

## ОБНАРУЖЕНИЕ ВСПЫШЕК МАЗЕРА МЕТАНОЛА ВБЛИЗИ ЧАСТОТ 19.9 И 20.9 ГГц В НАПРАВЛЕНИИ НА МАССИВНЫЙ ИСТОЧНИК АКТИВНОГО ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ G358.931-0.030

© 2019 г. А. Е. Вольвач<sup>1,2\*</sup>, Л. Н. Вольвач<sup>1</sup>, М. Г. Ларионов<sup>2</sup>, Г. К. МакЛеод<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Отдел радиоастрономии и геодинамики, Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Кацивели, РТ-22 Крым, Россия

<sup>2</sup>Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Радиоастрономическая обсерватория Хартебестхук, Крюгерсдорп 1740, ЮАР

<sup>4</sup>Университет Западного Онтарио, 1151 Ричмонд-стрит, Лондон, ON N6A 3K7, Канада

Поступила в редакцию 20.04.2019 г.; после доработки 04.09.2019 г.; принята к публикации 16.09.2019 г.

На радиотелескопах РТ-22 (Симеиз) и РТ-26 (ХартРАО) проведены исследования линий метанола  $\text{CH}_3\text{OH}$  на частотах 19.967 ГГц [переход  $2_1-3_0$  E ( $v_t = 0$ )] и 20.971 ГГц [переход  $10_1-11_2$  A<sup>+</sup> ( $v_t = 1$ )] в направлении на массивную область активного звездообразования G358.931-0.030. Обнаружены две новые вспышки. Одна из вспышек (на частоте 20.971 ГГц) является мощнейшей в диапазоне частот 19–26 ГГц. Представлены мониторинги вспышечных явлений, обнаруженных на частотах 19.967 и 20.971 ГГц. Зависимость амплитуды вспышек от времени отражает комплексную структуру областей мазерного излучения. Рассмотрена структура вспышек по скорости.

*Ключевые слова:* звездообразование, радиолинии, мазеры.

DOI: 10.1134/S032001081911010X

### ВВЕДЕНИЕ

Проблемой образования и эволюции массивных ( $>8 M_\odot$ ) звезд в нашей Галактике занимаются во многих обсерваториях Мира (Хекман и Суливан, 1976; Зиннекер и Йорк, 2007). Тем не менее остается еще достаточное количество вопросов на эту тему.

Эволюция массивных звезд быстротечна и скрыта от наших глаз гигантским поглощением в оптическом диапазоне (до тысячи звездных величин) и других диапазонах длин волн (Дженнесс и др., 1995). Время жизни таких объектов в тысячи раз меньше, чем у нормальных звезд. Мазеры (в том числе и  $\text{CH}_3\text{OH}$ ) являются указателями областей (Сугияма и др., 2008; Барткиевич и др., 2016), в которых происходят процессы рождения звезд.

В нашей Галактике имеются массивные зоны активного звездообразования, большинство из которых находится в направлении на ее центральную область. К таким областям, в частности, относятся NGC6334I-MM1, S255IR-NIRS3, G25+1.05 и W49N (Москаделли и др., 2017; Шимчак и др.,

2018; Хантер и др., 2017, 2018; Лью и др., 2018). Менее изучен на данный момент массивный комплекс звездообразования G358.931-0.030 из каталога компактных источников (CSC) с потоком 1.4 Ян на длине волны 870  $\mu$  (Уркварт и др., 2013).

В направлении на источник имеется компактная  $H_{II}$  область размером менее 10 угл. сек, температурой окружающей пылевой оболочки  $T = 28$  К и  $V_{LSR} = 19.3$  км/с (Контрерас и др., 2013). Пылевая оболочка имеет спектр с максимумом вблизи 30  $\mu$  по данным измерений на частотах 4.6, 12 и 22  $\mu$  (Spitzer Space Telescope, WISE).

Объект G358.931-0.030 включен в международную мониторинговую наблюдательную программу мониторинга мазеров M2O—организацию радиотелескопов, координирующую наблюдения (Maser Monitoring Organisation (M2O), MaserMonitoring.org). В середине января 2019 г. появилось сообщение о вспышке излучения в мазерной линии  $\text{CH}_3\text{OH}$  этого объекта на частоте 6.7 ГГц, (Сугияма и др., 2019). Информация о рассматриваемых в работе линиях появлялась в сообщениях работах (Вилсон и др., 1985; Ментен и др., 1986).

