

УДК 524.7-77

РАДИОИСТОЧНИК J1603+1105 — ДОЛГОВРЕМЕННАЯ И БЫСТРАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ

© 2017 В. К. Конникова^{1*}, М. Г. Мингалиев^{2,3**}, А. К. Эркенов²

¹Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

³Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420000 Россия

Поступила в редакцию 19 января 2017 года; принята в печать 17 мая 2017 года

Представлена долговременная кривая блеска радиисточника J1603+1105 и результаты исследования его переменности на масштабах от нескольких дней до нескольких недель. У объекта, не показывавшего ранее существенных изменений плотности потока, с 2007 г. наблюдалась вспышка с максимумом в 2010 г. В активной фазе на долговременной кривой блеска зафиксированы три вспышки с последовательно уменьшающейся амплитудой. Характерное время первой из них составило 2.5 года. В пяти сетах ежедневных наблюдений источника длительностью 95–120 дней обнаружена переменность плотности потока на шкале от 9 до 32 дней в 2011, 2012, 2015 и 2016 гг., причем в 2015 г. она детектирована на трех частотах. В 2011 г. переменность найдена на одной частоте, 4.8 ГГц, в 2012 г. — на двух частотах, 4.8 и 7.7 ГГц, в 2015 г. — на частотах 4.6, 8.2 и 11.2 ГГц. Приведены мгновенные спектры источника в разных фазах вспышки, показывающие, что динамика развития вспышки соответствует модели, в которой переменность является результатом эволюции ударной волны в джете радиисточника.

Ключевые слова: *радио континуум: общее — Объекты VL Lac: индивидуальные: J1603+1105*

1. ВВЕДЕНИЕ

Радиисточник J1603+1105 обнаружен в обзоре MGB [1]. Его галактическая широта $|b| = 42^\circ$. В 13-м издании каталога квазаров и активных ядер источник классифицирован как объект типа BL Lac со звездной величиной $V = 18^m3$ и красным смещением $z = 0.143$ [2]. Однако по данным каталога SDSS¹ красное смещение $z = 0.3855$, при этом в спектре нет значительных линий. Для достоверного определения красного смещения объекта, отождествленного с J1603+1105, требуются дополнительные исследования.

В 2005 г. источник наблюдался на VLA в диапазоне 1.4–22 ГГц, где имел плоский спектр [3]. По данным наблюдений J1603+1105 на 40-м телескопе обсерватории Оуэнс Вэлли (Owens Valley) 08.2008–04.2009 гг. плотность потока на 15 ГГц составляла 250–280 мЯн [4]. В 2006–2008 источник наблюдался на РАТАН-600 в диапазоне 1–21.7 ГГц [5], плотности потоков по этим данным

близки к полученным нами в соответствующие эпохи.

Мы начали мониторинг источника на радиотелескопе РАТАН-600 в рамках изучения выборки объектов с плотностями потоков $S > 200$ мЯн из каталога GB6 в области склонений $10^\circ - 12^\circ 30'$ (J2000) в интервале прямых восхождений $0^h - 24^h$ с ноября 2001 г., наблюдения проводились на 5 частотах в диапазоне 2.3–21.7 ГГц. Результаты исследований этой выборки до 2010 г. представлены в работах [6–8].

Источник J1603+1105 в течение семи лет не показывал существенной переменности, его плотность потока на всех частотах не превышала 0.25 Ян, а спектр был близок к плоскому. С 2008 г. плотность потока начала увеличиваться на всех частотах, максимум вспышки наблюдался в октябре 2010 г., максимальная плотность потока на 21.7 ГГц составила 0.6 Ян. До 2016 г. зарегистрирована серия вспышек с последовательно уменьшающейся амплитудой.

Переменность от нескольких дней до месяца исследовалась в ежедневных наблюдениях с длительностью сетов до 105 дней. Полученные результаты приведены в данной статье.

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

**E-mail: marat@sao.ru

¹<http://cas.sdss.org/dr7/en/tools/search/SQS.asp>

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Наблюдения источника J1603+1105 проводились в 2001–2002 г. и с 2006 г. на северном секторе РАТАН-600 одновременно на частотах 2.3, 4.8 ГГц (с 2014 г. — 4.6 ГГц), 7.7 ГГц (с 2013 г. — 8.2 ГГц), 11.2 и 21.7 ГГц. В 2003–2005 гг. источник не наблюдался из-за технических работ на телескопе, кроме того, приоритетным в указанное время было исследование близкого по координатам источника J1608+1029 со значительной долговременной и быстрой переменностью. С 2011 по 2015 гг. наблюдений на 2.3 ГГц не было вследствие техногенных помех. С 2015 г. они были продолжены на частоте 2.27 ГГц.

Для обработки данных использовался пакет программ, позволяющий получать как плотность потока единичного наблюдения источника, так и среднюю плотность потока за любой интервал внутри цикла наблюдений. В основу метода обработки положена оптимальная фильтрация исходных данных, его подробное описание приведено в работе [6]. Методика исследования быстрой переменности описана в разделе 3.2.

