

УДК 524.74-77

ДОЛГОВРЕМЕННАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ РАДИОИСТОЧНИКА J0010+1058 в 2000–2013 ГОДАХ

© 2015 А. Г. Горшков^{1*}, В. К. Конникова¹, М. Г. Мингалиев^{2,3}, Д. В. Кратов²¹Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского Государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия³Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

Поступила в редакцию 7 ноября 2014 года; принята в печать 15 декабря 2014 года

При мониторинге источника J0010+1058 в течение тринадцати лет обнаружено четыре вспышки с амплитудой больше 1 Ян на частоте 21.7 ГГц. С использованием автокорреляционных функций определено среднее характерное время вспышек $\tau_{\text{acf}} \approx 1.55 \pm 0.1$ года (максимум–минимум), одинаковое на пяти частотах: 2.3, 4.8, 7.7, 11.2 и 21.7 ГГц, что дает линейные размеры излучающей области $R \approx c \tau_{\text{acf}} \approx 0.48$ пк, угловые — 0.28 mas; яркостная температура составляет $0.6\text{--}6.5 \times 10^{11}$ К на частотах 21.7–2.3 ГГц. Кроме этого, на частотах выше 2.3 ГГц существует второе характерное время $\tau \approx 0.6$ года. Оценено среднее время запаздывания вспышек по отношению к частоте 21.7 ГГц на 150, 210, 270 и 390 дней соответственно на 11.2, 7.7, 4.8 и 2.3 ГГц и некоторые другие характеристики источника. Спектры, полученные в разные фазы активности источника, подтверждают модель развития вспышек как результата эволюции ударной волны при распространении в джете радиоисточника.

Ключевые слова: *галактики: сейфертовские — галактики: джеты — радиоконтинуум: галактики*

1. ВВЕДЕНИЕ

Галактика III Zw 2 (Mrk 1501) открыта Цвикки [1] и классифицирована как сейфертовская галактика I типа с $z = 0.089$ [2]. Галактика спиральная, с радиусом примерно 14 кпс. Она имеет яркое голубое ядро, которое в 40 раз ярче, чем вся галактика [3]. Объект отождествлен с радиоисточником, в дальнейшем мы будем называть его J0010+1058.

Галактика переменна во всех диапазонах: рентгеновском [4], оптическом [5] и инфракрасном [6]. Самая большая переменность источника наблюдается в радиодиапазоне. Длительные наблюдения источника проводились с 1980 г. в Мичиганском университете на частотах 4.8, 8.0 и 14.5 ГГц. Обнаружена переменность с временными шкалами от дней до десятилетий [7, 8]. В радиообсерватории Метсахови источник наблюдался на частотах 22 и 37 ГГц с 1985 г. Зарегистрированы вспышки плотности потока в 20–30 раз длительностью от месяцев до нескольких лет, максимальная амплитуда достигала 3 Ян [9, 10].

В работе [11] определены параметры источника по наблюдениям VLBI и в континууме на 22 и 37 ГГц: яркостная температура $T_b = 2.34 \times 10^{11}$, доплер-фактор, определенный по переменности, $D_{\text{var}} = 1.7$, видимая относительная скорость $\beta_{\text{app}} = 0.98 (v/c)$, лоренц-фактор $\gamma_{\text{var}} = 1.4$, угол между направлением джета и лучом зрения $\theta_{\text{var}} = 35^\circ$.

Мы наблюдали источник с сентября 2000 г. по октябрь 2010 г. одновременно на пяти частотах в диапазоне 2.3–21.7 ГГц и с июня 2011 г. по сентябрь 2013 г. на четырех частотах в диапазоне 4.8–21.7 ГГц.

В процессе наблюдений у радиоисточника обнаружена значительная вспышечная переменность плотности потока, характерная скорее для блазаров, чем для сейфертовских галактик, что представляет интерес для отдельного исследования.

Здесь мы приводим результаты нашего мониторинга.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Радиоисточник J0010+1058 наблюдался в составе полной по плотности потока выборки 83 источников с плоскими спектрами из каталога GB6

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

обзора MGB с $S_{4.85} > 200$ мЯн в области склонений $10^\circ-12^\circ 30'$ по всем прямым восхождениям. Наблюдения проводились на Северном секторе радиотелескопа РАТАН-600. С 2000 по 2004 гг. наблюдения проводились одновременно на частотах 2.3, 3.9, 7.7, 11.2 и 21.7 ГГц; с 2004 г. приемник на 3.9 ГГц заменен на 4.8 ГГц, а с 2011 г. из-за техногенных помех исключен приемник на 2.3 ГГц. В 2013 г. вместо 7.7 ГГц наблюдения проводились на 8.2 ГГц.

