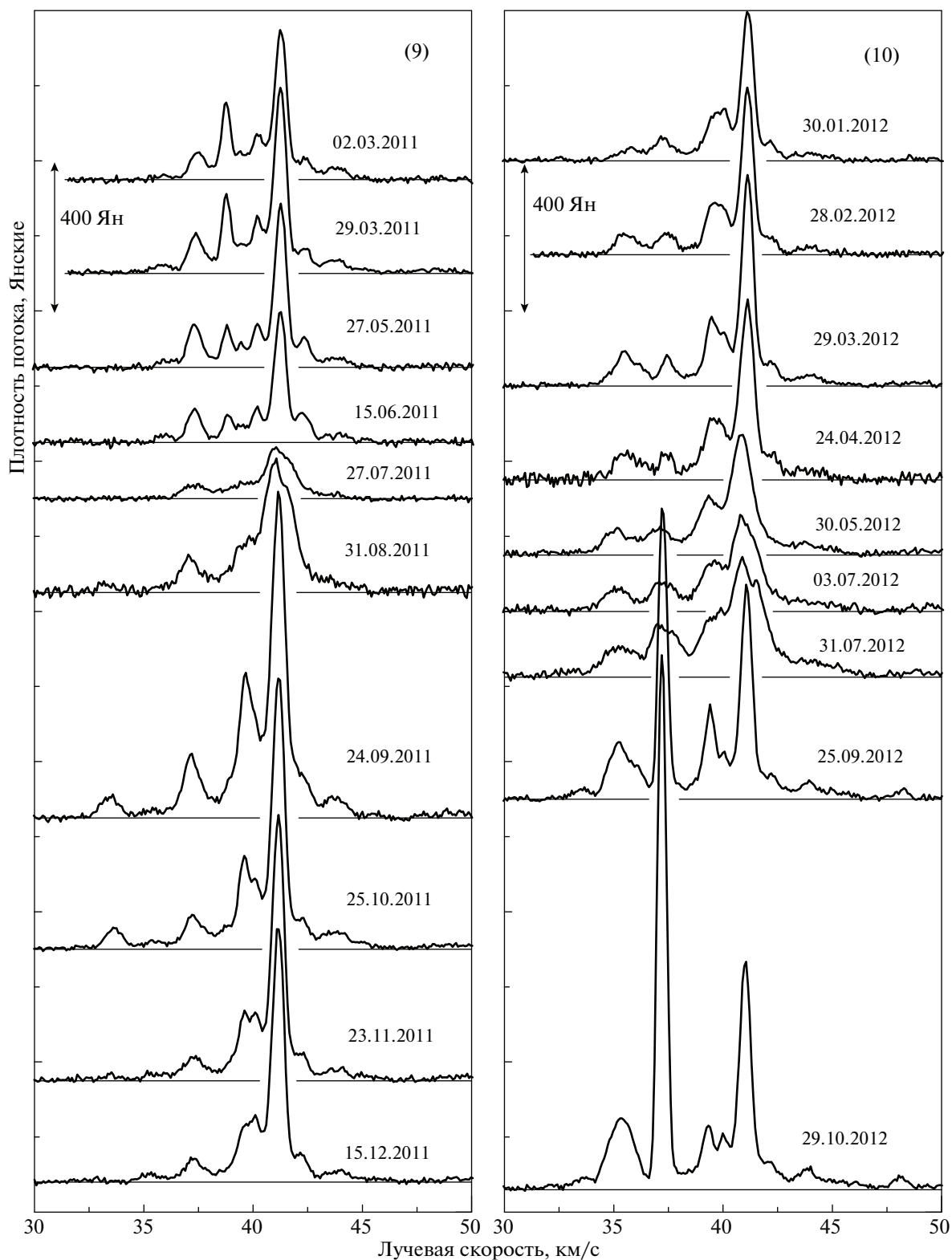


Рис. 4. То же, что на рис. 1, для 2011–2012 гг.

минимумы и отметили их отрезками вертикальных линий на рис. 10а. Значения циклов активности, т.е. протяженность временных интервалов между

такими минимумами, находятся в пределах 3.9–12.1 г. При таком выборе минимумов в каждом цикле активности имеется несколько максимумов.

