УДК 524.6

БЛАЗАР J1504+1029 — ПЕРЕМЕННОСТЬ НА МАСШТАБАХ ЧАСЫ-ГОДЫ

© 2019 г. В. К. Конникова^{1*}, М. А. Харинов², А. В. Ипатов², И. А. Ипатова², В. В. Мардышкин², М. Г. Мингалиев^{3,4}

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия ²Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

³Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

⁴Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

Поступила в редакцию 04.09.2018 г.; после доработки 19.10.2018 г.

Представлены результаты наблюдений блазара J1504+1029 (PKS 1502+106, OR 103) на радиотелескопах РАТАН-600 САО РАН на частотах 2.3, 3.9 (4.7), 7.7 (8.2), 11.2 и 21.7 ГГц в 2000-2018 гг. и РТ-32 обсерваторий "Зеленчукская", и "Бадары" комплекса "Квазар-КВО" ИПА РАН на частотах 5.05 и 8.63 ГГц в 2014-2018 гг. Исследовалась долговременная переменность, переменность на масштабах от нескольких дней до нескольких недель и внутрисуточная переменность (IDV). Долговременные кривые блеска коррелированы на всех частотах, показывают перманентную активность, на фоне которой выделяются три вспышки с максимумами в 2002, 2009 и 2018 г. Временная шкала переменности вспышки 2009 г. *т*_{var} ≈ 1 г. На частоте 21.7 ГГц верхний предел линейного размера излучающей области $R \le 0.3$ пк, углового размера $\theta \le 0.05$ мс дуги, яркостная температура $T_{\rm b} \ge 2 \times 10^{14}$ К, доплер-фактор $\delta \ge 5.8$. Вспышка с максимумом 2018 г. имеет протяженную восходящую ветвь, на 21.7 ГГц: $\tau_{\rm var} =$ =3.2 г., линейный размер $R \le 1.1$ пк, угловой размер $\theta \le 0.17$ мкс дуги, яркостная температура $T_{\rm b} \ge 2.2 \times 10^{12}$ К, доплер-фактор $\delta \ge 2.8$. В одиннадцати сетах ежедневных наблюдений источника длительностью 75-120 дней, проведенных с 2000 по 2017 г., в восьми обнаружена переменность на 2-4 частотах с характерными временами от 4 до 30 дней. В семи сетах переменность обусловлена одним-тремя циклическими процессами с характерными временами $\tau_{\rm acf} = 4-30^d$. Спектральный индекс переменных компонентов в разные годы меняется от $\alpha_{\rm var} = -1.6$ до +1.8. По крайней мере, в четырех сетах переменность обусловлена процессами в самом источнике. В этом случае на частоте 21.7 ГГц видимые линейные размеры излучающей области ≤ 4000 а.е., угловые $\theta \leq 3.5$ мкс дуги, яркостная температура $T_{\rm b} \ge 3 \times 10^{14}$ K, доплер-фактор $\delta \ge 14$. В сете 2004 г. переменность имеет вид "антивспышки" с падающей к высоким частотам плотностью потока переменного компонента. На 32-м телескопах проведено 36 успешных сеансов на 8.63 ГГц и 16 на 5.05 ГГц, IDV обнаружена в семнадцати и трех сеансах соответственно, причем IDV обнаруживается, в основном, вблизи максимума вспышки.

DOI: 10.1134/S0004629919030058

1. ВВЕДЕНИЕ

Источник J1504+1029 (PKS 1502+106, OR 103) отождествлен с высокополяризованным квазаром (HP) с красным смещением z = 1.839 и звездной величиной $V = 18.6^m$ [1, 2]. Галактическая широта источника $b = 55^{\circ}$.

Источник показывает вспышечную активность во всех диапазонах от гамма до радио. В 2009 г. проведены одновременные наблюдения вспышки J1504+1029 в гамма-диапазоне с помощью космического гамма-телескопа Ферми, в рентгеновском — с помощью телескопа Swift-XRT, в ультрафиолетовом и оптическом диапазонах — на телескопе Swift-UVOT [3]. PKS 1502+106 имеет компактную структуру "ядро-джет" (core—jet morphology) и быстрое сверхсветовое движение излучающих областей [4].

Мониторинг плотности потока источника в радиодиапазоне проводится в Радиообсерватории Мичиганского университета (США) на частотах 4.8, 8.0 и 14.5 ГГц [5], в обсерватории Метсахови (Финляндия) на частотах 22 и 37 ГГц [6].

Мы наблюдали источник J1504+1029 с 2000 по 2018 г. на радиотелескопе РАТАН-600 САО РАН

^{*}E-mail: valkon@sai.msu.ru

на пяти частотах от 2.3 до 21.7 ГГц. Исследовалась долговременная переменность и переменность от нескольких дней до месяца (мы будем называть ее недельной). С 2014 по 2018 г. на параболоидах РТ-32 обсерваторий "Зеленчукская" и "Бадары" комплекса "Квазар-КВО" ИПА РАН проводились наблюдения для поиска внутрисуточной переменности (далее IDV) на частотах 5.05 и 8.63 ГГц.

Для поиска недельной переменности радиоисточников на РАТАН-600 с 1999 г. проводились длинные серии ежедневных наблюдений от 70 до 150 дней. Исследовались полные выборки в областях склонений 4°-6° (В1950), 10°-12°30' (J2000) и выборка полярных источников 70°-84.5° (J2000). Результаты исследования выборок в 1999-2010 гг. опубликованы в работах [7-9]. В 2015-2017 гг. также наблюдалась выборка из каталога JVAS в области склонений 12°-18°30' [10]. Работа по поиску короткой переменности у радиоисточников была предложена А.Г. Горшковым.

