

УДК 524.527-77

СТРУКТУРА И ЭВОЛЮЦИЯ МОЩНЫХ ВСПЫШЕК МАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ H_2O В ПРОТОЗВЕЗДНОМ ОБЪЕКТЕ IRAS 18316–0602 (G25.65+1.05)

© 2020 г. Н. Т. Ашимбаева¹, В. В. Краснов², Е. Е. Лехт^{1,*}, М. И. Пашенко¹,
Г. И. Рудницкий¹, А. М. Толмачев³

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

² Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

³ Пуцунская радиоастрономическая обсерватория,
Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Пуццо, Россия

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

Поступила в редакцию 23.07.2019 г.

После доработки 04.09.2019 г.

Принята к публикации 06.09.2019 г.

Рассмотрены структура и эволюция мощных вспышек мазерного излучения H_2O в источнике IRAS 18316–0602 по результатам наблюдений на радиотелескопе РТ-22 в Пуццо. Основной причиной последней мощной и кратковременной вспышки в 2017 г. может быть наложение по лучу зрения двух мазерных конденсаций с очень близкими лучевыми скоростями. Все мощные вспышки, которые происходили в IRAS 18316–0602 с 2002 г., были связаны со скоплением мазерных конденсаций, лучевые скорости которых находятся в интервале 41.0–43.5 км/с. Предполагается, что в этой области имеются турбулентные (видимо, вихревые) движения вещества.

DOI: 10.31857/S0004629920010016

1. ВВЕДЕНИЕ

Источник инфракрасного излучения IRAS 18316–0602 связан с областью активного звездообразования. Кроме ИК-излучения в этой области наблюдаются радиоизлучение в континууме, биполярные молекулярные СО-потоки, а также мазеры водяного пара, гидроксиды и метанола.

Сильное ИК-излучение наблюдалось на 450 мкм (220 Ян) [1] и на 350 мкм (230 Ян) [2], а более слабое на 800 мкм (25 Ян) [1] и на 1100 мкм (7.5 Ян) [3]. В данной области расположен слабый источник радиоизлучения – сверхкомпактная область Н II (G25.65+1.05), наблюдения которой проводились на длинах волн 2.6 см ($F = 2.7$ мЯн) [4], 3.6 см [5] и 3.5 см [6]. На волне 3.6 см диаметр области Н II равен $3''$.

В окрестностях источника IRAS 18316–0602 Шеперд и Черчвел на волне 2.6 мм наблюдали два молекулярных СО-потока [7]. Положение максимума этого излучения совпадает с положением сверхкомпактной области Н II G25.65+1.05. Однако наблюдения в линии молекулы SiO показали, что имеются два максимума, разнесенные по δ на $40''$ [8]. Один из максимумов имеет синее

смещение ($+5.9 < V_{\text{bleu}} < +39.5$ км/с), а другой – красное ($+48.5 < V_{\text{red}} < +88.1$ км/с).

Изображение области в ближнем ИК-диапазоне волн, полученное с применением фильтров J , K и H [9], позволяет сделать вывод, что энергичный молекулярный поток на самом деле может состоять из нескольких потоков, каждый из которых связан с массивным молодым звездным объектом.

Расстояние до IRAS 18316–0602 было определено различными методами. Молинари и др. дают кинематическое значение 3.17 кпк [10], а Санада и др. – 2.7 кпк [11] по наблюдениям мазера H_2O . Хантер и др. оценили расстояние, как 3.3 кпк [12]. Кинематическое расстояние, равное 12.5 кпк, было получено в направлении локализации мазеров метанола для диапазона скоростей 40.6–41.9 км/с [13]. Однако следует отметить, что все вспышки мазера H_2O в IRAS 18316–0602 происходили на $V_{\text{LSR}} > 41.8$ км/с. Нам представляется наиболее предпочтительным кинематическое значение 3.1 или 3.3 кпк, которое используется в настоящее время во многих работах (см., напр.,

Санчес и др. [8]). При расстоянии 12.5 кпк мазер H_2O становится самым мощным из всех известных водяных мазеров, что, конечно, маловероятно.

Мазерное излучение H_2O было обнаружено в 1989 г. Сильное излучение наблюдалось на скорости 45.17 км/с с плотностью потока 725 Ян [14]. В июле 1994 г. поток излучения упал до 109 Ян [15]. В 1995 г. излучение регистрировалось в широком интервале лучевых скоростей с максимумами на 41.3 км/с (452 Ян) и 45.26 км/с (260 Ян) [16]. С 2002 г. в IRAS 18316–0602 более или менее регулярно происходили мощные вспышки мазера H_2O [17, 18].