С целью исследования переменности источника на шкале от нескольких дней до месяца проводились ежедневные наблюдения: в 2011 году — с 01.07 по 03.10, в 2012 г. — 01.05–15.08, в 2013 г. — 18.05–15.09, в 2015 г. — 15.06–5.09 и в 2016 г. — 13.06–15.09. Калибровка осуществлялась по источнику J1347+1217, спектр которого аппроксимируется прямой с плотностями потоков 1.46, 1.99, 2.3, 2.36, 2.99, 4.12 и 4.15 Ян на частотах 21.7, 11.2, 8.2, 7.7, 4.6, 2.3, 2.27 ГГц соответственно. Контроль изменений площади антенны также проводился по другим источникам с постоянной плотностью потока.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Долговременная кривая блеска

В 2001–2002 и 2006 г. существенной переменности источника мы не обнаружили. С 2007 г. плотность потока начала увеличиваться и в октябре 2010 г. достигла максимума. После первой вспышки последовали еще две вспышки с меньшими амплитудами, каждая из которых развивалась на спаде предыдущей. Кривые блеска J1603+1105 на частотах 21.7, 11.2, 8.2, 4.6 и 2.3 ГГц по результатам наших наблюдений с июня 2001 по сентябрь 2016 гг. представлены на рис. 1. Для длинных сетов 2011, 2012, 2013 гг. плотности потоков приведены на начало и конец наблюдений. Плотности потоков на 7.7 ГГц до 2013 г. пересчитаны на частоту 8.2 ГГц. Из-за значительной переменности источника в течение наблюдательного сета 2015 г.

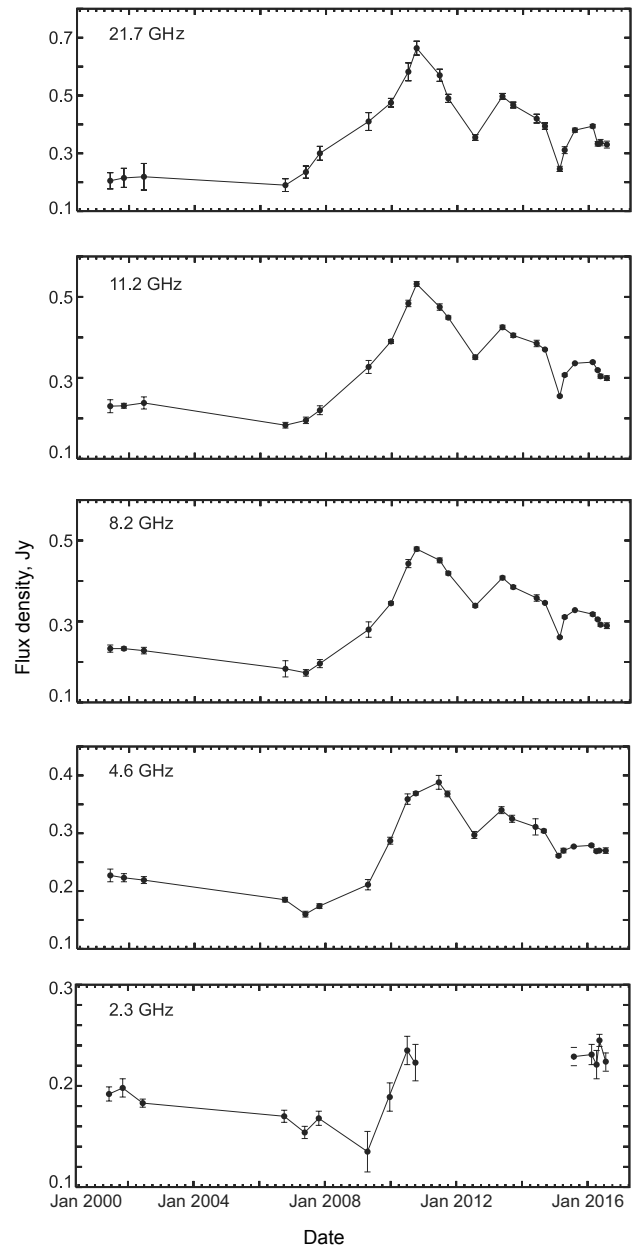


Рис. 1. Кривая блеска J1603+1105, полученная на РАТАН-600 в 2001–2016 гг.

в долговременной кривой блеска указаны средние плотности потока.

Кривые блеска на всех частотах практически идентичны. По восходящей части первой вспышки мы оценили ее характерное время τ_{var} . Для его определения была использована методика, предложенная в работе [9]. Характерное время есть $\tau_{\text{var}} = dt/d \ln S$. Эта величина остается постоянной в том случае, если изменение плотности потока в течение вспышки носит экспоненциальный характер.