Регистрации линий вблизи малоисследованного диапазона частот 19.967 ГГц и 20.971 ГГц была

\*Электронный адрес: volvach@bk.ru

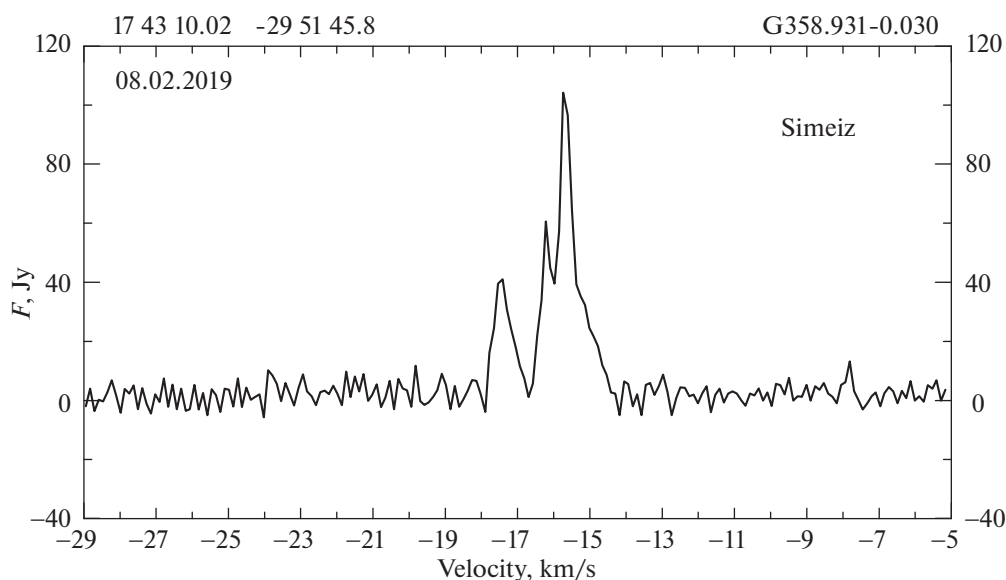


Рис. 1. Линия метанола  $\text{CH}_3\text{OH}$ , зарегистрированная на частоте 19.967 ГГц в источнике G358.931-0.030.

проведена на РТ-22 (Симеиз) в период с 21 января 2019 г. по 24 июня 2019 г. и РТ-26 (ХартРАО) на частоте 20.971 ГГц в период с 4 марта 2019 г. по 30 июня 2019 г.

#### НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Спектрально-поляриметрический радиометр диапазона (18–26) ГГц с Фурье-спектр анализатором параллельного типа использовался в комплексе с радиотелескопом РТ-22 для приема и регистрации данных от источника G358.931-0.030 в линиях метанола  $\text{CH}_3\text{OH}$  на частотах 19.967 ГГц (переход  $2_1-3_0$  E) и 20.971 ГГц (переход  $10_1-11_2$  A). Спектрометр имел 512 и/или 2048 каналов с разрешением по лучевой скорости 8 и 2 кГц соответственно (Нестеров и др., 2000). Полоса приема информации составляла 4 МГц при использовании системы регистрации Марк-5В+ и 16 МГц, используя регистратор РДР1. В зависимости от атмосферных условий, шумовая температура системы  $T_{\text{ш}}$  менялась в пределах 150–200 К, что с учетом разрешения спектрометра (8 кГц и соотношения для РТ-22 13 Ян/К) дает чувствительность по потоку  $\Delta F \approx 0.5$  Ян. Точность калибровки по потоку не хуже 10%. Ширина диаграммы направленности радиотелескопа на 20 ГГц составляла  $\Theta = 150$  угл. сек. Для учета поглощения в атмосфере Земли использовался метод “разрезов атмосферы”. Калибровка по потоку производилась по источникам DR 21, Vir-A, Cyg-A.

