

УДК 524.527.7

НАБЛЮДЕНИЯ МАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ OH И H₂O В ОБЛАСТИ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ S128

© 2018 г. Н. Т. Ашимбаева¹, П. Колом², Е. Е. Лехт^{1*},
М. И. Пашенко¹, Г. М. Рудницкий¹, А. М. Толмачев³

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

²Медонская обсерватория, Медон, Франция

³Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
Пушчинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН, Пушино, Россия

Поступила в редакцию 23.02.2018 г.; принята в печать 23.04.2018 г.

Представлены результаты мониторинга мазеров гидроксила и водяного пара в области S128. Обнаружено большое число эмиссионных деталей OH в линии 1665 МГц в обеих круговых поляризациях. Показано, что несмотря на сильную переменность плотности потока в главной линии 1665 МГц, лучевые скорости деталей сохранялись. Обнаружено зеемановское расщепление в линии 1720 МГц, равное 0.86 км/с, что соответствует величине продольного магнитного поля 3.6 мГс. Переменность излучения H₂O имеет циклический характер с квазипериодом от 4 до 14 лет. Характер эволюции отдельных деталей подтверждает, что мазерные источники H₂O А и В связаны с ионизационным фронтом двух сталкивающихся СО облаков, и показывает, что в 1999–2001 гг. активность от мазера В перешла к мазеру А.

DOI: 10.1134/S0004629918090013

1. ВВЕДЕНИЕ

Источник S128 отождествляется с областью Н II каталога Шарплеса [1] и находится на расстоянии около 9 кпк от Солнца. Его особенность состоит в том, что он находится на границе двух взаимодействующих (сталкивающихся) молекулярных облаков. К юго-западу от границы раздела облако имеет скорость -71.5 км/с, причем имеется небольшой градиент лучевой скорости. Облако к северо-востоку от границы (-74 км/с), наоборот, имеет большой градиент скорости см., например, [2]. Вдоль границы раздела облаков находится сверхкомпактная область Н II (S128N) размером 2 пк [3], а южнее нее на $60''$ расположена протяженная область Н II (S128) [4]. В направлении области Н II S128 и сверхкомпактной области УН II S128N расположены ИК-источники IRS1 и IRS2 соответственно [5].

Вблизи S128N находятся два мазерных источника (А и В) с расстоянием между ними $13''$ [2, 6]. Обе области Н II и оба мазерных источника H₂O находятся на границе сталкивающихся облаков, т.е. вблизи ионизационного фронта. Впоследствии

была найдена еще одна область мазерного излучения H₂O, названная областью С [7]. Расположена она южнее области В на $30''$. Мазер гидроксила был обнаружен в 1986 г. вблизи S128N [8].

Столкновение облаков могло положить начало процессу звездообразования в S128. Мазеры А и В наряду с мазером С могут быть связаны непосредственно со столкновением облаков СО, а не с каким-либо конкретным молодым звездным объектом.

2. АППАРАТУРА И НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения в линиях гидроксила на длине волны 18 см проведены на Большом радиотелескопе в Нансэ (Франция) с 2007 по 2017 г. На склонении $\delta = 0^\circ$ диаграмма направленности телескопа на данной длине волны равна $3.5' \times 19'$ по прямому восхождению и склонению, соответственно. Чувствительность телескопа для $\lambda = 18$ см и $\delta = 0^\circ$ составляет 1.4 К/Ян. Шумовая температура системы находилась в интервале от 35 до 60 К в зависимости от условий наблюдений. Спектральный анализ проводился автокорреляционным спектр-анализатором. Разрешение по частоте в главных

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

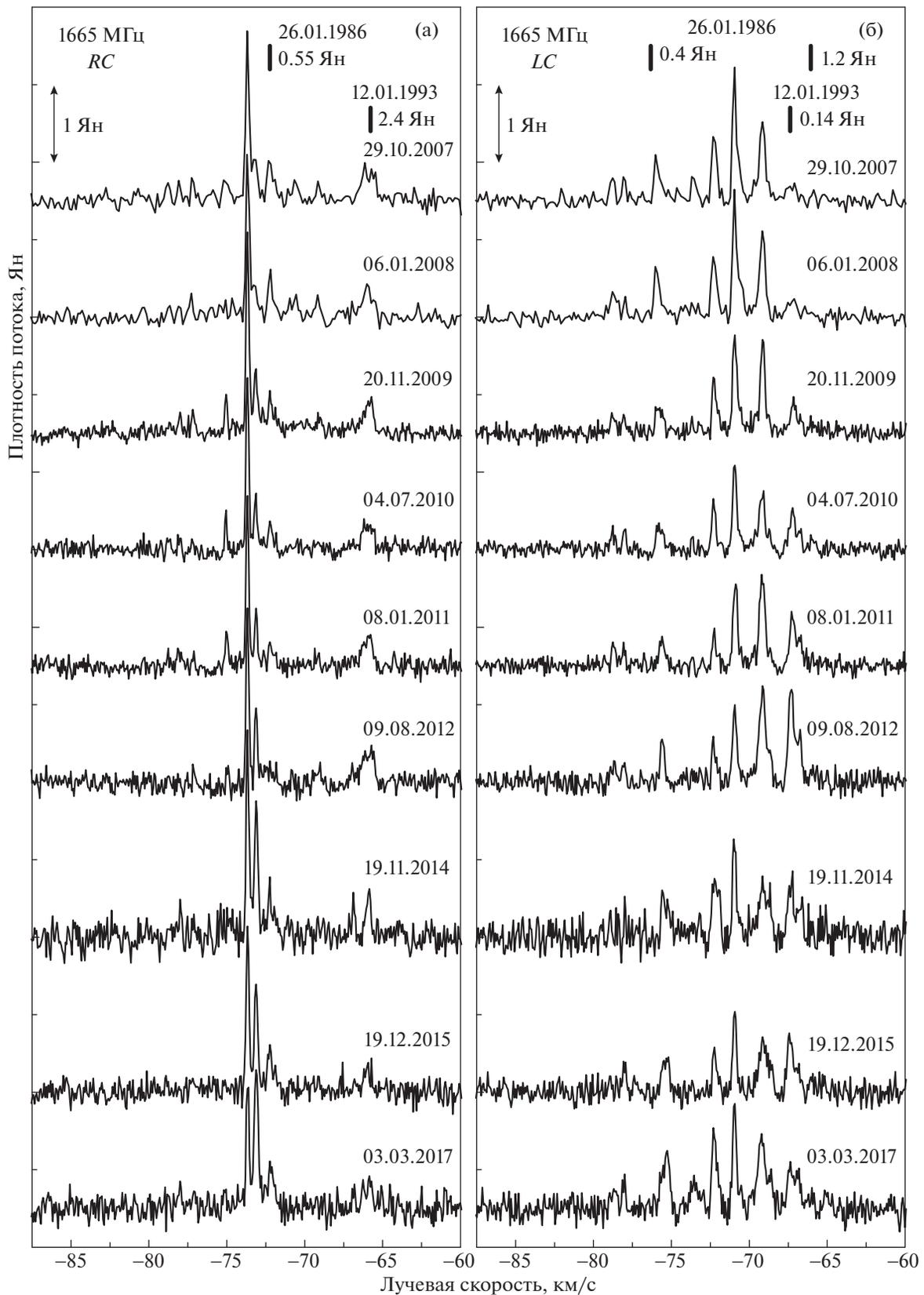


Рис. 1. Спектры мазерного излучения ОН в линии 1665 МГц в правой (RC) и левой (LC) круговых поляризациях. Приведены эпохи наблюдений. Двухсторонними вертикальными стрелками показана цена деления. Вверху отрезками вертикальных линий показаны положения эмиссионных деталей по лучевой скорости на эпохи 26.01.1986 [8] и 12.01.1993 [9].