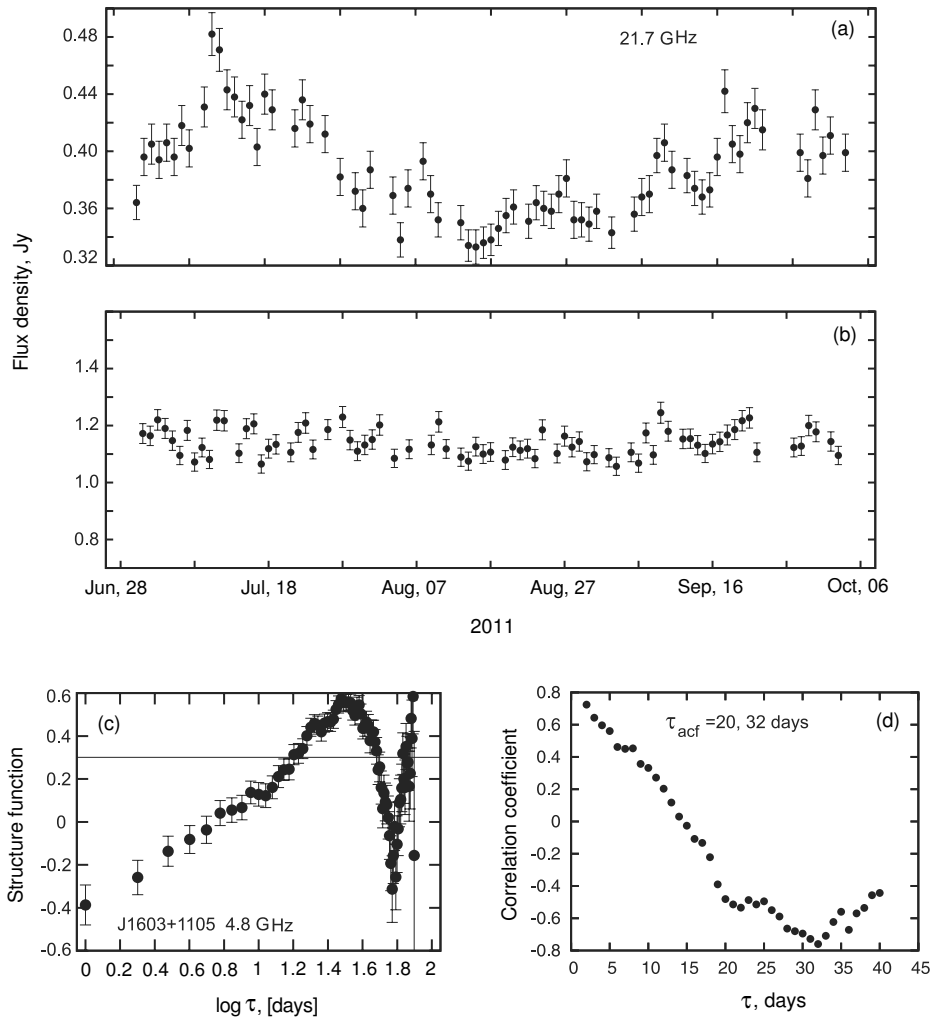


Рис. 2. Кривые блеска J1603+1105 (a) и постоянного источника J1640+1220 (b), структурная (c) и автокорреляционная (d) функции, полученные в наблюдательном сете 2011 г. на частоте 4.8 ГГц.

На практике характерное время определяется следующим образом. Из данных вычитается половина величины плотности потока, зарегистрированной непосредственно перед началом (или сразу после конца) вспышки. Если на кривой блеска между началом (или концом) и максимумом вспышки есть несколько точек наблюдений, то для каждой из них вычисляется dt_i как интервал времени между началом (или концом) вспышки и моментом измерения S_i , а значение $d \ln S_i$ — как разность логарифмов плотности потока в эти же моменты времени. Величину τ_{var} находим как среднее по всем измерениям. Вычитание половины плотности потока перед вспышкой позволяет учитывать хотя бы часть квазипостоянной составляющей, которая определяется суперпозицией некоторой средней плотности потока джета и старых, сильно проэволюционировавших, вспышек.

По нашим оценкам восходящая часть первой вспышки источника J1603+1105 близка к экспо-

ненциальной. Характерное время процесса по ее растущей ветви $\tau_{\text{var}} = 2.5$ года.

3.2. Быстрая переменность источника

Для поиска переменности на масштабах времени больше суток у объектов двух выборок в областях склонений $4^\circ-6^\circ$ (B1950.0) и $10^\circ-12^\circ 30'$ (J2000.0) [8, 10] мы использовали методику, подробно описанную в работе [10].

Перечислим кратко основные этапы.

Вначале проводилась фильтрация измеренных плотностей потоков, искаженных всякого рода помехами (погодными условиями или техногенными), с использованием критерия Фишера.

Затем была убрана долговременная переменность (аппроксимируемая параболическим или линейным трендом) с характерными временами больше, чем длительность наблюдений.