Приемник диапазона 18–26 ГГц был установлен во вторичном фокусе РТ-22. Высокостабильная

частота 5 МГц от водородного стандарта VCH-1005 подавалась на перестраиваемые по частоте гетеродины. При этом обеспечивалось преобразование входных частот приема в промежуточную частоту с указанными значениями полос (Вольвач и др., 2009). Наблюдательный цикл состоял из накопления сигнала в течение 5–10 мин при наведении на источник и столько же при отведении с источника на фиксированное расстояние  $0.5^\circ$ . Циклы повторялись для достижения заданного отношения сигнал/шум.

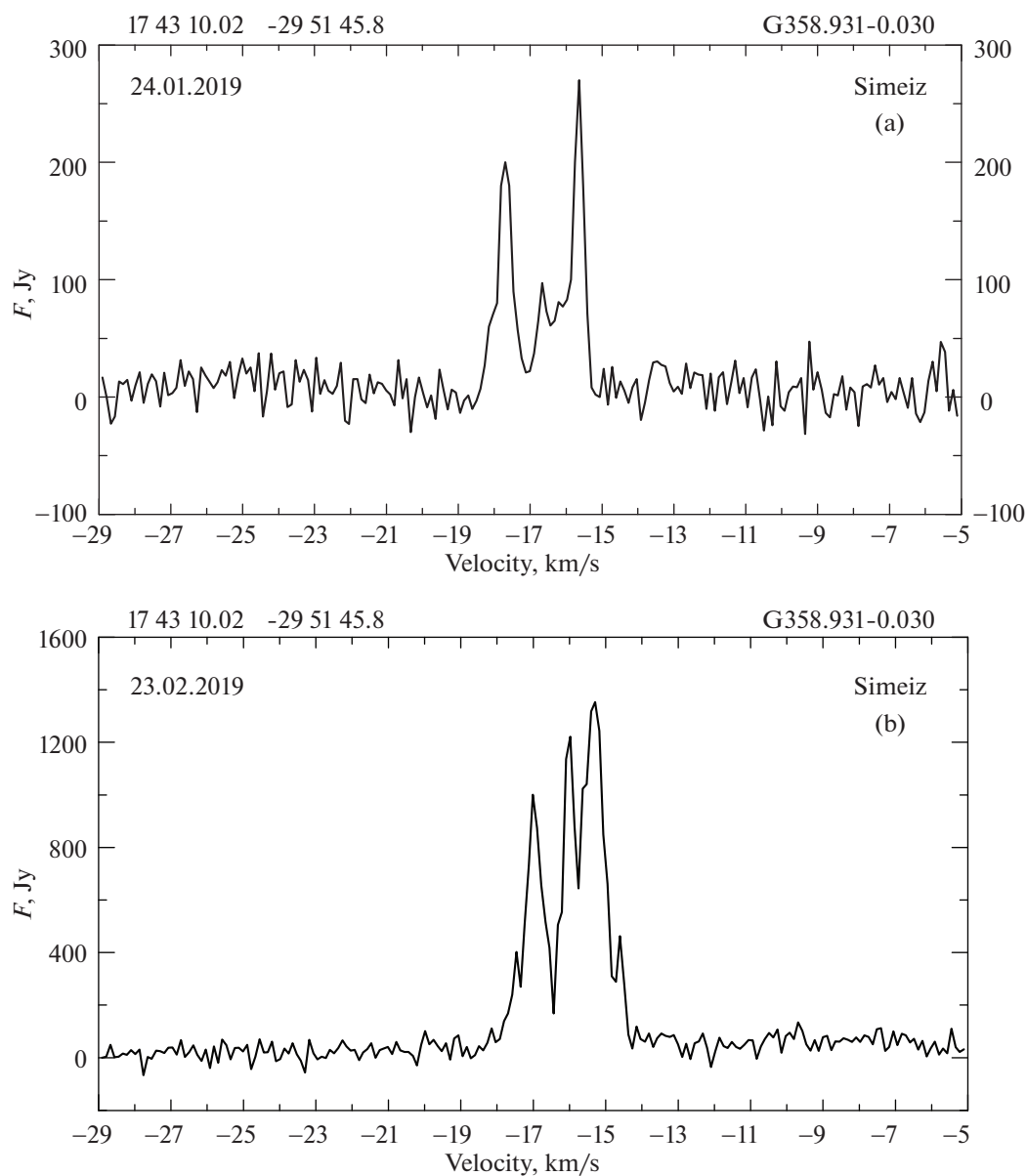
Весь процесс наблюдений проходил в автоматическом режиме под управлением модернизированной программы “field system”. Это касалось наведения антенны на источник, сопровождения источника, отведения с источника, проведения калибровочных процедур и перестройки гетеродинов.