Были проведены девять сетов ежедневных наблюдений длительностью от 77 до 103 дней. Выборка наблюдалась с целью исследования переменности на масштабах времени от нескольких дней до нескольких лет. Результаты исследования переменности всей выборки до 2008 г. опубликованы в работах [12, 13]. Радиоисточник J0010+1058 наблюдался как во всех длинных сетах, так и в отдельных наблюдениях длительностью 10–20 дней. Для контроля возможных отклонений, связанных с изменением эффективной площади антенны, величины калибровочного сигнала и других причин, наблюдались до десяти источников с постоянной плотностью потока и угловыми размерами меньше ширины диаграммы на самой короткой длине волны.

В качестве калибровочного источника при наблюдениях использовался J1347+1217, для него приняты плотности потока 4.12, 3.23, 2.94, 2.36, 2.30, 1.99 и 1.46 Ян на частотах 2.3, 3.9, 4.8, 7.7, 8.2, 11.2 и 21.7 ГГц соответственно.

Для обработки наблюдений использовался пакет программ, позволяющий получать как плотность потока однократного наблюдения источника, так и среднюю плотность потока за любой интервал времени внутри цикла наблюдений. В основу обработки положена оптимальная фильтрация исходных данных (подробно методика описана в [14]).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Кривые блеска

На рис. 1 приведены кривые блеска на частотах 21.7, 11.2, 7.7 и 4.8 и 2.3 ГГц за время с сентября 2000 г. по сентябрь 2013 г. (на 2.3 ГГц — по октябрь 2010 г.). Плотности потоков на 3.9 и 8.2 ГГц пересчитаны на 4.8 и 7.7 ГГц. Точки, полученные в наблюдениях, соединены линиями для удобства рассмотрения. Длинные серии представлены пятью–шестью точками. В 2013 г. и в течение одиннадцати месяцев 2005 г. наблюдения не проводились. Открытые кружки на кривой блеска 21.7 ГГц — данные из работы [10], полученные в обсерватории Метсахови на близкой частоте 22 ГГц; для 2005 г. крестиками показаны данные на 37 ГГц [15]. Эти данные соединены штриховой линией.

За тринадцать лет наблюдались четыре значительных вспышки на частотах 21.7–7.7 ГГц. На остальных частотах вспышки произошли значительно позже. Отсутствие наблюдений в конце 2004–середине 2005 гг. не позволило зарегистрировать минимум на спаде первой вспышки. При использовании данных на 37 ГГц видно, что минимум после первой вспышки был в середине 2005 г.

За все время наблюдений на 21.7 ГГц минимальная плотность потока $S = 0.211 \pm 0.02$ зарегистрирована 9 сентября 2013 г., максимальная $S = 3.56 \pm 0.05$ — 14 июня 2004 г. На частоте 2.3 ГГц минимальная плотность потока $S = 0.125 \pm 0.025$ получена 5 августа 2004 г., максимальная $S = 0.458 \pm 0.21$ — в период с июня по октябрь 2007 г.

По полученным данным видно, что процесс циклический. Для определения среднего характерного времени вспышек и запаздывания максимумов вспышек на более низких частотах мы воспользовались методикой, которая была применена для поиска короткой переменности в [16].

Были построены структурные функции первого порядка (SF)

$$D^1(\tau) = \langle [f(t) - f(t + \tau)]^2 \rangle,$$

где τ — временной сдвиг.

По виду структурной функции оценивались характерные времена переменности. Выше уровня аппаратных шумов структурная функция в логарифмическом масштабе растет по степенному закону, пока не достигает уровня насыщения. Пересечение степенной части с уровнем насыщения и дает характерное время τ_{sf} .

Мы также рассчитали автокорреляционные (ACF) функции и по ним определили характерные времена переменности по первому минимуму τ_{acf} . Временная задержка, соответствующая первому минимуму в ACF, соответствует временной задержке, где SF достигает максимума, поскольку $SF(\tau) = 2(ACF(0) - ACF(\tau))$. При таком определении для периодических изменений плотности потока это время будет составлять половину периода.

Идея определения характерного времени заключается в следующем: если переменность есть результат n циклических или гармонических процессов в источнике, то в ACF будет присутствовать функция

$$\sum_{i=1}^n A_i \cos\left(\pi \frac{\tau}{\tau_{i,acf}}\right),$$

где A_i — коэффициент корреляции i -ой переменной составляющей при нулевом сдвиге. Оптимизируя эту функцию по $2n$ параметрам, можно получить A_i и $\tau_{i,acf}$ переменных составляющих.