Мазерное излучение гидроксила наблюдалось в главных линиях 1665 и 1667 МГц (см., напр., [19]). В сателлитной линии 1612 МГц излучение имеет тепловой характер, а в 1720 МГц наблюдается линия поглощения. И, наконец, отметим, что в направлении IRAS 18316–0602 наблюдаются мазеры метанола класса II [6]. Впоследствии было показано, что они образуют две группы, А и В [20], разнесенные по расстоянию на ~1300 а.е. Причем расположены они по разные стороны относительно оси биполярного потока. Излучение деталей группы А, содержащей большее число деталей, линейно поляризовано.

Настоящая работа является продолжением исследования вспышек мазера H_2O , которые в IRAS 18316–0602 стали достаточно частыми.

2. АППАРАТУРА И НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения мазерного излучения H_2O в направлении IRAS 18316–0602 ($\alpha_{2000} = 18^{\text{h}}34^{\text{m}}20.9^{\text{s}}$, $\delta_{2000} = -5^{\circ}59'42.23''$) были проведены на радиотелескопе РТ-22 ПРАО на волне 1.35 см в 2017–2019 гг. Они являются продолжением мониторинга данного источника, начатого нами в 2002 г., результаты которого были опубликованы ранее в работе [17]. Чувствительность радиотелескопа составляет 25 Ян/К для точечного источника с неполяризованным излучением. Шумовая температура системы меняется от 150 до 300 К в зависимости от погодных условий и высоты источника над горизонтом.

Высокая стабильность основного (первого) гетеродина позволила проводить измерения лучевой скорости с высокой точностью. Ошибка лежит в пределах 20–25 м/с. Регистрация сигнала осуществлялась 2048-канальным автокорреляционным приемником со спектральным разрешением 0.0822 км/с. Все спектры были исправлены за поглощение в земной атмосфере.

Спектры H_2O за 2017–2019 гг. показаны на рис. 1 и 2. Ввиду большой разницы излучения вспышечных и остальных деталей центральные части спектров на панели (1) рис. 1 ограничены и пока-

заны полностью в другом масштабе на панели (2). Двухсторонними стрелками показана цена деления вертикальной оси в Янских. По горизонтальной оси отложена лучевая скорость относительно местного стандарта покоя в км/с.

3. ДИСКУССИЯ

На рис. 3а показана эволюция основных эмиссионных деталей. Для полноты картины и понимания природы возникновения мощных вспышек, кроме данных наблюдений 2017–2019 гг., мы также включили данные с середины 2016 г., взятые из работы Лехта и др. [17]. Стрелками отмечены положения максимумов излучения двух мощных вспышек. Для удобства анализа основные детали пронумерованы. Светлыми кружками нанесены детали в период их высокой активности. На рис. 3б, в, г показана переменность плотности потока основных деталей, причем вспышечные детали даны в двух разных масштабах. Указаны скорости деталей в максимумах их излучения.

3.1. Эволюция мощной вспышки в 2017–2018 гг.

Сложный характер эволюции мощной вспышки на протяжении 2017–2018 гг. хорошо демонстрируется на рис. 3а. С мая 2017 г. наблюдались две эмиссионные детали на близких лучевых скоростях: 41.1 (3а) и 42.0 км/с (3б). Затем в августе сильно выросло излучение детали 3б с 270 до 940 Ян, т.е. произошла ее вспышка.

Далее увеличился поток излучения от обеих деталей, причем поток от 3а сравнялся с потоком от 3б (октябрь 2017 г.). После этого резко возрос поток детали 3а, т.е. произошла очередная более мощная вспышка. При этом поток детали 3б упал примерно в 2–3 раза. Кроме того, имело место небольшое изменение лучевой скорости обеих деталей, которое привело к сближению деталей в спектре.

В декабре мы зарегистрировали излучение на уровне порядка 3000 Ян, причем максимум потока излучения приходился на лучевую скорость 42.7 км/с, т.е. на скорость детали 3б. Линия была асимметричной — левое крыло было более высоким, чем правое. Наблюдаемая асимметрия является следствием присутствия излучения детали 3а. Дальнейшая эволюция излучения этой вспышки подтверждает двойственную структуру линии.