Блазар J1504+1029 выделяется среди других источников присутствием всех трех видов переменности. В данной работе мы представляем результаты наших исследований переменности этого объекта с 2000 по 2018 г.

2. РАДИОТЕЛЕСКОП РАТАН-600

2.1. Наблюдения и обработка результатов

Радиоисточник J1504+1029 наблюдался на Северном секторе РАТАН-600 в верхней кульминации суточным прохождением. Одиннадцать сетов ежедневных наблюдений длительностью от 75 до 120 дней для поиска переменности на масштабах от нескольких дней до нескольких недель проведены в 2000, 2001, 2002, 2004, 2008, 2011, 2012, 2013, 2015, 2016 и 2017 г. Кроме того, источник наблюдался сериями по 7-10 дней для получения плотности потока для долговременной переменности. С 2000 по 2004 г. наблюдения проводились на частотах 2.3, 3.9, 7.7, 11.2 и 21.7 ГГц. С 2004 г. приемник на 3.9 ГГц заменен на 4.7 ГГц, с 2013 г. вместо частоты 7.7 ГГц наблюдения продолжены на 8.2 ГГц. На 2.3 ГГц не было наблюдений с 2011 по сентябрь 2015 г. из-за техногенных помех, далее наблюдения продолжены на частоте 2.27 ГГц.

В качестве калибровочного источника при всех наблюдениях использовался объект J1347+1217, для него приняты плотности потока 4.15, 4.12, 2.98, 2.36, 2.29, 1.99 и 1.46 Ян на частотах 2.27, 2.3, 4.7, 7.7, 8.2, 11.2 и 21.7 ГГц соответственно. Спектр опорного источника аппроксимируется степенной функцией $S = 6.02\nu^{-0.455}$ Ян.

Для обработки наблюдений использовался пакет программ, позволяющий получать как плотность потока индивидуального наблюдения источника, так и среднюю плотность потока за любой интервал внутри цикла наблюдений. В основу обработки положена оптимальная фильтрация исходных данных, подробно методика описана в [11].

2.2. Поиск недельной переменности и определение ее параметров

Подробно методика поиска переменности описана в работах [7, 12]. Мы приведем здесь основные этапы обработки и используемые термины.

После фильтрации измеренных плотностей потоков испорченных помехами (погодными условиями или техногенными) с использованием критерия Фишера и вычитания долговременной переменности на всех частотах определялась средняя плотность потока источника в течение всего сета наблюдений.

Затем рассчитывалось значение нормированной величины χ^2 для цикла (или части цикла) наблюдений для числа степеней свободы N-1, где N — число наблюдений в данном сете:

$$\chi^2 = (N-1)^{-1} \Sigma[(S_i - \langle S \rangle) / \Delta S_i]^2, \qquad (1)$$

где S_i и ΔS_i — плотность потока и ее ошибка в *i*-й день соответственно, $\langle S \rangle$ — средняя плотность потока по всем дням наблюдений. Переменность считалась обнаруженной, если величина χ^2 превышала теоретическое значение χ^2 при уровне значимости, не превышающем 1% для N-1 степеней свободы на двух и более частотах одного сета, либо на одной и более частотах в разных сетах.

Для определения характеристик переменности (характерных времен и дисперсии переменного компонента) были построены структурные функции первого порядка (SF):

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

где τ — временной сдвиг, f(t) — последовательность измерений S_i .

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

Структурные функции также использовались для определения дисперсии переменной составляющей

$$\sigma_{\rm var}^2 = \sigma_{\rm pr}^2 - \sigma_n^2, \tag{3}$$

где $\sigma_{\rm pr}^2 = \sum_{i=1}^n (S_i - \langle S \rangle)^2 / (N-1)$ — дисперсия процесса; $\sigma_n^2 = D^1(1)/2$ — дисперсия шумовой составляющей; $D^1(1)$ — значение SF при сдвиге на одни сутки. Величину переменной составляющей мы также характеризуем индексом модуляции в процентах, который определен как:

$$m = 100\sigma_{\rm var}/\langle S \rangle,\tag{4}$$

 $\sigma_{\rm var} = \sqrt{\sigma_{\rm var}^2}$ — стандарт переменной составляющей.

Мы также рассчитали автокорреляционные (ACF) функции и по ним определили характерные времена переменности по их первому минимуму τ_{acf} . Отметим, что 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 (характерное время) будет составлять половину периода. Автокорреляционные функции позволяют более точно определить характерное время переменности.

В наших наблюдениях недельная переменность в большинстве случаев определяется одним или двумя процессами с разными характерными временами и частотными спектрами. Мы приняли, что хотя бы один процесс в ACF данного источника не должен превышать уровень значимости 1%. Уровень значимости второго процесса в этом случае может быть больше. Это важно, поскольку в одном источнике процессы с разными τ_{acf} могут иметь разные частотные спектры и на разных частотах могут иметь разный уровень значимости.

По виду ACF 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.

3. РАДИОТЕЛЕСКОПЫ РТ-32 ИПА РАН

3.1. Наблюдения и обработка результатов

Наблюдения внутрисуточной переменности проводились с ноября 2014 г. по апрель 2018 г. на частоте 8.63 ГГц (36 сеансов), с апреля 2015 г. по август 2016 г. часть наблюдений вместо частоты 8.63 ГГц проведена на частоте 5.05 ГГц (16 сеансов).