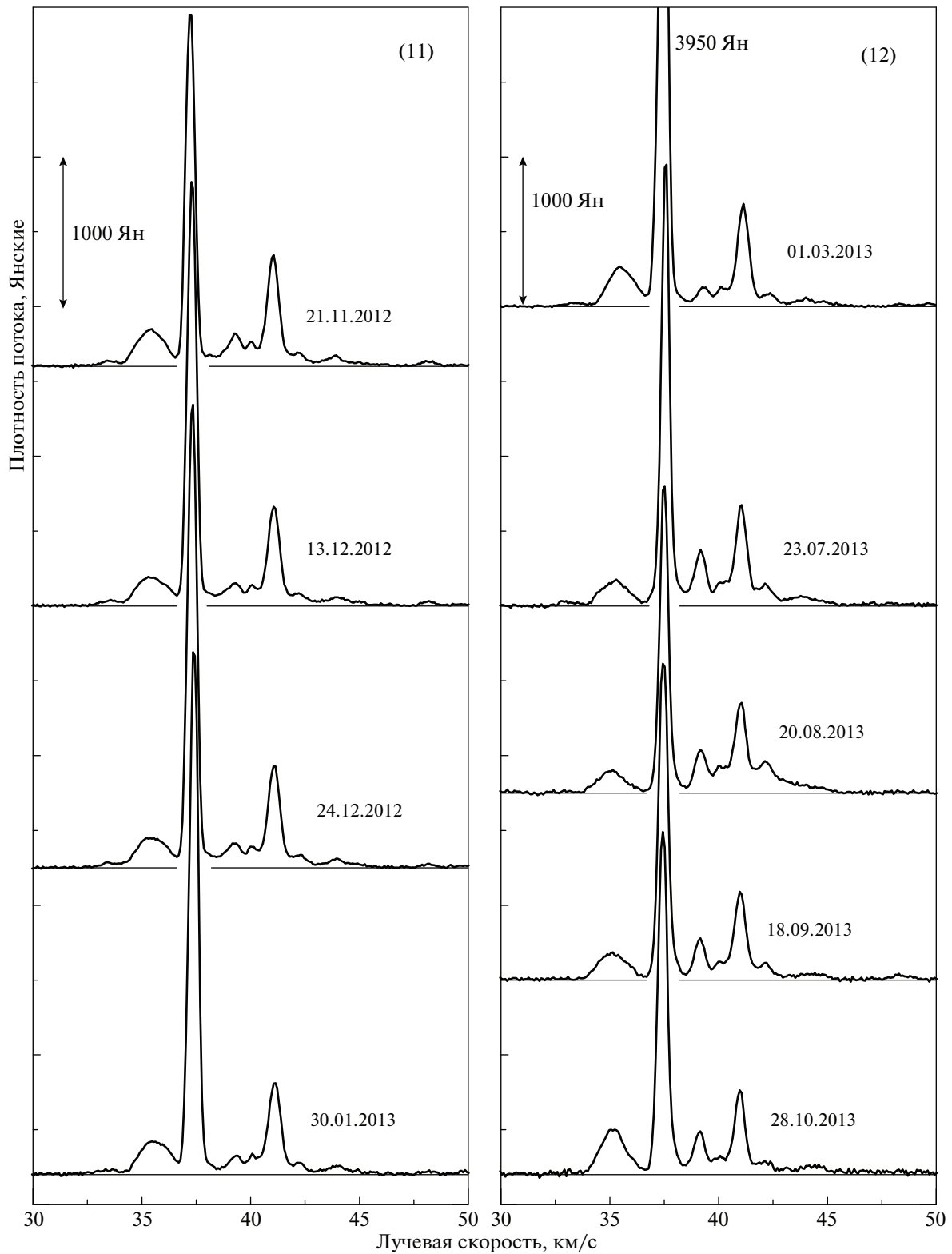


Рис. 5. То же, что на рис. 1, для 2012–2013 гг.

Особенно ярко это выражено в последнем цикле активности. Наблюдаются четыре максимума. В каждом из них преобладает излучение одной дета-

ли. Причем наблюдается последовательное появление излучения деталей в порядке возрастания их лучевой скорости, от 37.2 до 39.2 км/с. Вероятнее

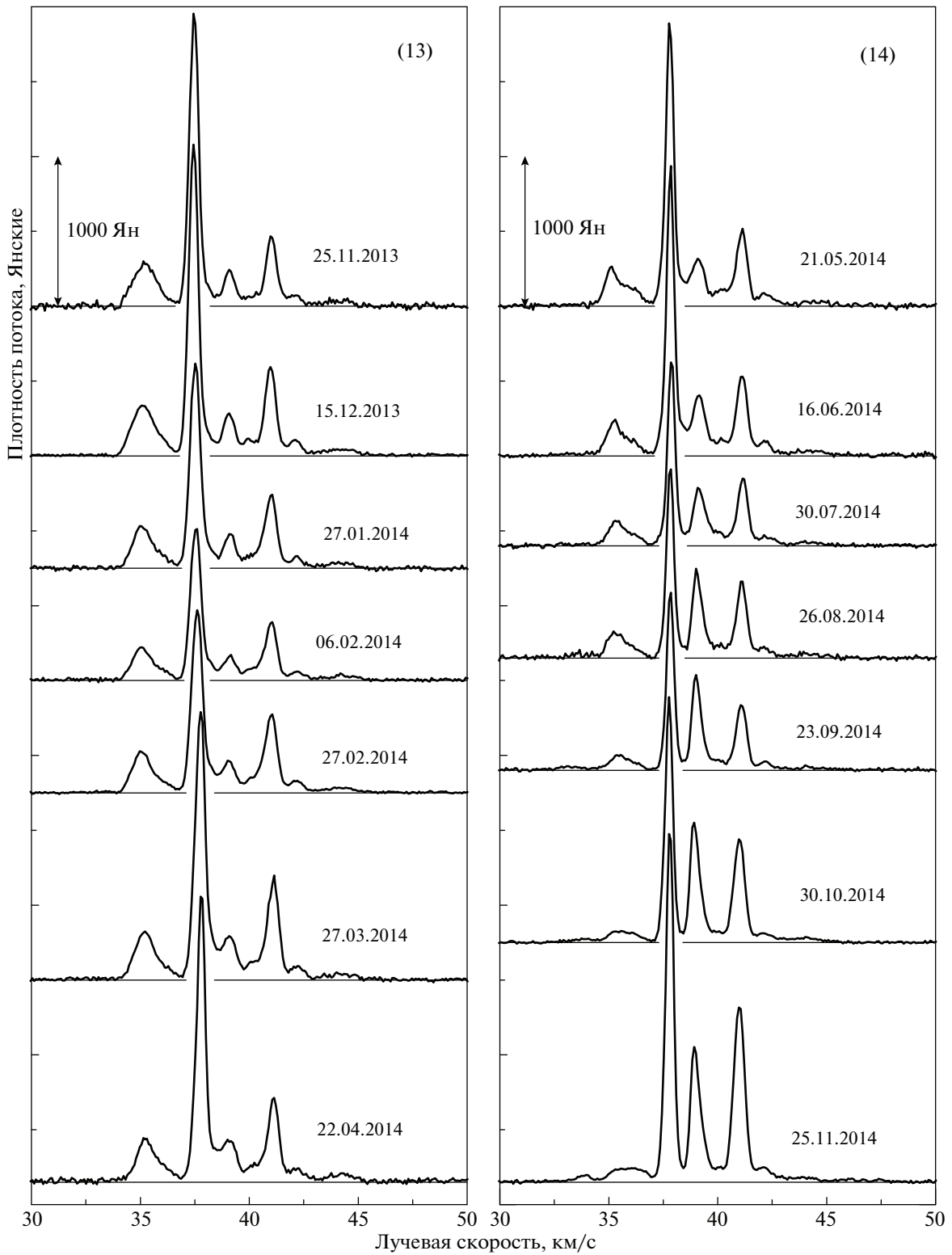


Рис. 6. То же, что на рис. 1, для 2013–2014 гг.