В феврале 2018 г. наблюдалось уже три компонента. В апреле вновь остались две компоненты и имело место их сближение по лучевой скорости. В мае–июне расстояние между компонентами было минимальным, менее 0.3 км/с, т.е. они практически слились в одну деталь. С августа в спектре вновь четко присутствовали две компо-

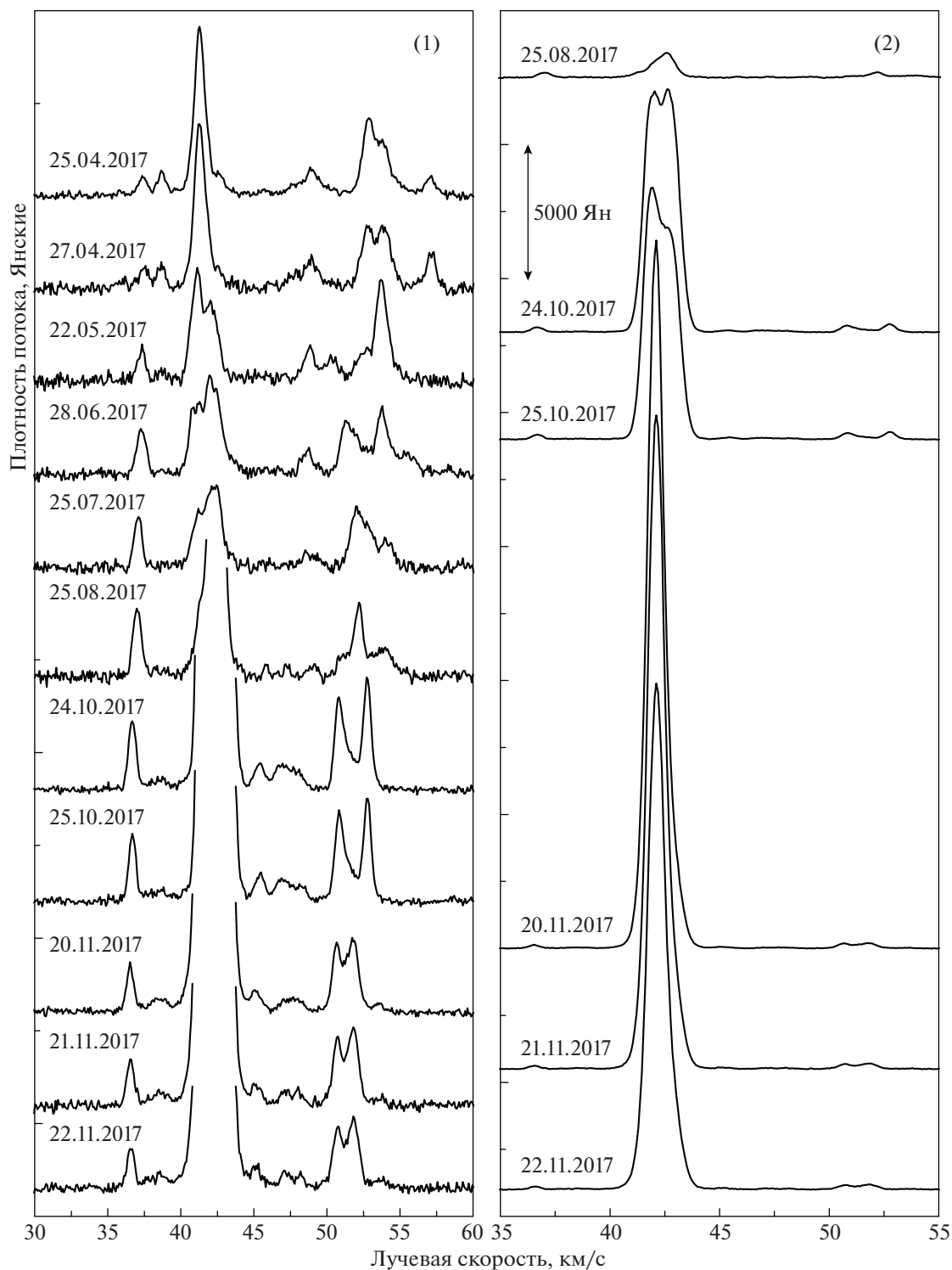


Рис. 1. Спектры мазерного излучения H_2O в IRAS 18316–0602 на длине волны $\lambda = 1,35$ см в период апрель–ноябрь 2017 г. Полностью центральная деталь приведена на панели (2). Двойными вертикальными стрелками показана цена деления в Янских. Приведены эпохи наблюдений.

ненты, амплитуды излучения которых постепенно уменьшались. Так завершилась одна из самых

мощных вспышек мазерного излучения H_2O в IRAS 18316–0602.