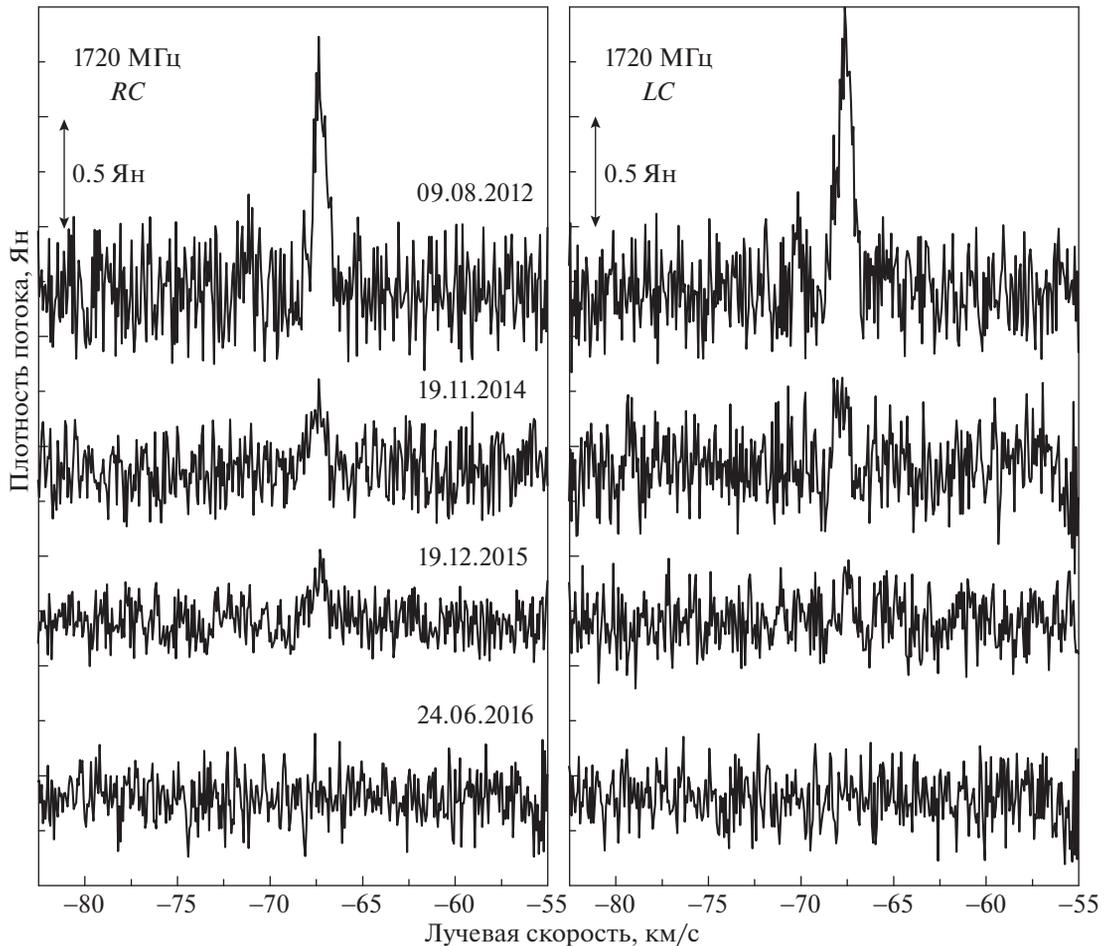


Рис. 2. Спектры мазерного излучения ОН в линии 1720 МГц в правой (*RC*) и левой (*LC*) круговых поляризациях.

линиях 1665 и 1667 МГц в 2007 и 2008 г. составляло 1.52 кГц (0.137 км/с), а с 2008 г. 763 Гц (0.0686 км/с).

В основном наблюдения проводились в главных линиях ОН 1665 и 1667 МГц, а с 2012 г. также в линии 1720 МГц в круговых и линейных поляризациях. В настоящей работе использованы только результаты наблюдений в круговых поляризациях. Излучение в линии 1667 МГц не было обнаружено. Спектры, наблюдаемые в линии 1665 МГц в правой и левой круговых поляризациях, приведены на рис. 1 на панелях (а) и (б) соответственно. Также указаны эпохи наблюдений. В каждой круговой поляризации наблюдается большое число эмиссионных деталей (более 15). Вверху отрезками вертикальных линий показаны положения эмиссионных деталей по лучевой скорости на эпохи 26.01.1986 [8] и 12.01.1993 [9]. Приведены плотности потоков этих деталей.

На рис. 2 показаны спектры в линии 1720 МГц, полученные нами для четырех эпох в круговых поляризациях. Наблюдения соответствуют нисходящей ветви эволюции излучения. В последнем

спектре (24 июня 2016 г.) излучение с потоком более 50 мЯн не обнаружено.

Мониторинг источника S128 в линии H_2O 1.35 см проводится нами на радиотелескопе РТ-22 в Пушинской радиоастрономической обсерватории (Россия) с 1981 г. Результаты наблюдений за период 1981–2000 гг. были опубликованы в работах [10, 11]. Таким образом, полное время мониторинга составило 37 лет. Чувствительность антенны равна 25 Ян/К для точечного источника неполяризованного излучения. Шумовая температура системы в зависимости от погодных условий находилась в пределах 130–250 К. Анализ сигнала осуществлялся 128-канальным анализатором фильтрового типа с разрешением 7.5 кГц (0.101 км/с по лучевой скорости в линии 1.35 см), а с 2005 г. 2048-канальным автокорреляционным анализатором спектра с разрешением 6.1 кГц (0.0822 км/с).

Спектры H_2O за период 2001–2017 гг. приведены на рис. 3–6. Даны эпохи наблюдений. Двухсторонними стрелками указан масштаб по вертикальной оси. Из-за сильной переменности рисунки