всего, что за возникновение первых трех максимумов ответственна одна и та же деталь, которая дрейфовала по лучевой скорости. Временные интервалы между максимумами в последнем цикле

активности составили от 1.6 до 2.2 г, т.е. они достаточно близки. Не исключено, что можно говорить о каком-то периодическом процессе в данном цикле активности.

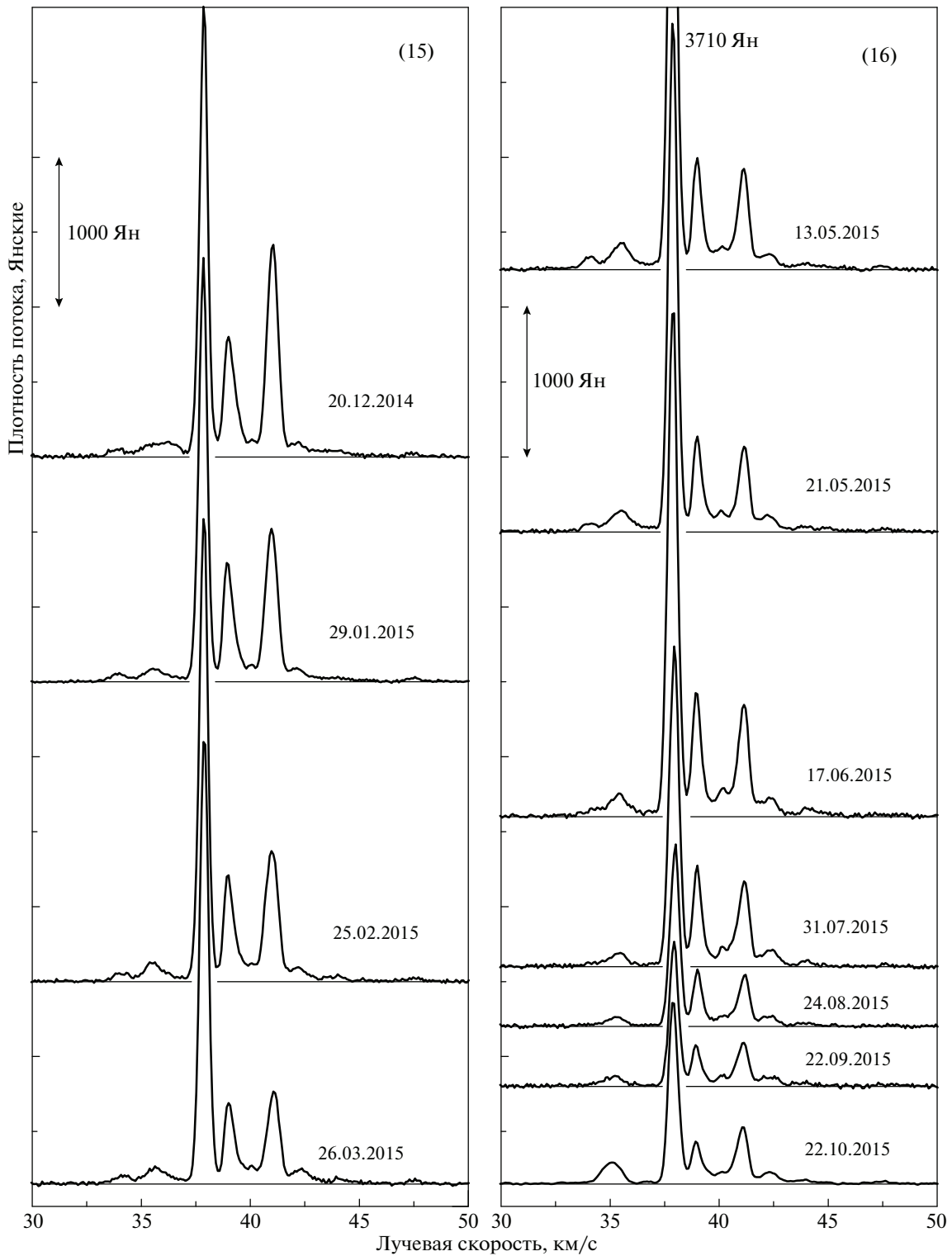


Рис. 7. То же, что на рис. 1, для 2014–2015 гг.

Циклическая переменность мазерного излучения с характерным временем от 3.9 до 12.1 г. может быть связана с изменениями активности центральной звезды в G43.8–0.1 в процессе ее формирования.

3.2. Отдельные детали

Общая картина переменности лучевой скорости основных деталей имеет сложный характер (см. рис. 10б). Тем не менее распределение точек на