Наблюдения проводились в режиме "плавного" сканирования по углу места, в процессе которого антенна сопровождает источник по азимуту и производит сканирование по углу места. Для накопления цикл сканирования повторяется необходимое количество раз, в дальнейшем *n* циклов накопления опорного или исследуемого источника называется сет. Подробно методика наблюдений описана в работах [13, 14]. Планирование и составление программ наблюдений проводилось с помощью программного обеспечения "Sched Maker" [15]. Обработка наблюдений с радиотелескопов PT-32 проводилась в специальном программном пакете "Class Visual" и оригинальной базе данных радиометрических наблюдений [16, 17]. Указанные средства позволяют получать антенные температуры источника, проводить чистку и фильтрацию данных, и в итоге строить кривую усиления по опорным источникам и получать результирующую плотность потока исследуемого источника.

В качестве опорных наблюдались источники J1631+1156 и J1640+1220. Оба источника аппроксимируются степенными функциями, принятые плотности потоков на 5.05 ГГц равны 0.760 и 0.525 Ян, на 8.63 ГГц — 1.08 и 0.802 Ян соответственно.

Опорные и исследуемые источники наблюдались поочередно: в течение получасового сета опорный источник, затем в течение часового сета — исследуемый источник (до 90 циклов сканирования в сете).

3.2. Поиск внутрисуточной переменности и определение ее параметров

По формуле (1) рассчитывалось значение χ^2 для суточных наблюдений. В данном случае S_i и ΔS_i — средняя плотность потока и ее ошибка за *i*-й сет соответственно, $\langle S \rangle$ — средняя плотность потока за N сетов, число степеней свободы N-1, где N — число полученных сетов в данную дату. Для разных наблюдений N-1 колеблется от 1 до 12. Погодные условия и качество наблюдений не всегда позволяли провести сканирование источника в течение всего доступного для наблюдений времени.

Переменность считалась обнаруженной, если величина χ^2 превышала теоретическое значение χ^2 при уровне значимости, не превышающем 0.1% для N-1 степеней свободы. При наблюдениях на двух антеннах одновременно величина χ^2 рассчитывалась по всем полученным данным.

Ужесточение требований к уровню значимости при наблюдениях на антеннах ИПА РАН связано с большим числом параметров, которые нужно учитывать при определении плотности потоков в каждом суточном сеансе наблюдений. Поскольку не для всех суточных сеансов наблюдений IDV удается построить структурную функцию, плотность потока переменной составляющей в данном сеансе наблюдений определялась в соответствии с приведенной ниже формулой, взятой из [18].

$$S_{\rm var} = [(N-1)(\chi^2 - 1)/\Sigma \Delta S_i^{-2}]^{0.5}.$$
 (5)

Рассчитывался также индекс переменности

$$m = 100 S_{\text{var}} / 6\langle S \rangle. \tag{6}$$

Характерные времена в сеансах с обнаруженной внутрисуточной переменностью получены из автокорреляционных функций по первому минимуму.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1. Долговременная переменность и интегральные спектры

На рис. 1 показана кривая блеска на частотах 21.7, 11.2, 8.2, 4.7 и 2.27 ГГц, полученная на РАТАН-600 с октября 2000 по март 2018 г. Данные, полученные ранее на других частотах, пересчитаны на приведенные. Плотность потока в течение большинства длинных сетов значительно менялась (см. §4.2). Данные длинных сетов аппроксимировались либо прямой, либо полиномом второй степени. Эта аппроксимация дает нам долговременную переменность, которая приведена на рис. 1. Отдельные измерения усреднялись за 7-10 дней. К сожалению, наблюдения источника вне длинных сетов не были непрерывными, на кривой блеска есть пропуски, например, не было наблюдений в промежутке 09.2015-06.2016 гг. В этот период возможна небольшая вспышка, данные, полученные на близкой частоте 8.63 на 32-м телескопе, показывают более высокие плотности потока. Точки на кривых блеска соединены для наглядности.

Кривая блеска показывает перманентную активность, на фоне которой выделяются 3 вспышки. В 2002 г. вспышка наблюдалась на фоне общей активности источника. Точка максимума на рис. 1 начало длинного сета 2002 г., возможно, максимум прошел несколько раньше. На рис. 2а приведен интегральный спектр на эпоху 10.2000 г. в начале наших наблюдений данного источника, в максимуме и на нисходящей ветви вспышки. Интегральные спектры показывают постепенное смещение максимума от высоких к низким частотам, что характерно для распространения ударных волн в джете радиоисточника.

Следующая вспышка 2009 г. наблюдалась во всем диапазоне от гамма до радиочастот [3]. 5– 10 августа 2008 г. был зафиксирован высокоэнергичный гамма-всплеск, характеризующийся быстрым подъемом и продолжительностью 5 дней. В оптическом и рентгеновском диапазонах также зарегистрирована вспышка с опозданием на несколько дней и продолжительностью в несколько дней. Одновременно источник наблюдался в радиодиапазоне на телескопах обсерваторий Owens Valley США, Efelsberg Германия, в радиообсерватории Metsahovi, Финляндия, РАТАН-600, САО РАН [3]. Максимум вспышки в радиодиапазоне наблюдался в апреле 2009 г. на частотах от 4.8 до 14.5 ГГц [4].

В наших наблюдениях максимум вспышки также зафиксирован в апреле 2009 г. Вспышка видна на трех высоких частотах. Временна́я шкала переменности по нисходящей ветви составила около 1 года. Временна́я шкала определена как $\tau_{\rm var} = dt/d\ln(S)$. Методика определения временно́й шкалы отдельной вспышки предложена в работе [19], а также подробно описана в [20].