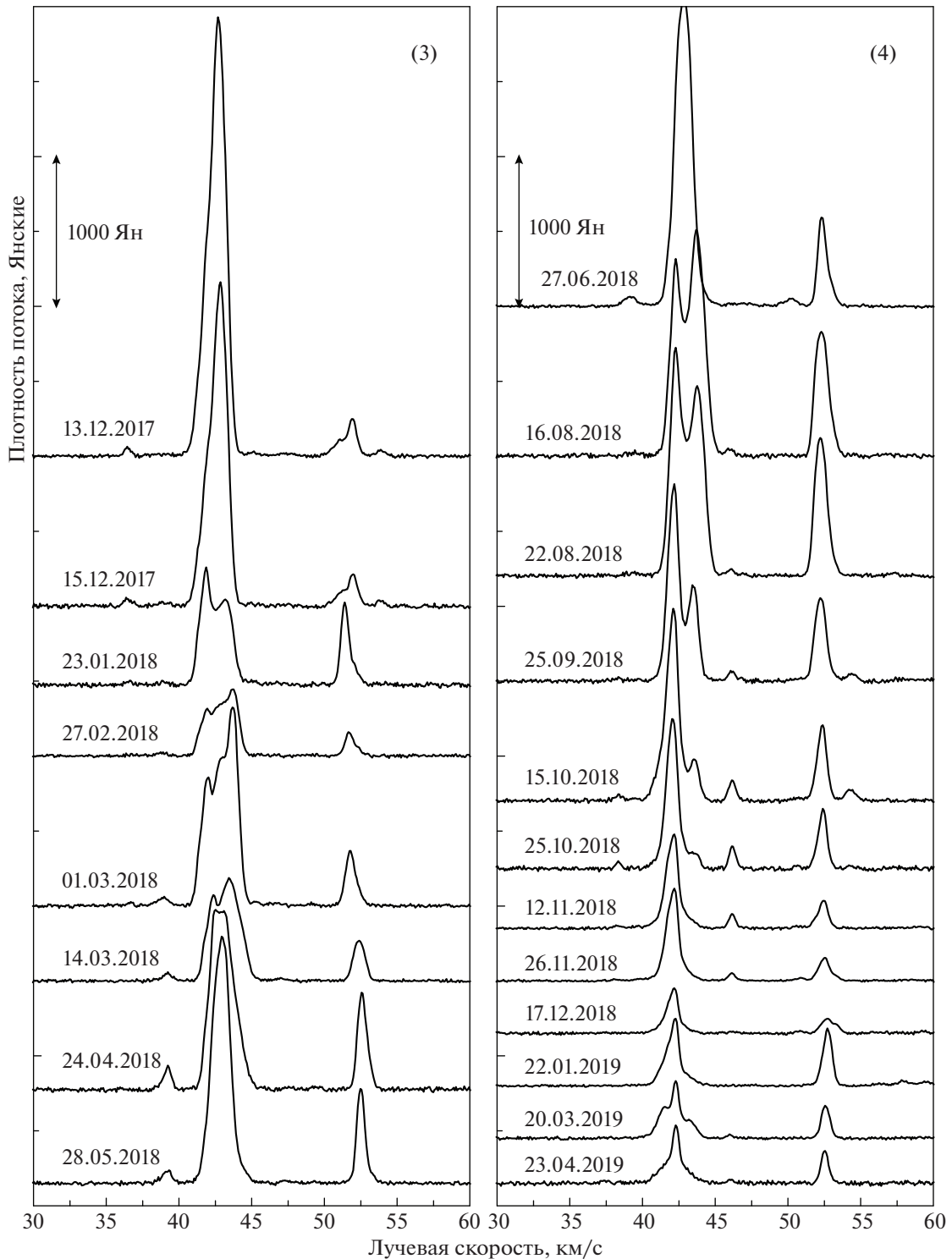


Рис. 2. Спектры мазерного излучения H_2O в IRAS 18316–0602 с декабря 2017 по апрель 2019 г.

3.2. Форма линии

На рис. 4а приведено сравнение формы линии вспышечной детали, которую мы наблюдали последовательно в течение трех дней, с 20 по 22 но-

ября 2017 г. Была проведена нормировка всех трех линий по плотности потока. Ввиду того, что был обнаружен небольшой дрейф линии по лучевой скорости даже в течение трех дней, мы провели