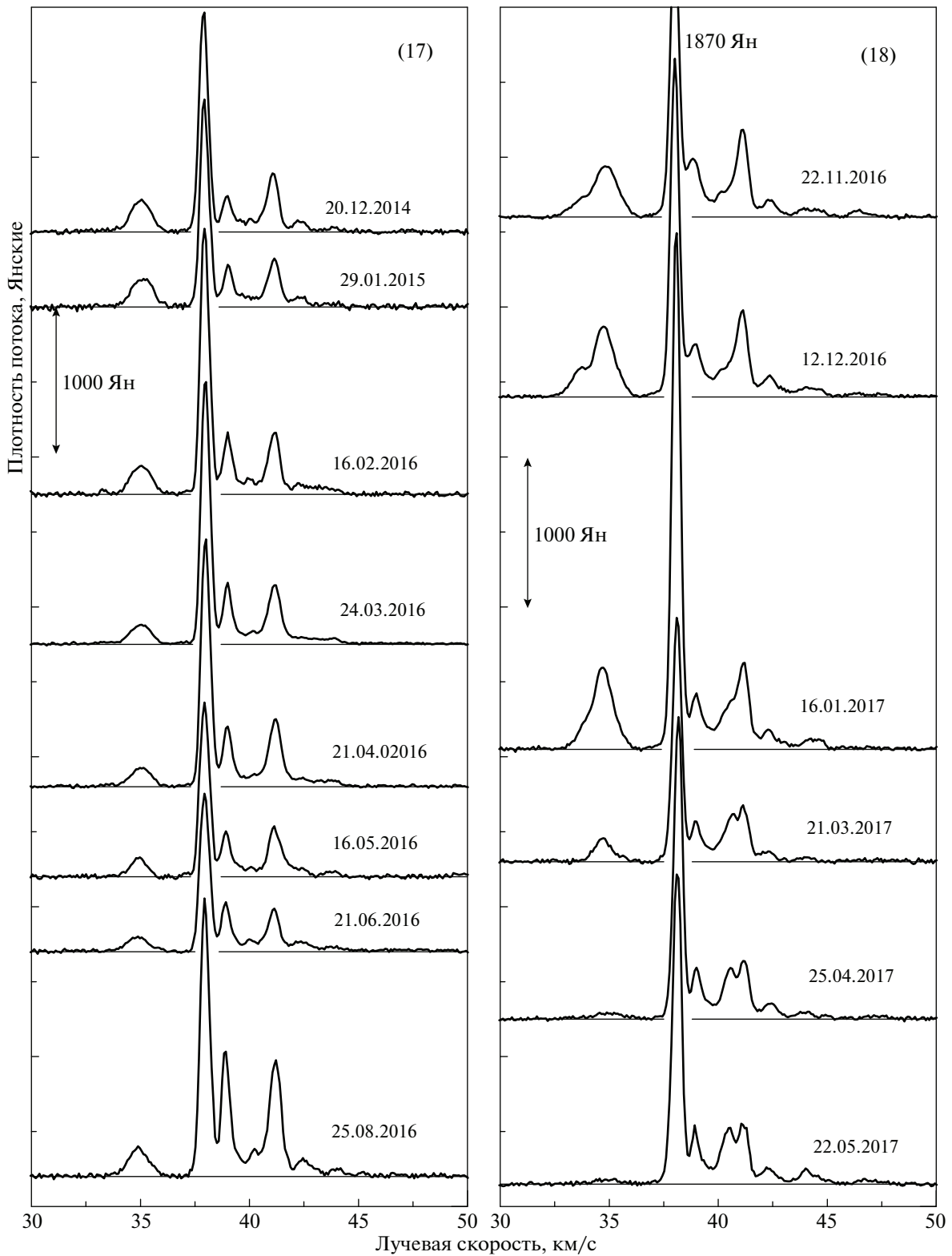


Рис. 8. То же, что на рис. 1, для 2014–2017 гг.

графике не носит хаотического характера. В основном, точки на графике хорошо аппроксимируются некоторыми прямыми линиями. Для удобства назо-

вем их конфигурациями и пронумеруем. Для каждой конфигурации также введены этапы эволюции, отличающиеся друг от друга прежде всего харак-

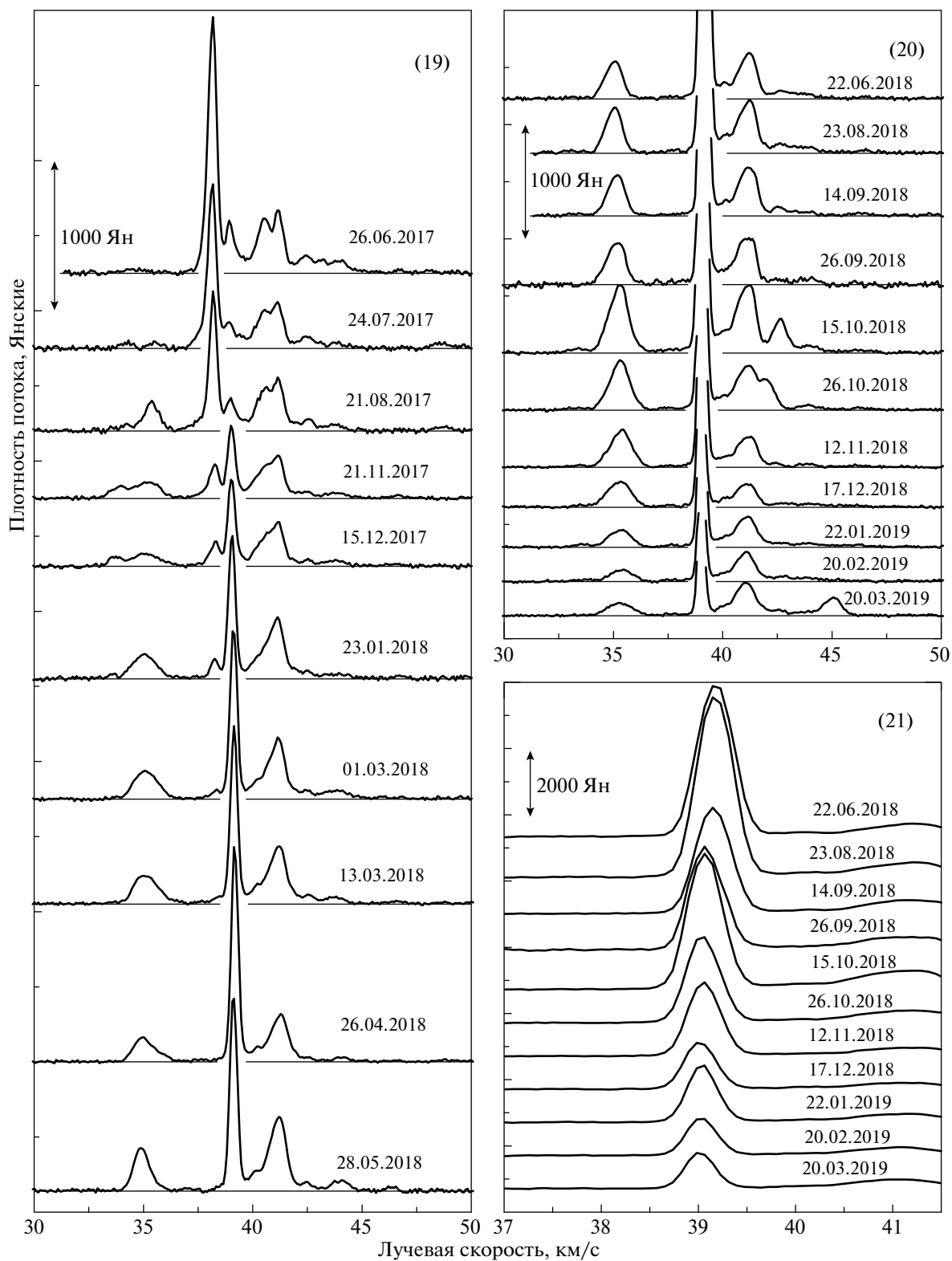


Рис. 9. То же, что на рис. 1, для 2017–2019 гг. Из-за сильной вспышки деталь 39.2 км/с в спектрах с июня 2018 г. ограничена и полностью показана на панели 21.