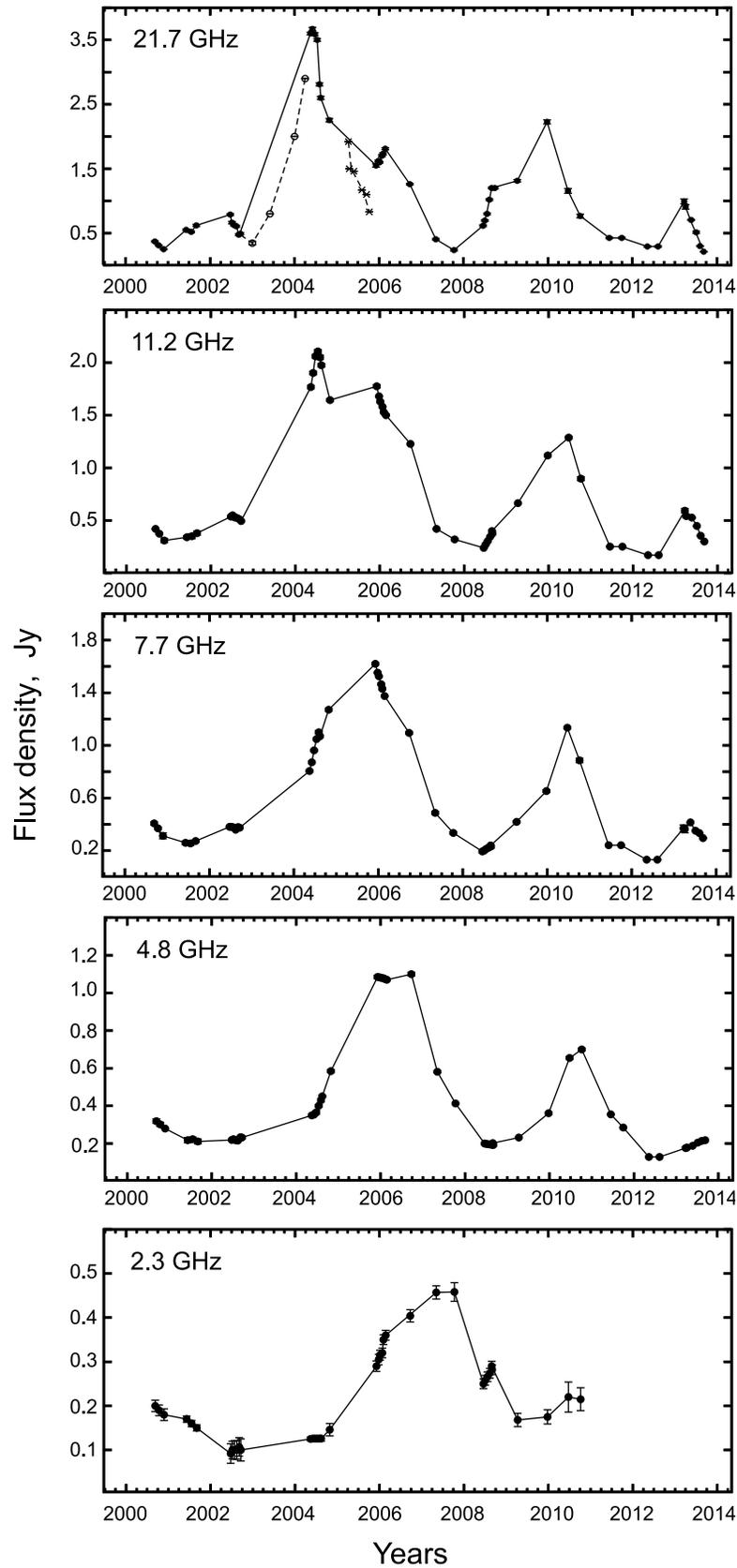


Рис. 1. Кривые блеска источника J0010+1058 с 2000 по 2013 гг. на частотах 21.7, 11.2, 7.7, 4.8 и 2.3 ГГц.