Первичная обработка наблюдательных данных осуществлялась в режиме <on-line>, что обеспечивало возможность оперативно вносить коррекции в наблюдательный процесс.

Наблюдения в обсерватории ХартРАО (Южная Африка) в методическом плане были схожи с наблюдениям на РТ-22 (Симеиз). В ХартРАО использовалась 26-м антенна с криогенным радиометром на частоту 22.2 ГГц. Спектрометр с полосой 8 МГц имел разрешение по скорости:  $10^5$  м/с.

#### НАБЛЮДЕНИЯ ВСПЫШЕЧНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ЛИНИЯХ МЕТАНОЛА $\text{CH}_3\text{OH}$ НА ЧАСТОТАХ 19.967 И 20.971 ГГц В НАПРАВЛЕНИИ НА ИСТОЧНИК G358.931-0.030

Данных по мазерам метанола в диапазоне 19–26 ГГц существенно меньше, чем в более низко-



**Рис. 2.** Образцы записи линии метанола  $\text{CH}_3\text{OH}$ , зарегистрированной на частоте 20.971 ГГц в источнике G358.931-0.030.

частотных диапазонах спектра. В большей степени это относится к диапазону 19–21 ГГц, где в линиях 19.967 ГГц [переход  $2_1-3_0$  E( $v_t = 0$ )] и 20.971 ГГц [переход  $10_1-11_2$  A<sup>+</sup>( $v_t = 1$ )] о вспышках мазеров метанола в G358.931-0.030 ранее не сообщалось. Исключение составляют наблюдения, выполненные параллельно с нашими наблюдениями 2 и 3 марта 2019 г. с помощью 22-м радиотелескопа Морга (Брин и др., 2019).

Поэтому любая новая информация о характере изменения спектральной плотности потока в линии мазеров метанола  $\text{CH}_3\text{OH}$  и о вариациях ее спек-

тральных характеристик имеет большое значение для изучения механизмов накачки линий и динамики мазерных областей.

Наблюдения проводились на частотах метанольных линий 19.967 ГГц и 20.971 ГГц в период с 23 января по 30 июня. Было обнаружено мазерное излучение на частоте 19.967 ГГц в диапазоне лучевых скоростей от  $-14$  до  $-18$  км/с, представляющее собой совокупность отдельных деталей с близкими скоростями. На рис. 1 показан образец спектра линии метанола  $\text{CH}_3\text{OH}$  вблизи частоты 19.967 ГГц.