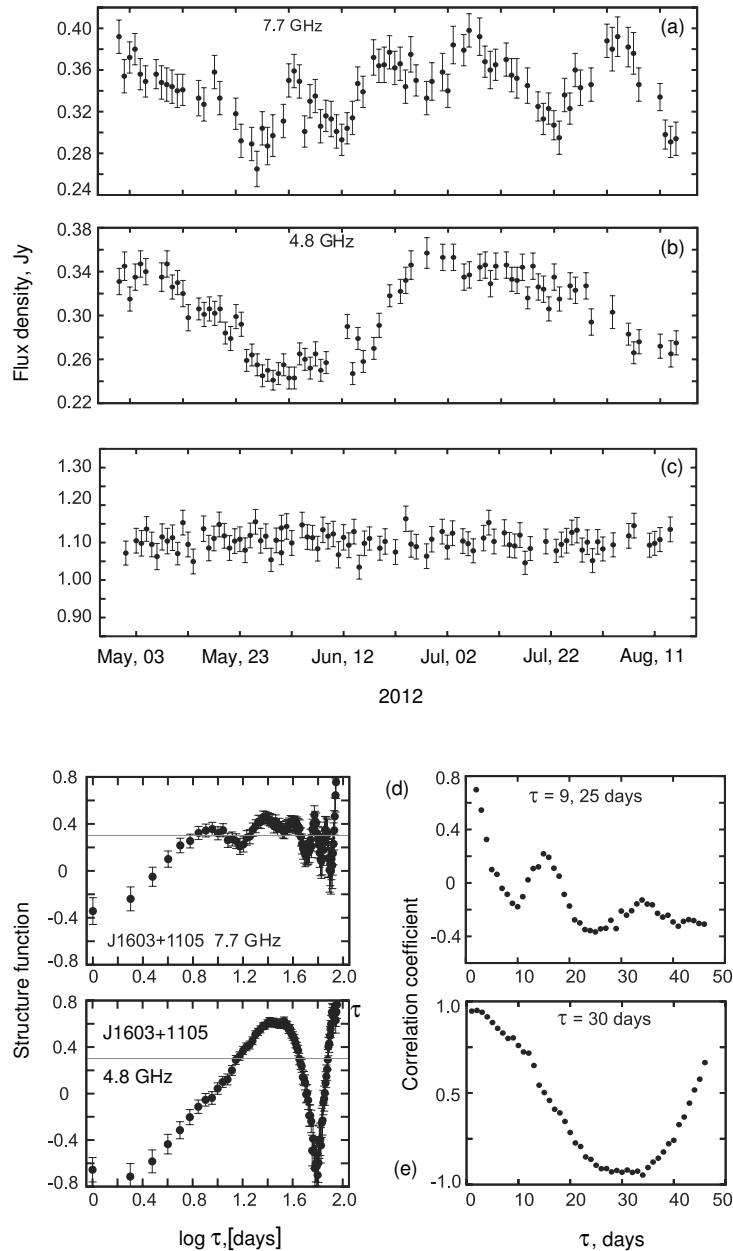


Рис. 3. Кривые блеска J1603+1105 на частотах 7.7 (a) и 4.8 ГГц (b) постоянного источника J1640+1220 на 4.8 ГГц (c), структурные и автокорреляционные функции J1603+1105 на частотах 7.7 (d) и 4.8 ГГц (e) в наблюдательном сете 2012 г.

На всех частотах определялась средняя плотность потока источника в течение сети наблюдений.

Характерные времена переменности грубо оценивались по виду структурных функций (SFs) первого порядка

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

где τ — временной сдвиг.

Если в процессе присутствует нешумовая компонента, то выше уровня аппаратных шумов SF растет по степенному закону, пока не достигает уровня насыщения, характеризующего суммарную

дисперсию процесса. Пересечение же степенной части с уровнем насыщения дает характерное время τ_{sf} .

Структурные функции также использовались для определения дисперсии переменной составляющей:

$$\sigma_{var}^2 = \sigma_{pr}^2 - \sigma_n^2,$$

где $\sigma_{pr}^2 = \sum_{i=1}^n (S_i - \langle S \rangle)^2 / (n - 1)$ — дисперсия процесса; $\langle S \rangle$ — средняя плотность потока за весь сет наблюдений; $\sigma_n^2 = D^1(1)/2$ — дисперсия

шумовой составляющей; $D^1(1)$ — значение SF при сдвиге на одни сутки.

Величину переменной составляющей мы характеризуем индексом модуляции, который определен как $m = 100\sigma_{\text{var}}/\langle S \rangle$.

Мы также рассчитали автокорреляционные функции (ACF) и, используя их, по минимумам корреляции определили более точно характерные времена переменности τ_{acf} .

Было принято, что уровень значимости основного процесса не должен превышать 1%. Уровень значимости остальных процессов в этом случае может быть больше.

По виду ACF можно определить не только характерное время, но и особенности переменного процесса, в частности, является ли он периодическим, представляет собой одну или несколько хаотических вспышек или является комбинацией этих процессов.

Были построены также кросскорреляционные функции, по которым определено запаздывание максимумов на исследуемых частотах.

Рассмотрим результаты исследования быстрой переменности по годам.

В длинном сете ежедневных наблюдений в 2011 г. на частоте 4.8 ГГц обнаружена переменность с индексом модуляции $m = 0.08$. На кривой блеска (рис. 2а) регистрируется один основной период, характерное время переменности источника $\tau_{\text{acf}} = 32$ дня. Кроме того, на графиках структурной и автокорреляционной функций (рис. 2с, d) виден дополнительный процесс с $\tau_{\text{acf}} = 20$ дней значительно меньшей амплитуды. На рис. 2b для сравнения приведена кривая блеска постоянного источника J1640+1220, близкого по прямому восхождению.