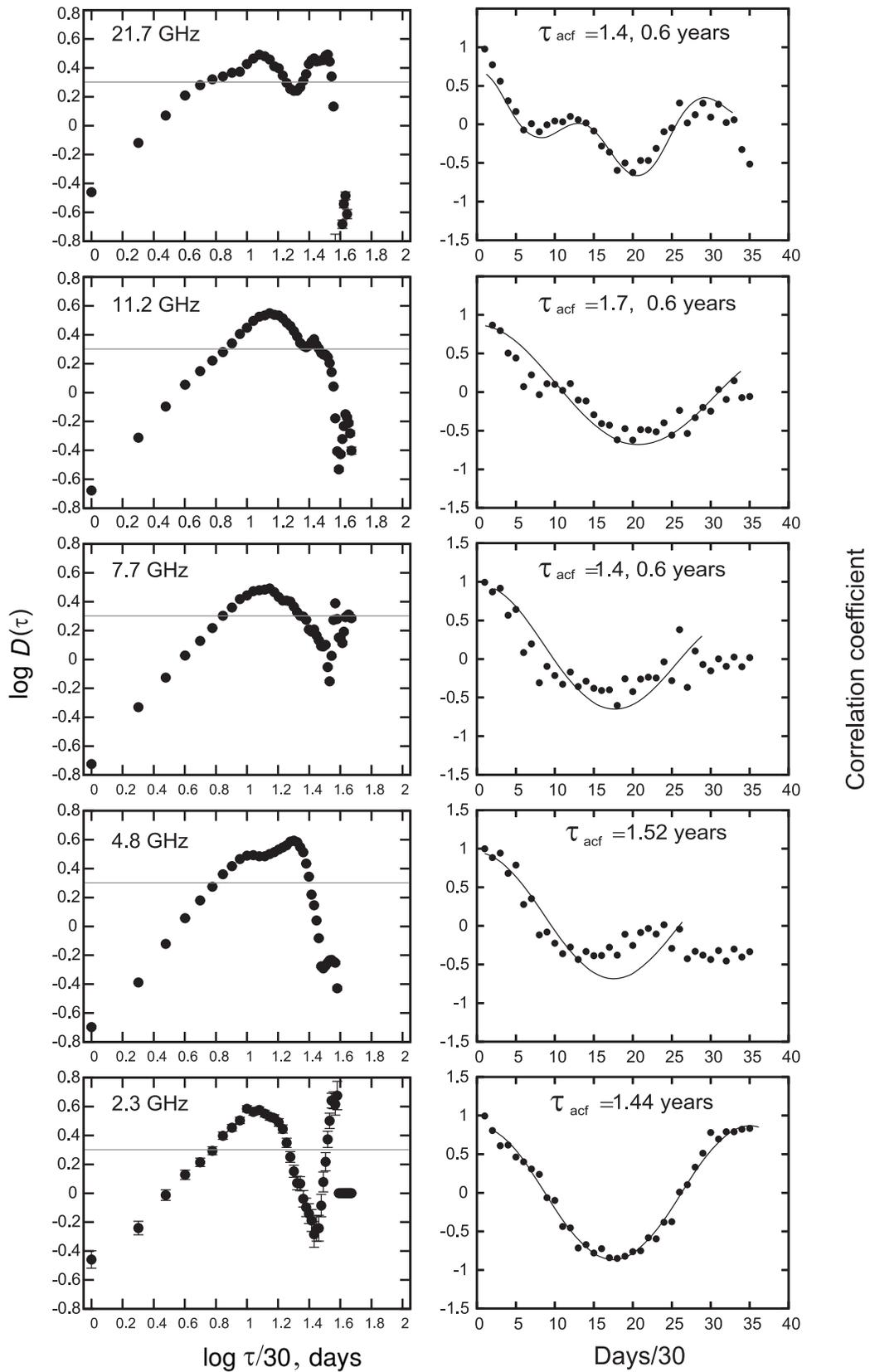


Рис. 2. Структурные и автокорреляционные функции источника J0010+1058 по всем данным за тринадцать лет.

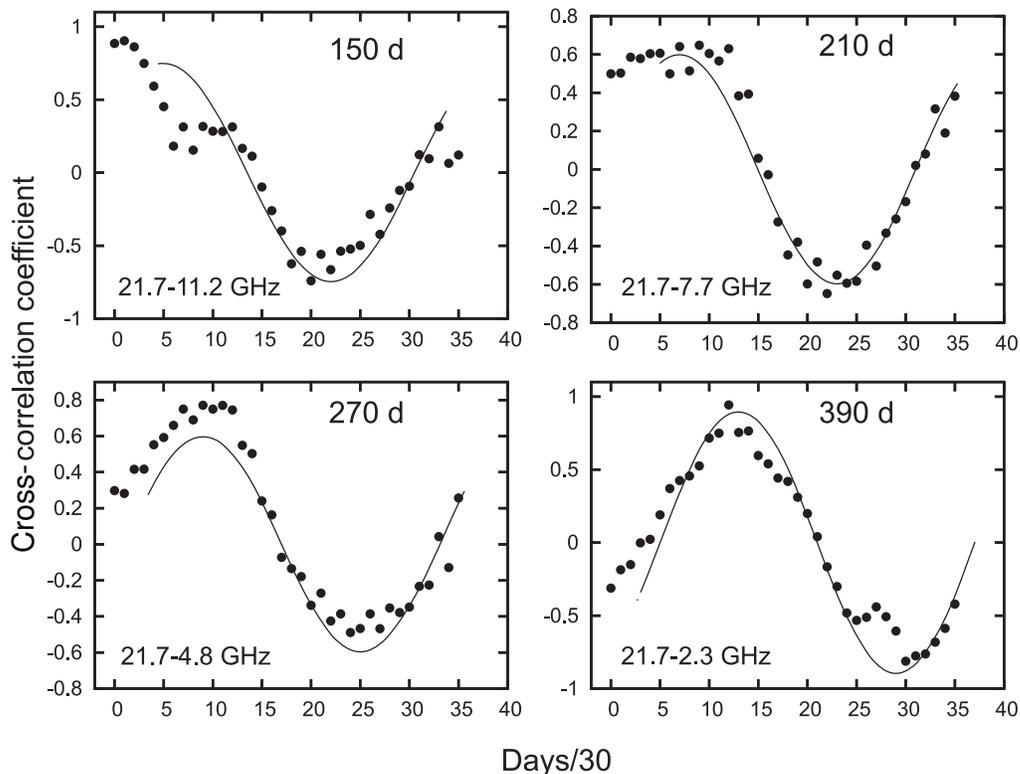


Рис. 3. Кросс-корреляционные функции источника J0010+1058 по всем данным за тринадцать лет.