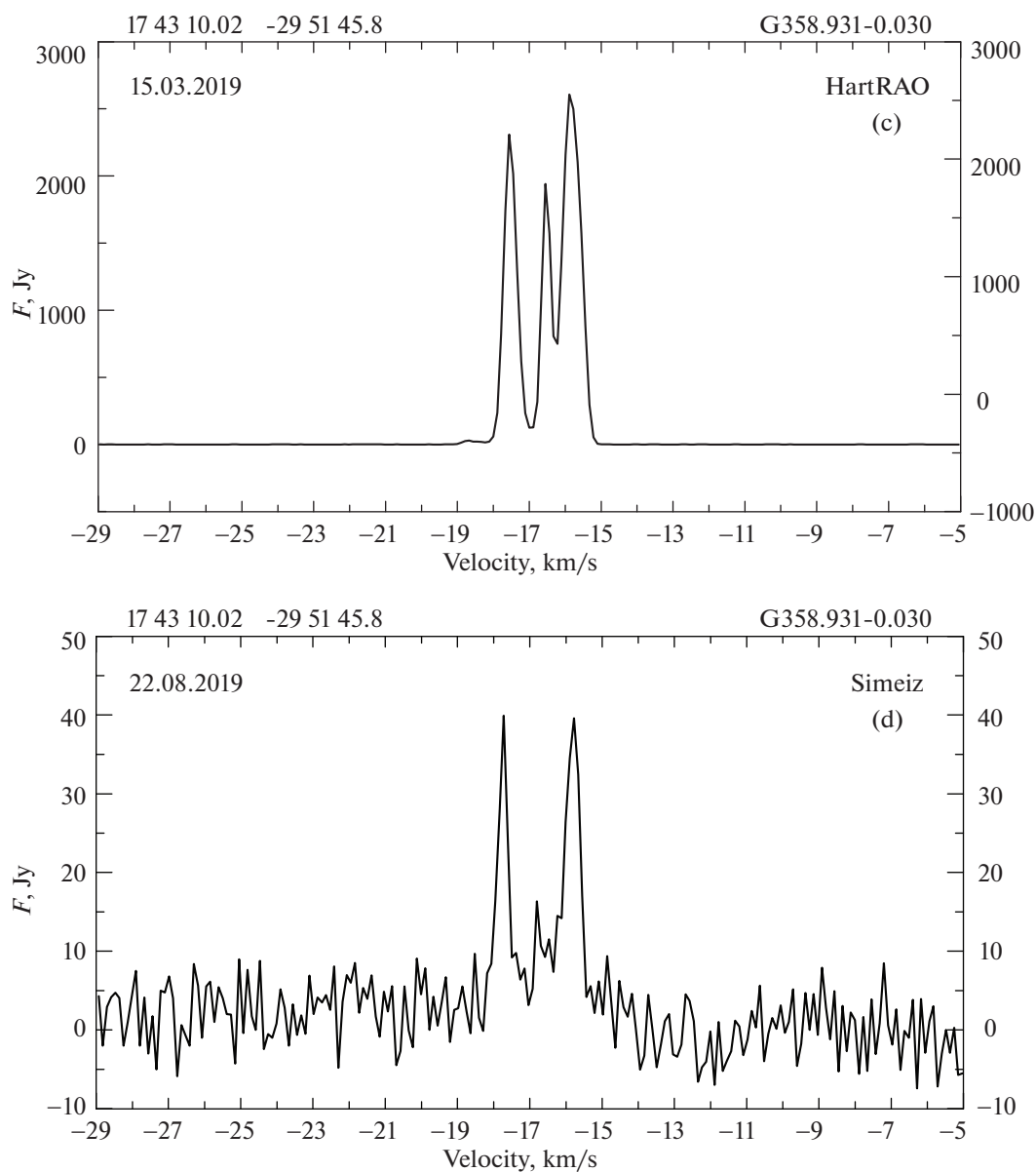


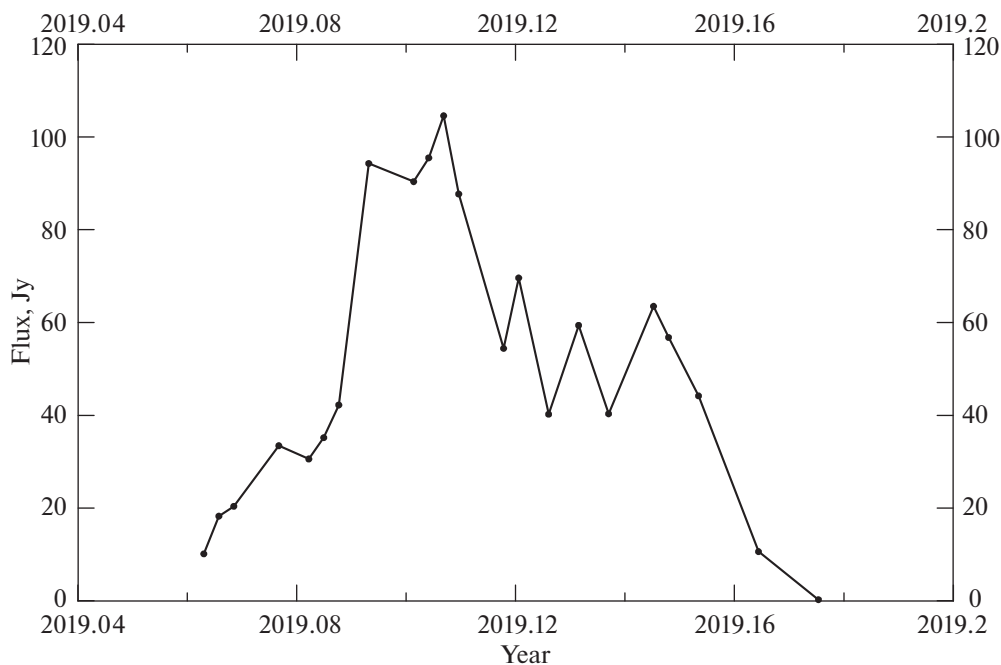
Рис. 2. Окончание.