На рис. 3а и 3b представлены кривые блеска в сете 2012 г. на 7.7 и 4.8 ГГц, соответственно. Очевиден совершенно разный характер переменности. На 7.7 ГГц в течение наблюдательного сета обнаружено 5 максимумов кривой блеска с характерным временем 10 дней и один процесс с характерным временем 25 дней. Индекс модуляции на данной частоте $m = 0.075$. На 4.8 ГГц наблюдается одна волна с $\tau_{\text{acf}} = 30$ дней и индексом модуляции $m = 0.105$. На рис. 3с для сравнения показана кривая блеска постоянного источника J1640+1220. Структурная и автокорреляционные функции J1603+1105 на частотах 7.7 и 4.8 ГГц приведены на рис. 3d и e.

В 2013 г. переменность плотности потока на уровне принятого порога значимости не обнаружена.

В сете 2015 г. детектирована значительная переменность источника на частотах 11.2, 8.2 и 4.6 ГГц. На рис. 4а–d представлены полученные кривые

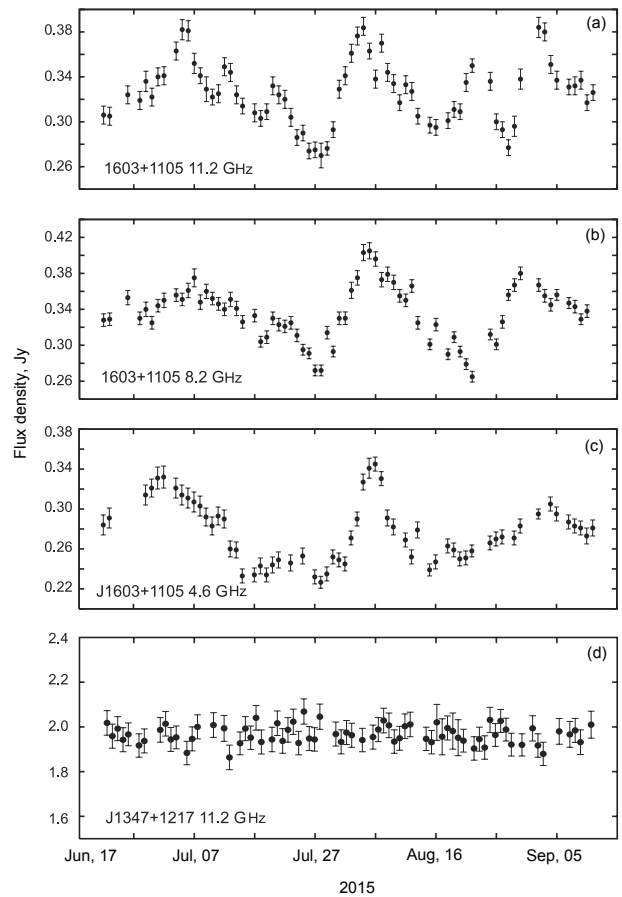


Рис. 4. Кривые блеска J1603+1105 на частотах 11.2 (а), 8.2 (b) и 4.6 ГГц (с) и опорного источника J1347+1217 на 11.2 ГГц (d) в наблюдательном сете 2015 г.

блеска. Для сравнения приведена кривая блеска опорного источника J1347+1217. Видно, что характер переменности на всех частотах квазипериодический, кривые блеска в значительной степени коррелированы. Структурные и автокорреляционные функции (рис. 5а–d) дают одинаковое характерное время на частотах 11.2 и 8.2 ГГц. На частоте 11.2 ГГц детектируется процесс с небольшой амплитудой и характерным временем 7 дней, по-видимому, вызванный локальной вспышкой с максимумом 20 июля. На частоте 4.6 ГГц процесс показывает два характерных времени 10 и 16 дней с близкими амплитудами. На графике структурной функции на 4.6 ГГц также видны два плато.

На рис. 6а показаны кросскорреляционные функции между частотами 11.2–8.2 и 8.2–4.6 ГГц. Видно небольшое запаздывание между этими частотами, не превышающее 2 дней.

Причина переменности на коротких масштабах может быть как внутренней — процессы внутри источника, так и внешней — рассеяние на неоднородностях межзвездной среды. Разделение этих