Из полученной временной шкалы вспышки 2009 г. мы оценили верхнее значение линейного размера излучающей области как $R = c \tau_{\rm var}$ и соответственно угловой размер

$$\Theta = R(1+z)^2/r_{\text{bol}},\tag{7}$$

где c — скорость света, $r_{\rm bol}$ — болометрическое расстояние до объекта. При расчете болометрического расстояния постоянная Хаббла принималась равной H = 65 км/с/Мпк, параметр замедления q = 0.5.

В системе покоя источника яркостная температура в максимуме вспышки оценивалась по формуле

$$T_{\rm b}^0 \ge \Delta S \lambda^2 (1+z)^3 / 2\pi \ k \Theta^2, \tag{8}$$

где ΔS — амплитуда вспышки.

Из условия, что максимальная яркостная температура не может превышать комптоновский предел $T_{\rm b}=10^{12}$ K, получаем значения величины доплер-фактора:

$$\delta_{\text{var}} \ge (T_{\text{b}}^0/10^{12})^{1/3}.$$
 (9)

Получены следующие параметры по нисходящей ветви вспышки 2009 г. на 21.7 ГГц: $\tau_{\rm var} = 1$ год, линейный размер $R \le 0.3$ пк, угловой размер $\theta \le 0.05$ mas (milliarcsecond, миллисекунда дуги), яркостная температура $T_{\rm b} \ge 2.6 \times 10^{13}$ К, доплерфактор $\delta \ge 3$. На частоте 8.2 ГГц яркостная температура $T_{\rm b} \ge 1.6 \times 10^{14}$ К, доплерфактор $\delta \ge 5.5$.

На рис. 26 приведен интегральный спектр источника в максимуме 04.2009 г., на нисходящей ветви вспышки 12.2009 и в первом минимуме после вспышки 06.2010 г. Вид спектров стандартный для модели ударной волны в джете радиоисточника, растущий в максимуме вспышки, после прохождения вспышки спектр сдвигается в низкочастотную область и становится практически плоским в минимуме. В пределах 15 дней не замечено запаздывания максимума на частоте 8.2 ГГц относительно 21.7 ГГц.



01/02 01/04 01/06 01/08 01/10 01/12 01/14 01/16 01/18 Дата (месяц, год)

Рис. 1. Кривые блеска блазара J1504+1029 на частотах 21.7, 11.2, 8.2, 4.7 и 2.27 ГГц, полученные на РАТАН-600 в 2000-2018 гг.

Плотность потока, Ян



Рис. 2. Интегральные спектры источника в разных фазах долговременной кривой блеска (а)–(г) и спектры переменных компонентов источника J1504+1029 в длинных сериях 2000–2017 гг.

В сентябре 2013 г. мы зафиксировали самую низкую плотность потока за все время наблюдений, 0.68–0.71 Ян на 21.7–4.7 ГГц, далее плотность потока росла на всех частотах до максимума 01.2018 г.

Третья вспышка отличается большой длительностью роста от минимума до максимума. На вершине вспышки наблюдается флуктуации плотности потока. Это достаточно частое явление, например, у источника 3С 454.3 [20]. Возможное объяснение этого явления предложено в работе [21].

Временна́я шкала восходящей ветви $\tau_{\rm var} \approx 3$ года. По формулам (7–9) определяем параметры излучающей области последней вспышки на 21.7 ГГц: линейный размер $R \leq 1.1$ пк, угловой

размер $\theta \le 0.17$ mas, яркостная температура $T_{\rm b} \ge 2.2 \times 10^{12}$ K, доплер-фактор $\delta \ge 2.8$, на 7.7 ГГц соответственно $T_{\rm b} \ge 1.6 \times 10^{13}$, доплер-фактор $\delta \ge 2.5$.

В 2016 г. сообщалось об обнаружении повышенной активности источника гамма-диапазоне [22].

4.2. Переменность от нескольких дней до месяца

Из 11 сетов ежедневных наблюдений в 2000– 2017 гг. недельная переменность обнаружена в восьми сетах. Основные характеристики, которые мы получаем из кривых блеска — характерное время переменности τ_{acf} , стандарт переменной составляющей и индекс модуляции при обнаружении на нескольких частотах, спектр переменной составля-ющей, характер переменности.

Прежде чем представить полученные данные для исследуемого источника, кратко опишем результаты, полученные ранее по недельной переменности 40 источников из выборок на разных склонениях [7–10].

Рассмотрение структурных (SF) и автокорреляционных (ACF) функций источников с недельной переменностью, обнаруженных ранее, показало, что несмотря на кажущееся разнообразие кривых блеска, их можно разделить на 4 группы, соответствующие различному характеру переменности.

1. Периодический процесс. ACF хорошо аппроксимируется одной гармоникой. Количество периодов может быть от двух и более.

2. Циклический или квазипериодический процесс. Это наиболее распространенный тип недельной переменности. Из вида ACF видно, что процесс носит циклический характер, но в течение сета период и амплитуда цикла меняется. В качестве τ_{acf} принимается время первого минимума ACF, которое является средним временем полупериода цикла.

3. Сумма двух или более циклических процессов с разными амплитудами и характерными временами. На структурной и автокорреляционных функциях хорошо видны эти процессы.

4. Случайные процессы. Это могут быть одиночные или редкие хаотично расположенные импульсы, в ACF будет присутствовать один значимый минимум. Величина τ_{acf} дает характерное время одиночного импульса или среднее время ансамбля импульсов.