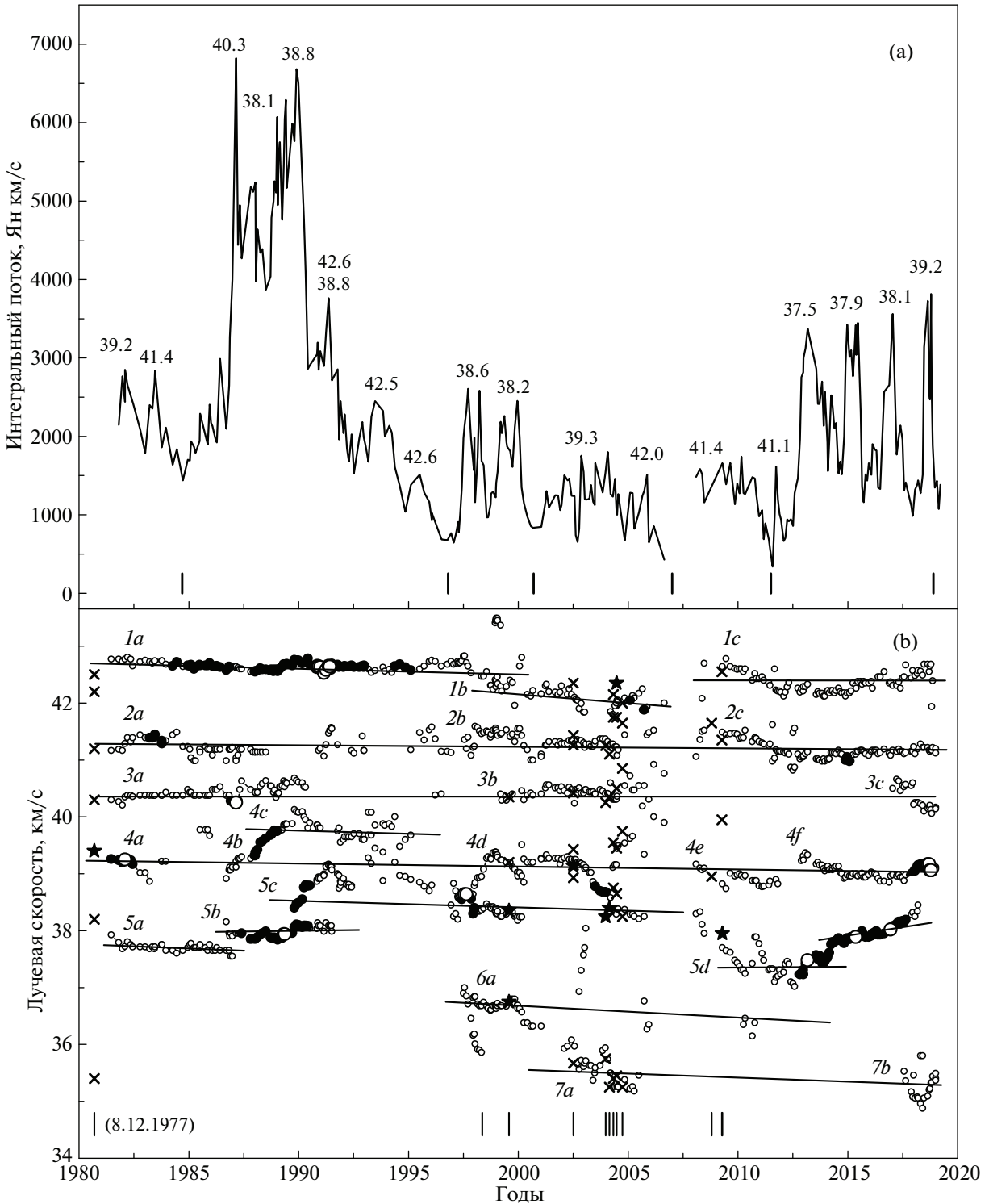


Рис. 10. Переменность интегрального потока (а) и лучевой скорости (б) основных эмиссионных деталей мазерного излучения H_2O . Минимумы активности отмечены отрезками вертикальных линий внизу на панели (а). Для каждого максимума приведено значение лучевой скорости основной детали. На панели (б) светлыми кружками нанесены детали с потоками менее 1000 Ян, а темными — с потоками более 1000 Ян. Для удобства некоторые из них пронумерованы. Внизу над горизонтальной шкалой отрезками вертикальных линий отмечены эпохи VLA наблюдений, а крестиками и звездочками нанесены положения наиболее сильных деталей в эти эпохи. Большими светлыми кружками отмечены детали в максимумах излучения с потоками более 3000 Ян.

тером переменности лучевой скорости. Наиболее сложный характер эволюции имеют конфигурации 4 и 5.

Смысл прямых линий заключается в том, что мы прослеживаем эволюцию излучения деталей в спектрах на близких лучевых скоростях. Это могут быть как отдельные детали, так и компактные скопления деталей с близкими лучевыми скоростями. Возможны также структуры какой-либо другой формы, например, в виде волокон или цепочек, имеющих градиент лучевой скорости. Это видно на примере эволюции конфигураций 4*b*, 4*c* и 5*b*–5*d*, в которых наблюдается дрейф излучения по лучевой скорости.

Для полноты картины эволюции мазерного излучения H₂O отдельных деталей в источнике G43.8–0.1 кратко перечислим основные результаты до 1997 г.