По виду АСФ можно определить не только характерное время, но и характеристики переменности, в частности, является ли процесс периодическим, представляет собой одну или несколько хаотических вспышек, или может быть комбинацией этих процессов.

На рис. 2 приведены структурные (слева) и автокорреляционные (справа) функции, полученные по всем измерениям на пяти частотах. На всех графиках автокорреляционных функций сдвиг на одну точку соответствует 30 дням. Аппроксимация данных дает минимум в области 17–20, что соответствует характерному времени 1.4–1.7 года. На частотах 21.7, 11.2 и 7.7 ГГц видно присутствие второго процесса с минимумом на 7 (характерное время примерно 0.6 года), который, по-видимому, в основном обусловлен небольшими промежуточными вспышками. Характерное время $\tau_{\text{acf}} \approx 1.55 \pm 0.1$ года дает средние линейные размеры излучающей области без учета угла зрения $R \approx c\tau_{\text{acf}} \approx 0.48$ пк, угловые 0.28 mas, яркостная температура $0.6\text{--}6.5 \times 10^{11}$ К на частотах 21.7–2.3 ГГц.

На рис. 3 показаны кросс-корреляционные функции между частотами 21.7–11.2, 21.1–7.7 и 21.7–4.8 и 21.7–2.3 ГГц. Аппроксимация кросс-

корреляционных функций

$$\sum_{i=1}^n A_i \cos\left(\pi \frac{\tau - \Delta t}{\tau_{i,\text{acf}}}\right)$$

позволяет получить среднее время задержки Δt .

На частоте 11.2 ГГц максимум вариаций запаздывает на 150 дней по сравнению с частотой 21.7 ГГц, на частоте 7.7 ГГц процесс развивается позже на 210 дней, на 4.8 ГГц — на 270 дней, и на 2.3 ГГц — на 390 дней. Напомним, что мы определили среднее время запаздывания максимумов по всем вспышкам. Полученные запаздывания согласуются с результатами в [17].

На рис. 4а показана зависимость запаздывания от частоты относительно частоты 21.7 ГГц.

Характер переменности J0010+1058 соответствует модели, в которой вариации плотности потока являются результатом эволюции ударной волны, распространяющейся в джете [18]. Согласно этой модели, в своем развитии ударная волна проходит стадию усиления, баланса, когда сравнимы энергетические потери и энергия усиления, и затухания. Форма спектра волны соответствует спектру однородного источника и остается неизменной в процессе эволюции. По мере развития ударной волны частота максимума в спектре смещается в сторону низких частот.

В начале вспышки максимум в спектре находится выше исследуемого диапазона. Спектр достаточно хорошо можно аппроксимировать параболой. По мере развития вспышки максимум сдвигается в низкочастотную область, в конечном итоге попадая в исследуемый диапазон.

Максимальная амплитуда переменности плотности потока ΔS_{\max} будет достигнута, когда частота максимума в спектре достигнет частоты баланса ν_b , где $\Delta_{\max} \propto \nu^\beta$, β — спектральный индекс оптически толстой области. На частотах выше ν_b максимумы будут достигаться одновременно, и $\Delta S_{\max} \propto \nu^\alpha$, где α — спектральный индекс оптически тонкой области спектра ударной волны. Ниже ν_b максимумы будут тем позже и тем меньше $\Delta S_{\max} \propto \nu^\beta$, чем ниже частота. По данным нашего мониторинга источника J0010+1058 на пяти частотах мы определили величину β .

По имеющимся данным измерений плотности потока был рассчитан индекс переменности, который определен как

$$V = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{S_{\max} + S_{\min}},$$

где S_{\max} и S_{\min} — максимальная и минимальная зарегистрированные за тринадцать лет плотности потока.

Полученные индексы переменности на частотах 2.3–21.7 ГГц равны 0.55, 0.70, 0.77, 0.84 и 0.88 соответственно. На рис. 4б показана зависимость индекса переменности от частоты. Зависимость аппроксимируется параболой с максимумом на 30 ГГц.

На рис. 4с показана зависимость ΔS_{\max} от частоты. Зависимость аппроксимируется формулой $\Delta S_{\max} = \nu^{+0.86}$. В исследуемом диапазоне не достигается оптически тонкая область спектра ударной волны.

Ни в одном сете длительных наблюдений после исключения долговременной переменности мы не обнаружили переменность с характерным временем меньше месяца.

3.2. Спектры источника в разные фазы долговременной переменности

На рис. 5 приведены спектры источника в 2000–2013 гг.

Изменение спектра отражает развитие вспышки: спектр растущий, по мере спада вспышки максимум в спектре продвигается в низкочастотный диапазон. Рассмотрим кратко полученные в наших наблюдениях спектры в разные фазы активности.