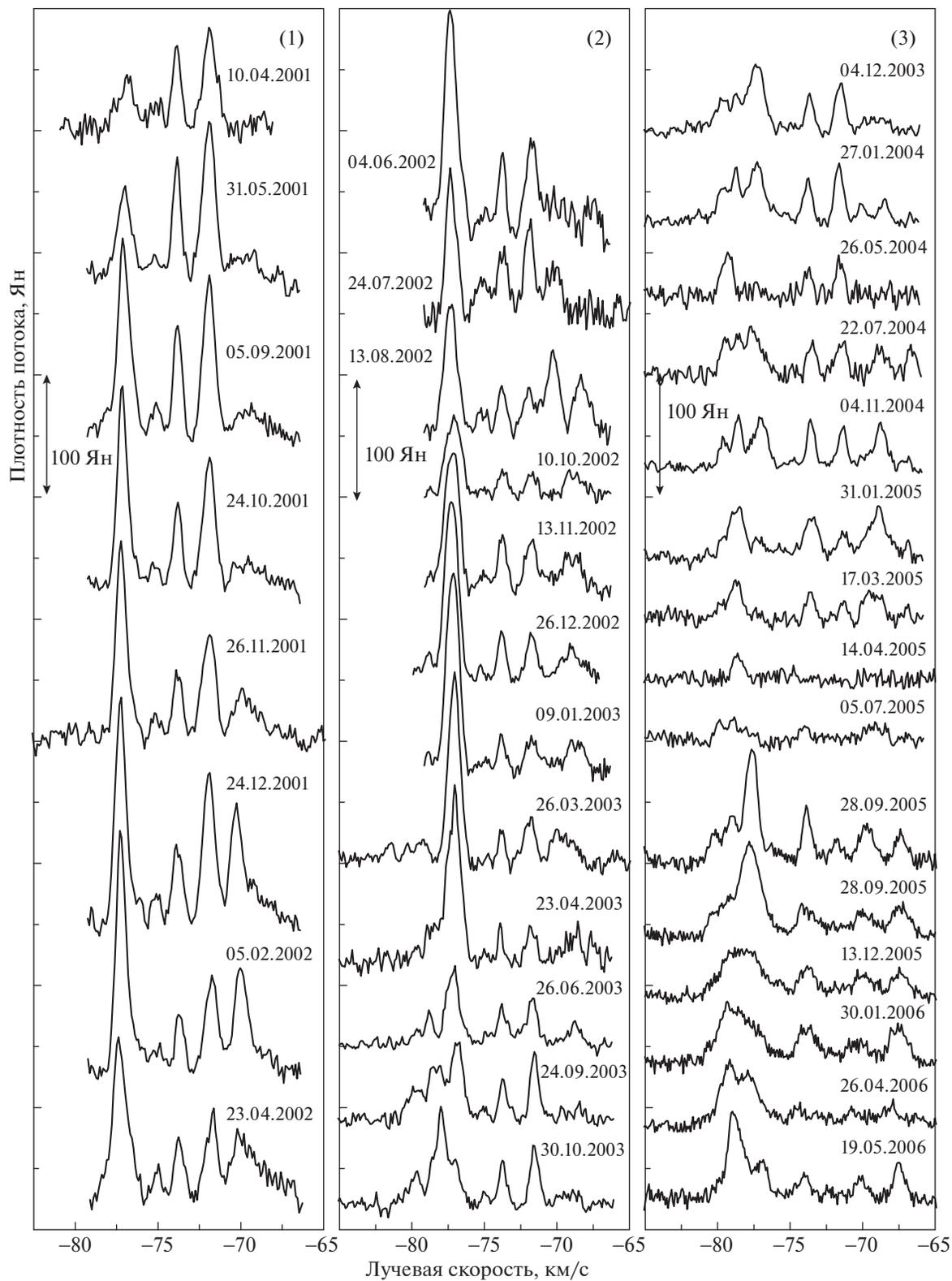


Рис. 3. Спектры мазерного излучения H_2O в S128 в 2001–2006 гг. Обозначения те же, что на рис. 1.

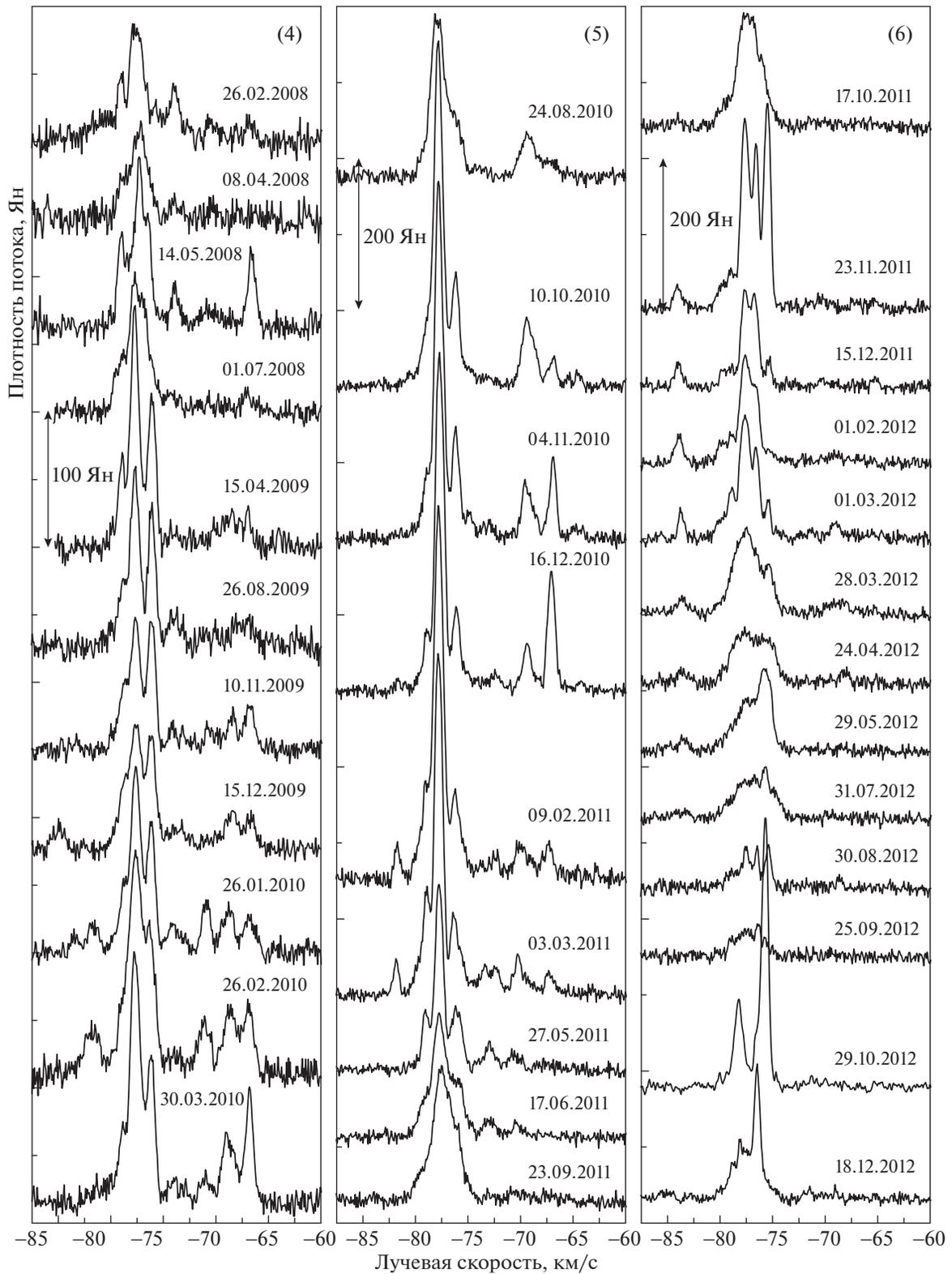


Рис. 4. То же, что на рис. 3, для 2008–2012 гг.

приведены в разных масштабах. С середины 2005 г. наблюдения проводились в широком интервале лучевых скоростей (от -150 до $+10$ км/с). Так как

излучение наблюдалось в интервале скоростей от -87 до -63 км/с, то приведены только центральные части спектров.