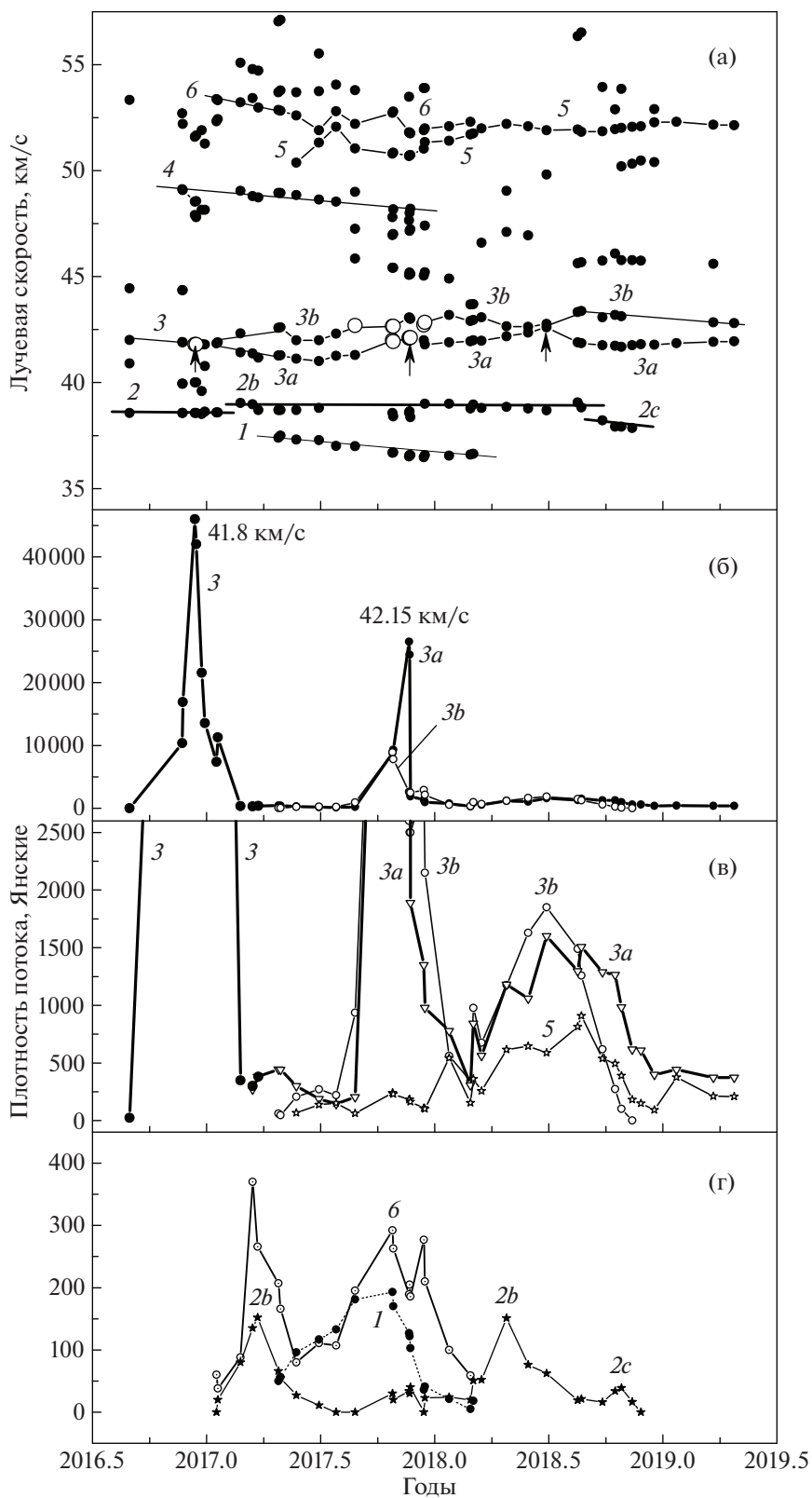


Рис. 3. Переменность лучевой скорости (а) и плотности потока основных эмиссионных деталей (б, в, г). Светлыми кружками показаны детали в периоды высокой активности объекта. Вариации лучевой скорости основных деталей аппроксимированы прямыми линиями и для удобства пронумерованы. В максимумах потоков указаны соответствующие им значения лучевых скоростей. Вертикальными стрелками отмечены положения максимумов мощных вспышек.