На рис. 2а–d показана линия метанола СН<sub>3</sub>ОН, впервые зарегистрированная на частоте 20.971 ГГц в источнике G358.931-0.030 на РТ-22 (Симеиз).

Отличительной особенностью структуры метанольных линий, вспыхнувших на частотах 19.967 и 20.971 ГГц, является их сложная структура (рис. 1, 2а–d). На частоте 20.971 ГГц мы наблюдаем несколько вспыхнувших деталей. Напрашивается аналогия со вспышками мазеров в линии водяного пара H<sub>2</sub>O (Вольвач и др., 2019а, с), где был обнаружен “кластер” мазерных образований, расположенных в области размером  $\sim 10^{14}$ – $10^{15}$  см. Возможно, подобная структура мазерных образо-

ваний типична и для метанольных мазеров. Мазер на частоте 20.971 ГГц был также зарегистрирован с помощью 22-м радиотелескопа Морга и на интерферометре АТСА 2 и 3 марта 2019 г., когда первая вспышка на частоте 19.967 ГГц уже закончилась (Брин и др., 2019).

На указанных частотах 19.967 и 20.971 ГГц в источнике вспышечные явления происходят в одном и том же интервале лучевых скоростей. Ширины одиночных линий свидетельствуют в пользу того, что мы наблюдаем излучение от источников, которые ответственны за основную долю увеличе-



**Рис. 3.** Мониторинг G358.931-0.030 в линии метанола на частоте 19.967 ГГц на лучевой скорости  $-15.8$  км/с, выполненный с 23 февраля по 5 марта 2019 г. на РТ-22 (Симеиз).

ния плотности потока. Ширины линий составляют около  $0.4$  км/с.

Если мазеры не находятся в ненасыщенном состоянии, то приведенную величину можно считать оценкой температуры атомов водорода, которая составляет, по данным измерениям,  $T \approx 100$  К. Это значение ниже, чем температура испарения водяного пара ( $130$  К), что может быть одной из причин отсутствия заметного излучения в линии водяного пара на частоте  $22.235$  ГГц во время указанных вспышек мазера метанола (по данным наших наблюдений).

Диапазоны скоростей мазера на первой и второй частотах совпадают, что может указывать на пространственную близость излучающих их составляющих. Также это может указывать на то, что физические характеристики в областях формирования излучения в обеих линиях схожи между собой.

На рис. 3 показаны данные регулярного мониторинга G358.931-0.030 на частоте  $19.967$  ГГц на лучевой скорости около  $-15.8$  км/с на радиотелескопе РТ-22 (Симеиз).

Общая продолжительность вспышки составляет около полутора месяцев и поэтому может относиться к разряду коротких вспыхивающих явлений. В этом смысле она ничем не отличается от коротких вспышек мазера водяного пара (Вольвач и др., 2019b). Корректность такого сравнения заключается в том, что энергетические переходы

в рассматриваемых линиях метанола и водяного пара близки. Совпадение длительностей вспышек в линиях разных элементов показывает, что явления мазерных всплесков инициируются похожими агентами, которыми могут быть ударные волны от расширяющихся оболочечных структур. Эти структуры могут возникать в результате повышения активности центральной массивной звезды раннего спектрального класса.