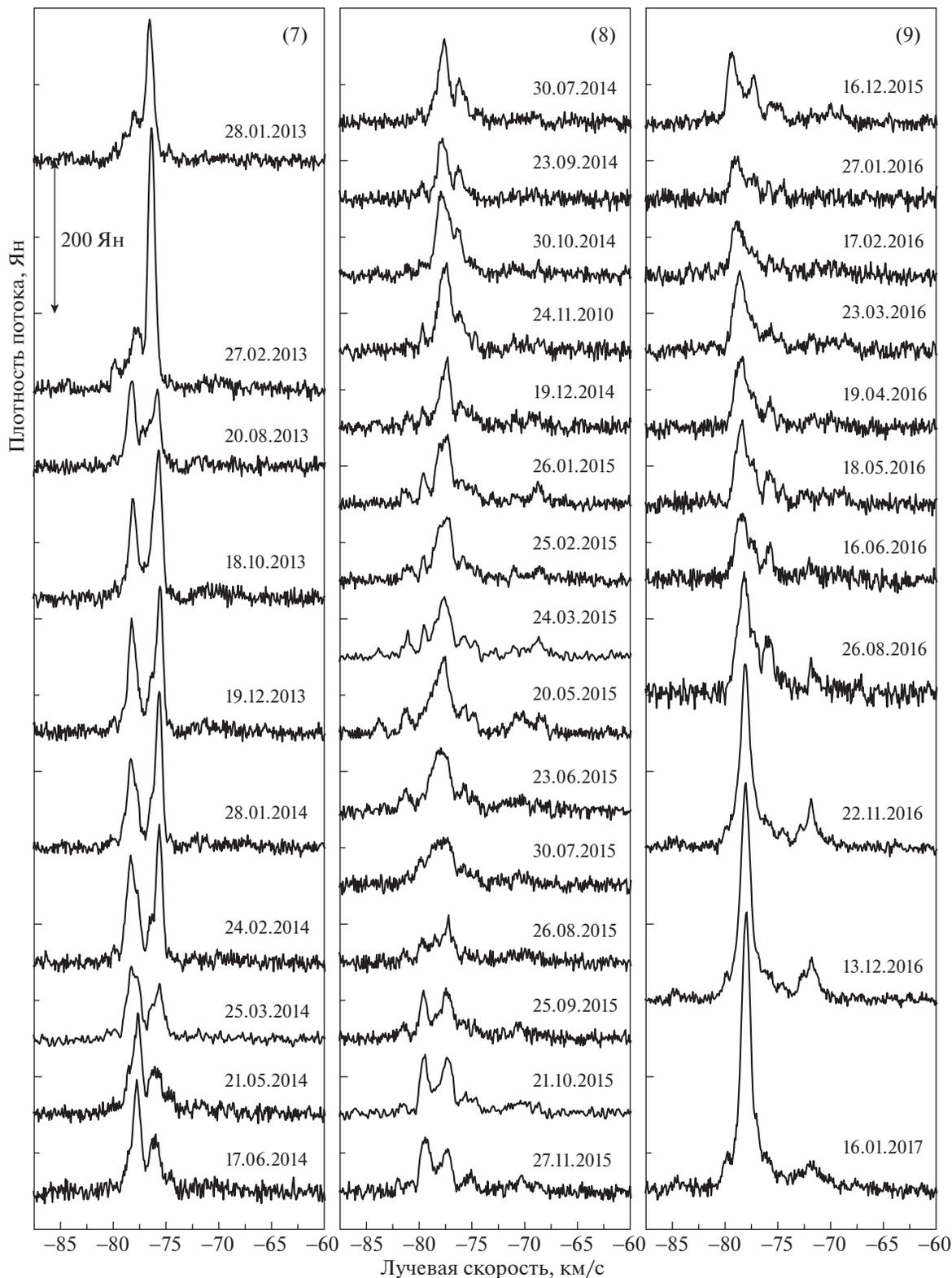


Рис. 5. То же, что на рис. 3, для 2013–2017 гг. Масштаб вертикальной оси, показанный слева, относится ко всем трем панелям.

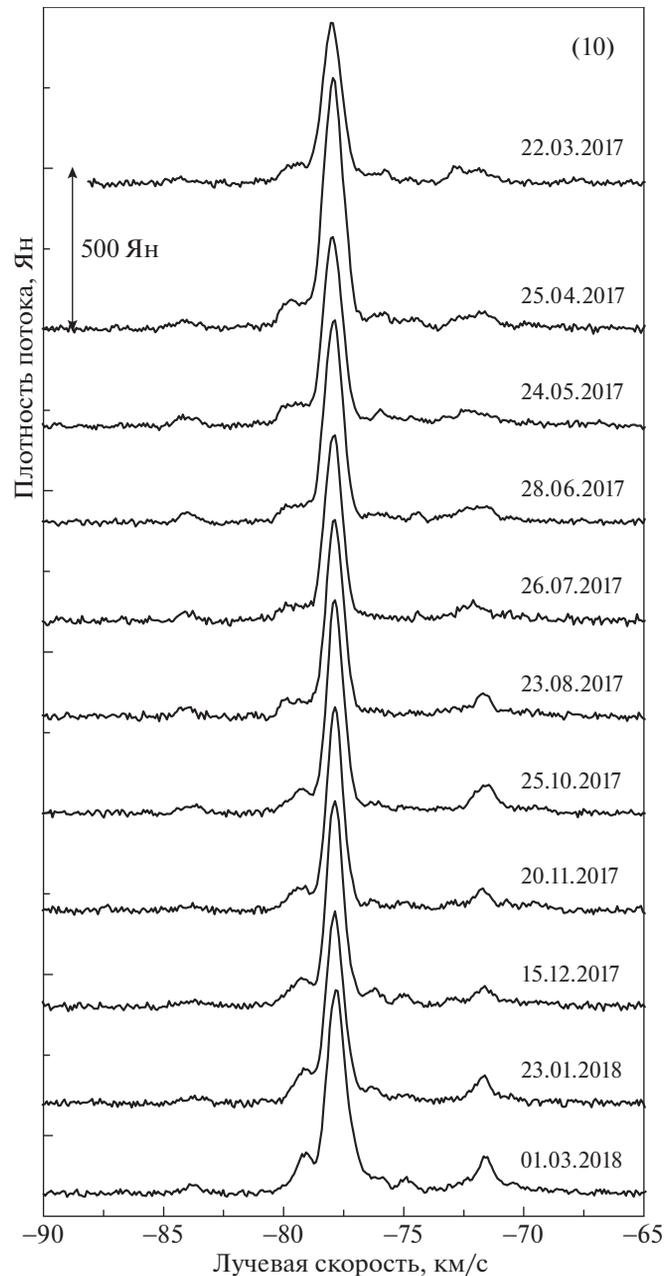


Рис. 6. То же, что на рис. 3, для 2017–2018 гг.

3. МАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ГИДРОКСИЛА

3.1. Переменность излучения

Спектры обнаруженного в 1986 г. мазера ОН на волне 18 см в направлении области S128 были простыми. Согласно [8] в линии 1665 МГц в правой круговой поляризации была лишь одна деталь на скорости -72.24 км/с и две детали в левой поляризации на скоростях -76.32 и -66.05 км/с. Также простым был спектр, полученный авторами [9] в 1993 г., содержащий по одной детали в каждой круговой поляризации. В другой главной линии 1667 МГц излучение ОН не было обнаружено.