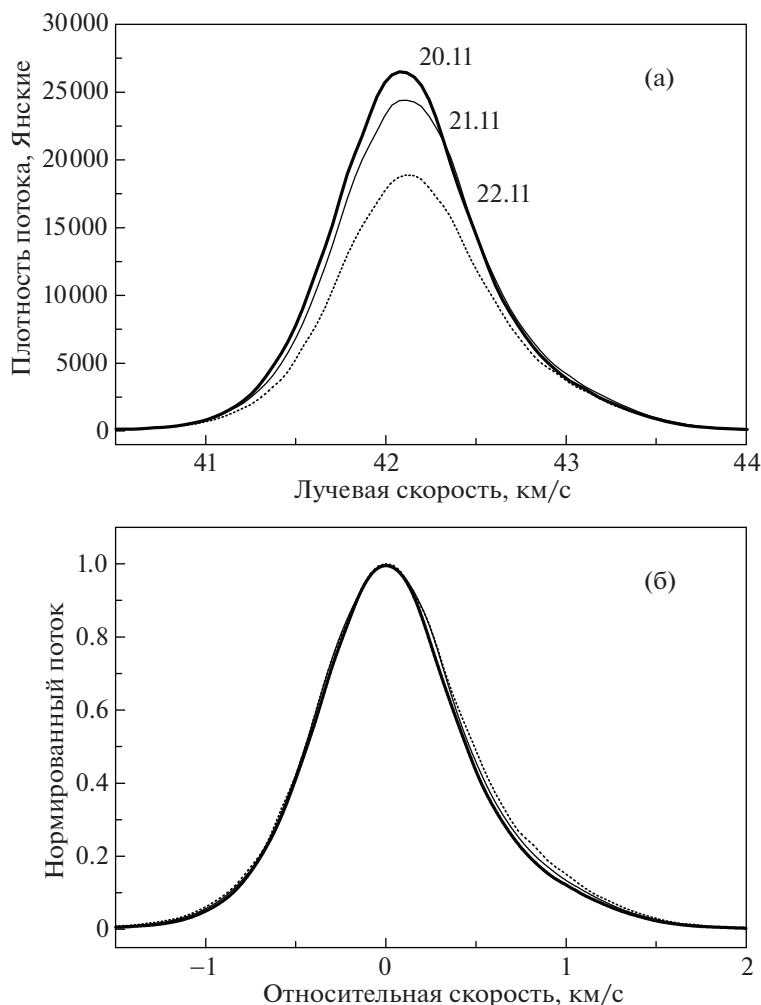


Рис. 4. Наложения линий главной вспышки за 20, 21 и 22 ноября 2017 г. (а) и нормированных и сцентрированных к нулевой скорости линий (б).

центровку линии по оси ординат, где нулевой скорости соответствует максимум излучения линии.

Видно, что линия асимметричная — ее правое крыло более пологое, чем левое. Как мы уже отмечали, это вызвано присутствием более слабого компонента на лучевой скорости около 43.0 км/с. Причем, при уменьшении потока основного компонента наблюдался подъем правого крыла линии, что свидетельствует о том, что вклад более слабого компонента (правого) возрастал.

Левые крылья линий совпадают. Это показывает, что при разных значениях плотности потока, отличающихся в 1.4 раза, ширина линии не менялась. Следовательно, мазер не является насыщенный. При наблюдаемом темпе спада потока излучения возможно, что в максимуме вспышки (до 20 ноября 2017 г.) плотность потока была значительно выше, чем мы наблюдали, т.е. вспышка была достаточно мощной. Согласно

Вольвач и др. [18] вспышка была кратковременной и плотность потока в максимуме достигала $\sim 1.3 \times 10^5$ Ян, а продолжительность вспышки по уровню 0.5 составляла всего лишь одну неделю.

3.3. Возможная природа мощной вспышки

В нашем мониторинге интервалы между наблюдениями были недостаточными, чтобы определить максимум потока вспышки и характер роста потока, а также выявить характер перехода активности во время мощной вспышки от детали на скорости 42.1 км/с к детали на скорости 42.7 км/с.

Отметим, что плотность потока излучения детали на $V \sim 42.7$ км/с была зарегистрирована нами на уровне ~ 3000 Ян, в то время, как детали на скорости 42.1 км/с плотность потока составляла 26 000 Ян. Максимумы излучения у этих деталей приходится на разные эпохи. Следовательно, во

время этой мощной вспышки имело место последовательное возбуждение деталей с близкими лучевыми скоростями. Характер дальнейшей эволюции излучения вспышки позволяет допустить, что имеется скопление мазерных конденсаций H_2O .

Подобный характер эволюции сильной вспышки, описанный в разделе 3.1, мы наблюдали в 1985 г. в источнике S 252A, связанном с областью активного звездообразования [21]. Однако в S 252A плотность потока излучения в максимуме не превышала 1200 Ян, в то время как в IRAS 18316–0602 плотность потока в максимуме была как минимум на два порядка выше, причем продолжительность вспышки была значительно меньше. Кроме того, в S 252A имел место реальный дрейф излучения мазерных конденсаций по лучевой скорости.

В IRAS 18316–0602 дрейф деталей *3a* и *3b* во время мощной вспышки был незначительным. Учитывая все это, можно предположить, что в IRAS 18316–0602 действовал другой механизм значительного увеличения плотности потока. Этот механизм может быть связан не только с повышением активности протозвездного объекта, который вызывает, например, усиление звездного ветра, но и с изменениями каких-либо физических параметров самого мазера.