На рис. 4 приведены данные детального мониторинга G358.931-0.030 в линии метанола на частоте  $20.971$  ГГц на лучевой скорости  $-15.8$  км/с с 21 января по 30 июня 2019 г. на радиотелескопах РТ-22 (Симеиз), РТ-26 (ХартРАО). В первой декаде июня 2019 г. поток источника в линии уже составлял менее 10% от максимального значения. Далее он снизился до  $40$  Ян (рис. 2b).

Начало второй вспышки на  $20.971$  ГГц произошло на спаде первой, незадолго до ее окончания (рис. 4). Комплексная форма вспыхивающего явления в G358.931-0.030 может свидетельствовать о последовательном возбуждении мазеров метанола в одном из кластеров объекта.

Для определения физических характеристик мазеров на таких частотах желательно проведение одновременных мониторинговых наблюдений, как на одиночных антеннах, так и в интерферометрическом режиме.

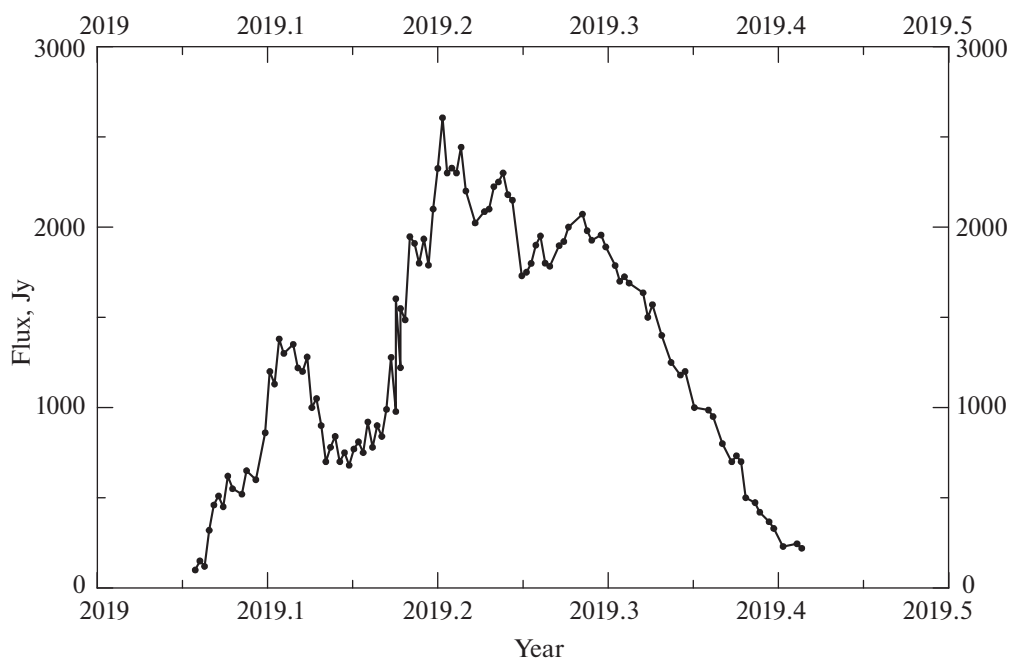


Рис. 4. Мониторинг вспышки мазера метанола в источнике G358.931-0.030 на частоте 20.971 ГГц на радиотелескопах РТ-22 (Симеиз), РТ-26 (ХартРАО).

## ВЫВОДЫ

1. С использованием радиотелескопов РТ-22 (Симеиз) и РТ-26 (ХартРАО) выполнено исследование линии метанола  $\text{CH}_3\text{OH}$  на частотах 19.967 ГГц [переход  $2_1-3_0$  E( $v_t = 0$ )] и 20.971 ГГц [переход  $10_1-11_2$  A<sup>+</sup>( $v_t = 1$ )] в массивной области активного звездообразования G358.931-0.030.

2. Обнаружены новые вспышки в линиях метанола на частотах 19.967 ГГц и 20.971 ГГц.

3. Вспышка в метанольной линии на частоте 20.971 ГГц в этом объекте является мощнейшей в диапазоне 19–26 ГГц и отражает сложные физические процессы, происходящие в областях мазерного излучения.