В сете 2000 г. в течение 82 дней ежедневных наблюдений плотность потока уменьшалась на всех частотах, к концу сета плотность потока на 21.7 ГГц

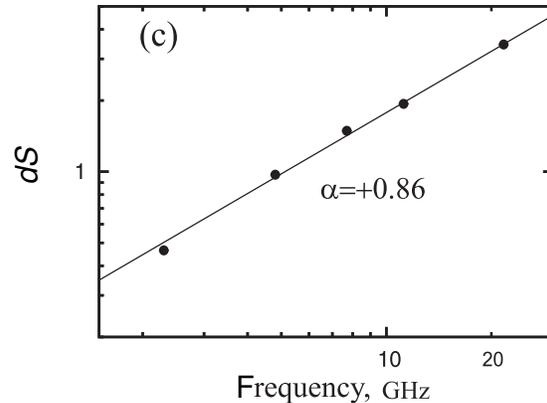
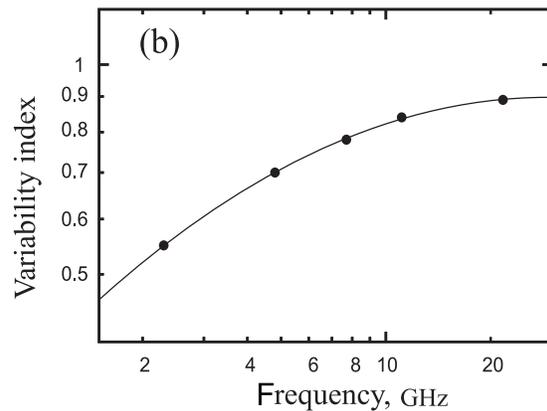
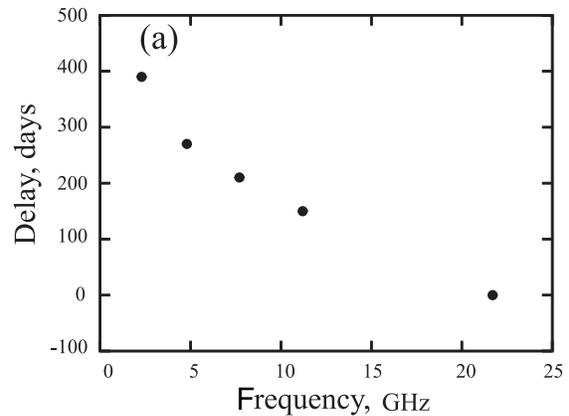


Рис. 4. (а) Зависимость времени задержки максимумов относительно 21.7 ГГц от частоты. (б) Зависимость индекса переменности за тринадцать лет от частоты. (с) Зависимость максимального изменения плотности потока dS от частоты.

была близка к минимальной за тринадцать лет: наши наблюдения попали на затухание вспышки 1998–1999 гг., подробно описанной в статье [18]. Плотность потока в максимуме этой вспышки на частоте 22 ГГц была около 2.5 Ян. В наших наблюдениях спектр аппроксимировался параболой, за 82 дня наблюдений в сентябре–ноябре 2000 г. максимум в спектре сместился с 12 до 8.5 ГГц. На