Во время сильных вспышек до 1991 г. для ряда одиночных деталей было обнаружено, что плотность потока и ширина линии этих деталей связаны соотношением $\ln F \propto \Delta V^{-2}$ [14]. Это справедливо для ненасыщенного или для частично насыщенного мазера.

Деталь 1*a* со средней лучевой скоростью 42.6 км/с на протяжении более, чем 15 лет (1982–1997 гг.) была одиночной, что позволило провести тщательный анализ эволюции ее основных параметров: плотности потока, лучевой скорости, ширины и формы линии [11, 13]. Несколько раз менялся режим работы мазера.

Для ряда деталей был обнаружен дрейф излучения по лучевой скорости. Наиболее существенными были дрейфы излучения с номерами 4*b* и 4*c* в 1987–1989 гг., 5*b* и 5*c* в 1989–1990 гг., а также в 1997 г.

Во втором случае (детали 5*b* и 5*c*) во время сильной вспышки в 1989–1990 гг. произошел распад мазерной конденсации на две. Дрейф скорости был вызван воздействием среды на эти конденсации. Этот результат был получен при исследовании переменности плотности потока, лучевой скорости и ширины линии [15]. Следовательно, детали 5*b* и 5*c* (рис. 10) могут приниматься как два очень близких в пространстве мазерных пятна.

В 1997 г. после сильной вспышки на скорости 38.5 км/с с плотностью потока в максимуме около 3700 Ян и шириной линии 0.43 км/с линия стала раздваиваться и расстояние между компонентами плавно увеличилось до 0.9 км/с. В 1998–1999 гг., когда были проведены наблюдения Sagma et al. [7], скорость главного компонента составила 38.3 км/с. Для этого компонента также имело место соотношение $\ln F \propto \Delta V^{-2}$, что справедливо для ненасыщенного или частично насыщенного

мазера. Причиной данной вспышки может быть наложение по лучу зрения двух мазерных пятен.

В 2012–2018 гг. имелись четыре основные детали (возможно скопления деталей). На рис. 11 показана переменность плотности потока (а), лучевой скорости (б) и ширины линии (в) двух из них, в которых происходили вспышки, превышающие в максимумах излучения 3000 Ян. Максимумы излучения детали 5*d* наблюдались на последовательно возрастающих значениях лучевой скорости. За 6 лет лучевая скорость плавно возросла на 1.3 км/с. Ширина линии при этом менялась в пределах 0.4–0.6 км/с, что существенно. Никакой связи между переменностью плотности потока и шириной линии не прослеживается. Вариации ширины линии в данном случае могут быть связаны не с изменением режима работы мазера, а с изменением, например, геометрии мазерного пятна.

Ширина линии детали 4*f* во время сильной вспышки в 2018 г. на 39.2 км/с была меньше чем 5*d*. Лучевая скорость менялась незначительно, ширина линии менялась в 1.5 раза, как и в случае 5*d*. Причем, чем больше поток, тем шире была линия. Это указывает на насыщенное состояние мазера, связанного с деталью 4*f*.

Во время этой вспышки мы также проводили наблюдения на позиционных углах, сильно отличающихся от “стандартных” в нашем мониторинге углов для источника G43.8–0.1. Переменность главной детали 39.2 км/с оценивалась относительно остальных, достаточно стабильных деталей. Никакой корреляции переменности потока с позиционным углом не прослеживалась. Это указывает на отсутствие видимой линейной поляризации излучения, связанного с мазерным пятном на 39.2 км/с.

Как мы отмечали выше, картины эволюции мазерного излучения имеют сложный характер, особенно в 1985–1992 и 2003–2012 гг. Это не позволяет выявить, существует ли циклическая переменность потока отдельных деталей, а тем более введенных нами конфигураций, на протяжении всего мониторинга источника G43.8–0.1.

3.3. Отождествление

В полученную нами общую картину эволюции лучевой скорости основных эмиссионных деталей хорошо вписываются результаты наблюдений Sagma и др. [7], выполненных на VLA НРАО в 1998–1999 гг. (см. рис. 10). Как отмечалось во Введении, ими были найдены четыре мазера (одиночные детали) на лучевых скоростях 36.5, 38.1, 38.95 и 40.1 км/с. На рис. 10б они идентифицируются с фрагментами конфигураций с номерами 6*a*, 5*c*, 4*d* и 3*b* соответственно.