В одном источнике на разных частотах может наблюдаться переменность разных типов с разными характерными временами, переменность может обнаруживаться не на всех частотах. Также переменность может присутствовать в некоторые годы, а в другие полностью отсутствовать. Это объясняется ограниченным временем жизни компонента с данным характерным временем, заведомо меньше года, что подтверждается также исследованием периодичности переменного компонента с помощью вейвлет-анализа [23].

Причинами недельной переменности (в отличие от долговременной), могут быть как процессы, протекающие внутри источника, так и вариации условий распространения на пути от источника к наблюдателю.

Главным аргументом в пользу того или другого вида переменности является вид спектра и часто́ты, на которых этот спектр сформирован. Падающий к высоким частотам спектр свидетельствует в пользу внешнего происхождения переменности, а растущий спектр, корреляция кривых блеска на разных частотах и запаздывание максимумов к низким частотам скорее всего указывают на внутреннюю причину переменности.

Также замечено, что растущие спектры переменного компонента наблюдаются в активных фазах долговременной кривой блеска, а падающие в периоды низкой активности.

Рассмотрим кратко переменность блазара J1504+1029 по годам, затем подытожим полученные данные.

На рис. 3—17 приведены кривые блеска, структурные и автокорреляционные функции блазара на частотах, которые использовались в данном году. Из кривых блеска убрана долговременная переменность с характерными временами больше, чем длительность наблюдений.

Спектры стандарта переменной составляющей для всех длинных сетов в логарифмическом масштабе показаны на рис. 2. Все данные также приведены на частотах, на которых проводились наблюдения в данном году. В пределах ошибок все растущие спектры аппроксимированы степенной функцией.

4.2.1. Сет 08.09–26.11.2000 г. В сете ежедневных наблюдений 2000 г. переменность обнаружена на частотах 21.7, 11.2, 3.9 и 2.3 ГГц. На долговременной кривой блеска наблюдается восходящая ветвь первой вспышки. Кривые блеска на этих частотах приведены на рис. 3, структурные и автокорреляционные функции — на рис. 4. На частотах 11.2 и 21.7 ГГц кривые блеска коррелированы, среднее запаздывание на частоте 11.2 ГГц относительно 21.7 ГГц примерно 5 дней. Структурные и автокорреляционные функции показывают наличие двух квазипериодических компонентов с характерными временами $\tau_{acf} = 6.5$ и 18^d , одинаковых на 21.7 и 11.2 ГГц. Индексы модуляции на этих частотах m = 5.4% и 1.7% соответственно.

На частоте 7.7 ГГц переменность значительно ниже принятого уровня значимости, индекс модуляции m < 1%. На 3.9 ГГц кривая блеска показывает циклический процесс с одним периодом $\tau_{acf} =$ $= 20^d$, на 2.3 ГГц циклический процесс с тремя периодами с $\tau_{acf} = 6, 19, 30^d$. Вероятнее всего это три периода одного процесса, среднее характерное время (полупериод) $\tau_{acf} = 6^d$. Индекс модуляции на 3.9 и 2.3 ГГц m = 3.0% и 7.8% соответственно. Интегральный спектр, приведенный на рис. 2(а), показывает рост к высоким частотам со спектральным индексом $\alpha = +0.2$.

На рис. 2 спектр стандарта переменного компонента в сете 2000 г. на 2.3–7.7 ГГц падает к высоким частотам с индексом $\alpha = -1.4$, на частотах 7.7– 21.7 ГГц спектр растущий с индексом $\alpha = +1.6$, на частотах 3.9–2.3 ГГц спектр падающий с $\alpha = -1.4$.



Рис. 3. Кривые блеска в длинном сете 2000 г. на частотах 21.7, 11.2, 3.9 и 2.3 ГГц.



Рис. 4. Структурные (слева) и автокорреляционные функции (справа) на частотах 21.7, 11.2, 3.9 и 2.3 ГГц для кривых блеска, приведенных на рис. 3.



Рис. 5. Кривые блеска в длинном сете 2001 г. на частотах 11.2, 7.7 и 3.9 ГГц.

4.2.2. Сет 10.07–09.09.2001 г. На рис. 5 приведены кривые блеска в сете 2001 г., циклическая переменность обнаружена на 2.3, 3.9 и 11.2 ГГц. К сожалению, в первый месяц наблюдений были проблемы с приемниками, а на частоте 7.7 ГГц весь цикл. Поэтому мы рассматриваем два месяца наблюдений 10.06–09.09.2001 г. На 7.7 ГГц переменность присутствует, но из-за проблем с калибровкой мы не смогли получить значимый результат. На рис. 6 приведены структурные и автокорреляционные функции, построенные по кривой блеска 2001 г. Наблюдения проводились перед максимумом первой вспышки 2002 г. Переменность также существует на частотах 2.3 и 21.7 ГГц, но изза больших ошибок плотности потока она ниже принятого уровня значимости. Структурные и автокорреляционные функции на 2.3, 3.9 и 11.2 ГГц показывают 2 характерных времени $\tau_{acf} = 10$, и 27^d . Кривые блеска показывают корреляцию со средним запаздыванием максимумов в 3–4 дня. Спектр переменной составляющей растет к высоким частотам с $\alpha = +0.5$. Индексы модуляции на 11.2, 7.7 и 3.9 ГГц равны m = 4.1, 2.4 и 2.0.