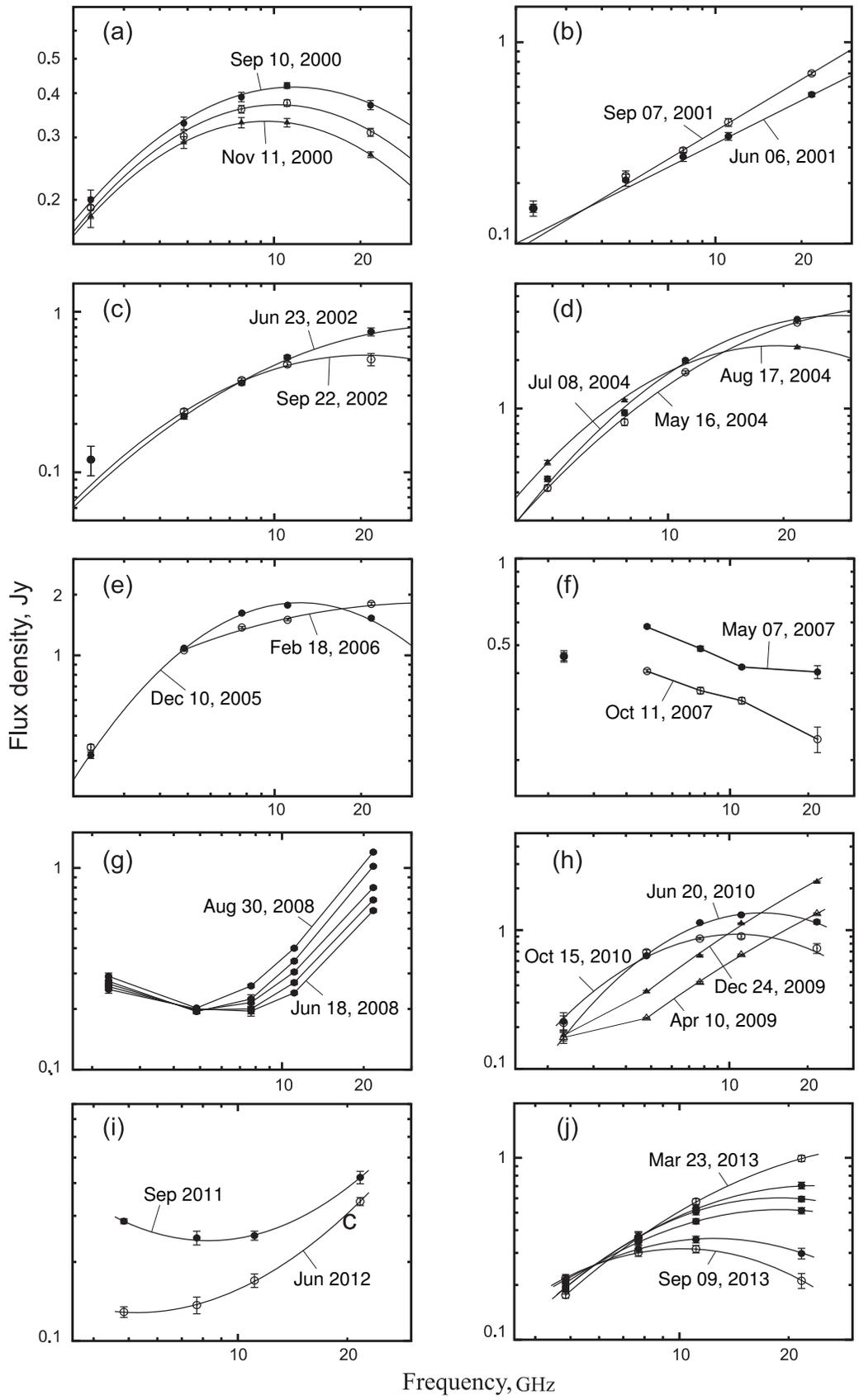


Рис. 5. Спектры источника J0010+1058 в разные фазы активности.

рис. 5а показаны спектры в начале, в середине и в конце наблюдений.

В 2001 г. плотность потока на 21.7 и 11.2 ГГц росла, на остальных частотах менялась незначительно в течение почти ста дней; спектр степенной, растущий к высоким частотам, со спектральным индексом $\alpha_{4.8-21.7} = 0.71-0.85$, $S_\nu \sim \nu^\alpha$ (рис. 5b).

Между концом серии 2001 г. и началом серии 2002 г. (девять месяцев) вероятно произошла небольшая вспышка, и в 2002 г. мы наблюдали ее спад. Спектры аппроксимируются параболами, максимум в спектре за 97 дней наблюдательного сета продвинулся в низкочастотную область с 40 до 20 ГГц. На рис. 5с спектр в начале и конце сета наблюдений.

В 2004 г. наблюдения 96-дневного сета проходили в максимуме первой вспышки. На рис. 5d показан спектр источника в начале наблюдений, в максимуме вспышки на 11.2 ГГц и в конце наблюдений. К концу сета максимум на трех высоких частотах пройден, а на 2.3 и 4.8 ГГц еще не достигнут; спектр аппроксимируется параболой с максимумом на 20 ГГц.

В 2005–2006 гг. на спаде первой вспышки начала развиваться следующая, начало которой мы не наблюдали. В начале сета 10 декабря 2005 г. на рис. 5е мы видим спад первой вспышки, спектр с максимумом на 10 ГГц, а в конце сета, 18 февраля 2006 г., начала развиваться новая вспышка: спектр растущий с максимумом выше наблюдаемого диапазона.

На частоте 21.7 ГГц 11 октября 2007 г. зарегистрирована минимальная плотность потока, а на 2.3 ГГц в это время плотность потока близка к максимальной. Соответственно спектр в эту эпоху — падающий к высоким частотам, со спектральным индексом $\alpha = -0.27$ (рис. 5f).

В сете 2008 г. плотность потока росла на всех частотах: спектры от 4.8 ГГц — также растущие к высоким частотам (рис. 5g). В 2009 г. спектры получены на растущей части третьей вспышки, спектры — растущие, с $\alpha = +1.2-1.3$. В 2010 г. спектры — на спаде этой вспышки, с максимумом в рассматриваемом диапазоне.

В 2011–2012 гг. началась последняя небольшая вспышка (рис. 5i), а в 2013 г. с марта по сентябрь мы видим продвижение максимума в спектре в низкочастотный диапазон от 22 до 10 ГГц (рис. 5j).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При мониторинге источника J0010+1058 в течение тринадцати лет наблюдались четыре вспышки с амплитудой больше 1 Ян на частоте 21.7 ГГц. В первой вспышке плотность потока на этой частоте увеличилась в шестнадцать раз.