Мониторинг мазера ОН в течение 10 лет (2007–2016 гг.) показал наличие в спектрах большого числа эмиссионных деталей в линии 1665 МГц в каждой круговой поляризации (см. рис. 1). Наблюдается высокая переменность мазерного излучения. Сравнение с ранее полученными спектрами в 1986 [8] и 1993 г. [9] усиливает этот вывод.

Несмотря на то что в линии 1665 МГц заметно менялись потоки отдельных деталей, их лучевые скорости сохранялись на протяжении всего мониторинга. Поэтому мы построили средние спектры для обеих круговых поляризаций в отдельности. Это позволило выявить существование слабых де-

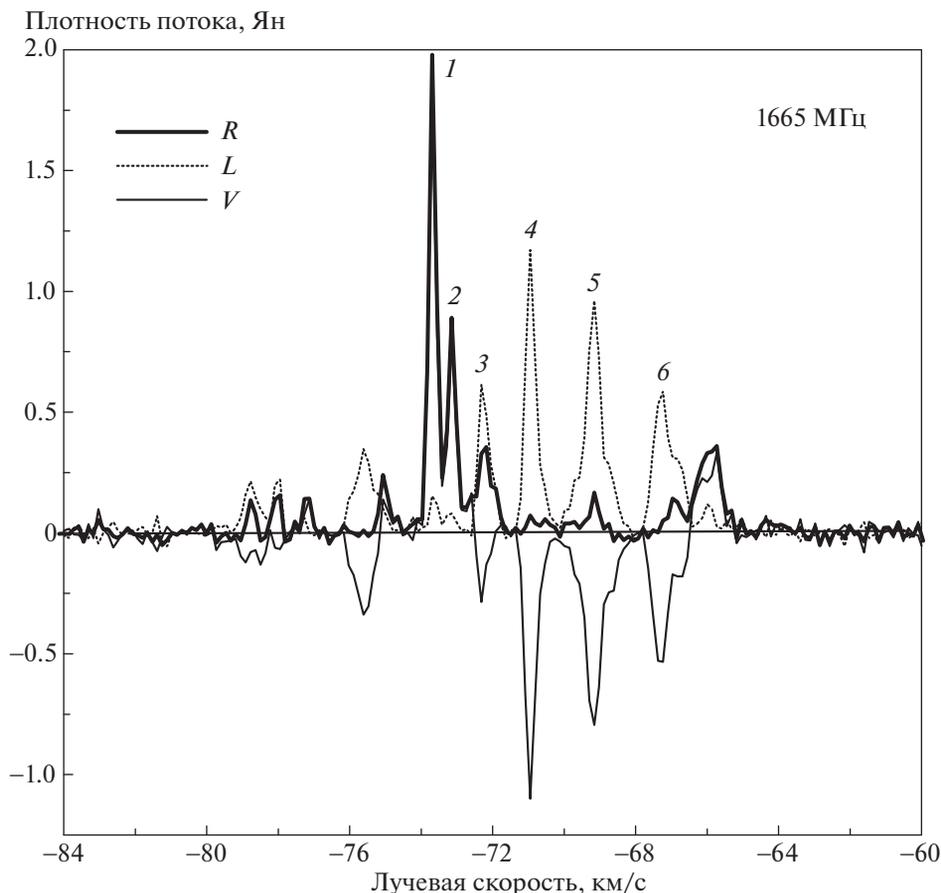


Рис. 7. Средние спектры мазерного излучения ОН в главной линии 1665 МГц для обеих круговых поляризаций в отдельности и параметр Стокса V . Основные детали пронумерованы.

талей (см. рис. 7). Нижняя граница по плотности потока составила около 30 мЯн. Таким образом, мы обнаружили более 15 эмиссионных деталей. Каждая из них имеет излучение в обеих круговых поляризациях. Степень поляризации деталей различна, меняется в диапазоне от 20 до 90%. Только для одной детали на скорости -76.6 км/с наблюдается 100% круговая поляризация (левая).

Для удобства анализа наиболее сильные детали пронумерованы в порядке возрастания их лучевых скоростей. В интервале лучевых скоростей от -77.7 до -72.6 км/с преобладает излучение с правой круговой поляризацией, а в интервале от -72.6 до -66.5 км/с — с левой круговой поляризацией. Никакой другой закономерности между лучевой скоростью и степенью поляризации не просматривается.

На рис. 8 на двух верхних панелях приведена переменность плотности потока основных, наиболее интенсивных и стабильных деталей в линии 1665 МГц в правой и левой круговых поляризациях. Для каждой детали приведены значение лучевой скорости, номер детали и вид круговой

поляризации. На двух нижних панелях показана переменность ширины линии этих же деталей.

Корреляция в характере переменности потока просматривается только для двух деталей $3L$ (-72.22 км/с) и $4L$ (-70.94 км/с), а ширин линий — для деталей $1R$ и $3L$. Корреляция переменности между какими-либо параметрами для одной линии не обнаруживается. Лишь на отдельных временных участках имеется корреляция переменности плотности потока и ширины линии. При большом числе эмиссионных деталей перечисленные выше корреляции могут иметь случайный характер. В этом случае можно говорить о сложной структуре области возникновения мазерного излучения гидроксила.

Следует также отметить, что линии достаточно узкие. Наименьшая ширина линии составляет всего лишь 0.17 км/с, в то время как температуре среды ~ 60 К соответствует тепловая ширина линии более 1 км/с. В случае существования мелкомасштабных турбулентных движений ширина линии может быть еще больше. Таким образом, имеет место сильный мазерный эффект.