4.2.3. Сет 17.06–22.09.2002 г. Кривые блеска, структурные и автокорреляционные функции в длинном сете 2002 г. приведены на рис. 7 и 8. Переменность обнаружена на частотах 21.7, 11.2, 7.7 и 3.9 ГГц с индексами модуляции m = 3.5, 3.1, 3.1, и 2.9. На кривых блеска хорошо видны



Рис. 6. Структурные (слева) и автокорреляционные функции (справа) на частотах 11.2, 7.7 и 3.9 ГГц для кривых блеска, приведенных на рис. 5.

периодические процессы, но ни на одной частоте они не повторяются. Наблюдается один циклический процесс на частоте 21.7 ГГц с $\tau_{acf} =$ = 12^d, на ACF 11.2 ГГц четыре минимума, которые можно интерпретировать как один квазипериодический процесс с $\tau_{acf} = 5^d$ (средний полупериод). На частоте 7.7 ГГц зафиксировано два циклических процесса с $\tau_{acf} = 10$ и 29^d. На частоте 3.9 ГГц также наблюдаются два процесса с $\tau_{acf} = 13$ и 20^d. Спектр переменной составляющей аппроксимируется кривой с небольшим растущим индексом $\alpha \approx$ ≈ 0.09 . Интегральный спектр (см. рис. 2(а)) имеет максимум на частоте около 12 ГГц. **4.2.4. Сет 15.05–18.08.2004 г.** Вместо частоты 3.9 ГГц наблюдения продолжены на 4.8 ГГц. Кривые блеска приведены на рис. 9, структурные и автокорреляционные функции — на рис. 10. Основная переменность обусловлена процессом, имеющим вид "антивспышки" или затмения. "Антивспышка" с минимумом 12–17 июля дает характерные времена $\tau_{acf} = 10, 12, 15$ и 20^d на 11.2, 7.7, 4.7, 2.3 ГГц соответственно.

Мы уже сталкивались с таким явлением, например, у источника J0721+7120 [24]. На частоте 11.2 ГГц наблюдается также циклический компонент с $\tau \approx 30^d$. Спектр переменной составляющей падает к высоким частотам, спектральный индекс в



Рис. 7. Кривые блеска в длинном сете 2002 г. на частотах 21.7, 11.2, 7.7 и 3.9 ГГц.



Рис. 8. Структурные (слева) и автокорреляционные функции (справа) на частотах 21.7, 11.2, 7.7 и 3.9 ГГц для кривых блеска, приведенных на рис. 7.

диапазоне 4.8—11.2 ГГц $\alpha \approx -0.6$. Индексы модуляции равны m = 3.9%, 3.1%, 2.3% и 1.8% на 2.3, 3.9, 7.7 и 11.2 ГГц соответственно.

4.2.5. Сет 17.06–31.08.2008 г. Сет получен вблизи вспышки 2009 г. Значимая переменность обнаружена на частотах 21.7 и 11.2 ГГц. Неболь-

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 96 № 4 2019



Рис. 9. Кривые блеска в длинном сете 2004 г. на частотах 11.2, 7.7, 4.8 и 2.3 ГГц.

шая переменность присутствует и на 7.7 ГГц с уровнем значимости меньше принятого. Переменность квазипериодическая, на кривой блеска виден циклический процесс с двумя периодами. Характерное время $\tau = 14^d$. Кривые блеска коррелированы, кросс-корреляционная функция показывает среднюю величину запаздывание максимума на 11.2 ГГц примерно 5 дней (см. рис. 11). Спектр перемен-



Рис. 10. Структурные (слева) и автокорреляционные функции (справа) на частотах 21.7, 11.2, 3.9 и 2.3 ГГц для кривых блеска, приведенных на рис. 9.



Рис. 11. Кривые блеска в длинном сете 2008 г. на частотах 21.7 и 11.2 ГГц, внизу — структурные и автокорреляционные функции, соответствующие приведенным кривым блеска.

ной составляющей растет к высоким частотам со спектральным индексом $\alpha \approx 2$. Индексы модуляции m = 8.5% и 2.7% на частотах 21.7 и 11.2 ГГц. На рис. 2в приведен интегральный спектр в максимуме

вспышки, на нисходящей ветви и в минимуме после вспышки.

В 2009, 2010 и 2014 г. длинные сеты не проводились. В сетах 2011, 2012 и 2013 не обнаружено

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 96 № 4 2019



Рис. 12. Кривые блеска в длинном сете 2015 г. на частотах 21.7, 11.2 и 8.2 ГГц.

переменности. На рис. 2г показаны интегральные спектры в эти годы. Все спектры близки к плоским.

4.2.6. Сет 17.06–15.09.2015 г. Наблюдения выполнены на восходящей ветви третьей вспышки. Сильная переменность обнаружена на трех высоких частотах, 21.7, 11.2 и 8.2 ГГц, с индексами модуляции m = 6.3, 4.7, и 2.7% соответственно. На 4.7 ГГц уровень значимости немного меньше принятого, m = 1.6%. На 21.7 ГГц наблюдаются два квазипериодических процесса с $\tau = 10$ и 20^d (см. рис. 12). На 11.2 и 8.2 ГГц также зафиксированы два циклических процесса с $\tau = 10$ и 30^d . Кросскорреляционная функция показывает значитель-

ную корреляцию первого процесса между тремя частотами, запаздывание между частотами 21.7 и 8.2 ГГц составляет 5 дней (см. рис. 13). Спектр стандарта переменной составляющей растет к высоким частотам с $\alpha = 0.8$.