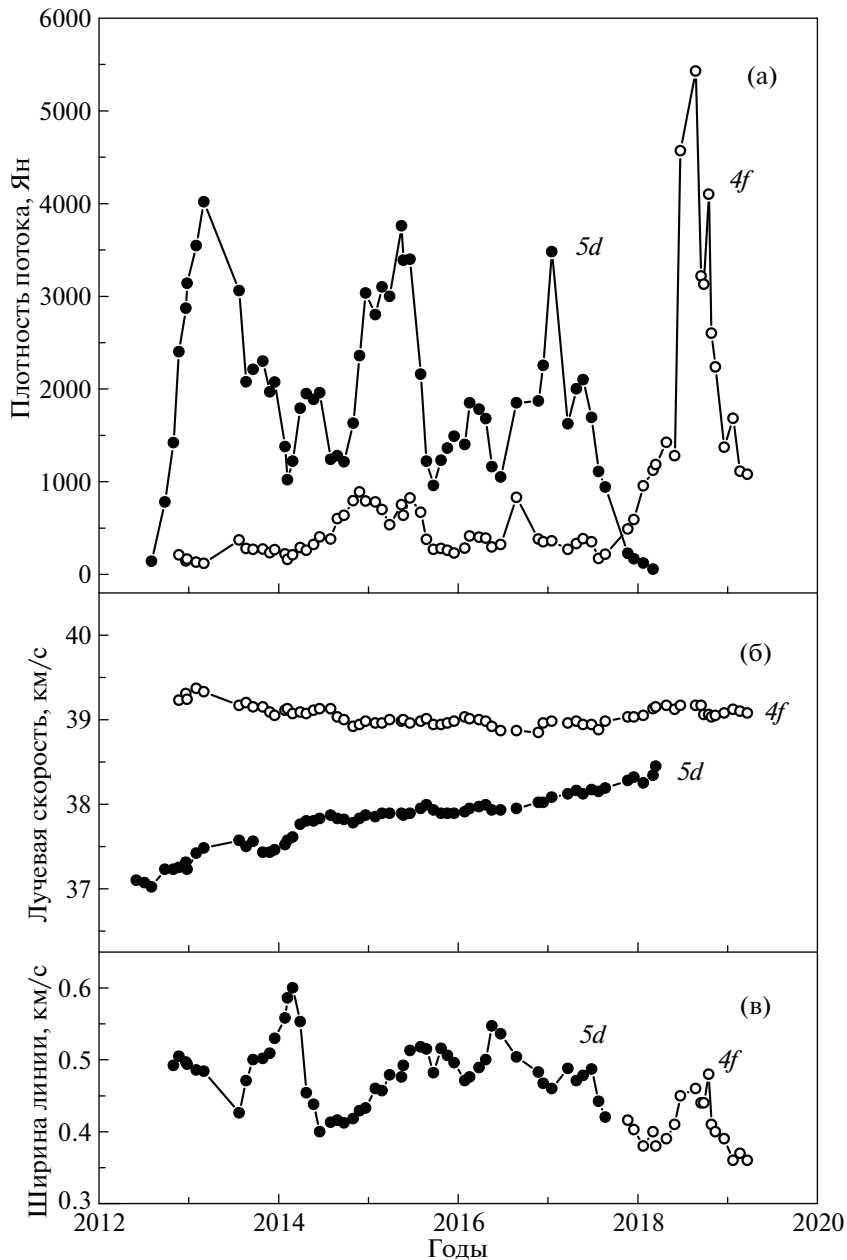


Рис. 11. Переменность плотности потока (а), лучевой скорости (б) и ширины линии (в) двух главных деталей последнего цикла активности.

Также имеется хорошее совпадение положения основных деталей нашего мониторинга и других интерферометрических наблюдений с 2002 по 2009 г.

Теперь попытаемся объяснить, что такое конфигурации, введенные нами согласно рис. 10б. Возникает вопрос. Это реальные структуры, или случайное совпадение излучения на близких лучевых скоростях от разных мазерных пятен, которые пространственно не совпадают?

На рис. 12 мы нанесли положения мазерных пятен согласно всем наблюдениям с высоким угловым разрешением за исключением эпох 1998–

1999 гг., поскольку данные о координатах мазерных пятен в работе Sarma и др. [7] не приводятся. Однако они утверждают, что мазерные пятна располагаются вдоль дуги [6]. Для каждой эпохи мазерные пятна отражены своими символами, что показано сверху слева. Около каждого мазерного пятна указана его лучевая скорость в км/с. Для удобства для каждой эпохи применен свой шрифт.

За весь наш мониторинг мы зарегистрировали девять вспышек, амплитуда излучения которых в максимуме превышала 3000 Ян. Используя данные интерферометрических наблюдений, достаточ-