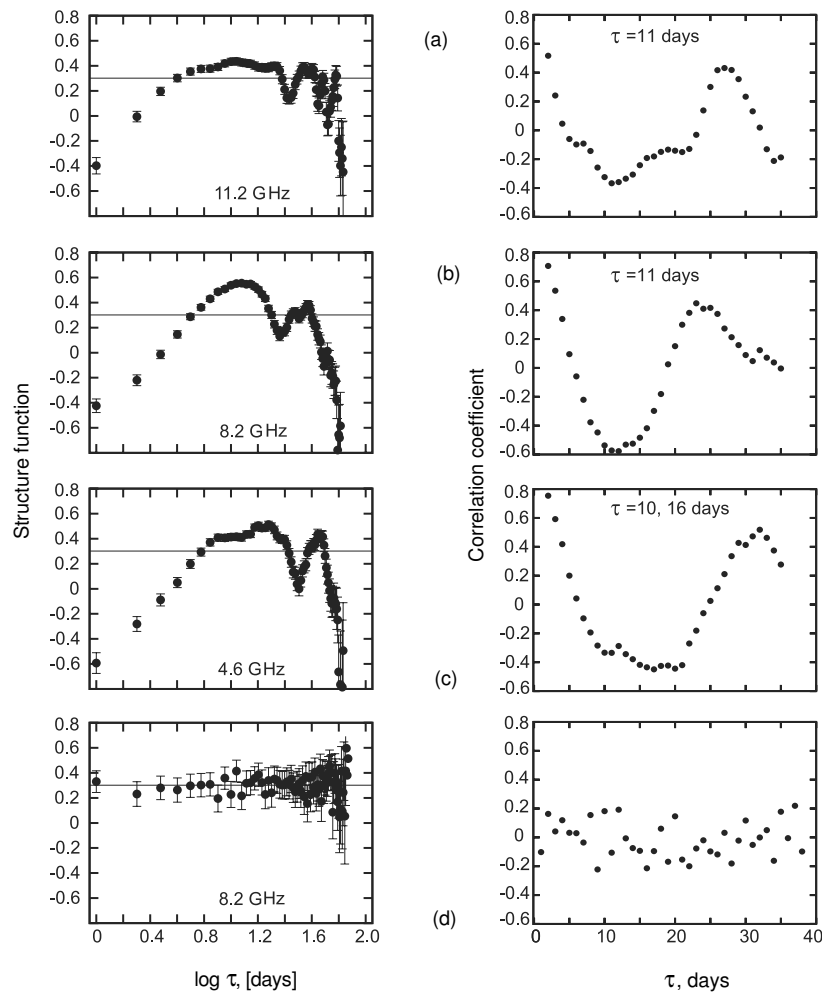


Рис. 5. Структурные и автокорреляционные функции J1603+1105 на частотах 11.2, 8.2, 4.6 ГГц (a)–(c) и то же для опорного источника на частоте 8.2 ГГц (d).

видов переменности возможно при наблюдениях на нескольких частотах. Спектр переменной компоненты, растущий к высоким частотам, наличие запаздывания максимумов на разных частотах указывают на внутреннюю причину — процессы в самом источнике, а спектр переменной составляющей, падающий к высоким частотам, и отсутствие запаздывания на разных частотах — на внешнюю причину переменности — рассеяние на неоднородностях межзвездной и межгалактической сред.

По данным на трех частотах мы получили практически плоский спектр переменной составляющей. Такой спектр не позволяет однозначно определить, чем вызвана обнаруженная переменность: внутренняя она или внешняя, обусловленная межзвездной средой.

В сети 2016 г., к сожалению, очень плохие погодные условия и частично аппаратные неполадки не позволили провести исследование и анализ переменности плотности потока источника в полной мере. Переменность на частотах 8.2 и 4.6 ГГц

несомненно есть, но значимость ее детектирования ниже принятой. Тем не менее по структурным и автокорреляционным функциям можно определить характерные времена². Графики этих функций показаны на рис. 6b, c. На обеих частотах присутствуют компоненты с характерными временами 5 и 15 дней.

3.3. Спектры источника

Мы построили спектры источника в разных фазах вспышек, а также в минимуме, максимуме и промежуточной части восходящей кривой вспышки в длинном сете 2015 г. (см. рис. 7).

²Характерные времена переменности процесса можно определить как по структурной, так и по автокорреляционной функции, но по последней можно получить более точный результат и определить характер переменности.