4.2.7. Сет 15.06–08.09.2016 г. Восходящая ветвь вспышки. Значимая переменность с индексами модуляции m = 3.6, 3.0 и 2.4% обнаружена на 11.2, 8.2 и 4.7 ГГц соответственно. Автокорреляционная функция показывает присутствие двух квазипериодических компонентов с одинаковыми характерными временами $\tau = 10$ и 26^d на всех частотах (см. рис. 14 и 15). Кривые блеска кор-



Рис. 13. Структурные (слева) и автокорреляционные функции (справа) на частотах 21.7, 11.2 и 8.2 ГГц, соответствующие кривым блеска, приведенным на рис. 12.

релированы, наблюдается запаздывание максимумов по мере перехода к низким частотам, которое составляет около 4 дней. Спектр стандарта переменного компонента растет к низким частотам также с характерным временем около 4 дней, $\alpha_{4.7-11.2} = +1.06.$

4.2.8. Сет 02.06–03.09.2017 г. Максимум вспышки. Циклический переменный компонент присутствует на частотах 8.2, 4.7 и 2.3 ГГц с характерным временем $\tau_{acf} = 24^d$. По этой переменной составляющей кривые блеска коррелированы. На частотах 4.7 и 2.27 ГГц существует второй компонент с $\tau = 7^d$ (см. рис. 16 и 17). К сожалению, не удалось выделить переменный компонент на двух высоких частотах из-за большого разброса данных (погода, перестройка приемников). Спектр стандарта переменной составляющей растет к

высоким частотам с $\alpha = 1.9$, индексы модуляции на 8.2-2.27 ГГц равны m = 3.8-2.8%.

Итак, в восьми из одиннадцати длинных сетов обнаружена переменность с характерными временами от 6 до 30 дней, получены кривые блеска, спектры переменных компонентов, индексы модуляции. Кроме сета 2004 г. переменность носит квазипериодический характер. Данные, полученные в 2001, 2008, 2015, 2016 и 2017 г. имеют похожие характеристики: растущие к высоким частотам спектры переменных компонентов с $\alpha = 0.8 - 1.9$, коррелированность кривых блеска, запаздывание максимумов к низким частотам на 4–5 дней, большие индексы модуляции на самой высокой частоте, m = 6 - 8.5%, достаточно большие для галактической широты $b = 55^{\circ}$.

В 2016 и 2017 г. индексы на частоте 21.7 ГГц получены путем экстраполяции более низкочастот-



Рис. 14. Кривые блеска в длинном сете 2016 г. на частотах 11.2, 8.2 и 4.7 ГГц.

ных данных. Кроме того, наблюдения в эти годы были выполнены вблизи вспышек на долговременной кривой блеска. Наиболее вероятная модель обнаруженной в эти годы переменности распространение ударной волны в джете радиоисточника [25, 26]. Для этой модели типична временная шкала от нескольких недель до нескольких месяцев, а также запаздывание максимума по мере уменьшения частоты. Кроме того, на этот механизм указывают растущий спектр переменного компонента и динамика изменения интегрального спектра — смещение максимума в низкочастотную область после прохождения максимума плотности потока. В этом случае на частоте 21.7 ГГц для $\tau_{acf} = 24^d$ оцененные по формулам (7)–(9) максимальный линейный размер излучающей области $R\leq 4000\,$ а. е., угловой размер $\theta\leq 3.5\,$ мкс дуги, яркостная температура $T_{\rm b}\geq 13\times 10^{15}\,$ K, доплерфактор $\delta\geq 14.$

В сете 2004 г. переменность имеет вид "антивспышки". Падающий к высоким частотам спектр указывает на внешнюю причину переменности. Природа этих "антивспышек" не ясна, одной из причин может быть появление на луче зрения компактного сгустка релятивистских электронов с оптической толщей больше единицы во всем наблюдаемом частотном интервале.

В наблюдениях 2000 г. спектр переменного компонента содержит как растущую, так и падающую части. Возможная интерпретация такого



Рис. 15. Структурные (слева) и автокорреляционные функции (справа) на частотах 21.7, 11.2, 3.9 ГГц, соответствующие кривым блеска, приведенным на рис. 14.

спектра — наличие как внешней, так и внутренней переменности. Растущий к высоким частотам спектр на 11.2 и 21.7 ГГц, коррелированность кривых блеска, большой индекс модуляции на высокой частоте, m = 5.4, указывают на то, что причина наблюдаемой переменности в самом источнике; на частотах 2.3 и 3.9 ГГц — падающий спектр, некоррелированность кривых блеска указывают на внешнюю причину переменности — межзвездные мерцания.

В сете 2002 г. квазипериодическая переменность, спектр переменного компонента близок к плоскому, $\alpha_{\rm var} = +0.1$. На всех частотах разные характерные времена, отсутствует корреляция между кривыми блеска. Интерпретировать причину переменности для этого года трудно, вероятнее всего, она внешняя.

4.3. Внутрисуточная переменность

Наблюдения внутрисуточной переменности начались в 2014 г. перед последней вспышкой. Всего за 2014—2018 гг. проведено 36 успешных сеансов на частоте 8.63 ГГц, из них 20 сеансов одновременно в двух обсерваториях. В промежутке между апрелем 2015 и августом 2016 г. проведено 16 сеансов на 5.05 ГГц. Значимая IDV зарегистрирована в 17 (2014—2018 гг., 8.63 ГГц) и 3 (2015—2016 гг., 5.05 ГГц) сеансах соответственно.

Результаты наблюдений сведены в табл. 1 и 2. В первом столбце таблиц приведены даты наблюдения, во втором — средняя плотность потока за сеанс, в третьем столбце — ошибка средней плотности потока, в четвертом — индекс модуляции, в пятом и шестом столбцах — нормированные величины χ^2 для реальных наблюдений и теоретические



Рис. 16. Кривые блеска в длинном сете 2017 г. на частотах 8.2, 4.7 и 2.27 ГГц.