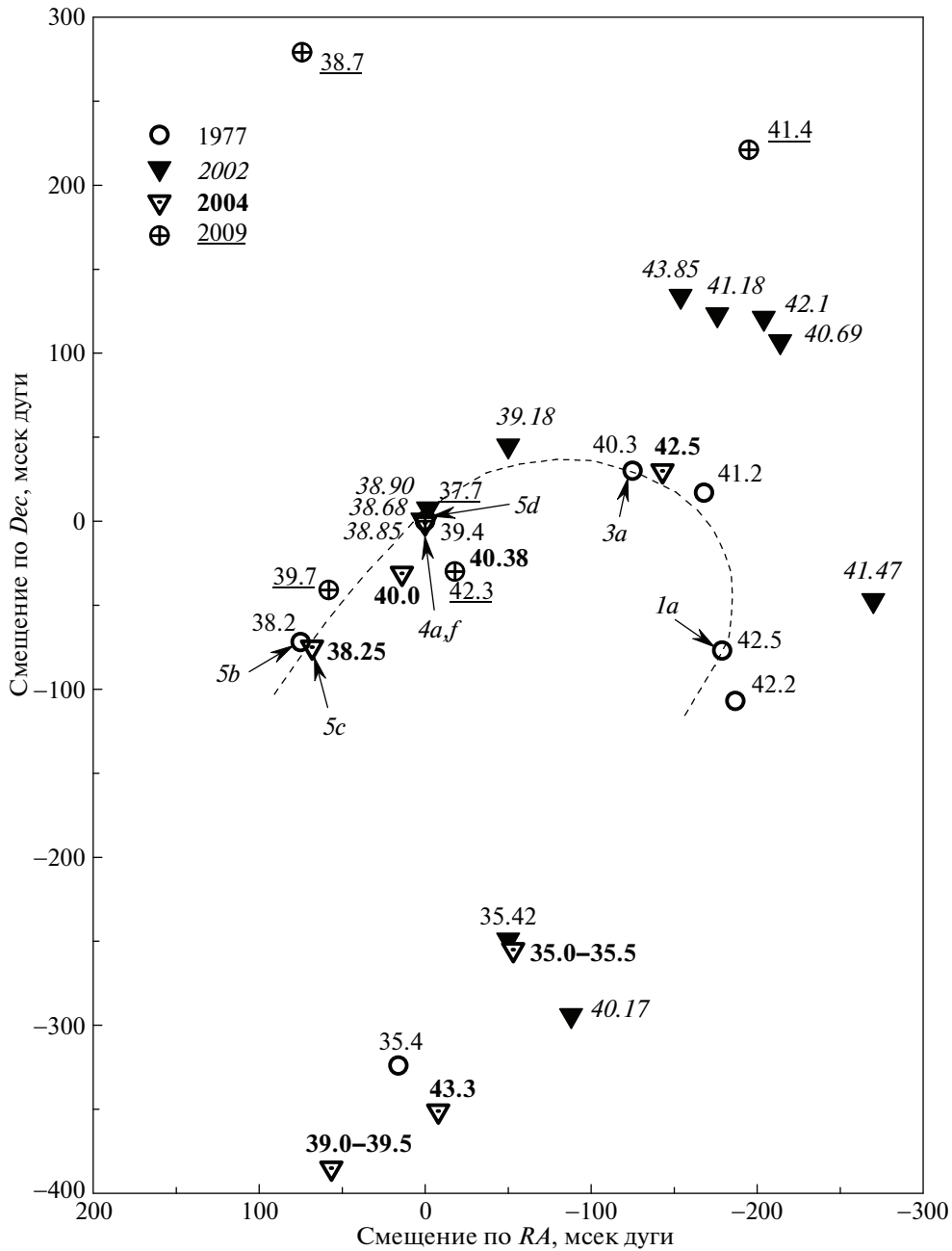


Рис. 12. Карты расположения основных мазерных пятен H_2O для разных эпох. Для каждой эпохи мазерные пятна отражены своими символами, что показано вверху слева. Около каждого мазерного пятна указана его лучевая скорость в км/с. Для удобства для каждой эпохи применен свой шрифт. Стрелками указаны мазерные пятна, в которых произошли вспышки с плотностями потоков в максимумах более 3000 Ян и указаны номера фрагментов конфигураций, где произошли такие вспышки.

но легко определяется принадлежность всех вспышек к соответствующим мазерным пятнам, исключая последнюю вспышку в 2018 г. на лучевой скорости 39 км/с. Стрелками указаны мазерные пятна, в которых произошли эти вспышки. Также указаны номера фрагментов конфигураций согласно рис. 10. Все эти мазерные пятна хорошо ложатся на некоторую дугу, нанесенную штриховой линией.

Согласно Sagma et al. [14] мазерные пятна 43.85, 41.18, 42.1 и 40.69 км/с образуют отдельную дугообразную структуру, которую они назвали северной дугой.

Обращаем внимание на то, что спустя 40 лет после первых наблюдений в 1977 г. спектры H_2O повторились в конце 2018 г., т.е. эмиссионные детали наблюдались на очень близких лучевых

скоростях. Это также хорошо иллюстрируется на рис. 10б. Поэтому можно предположить, что последняя вспышка 2018 г. на $V_{\text{LSR}} = 39.2$ км/с связана с основным мазерным пятном с координатами (0; 0) (см. рис. 12).

Таким образом, все сильные вспышки произошли в мазерных пятнах, расположенных на некоторой дуге [6]. Вне этой дуги расположение мазерных пятен скорее всего носит хаотический характер. Ввиду всего этого можно согласиться с Wu et al. [9], что в G43.8–0.1 нет ярко выраженного молекулярного потока вещества. Тем не менее надо отметить, что согласно Sarma et al. [14], кроме центральной, имеется еще несколько групп мазерных пятен. Северо-восточная и юго-западная могут указывать на наличие околос звездного диска диаметром ~ 3000 а.е.

4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Перечислим основные результаты 38-летнего мониторинга источника мазерного излучения H_2O в G43.8–0.1, связанного с областью активного звездообразования. В настоящей работе были также использованы все опубликованные данные по интерферометрическим наблюдениям.

— Получен полный каталог спектров мазерного излучения H_2O на волне 1.35 см источника G43.8–0.1 с 1981 г. по 2019 г.

— Интегральное излучение мазера H_2O в линии 1.35 см имеет квазипериодическую переменность с характерным временем от 3.9 до 12.1 г., что может быть связано с изменением активности центральной звезды в G43.8–0.1 в процессе ее формирования.

— Обнаружено девять сильных вспышек (в основном со временем нахождения в активной стадии не более одного года) с потоком в максимуме более 3000 Ян. Проведено отождествление этих вспышек с мазерными пятнами на картах, полученных с высоким угловым разрешением.

— Все сильные вспышки произошли в мазерных пятнах, расположенных на некоторой дуге [6]. Вне этой дуги расположение мазерных пятен скорее

всего носит хаотический характер, т.е. в G43.8–0.1 нет ярко выраженного молекулярного потока вещества. Предпочтение следует отдать модели оболочечной структуры мазерного источника H_2O в G43.8–0.1.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам Пушинской радиоастрономической обсерватории АКЦ ФИАН за большую помощь в проведении наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. H. Knowles, J. L. Caswell, and W. M. Goss, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **175**, 537 (1976).
2. N. J. Evans, S. Beckwith, R. L. Brown, and W. Gilmore, *Astrophys. J.* **227**, 450 (1979).
3. H. E. Matthews, P. A. Shaver, W. M. Goss, and H. J. Habing, *Astron. and Astrophys.* **63**, 307 (1978).
4. R. Genzel and D. Downes, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **30**, 145 (1977).
5. S. Kurtz, E. Churchwell, and D. O. S. Wood, *Astrophys. J. Suppl.* **91**, 659 (1994).
6. D. Downes, R. Genzel, J. M. Moran, K. J. Jonston, L. I. Matveyenko, L. R. Kogan, V. I. Kostenko, and B. Rönnäng, *Astron. and Astrophys.* **79**, 233 (1979).
7. A. P. Sarma, T. H. Troland, R. M. Crutcher, and D. A. Roberts, *Astrophys. J.* **580**, 928 (2002).
8. M. Honma, T. Bushimata, Y. K. Choi, T. Fujii, et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **57**, 595 (2005).
9. Y. W. Wu, M. Sato, M. J. Reid, L. Moscadelli, et al., *Astron. and Astrophys.* **566**, id. A17 (2014).
10. E. E. Lekht, E. Mendoza-Torres, and R. L. Sorochenko, *Astrophys. J.* **443**, 222 (1995).
11. E. E. Лехт, *Астрон. журн.* **72**, 532 (1995).
12. E. E. Лехт, Р. Л. Сороченко, *Астрон. журн.* **76**, 758 (1999).
13. E. E. Lekht, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **141**, 185 (2000).
14. A. P. Sarma, T. H. Troland, J. D. Romney, and T. H. Huynh, *Astrophys. J.* **674**, 295 (2008).
15. E. E. Лехт, Н. А. Силантьев, Х. Э. Мендоса-Торрес, А. М. Толмачев, *Письма в Астрон. журн.* **28**, 106 (2002).