С использованием автокорреляционных функций определено среднее характерное время вспышек $\tau_{acf} \approx 1.55 \pm 0.1$ год (максимум–минимум), одинаковое на всех пяти частотах. Характерное время 1.55 года дает линейные размеры излучающей области без учета угла зрения $R \approx c \tau_{acf} \approx 0.48$ пк, угловые 0.28 mas. Яркостная температура $0.6-6.5 \times 10^{11}$ К на частотах 21.7–2.3 ГГц. Кроме этого, на частотах выше 2.3 ГГц существует второе характерное время $\tau \approx 0.6$ года.

Кросс-корреляционные функции, построенные по всем данным, показали среднее время запаздывания вспышек по отношению к вспышке на частоте 21.7 ГГц на 150, 210, 270 и 390 дней соответственно на 11.2, 7.7, 4.8 и 2.3 ГГц. Напомним, что это среднее время запаздывания максимумов по всем вспышкам.

Индексы переменности за тринадцать лет на частотах 2.3–21.7 ГГц равны 0.55, 0.70, 0.77, 0.84 и 0.88 соответственно. Зависимость индексов переменности от частоты аппроксимируется параболой с максимумом на 30 ГГц.

Зависимость максимального изменения плотности потока за тринадцать лет от частоты аппроксимируется функцией $\Delta S_{\max} = \nu^{+0.86}$. В исследуемом диапазоне не достигается оптически тонкая область спектра ударной волны.

Спектры, полученные в разные фазы кривой блеска, подтверждают модель развития вспышек как результата эволюции ударной волны при ее распространении в джете радиоисточника.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана грантом РФФИ 14-02-00025-а. Работа частично выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров. Наблюдения проводились при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. F. Zwicky, *Adv. Astron. Astrophys.* **5**, 267 (1967).
2. H. Arp, *Astrophys. J.* **152**, 1101 (1968).
3. V. Huttchings, D. Crampton, and B. Campbell, *Astrophys. J.* **280**, 41 (1984).
4. J. S. Kaastra and P. A. J. de Korte, *Astron. and Astrophys.* **198**, 16 (1988).
5. C. Lloyd, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **209**, 697 (1984).
6. G. Neugebauer, G. K. Miley, B. T. Soifer, and P. E. Clegg, *Astrophys. J.* **308**, 815 (1986).

7. H. D. Aller, M. F. Aller, G. E. Latimer, and P. E. Hodge, *Astrophys. J. Suppl.* **59**, 513 (1985).
8. H. D. Aller, M. F. Aller, G. E. Latimer, and P. E. Hodge, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **202**, 1801 (2003).
9. H. Teräsranta, M. Tornikoski, A. Mujunen, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **132**, 305 (1998).
10. H. Teräsranta, S. Wiren, P. Koivisto, et al., *Astron. and Astrophys.* **440**, 409 (2005).
11. T. Hovatta, E. Valtaoja, M. Tornikoski, and A. Lähteenmäki, *Astron. and Astrophys.* **494**, 527 (2009).
12. A. G. Gorshkov, V. K. Konnikova, and M. G. Mingaliev, *Astronomy Reports* **56**, 355 (2012).
13. A. G. Gorshkov, V. K. Konnikova, and M. G. Mingaliev, *Astronomy Reports* **57**, 344 (2013).
14. A. G. Gorshkov, V. K. Konnikova, and M. G. Mingaliev, *Astronomy Reports* **47**, 903 (2003).
15. E. Valtaoja (private communication).
16. A. G. Gorshkov, V. K. Konnikova, and M. G. Mingaliev, *Astronomy Reports* **54**, 908 (2010).
17. A. Brunthaler, H. Falcke, G. C. Bower, et al., *Astron. and Astrophys.* **80**, 497 (2005).
18. E. Valtaoja, H. Teräsranta, S. Urpo, et al., *Astrophys. J.* **254**, 71 (1992).

Long-Term Variability of the Radio Source J0010+1058 in 2000–2013

A. G. Gorshkov, V. K. Konnikova, M. G. Mingaliev, and D. V. Kratov

During thirteen-year monitoring of the source J0010+1058, four bursts have been observed with an amplitude greater than 1 Jy at a frequency of 21.7 GHz. Using autocorrelation functions, we determined the average characteristic burst time $\tau_{\text{acf}} \approx 1.55 \pm 0.1$ yr (max–min), identical at five frequencies: 2.3, 4.8, 7.7, 11.2, and 21.7 GHz, which provides the linear sizes of the emission region $R \approx c\tau_{\text{acf}} \approx 0.48$ pc, and the angular ones—0.28 mas; the brightness temperature is $0.6\text{--}6.5 \times 10^{11}$ K at the frequencies 21.7–2.3 GHz. Moreover, at frequencies higher than 2.3 GHz, there is one more characteristic time $\tau \approx 0.6$ yr. We estimated the average lag time of the bursts in relation to a frequency of 21.7 GHz as 150, 210, 270, and 390 days at 11.2, 7.7, 4.8, and 2.3 GHz respectively, and some other source characteristics. Spectra obtained in different periods of source activity confirm the model of the burst development as a result of the evolution of a shock wave propagating along the radio source jet.

Keywords: *galaxies: Seyfert—galaxies: jets—radio continuum: galaxies*