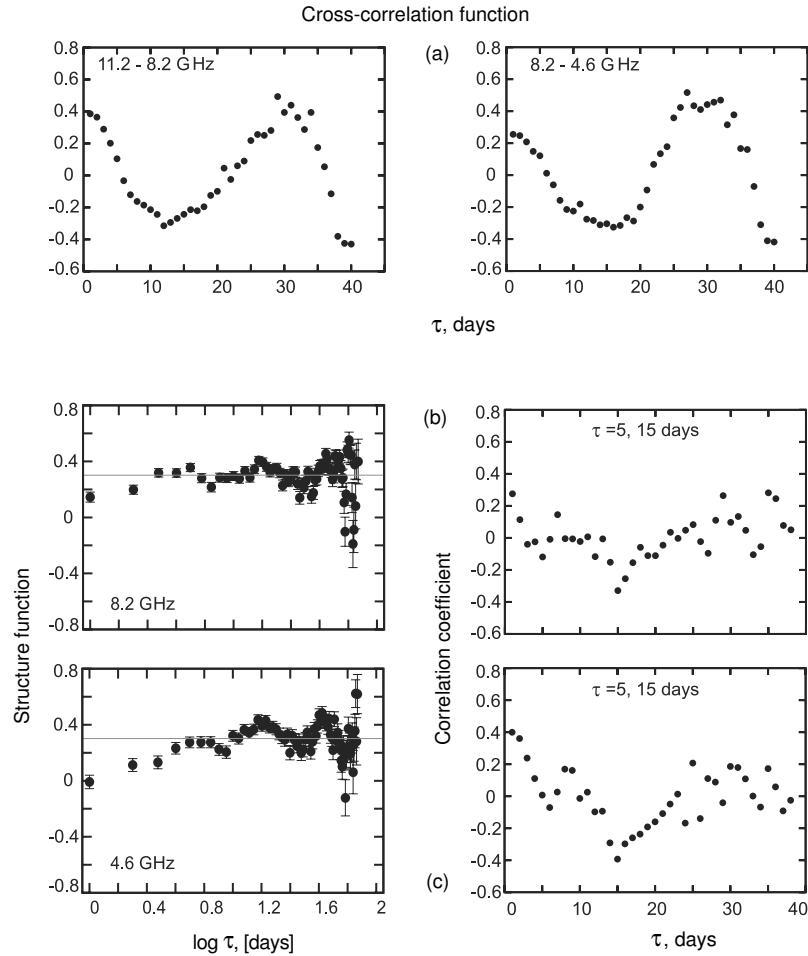


Рис. 6. Кросскорреляционные функции между частотами 11.2–8.2 и 8.2–4.6 ГГц (а); структурные и автокорреляционные функции J1603+1105 на частотах 8.2 (b) и 4.6 ГГц (c) в сети 2016 г.

По результатам наблюдений 2001 и 2006 гг. переменность слабая, спектры близки к плоским (рис. 7а).

На рис. 7b представлены спектры в начале (май 2007 г.) и середине восходящей ветви (апрель 2009 г.) первого максимума. Видно последовательное увеличение спектрального индекса от $\alpha_{4.8-11.2} \approx +0.16$ до $\alpha_{4.8-11.2} \approx 0.55$.

Спектр источника в максимуме первой вспышки (5 октября 2010 г.) и по двум измерениям до и после него приведен на рис. 7с. Частоты максимума в спектре определялись с помощью аппроксимации наблюдательных данных, полученных нами в указанные даты, и равны 33, 50 и 15 ГГц, соответственно. Очевидна эволюция спектра со временем, а именно высвечивание вспышки на высоких частотах.

На рис. 7d показаны спектры J1603+1105 в начале, середине и конце второй вспышки. В максимуме второй вспышки спектр растущий с ин-

дексом $\alpha_{4.8-11.2} \approx 0.17$, в ее конце — падающий: $\alpha_{4.8-11.2} \approx -0.06$.

Спектры J1603+1105 в минимуме и максимуме фазы быстрой переменности 2015 г., соответственно 27 июля и 3 августа, показаны на рис. 7е. Степенной спектр получен в середине восходящей части очередной вспышки 30 июля 2015 г. ($\alpha = 0.22$).

рис. 7f представляет спектры третьей вспышки. Растущая часть степенная, видно постепенное снижение плотности потока, максимум в спектре также постепенно смещается к рабочему диапазону.

Исследование кривых блеска и спектров J1603+1105 в разных фазах активности показало, что в большинстве случаев динамика развития вспышки соответствует модели, в которой переменность является результатом эволюции ударной волны в джете радиисточника.

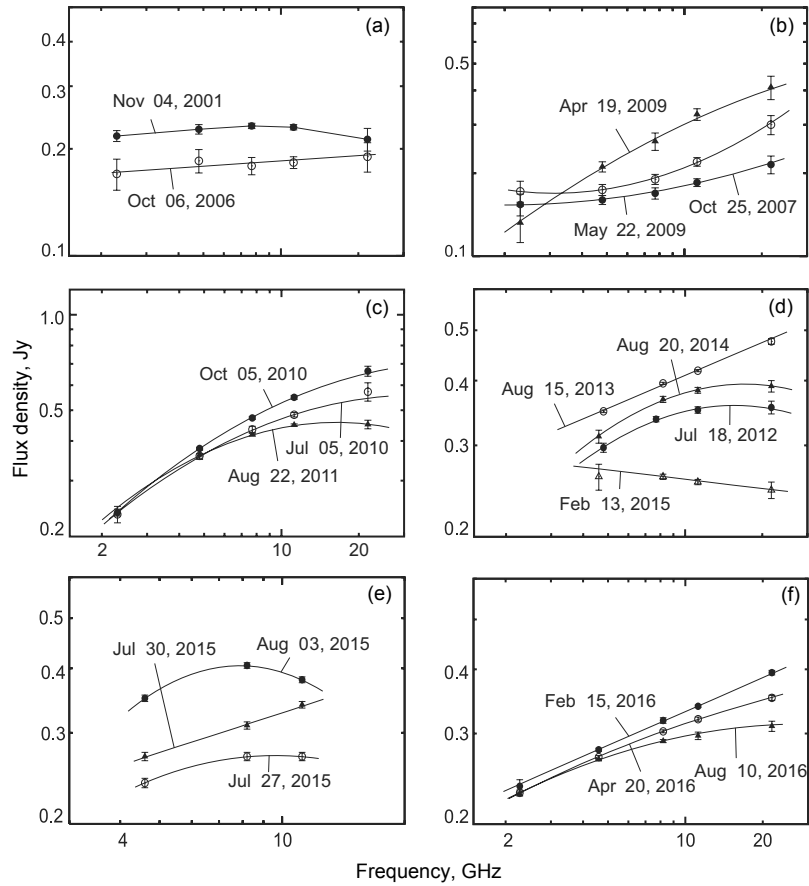


Рис. 7. Спектры J1603+1105 в разные фазы активности источника. Подробнее в тексте.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На долговременной кривой блеска источника J1603+1105 зарегистрировано резкое увеличение плотности потока, которая до этого практически не менялась в течение 7–8 лет. Соответствующая активной фазе область представляет собой три вспышки, каждая последующая из которых меньшей амплитуды развивалась на спаде предыдущей. Характерное время переменности по растущей ветви первой вспышки $\tau_{\text{var}} = 2.5$ года.