4. Рассмотрена динамика развития вспышечных явлений на частотах 19.967 и 20.971 ГГц, показывающая, что вспышки могут принадлежать к разряду коротких, которые также наблюдаются и в линии водяного пара.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-29-11005).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барткиевич и др. (A. Bartkiewicz, M. Szymczak, and H.J. van Langevelde), *Astron. Astrophys.* **587**, A104 (2016).
2. Брин и др. (S.L. Breen, A.M. Sobolev, J.F. Kaczmarek, S.P. Ellingsen, T.P. McCarthy, and M.A. Voronkov), *Astrophys. J. Lett.* **876**, L25 (2019).
3. Вилсон и др. (T.L. Wilson, C.M. Walmsley, K.M. Menten, and W. Hermsen), *Astron. Astrophys.* **147**, L19 (1985).
4. Вольвач А.Е., Вольвач Л.Н., Стrepка И.Д., Антюфеев А.В., Мышенко В.В., Зубрин С.Ю., Шульга В.М., *Изв. Крымской Астрофиз. обсерв.* **104**, 6, 72 (2009).
5. Вольвач и др. (L.N. Volvach, A.E. Volvach, M.G. Larionov, G.C. MacLeod, S.P. van den Heever, P. Wolak, M. Olech, A.V. Ipatov, et al.), *Astron. Rep.* **63**, 1, 49 (2019a).
6. Вольвач и др. (L.N. Volvach, A.E. Volvach, M.G. Larionov, S.P. van den Heever, P. Wolak, and M. Olech), *MNRAS* **482**, 190 (2019b).
7. Вольвач и др. (L.N. Volvach, A.E. Volvach, M.G. Larionov, G.C. MacLeod, and P. Wolak), *MNRAS* **487**, L77 (2019c).
8. Дженнесс и др. (T. Jenness, P.F. Scott, and R. Padman), *MNRAS* **276**, 1024 (1995).
9. Зиннекер, Йорк (H. Zinnecker and H.W. Yorke), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **45**, 481 (2007).
10. Контрерас и др. (Y. Contreras, F. Schuller, J.S. Ugruhart, T. Csengeri, F. Wyrowski, H. Beuther, S. Bontemps, L. Bronfman, et al.), *Astron. Astrophys.* **549A**, 45C (2013).
11. Лью и др. (S.-Y. Liu, Y.-N. Su, I. Zinchenko, K.-S. Wang, and Y. Wang), *Astrophys. J. Lett.* **863**, L12 (2018).

12. Ментен и др. (K.M. Menten, C.M. Walmsley, C. Henkel, T.L. Wilson, L.E. Snyder, J.M. Hollis, and F.J. Lovas), *Astron. Astrophys.* **169**, 271 (1986).
13. Москаделли и др. (L. Moscadelli, A. Sanna, C. Goddi, et al.), *Astron. Astrophys.* **600**, L8 (2017).
14. Нестеров Н.С., Вольвач А.Е., Стрепка И.Д., и др., *Радиофизика и радиоастрономия*, **5**, 3, 320 (2000).
15. Сугияма и др. (K. Sugiyama, Y. Saito, Y. Yonekura, and M. Momose), *The Astronomer's Telegram* **12446** (2019).
16. Сугияма и др. (K. Sugiyama, K. Fujisawa, A. Doi, M. Honma, et al.), *Publ. Astron. Soc. Japan* **60**, 23 (2008).
17. Уркварт и др. (J.S. Urquhart, T.J.T. Moore, F. Schuller, et al.), *MNRAS* **431**, 1752 (2013).
18. Хантер и др. (T.R. Hunter, C.L. Brogan, G.C. MacLeod, C.J. Cyganowski, et al.), *Astrophys. J.* **854**, 170 (2018).
19. Хантер и др. (T.R. Hunter, C.L. Brogan, G.C. MacLeod, et al.), *Astrophys. J. Lett.* **837**, L29 (2017).
20. Хекман, Суливан (T.M. Heckman and W.T. Sullivan), *Astrophys. Lett.* **17**, 105 (1976).
21. Шимчак и др. (M. Szymczak, M. Olech, P. Wolak, E. Gerard, and A. Bartkiewicz), *Astron. Astrophys.* **617**, A80 (2018).