Мы проанализировали переменность излучения большинства эмиссионных деталей мазера H_2O (см. рис. 3б–г). В эпоху мощной вспышки 2017 г. просматривается корреляция переменности двух основных деталей (*3a* и *3b*) с другими, значительно более слабыми (*1*, *6* и *2b*), плотность потока которых в максимумах их излучения в данную эпоху составляла 190, 290 и 37 Ян соответственно.

Корреляция переменности нескольких деталей на разных лучевых скоростях свидетельствует о существовании единой причины, связанной с протозвездным объектом. Однако существенное различие в интенсивности деталей *3a* и *3b* на три порядка и кратковременность вспышки требуют привлечения еще каких-либо дополнительных механизмов усиления мазерного излучения.

Скорее всего, имело место пространственное наложение по лучу зрения двух мазерных конденсаций, либо двух сгустков вещества повышенной плотности с близкими лучевыми скоростями. Действие такого механизма возможно при существовании турбулентных движений вещества в области генерации мазерного излучения H_2O . Аналогичный эффект наблюдался нами, например, в источнике S 140 [22].

Усиление мазерного излучения может происходить при действии еще одного механизма — конкуренции пространственных мод за накачку. Впервые этот механизм был предложен Чесарони

для объяснения явления антикорреляции излучения в источнике S 255, когда усиливается излучение одних деталей за счет подавления излучения других [23]. Данный механизм мог привести к дополнительному росту потока мощной вспышки 2017 г.

3.4. Вспышка в 2018 г.

Вспышку с максимумом излучения в середине 2018 г. на скорости $V_{\text{LSR}} = 42.5$ км/с, когда детали *3a* и *3b* почти слились в одну, можно считать обычной для источника IRAS 18316–0602, поскольку плотность потока не превышала 1800 Ян и она была достаточно продолжительной. Вспышка связана с теми же деталями мазера H_2O , что и мощная вспышка 2017 г. Имеется корреляция переменности потоков деталей *3a*, *3b*, *5* и в некоторой степени *2b*, т.е. произошла активизация мазерного излучения как минимум трех достаточно интенсивных деталей и одной более слабой. Видимо, в 2018 г. вновь выросла активность протозвездного объекта, которая могла иметь вспышечный характер.

3.5. Сравнение с другими вспышками H_2O

Анализируя все предыдущие мощные вспышки мазерного излучения H_2O в IRAS 18316–0602, можно сделать вывод, что все они происходили на достаточно близких лучевых скоростях и, вероятнее всего, они связаны с одним и тем же скоплением мазерных конденсаций, в котором можно выделить две основные компоненты на лучевых скоростях ~ 42.0 (деталь *3a*) и ~ 42.7 км/с (деталь *3b*). Важно отметить, что согласно Санчесу и др. [8] скорость ядра молекулярного облака по наблюдениям в линиях N_2H^+ и C_2H равна 42.5 км/с, т.е. совпадает со средней скоростью основного скопления мазерных конденсаций H_2O .

Другим важным моментом является то, что во время вспышки 2016 г. также произошел рост потока излучения от большинства других деталей практически во всем диапазоне лучевых скоростей, от 37 до 56 км/с. Это свидетельствует о повышении активности всего мазерного источника H_2O и, конечно, связано с более высоким уровнем активности самой протозвезды в IRAS 18316–0602, который сохранялся в дальнейшем в 2017–2018 гг.

И, наконец, вновь обратим внимание на следующее явление. Несмотря на большую разницу в амплитуде вспышек 2017 и 2018 г., характер эволюции двух главных вспышечных деталей был одним и тем же: сближение деталей в спектре на восходящей ветви эволюции и удаление их друг от друга на нисходящей ветви. Это может быть связано с геометрией турбулентного вихре-

вого движения мазерных конденсаций или плотных сгустков вещества.

При исследовании вспышки 2018 г., по-видимому, интервалы между наблюдениями также были недостаточно малыми для того, чтобы зарегистрировать поток в максимуме вспышки. Также не исключена эволюция самого вихря, что могло повлиять на мощность вспышки 2018 г. Поэтому представляет интерес проследить за последующими возможными вспышками мазерного излучения H₂O в IRAS 18316–0602 в 2019–2020 гг.

4. ВЫВОДЫ

Выделим наиболее значительные результаты, полученные при анализе вспышек мазерного излучения H₂O в источнике IRAS 18316–0602, связанного с областью активного звездообразования.

1. Вспышка в 2017 г. была очень мощной и кратковременной. Она имела глобальный для источника характер, поскольку наблюдались коррелированные с ней увеличения излучения от других спектральных деталей. Для такой мощной кратковременной вспышки нужны были особые условия по сравнению с остальными деталями. В этом смысле ее можно считать локальной.