В длинных сетях ежедневных наблюдений источника быстрая переменность обнаружена в 2011 г. только на 4.8 ГГц, процесс имеет два характерных времени $\tau_{\text{acf}} = 20$ и 32 дня, индекс модуляции $m = 100\sigma_{\text{var}}/\langle S \rangle = 0.08$.

В 2012 г. значимая быстрая переменность найдена на частотах 7.7 и 4.8 ГГц. Индексы модуляции на 7.7 и 4.8 ГГц $m = 100\sigma_{\text{var}}/\langle S \rangle = 0.08$ и 0.105, соответственно. Процесс на 4.8 ГГц представляет собой одну волну с характерным временем $\tau_{\text{acf}} = 30 \pm 2$ дней, на 7.7 ГГц изменения плотности потока хаотические, наблюдаются 5 максимумов, средние характерные времена переменности составляют 9 ± 0.5 и 25 ± 1 дней.

В 2013 г. переменность, удовлетворяющая принятым критериям детектирования, не обнаружена.

В 2015 г. зарегистрирована переменность источника на частотах 11.2, 8.2 и 4.6 ГГц, все процессы носят квазипериодический характер с $\tau_{\text{acf}} = 10$ –11 дней. На частоте 4.6 ГГц виден еще один процесс с $\tau_{\text{acf}} = 17 \pm 2$ дней, скорее всего, вызванный растянутой третьей вспышкой. Задержка между частотами 11.2–8.2 ГГц и 8.2–4.6 ГГц не превышает 2 дней. По трем частотам спектр стандарта переменной составляющей в пределах ошибок близок к плоскому. Полученные данные не позволяют однозначно определить, вызвана обнаруженная переменность внутренней или внешней, обусловленной межзвездной средой, причиной.

В 2016 г. переменность с характерным временем около 15 дней на частотах 8.2 и 4.6 ГГц детектируется, но значимость результата ниже заявленной, в основном из-за погодных условий и неполадок аппаратуры.

Спектры, полученные в разных фазах вспышек, дают типичную картину, показывающую, что динамика развития вспышки соответствует модели,

в которой переменность есть результат эволюции ударной волны в джете радиисточника.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа проводилась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 14-02-00025). МГМ благодарен за финансирование из средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. L. Bennett, C. R. Lawrence, B. F. Burke, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **61**, 1 (1986).
2. M.-P. Véron-Cetty and P. Véron, *Astron. and Astrophys.* **518**, A10 (2010).
3. S. Tinti, D. Dallacasa, G. de Zotti, et al., *Astron. and Astrophys.* **432**, 31 (2005).
4. J. L. Richards, W. Max-Moerbeck, V. Pavlidou, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **194**, 29 (2011).
5. M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, I. Tornainen, et al., *Astron. and Astrophys.* **544**, A25 (2012).
6. A. G. Gorshkov, V. K. Konnikova, and M. G. Mingaliev, *Astronomy Reports* **47**, 903 (2003).
7. A. G. Gorshkov, V. K. Konnikova, and M. G. Mingaliev, *Astronomy Reports* **56**, 345 (2012).
8. A. G. Gorshkov, V. K. Konnikova, and M. G. Mingaliev, *Astronomy Reports* **57**, 344 (2013).
9. E. Valtaoja, A. Lähteenmäki, H. Teräsanta, and M. Lainela, *Astrophys. J. Suppl.* **120**, 95 (1999).
10. A. G. Gorshkov, V. K. Konnikova, and M. G. Mingaliev, *Astronomy Reports* **54**, 908 (2010).

Long-Term and Rapid Variability of the Radio Source J 1603+1105

V. K. Konnikova, M. G. Mingaliev, and A. K. Erkenov

We present the long-term light curve of the radio source J 1603+1105 and results of the study of its variability on timescales from several days to several weeks. From 2007, a flare with the maximum in 2010 was observed for the object that earlier showed no significant variations of flux density. Three flares with a successively decreasing amplitude were detected at an active phase in the long-term light curve. The characteristic time of the first one was 2.5 yrs. In five sets of daily observations of 95 to 120 days, the flux density variability on scales from 9 to 32 days in 2011, 2012, 2015, and 2016 was detected; in 2015 it was detected at three frequencies simultaneously. In 2011, the variability was found at a single frequency of 4.8 GHz; in 2012 — at two frequencies, 4.8 and 7.7 GHz; in 2015 — at 4.6, 8.2, and 11.2 GHz. We present instant spectra of the source at different flare phases showing that the dynamics of the flare development is consistent with the model, in which the variability is the result of the shock wave evolution in the radio source jet.

Keywords: *radio continuum: general—BL Lacertae objects: individual: J 1603+1105*