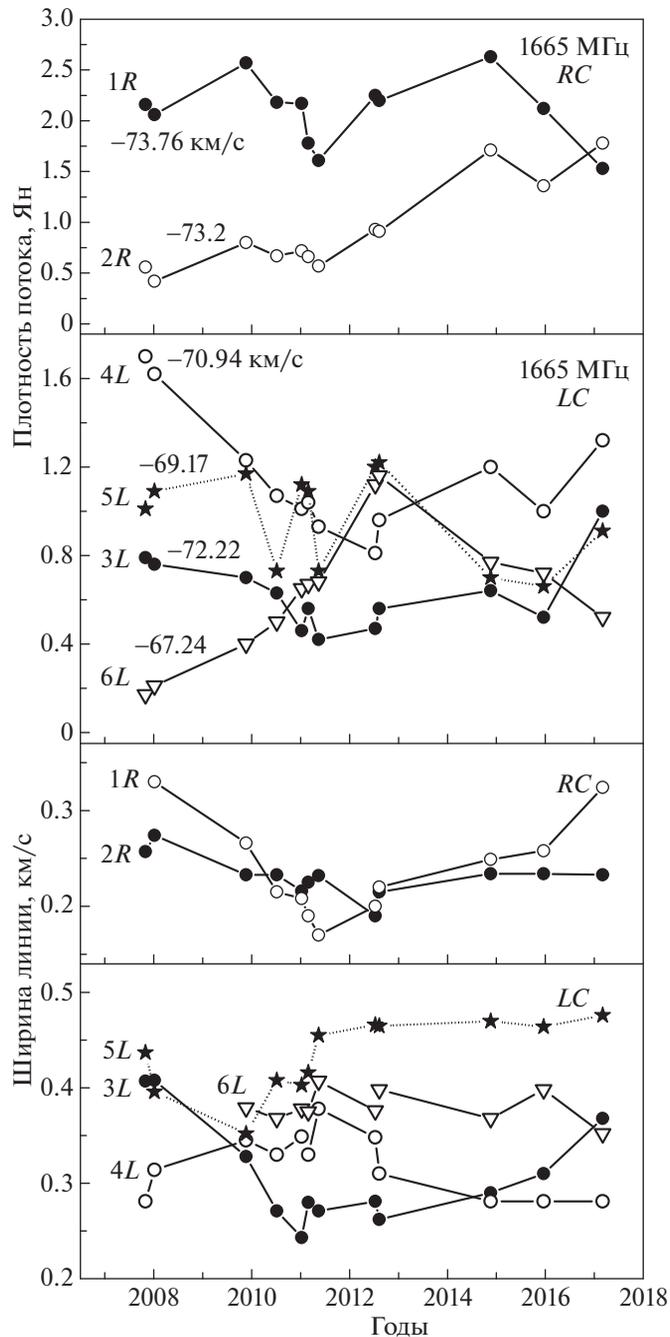


Рис. 8. Переменность мазерного излучения ОН (плотность потока и ширина линии) в линии 1665 МГц основных деталей. Для каждой детали приведено значение лучевой скорости, а также номер согласно рис. 7. Указан вид круговой поляризации (*R* — правая, *L* — левая).

3.2. Магнитное поле

На рис. 7, кроме средних спектров, показан параметр Стокса *V* в линии 1665 МГц. Никакая зеемановская пара здесь не просматривается. Это означает отсутствие продольного магнитного поля.

На рис. 9 приведена зависимость от лучевой скорости параметра Стокса *V* для линии 1720 МГц для двух эпох. Для каждой из них просматривается

зеемановская пара. Среднее значение расщепления составляет 0.85 км/с, что соответствует величине продольного магнитного поля 3.6 мГс. Поле направлено от наблюдателя.

Таким образом, мы установили, что магнитное поле в линии 1665 МГц отсутствует. Зато имеется магнитное поле в линии 1720 МГц. Это довольно редкое явление для гидроксильных мазеров. Также отметим, что мазер в главной линии находится в

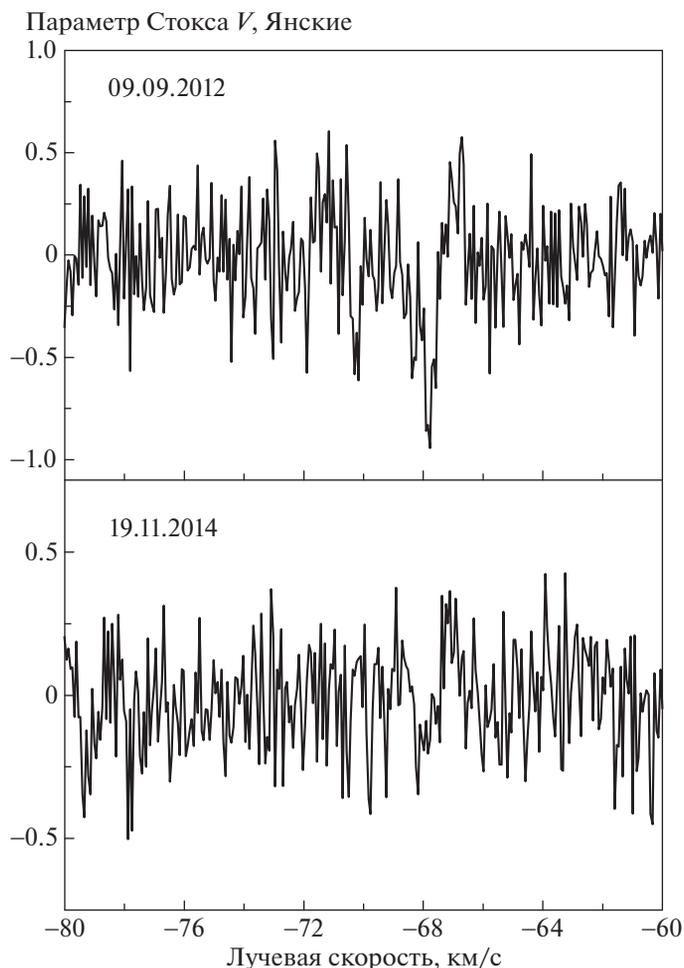


Рис. 9. Зеемановское расщепление в спутниковой линии ОН 1720 МГц.

достаточно активной фазе. Это аргументируется большим числом эмиссионных деталей по сравнению с эпохой его обнаружения. В противоположность этому излучение в спутниковой линии 1720 МГц исчезло.

Перечисленные выше факторы могут быть аргументами в пользу того, что области генерации мазерного излучения ОН в линиях 1665 и 1720 МГц не совпадают.

4. МАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ВОДЯНОГО ПАРА

4.1. Интегральный поток

Переменность интегрального потока для всего нашего мониторинга за 37 лет показана на рис. 10. Видно, что имеет место циклический характер изменений интегрального потока. Ранее это было показано в работах [11] для временного интервала 1982–2000 гг. и [12] для интервала 1987–1999 гг. Результаты наблюдений настоящей работы (2001–2018 гг.) подтверждают такой характер переменности. На протяжении 37 лет насчитывается 5 циклов

мазерной активности. Деление на циклы проводилось по минимумам активности, что является вполне естественным. Для удобства анализа для максимумов всех циклов активности введены обозначения от М1 до М5. Мы называем наблюдаемую переменность циклической, а не периодической, так как временные интервалы между максимумами излучения сильно различаются, от 4 до 14 лет.

Самым продолжительным был третий цикл. Он довольно сложен, с дополнительными максимумами, для которых мы ввели обозначения m1, m2 и m3.

4.2. Средние спектры

Для удобства анализа эволюции мазеров H_2O вблизи каждого максимума интегрального потока (основных и дополнительных) были построены средние спектры, которые представлены на рис. 11. Указаны временные интервалы усреднения. Средние спектры позволяют оценить характер переменности самого спектра. Это важно, поскольку источник является двойным и неразрешим на