2. Наиболее вероятным механизмом является наложение по лучу зрения двух мазерных конденсаций, либо плотных сгустков вещества в самой конденсации с близкими лучевыми скоростями. Характер переменности лучевых скоростей и потоков основных деталей вспышки можно объяснить наличием турбулентного вихревого движения вещества – плотных сгустков вещества и, возможно, самих мазерных конденсаций.

3. Все мощные вспышки, которые происходили в IRAS 18316–0602 с момента начала нашего мониторинга данного источника, были связаны со скоплением мазерных конденсаций, лучевые скорости которых находятся в интервале 41.0–43.5 км/с.

Для подтверждения или отрицания нашей модели представляет интерес продолжение мониторинга и, конечно, проведение VLBI-наблюдений, особенно в эпохи сильных вспышек.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *A. J. Walsh, G. H. Macdonald, N. D. S. Alvey, M. G. Burton, and J.-K. Lee*, *Astron. and Astrophys.* **410**, 597 (2003).
2. *T. R. Hunter, E. Churchwell, C. Watson, C. Cox, D. J. Benford, and P. R. Roelfsema*, *Astrophys. J.* **119**, 2711 (2000).
3. *W. H. McCutcheon, T. Sato, C. R. Purton, H. E. Matthews, and P. E. Dewdney*, *Astron. J.* **110**, 1762 (1995).
4. *W. H. McCutcheon, P. E. Dewdney, C. R. Purton, and T. Sato*, *Astrophys. J.* **101**, 1435 (1991).
5. *S. Kurtz, E. Churchwell, and D. O. S. Wood*, *Astrophys. J. Suppl.* **91**, 659 (1994).
6. *A. J. Walsh, M. G. Burton, A. R. Hyland, and G. Robinson*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **301**, 640 (1998).
7. *D. S. Shepherd and E. Churchwell*, *Astrophys. J.* **472**, 225 (1996).
8. *A. Sánchez-Monge, A. López-Sepulcre, R. Cesaroni, C. M. Walmsley, C. Codella, M. T. Beltrán, M. Pestalozzi, and S. Molinari*, *Astron. and Astrophys.* **557**, id. A94 (2013).
9. *A. Zavagno, L. Deharveng, D. Nadeau, and J. Caplan*, *Astron and Astrophys.* **394**, 225 (2002).
10. *A. Molinari, J. Brand, R. Cesaroni, and F. Palla*, *Astron. and Astrophys.* **308**, 573 (1996).
11. *K. Sunada, T. Nakazato, N. Irtida, S. Hongo, Y. Kitamura, and J. Yang*, *Publ. Astron. Soc. Japan* **59**, 185 (2007).
12. *T. R. Hunter, E. Churchwell, C. Watson, P. Cox, D. J. Benford, and P. R. Roelfsema*, *Astron. J.* **119**, 2711 (2000).
13. *J. A. Green, N. M. McChure-Griffiths*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **417**, 2500 (2011).
14. *F. Palla, J. Brand, R. Cesaroni, G. Comoretto, and M. Felli*, *Astron. and Astrophys.* **246**, 249 (1991).
15. *T. Jenness, P. F. Scott, and R. Padman*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **276**, 1024 (1995).
16. *S. Kurtz and P. Hofner*, *Astron. J.* **130**, 711 (2005).
17. *Е. Е. Лехт, М. И. Пашенко, Г. М. Рудницкий, А. М. Толмачев*, *Астрон. журн.* **95**, 224 (2018).
18. *Л. Н. Вольвач, А. Е. Вольвач, М. Г. Ларионов, Г. К. МакЛеод, и др.*, *Астрон. журн.* **96**, 51 (2019).
19. *K. A. Edris, G. A. Fuller, and R. J. Cohen*, *Astron. and Astrophys.* **465**, 865 (2007).
20. *G. Surcis, W. H. T. Vlemmings, H. J. van Langevelde, B. Hutawarakorn Kramer, A. Bartkiewicz, and M. G. Blasi*, *Astron. and Astrophys.* **578**, id. A102 (2015).
21. *Е. Е. Лехт, И. И. Берулис, Э. Мендоса-Торрес*, *Астрон. журн.* **73**, 844 (1996).
22. *Е. Е. Лехт, С. Ф. Лихачев, П. Л. Сороченко, В. С. Стрельницкий*, *Астрон. журн.* **70**, 731 (1993).
23. *R. Cesaroni*, *Astron. and Astrophys.* **223**, 513 (1990).