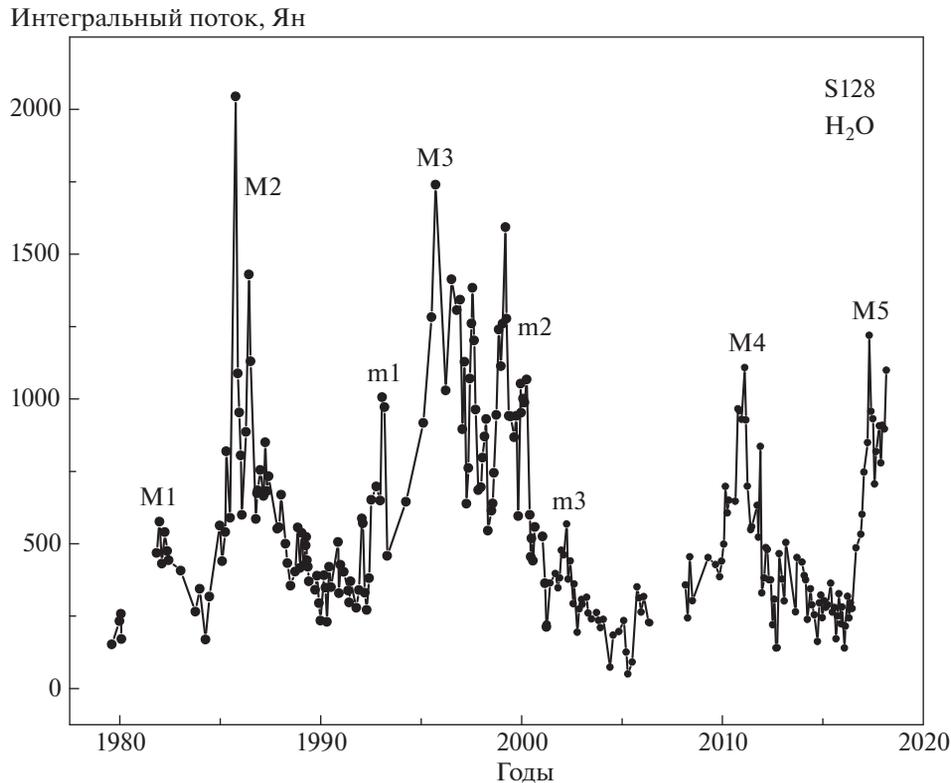


Рис. 10. Интегральный поток мазерного излучения H₂O в направлении S128. Данные за 1979 и 1980 г. взяты из работы [3]. Для основных максимумов введены обозначения от M1 до M5, а для дополнительных — m1, m2 и m3.

одионочной антенне. Напомним, что из наблюдений с высоким угловым разрешением было получено, что основное излучение в районе лучевой скорости -78 км/с возникает в направлении на источник А, а на скорости -72 км/с — в направлении на В. Сравнение средних спектров в цикле M3 показывает, что имеется переход мазерной активности от источника В к источнику А, т.е. от одной области ионизационного фронта к другой. Причиной такого явления могло быть какое-то возмущение, распространяющееся вдоль ионизационного фронта. Это может быть не сама ударная волна, а ее фронт.

4.3. Отдельные эмиссионные детали

Основное излучение для циклов активности M4 и M5 (2001–2017 гг.) в спектре H₂O наблюдается вблизи скорости -78 км/с и, следовательно, связано с источником А. Анализ этих циклов активности (см. рис. 12) показал, что имеются различия в эволюции параметров мазерного излучения. В цикле 2010–2011 гг. имеется ярко выраженный максимум потока. При этом на восходящей ветви роста потока лучевая скорость и ширина линии менялись незначительно, хотя можно увидеть и небольшую корреляцию. На нисходящей ветви ширина линии не менялась.

В 2016–2017 гг. картина эволюции была иной. Имеются регулярный и значительный рост потока и одновременный дрейф лучевой скорости в сторону ее роста. Также одновременно происходило сужение линии. Видно, что величина дрейфа скорости (0.25 км/с) и величина, на которую уменьшилась ширина линии (0.30 км/с), практически одинаковые. Это обстоятельство может стать основным вкладом в построении модели мазера водяного пара на скорости -78 км/с.

В 2018 г. структура линии стала меняться. Произошел небольшой рост плотности потока, рост лучевой скорости и, самое важное, значительное расширение линии. Это свидетельствует о появлении излучения от других деталей с очень близкими лучевыми скоростями. Кроме того, форма линии стала отличаться от гауссовой, особенно в крыльях линии.

4.4. О модели водяного мазера

Как мы уже отмечали [7], мазерные конденсации, вероятнее всего, связаны с ионизационным фронтом ударной волны, которая возникает на границе столкновения двух молекулярных СО облаков. На основании направления дрейфа скорости мазера -72 км/с в период 1989–2000 гг.

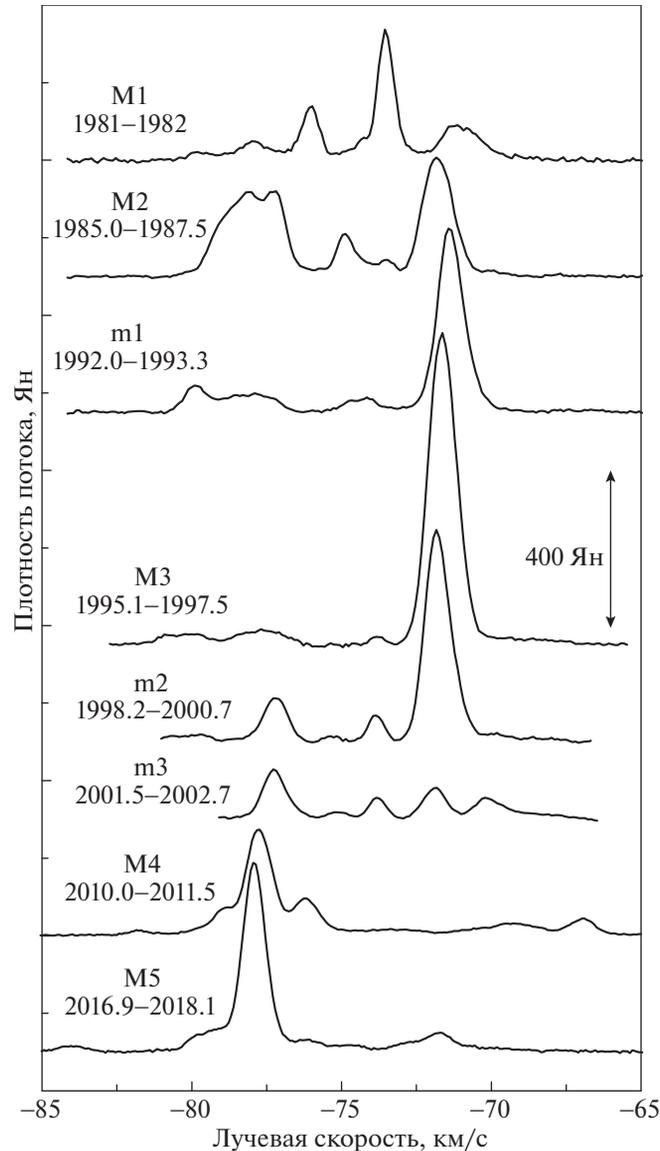


Рис. 11. Средние спектры H_2O , вычисленные для временных интервалов вблизи основных и дополнительных максимумов интегрального потока. Указаны интервалы усреднения.

было показано, что более удаленное CO облако продвигает область столкновения облаков к нам. Согласно [5], этот мазер связан с областью В.

Мы вправе предположить, что возможно также физическое влияние этого процесса на конфигурацию мазерной конденсации. Например, она может подвергаться сжатию сталкивающимися облаками. Согласно [7], возможно также удлинение комков вещества вдоль ионизационного фронта. Эти два механизма могут вызвать дрейф максимума излучения по лучевой скорости с одновременным уменьшением ширины линии. Именно такой характер эволюции имел место для детали на скорости -78 км/с, связанной с областью А.

Таким образом, для двух разных деталей, связанных с источниками А и В, характер переменности излучения в разные эпохи одинаков. Это свидетельствует о том, что причина наблюдаемого характера переменности мазерного излучения деталей в разных источниках А и В одна и та же, т.е. воздействие ионизационного фронта сталкивающихся молекулярных облаков.

5. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Отметим основные результаты, полученные при мониторинге мазерных источников гидроксидла (18 см) и водяного пара (1.35 см) в направлении

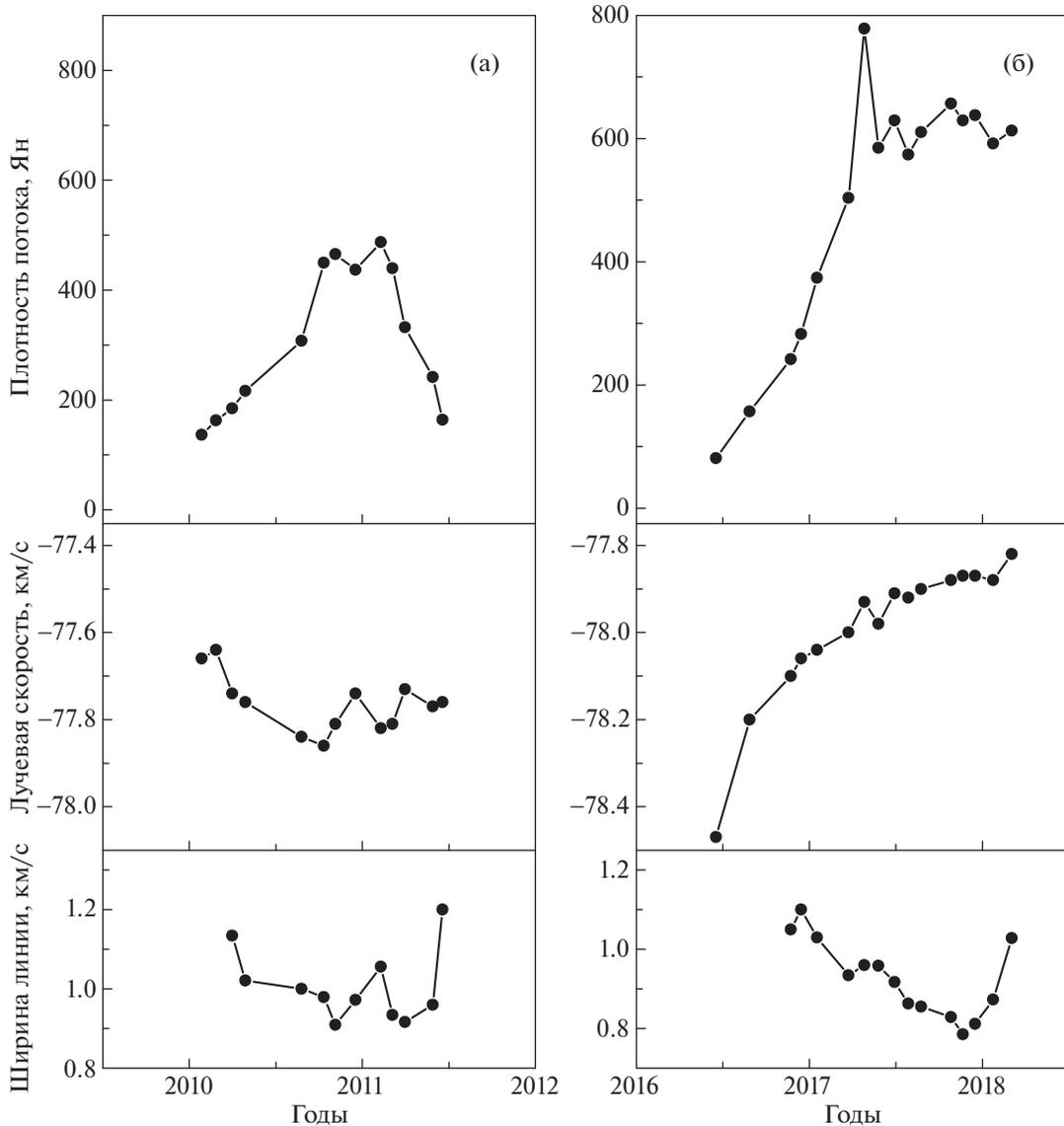


Рис. 12. Переменность плотности потока, лучевой скорости и ширины линии мазерного излучения H_2O двух основных деталей с 2010 г.

области S128, связанной с фронтом столкновения двух молекулярных CO облаков.

1. Обнаружено большое число эмиссионных деталей в главной линии OH 1665 МГц в обеих круговых поляризациях. Излучение в линии 1667 МГц не обнаружено.

2. Показано, что несмотря на сильную переменность плотности потока излучения в линии 1665 МГц, лучевые скорости деталей сохранялись на протяжении всех 10 лет мониторинга.

3. Обнаружено зеемановское расщепление в линии OH 1720 МГц, равное 0.86 км/с, что соответствует величине продольного магнитного поля 3.6 мГс. Поле направлено от наблюдателя.

4. Переменность излучения H_2O имеет циклический характер с квазипериодом от 4 до 14 лет.

5. Характер эволюции отдельных деталей подтверждает, что мазерные источники H_2O А и В связаны с ионизационным фронтом двух сталкивающихся CO облаков, и показывает, что активность излучения в цикле МЗ постепенно перешла от мазера В к мазеру А.

6. Несмотря на то что мазеры OH H_2O расположены на границе столкновения двух молекулярных CO облаков, имеется очень важное различие между ними: лучевые скорости деталей гидроксильных мазеров стабильны, в то время как для мазеров водяного пара наблюдается значительный дрейф

лучевых скоростей. Это может свидетельствовать о том, что мазеры пространственно не совпадают.

Представляют большой интерес интерферометрические наблюдения мазера ОН в период его высокой активности, когда можно локализовать положения большого числа отдельных деталей относительно ионизационного фронта. Вероятно, что, как и мазер водяного пара, мазер гидроксила также связан с ионизационным фронтом сталкивающихся СО облаков, а не с конкретными молодыми звездными объектами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. Sharpless, *Astrophys. J. Suppl.* **4**, 257 (1959).
2. A. D. Haschick and P. T. P. Ho, *Astrophys. J.* **292**, 200 (1985).
3. P. T. P. Ho, A. D. Haschick, and F. P. Israel, *Astrophys. J.* **243**, 526 (1981).
4. P. T. P. Ho, A. D. Haschick, and F. P. Israel, *Astrophys. J.* **362**, 147 (1981).
5. A. Mampaso, P. Gómez, C. Sanchez-Magro, and M. J. Selby, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **207**, 465 (1984).
6. V. Migenes, S. Horiuchi, V. I. Slysh, I. E. Val'tts, *et al.*, *Astrophys. J.* **123**, 487 (1999).
7. A. M. S. Richards, R. J. Cohen, M. Crocker, E. E. Lekht, E. Mendoza-Torres, and V. A. Samodourov, *Astrophys. Space Sci.* **295**, 19 (2004).
8. J. G. A. Wouterloot, J. Brand, and C. Henkel, *Astron. and Astrophys.* **191**, 323 (1988).
9. A. L. Argon, M. J. Reid, and K. M. Menten, *Astrophys. J. Suppl.* **129**, 227 (2000).
10. И. И. Берулис, Е. Е. Лехт, Х. Э. Мендоса-Торрес, *Астрон. журн.* **72**, 468 (1995).
11. Е. Е. Лехт, Х. Э. Мендоса-Торрес, И. И. Берулис, *Астрон. журн.* **79**, 63 (2002).
12. R. Valdetaro, F. Palla, J. Brand, R. Cesaroni, G. Comoretto, M. Felli, and F. Palagi, *Astron. and Astrophys.* **383**, 244 (2002).