для уровня значимости 0.1% для числа степеней свободы из седьмого столбца. В восьмом столбце дано характерное время переменности, в девятом — плотность потока переменной составляющей. Десятый столбец указывает на обсерваторию, в которой проведены наблюдения: "В" — Бадары, "Z" — Зеленчукская, "B+Z" — наблюдения проведены одновременно в двух обсерваторях. Все плотности потоков приведены в Ян.

В таблицы не включены сеансы с числом степеней свободы меньше 3 (это соответствует менее четырех часов наблюдений). Погодные условия и качество наблюдений и выделенное антенное время не всегда позволяли провести сканирование источника в течение всего доступного для наблюдений времени.

На рис. 18 и 19 приведены кривые блеска источника с обнаруженной переменностью на частотах 8.63 и 5.05 ГГц. Темными кружками показаны наблюдения, полученные в обсерватории Бадары, светлыми — в обсерватории Зеленчукская. Каждая точка на рисунках — результат усреднения за сет плотности потока. На рис. 18 кривая блеска



Рис. 17. Структурные (слева) и автокорреляционные функции (справа) на частотах 21.7, 11.2, 3.9 и 2.3 ГГц, соответствующие кривым блеска, приведенным на рис. 16.

15.10.2017 г. показана вместе с кривой блеска опорного источника J1631+1156.

Начало наших наблюдений IDV совпало с минимумом плотности потока на долговременной кривой блеска. Дальнейшие наблюдения проводились на растущей ветви вспышки, максимум которой зарегистрирован в январе 2018 г. Значимая переменность обнаруживается, в основном, при приближении к максимуму вспышки и до конца программы в апреле 2018 г. Обнаружение переменности, в основном, вблизи максимума вспышки подтверждает тот факт, что внутрисуточная переменность появляется в активных фазах на долговременной кривой блеска. Это отмечалось и в других исследованных источниках (см., напр., [20, 27]). Это приводит к мысли, что очень компактные образования, ответственные за IDV, независимо от природы этого феномена, существуют только в активной фазе.

Характер внутрисуточной переменности можно разделить на четыре типа: отдельная вспышка, антивспышка (кривая с минимумом в данном сеансе), квазипериодический процесс, линейный тренд. Не обнаружено зависимости формы кривой блеска от даты наблюдений.

Со времени открытия в 1987 г. переменности с характерным временем меньше суток [23] вопрос, является ли внутрисуточная переменность собственной переменностью или вызвана рассеянием на неоднородностях межзвездной среды, остается открытым. Часть сеансов IDV проводились на телескопах, разнесенных по долготе на 4 часа.

Таблица 1. IDV J1504+1029 на 8.57 ГГц

Дата	$\langle S \rangle$	ΔS	m	χ^2	$\chi^{2}_{0.1\%}$	N-1	$S_{ m var}$	$ au_{ m acf}$	Обсерватория
09.11.2014	0.765	0.015	—	0.87	4.10	5	—	—	B + Z
23.11.2014	0.944	0.033	_	0.64	4.62	4	_	_	В
30.11.2014	0.783	0.019	—	0.66	4.10	5	—	—	B + Z
14.12.2014	0.812	0.019	—	0.95	5.42	3	—	_	Z
18.01.2015	0.913	0.042	0.7	9.32	3.27	8	0.041	3.3	B + Z
25.01.2015	0.935	0.055	0.9	14.15	3.47	7	0.048	3.1	B + Z
01.02.2015	0.936	0.004	—	0.05	5.42	3	—	_	Z
22.02.2015	0.991	0.044	0.6	3.11	3.74	6	0.033	—	B + Z
15.03.2015	1.041	0.042	0.6	4.65	5.42	3	0.038	_	Z
22.03.2015	0.996	0.013	—	0.43	5.42	3	—	—	Z
04.02.2016	2.429	0.043	—	0.84	4.62	4	—	_	В
14.02.2016	2.576	0.139	0.6	6.50	4.62	4	0.100	1.8	Z
13.03.2016	2.627	0.094	0.5	4.02	3.74	6	0.074	2.7	B + Z
20.03.2016	2.482	0.097	0.5	3.85	3.47	—	0.081	2.0	B + Z
26.03.2016	2.088	0.297	2.0	39.56	4.10	5	0.246	2.1	B + Z
02.04.2016	2.468	0.141	0.9	9.49	4.10	5	0.129	3.3	B + Z
01.05.2016	2.730	0.032	—	0.36	5.42	3	—	_	В
08.05.2016	2.861	0.042	—	0.55	3.47	7	—	_	В
06.08.2016	3.114	0.090	0.3	1.79	2.84	11	0.053	_	B + Z
07.08.2016	3.148	0.054	—	0.48	5.42	3	—	—	Z
13.11.2016	3.013	0.155	0.9	6.34	2.16	23	0.156	3.4	B + Z
04.12.2016	3.104	0.113	0.5	3.27	2.31	19	0.090	2.5	B + Z
15.01.2017	3.284	0.093	0.1	1.12	3.10	9	0.025	_	B + Z
09.07.2017	3.210	0.149	0.6	4.75	4.62	4	0.110	>5.0	В
12.08.2017	3.699	0.136	0.4	2.13	2.23	21	0.090	_	B + Z
13.08.2017	3.749	0.101	0.2	1.32	2.84	11	0.043	2.5	В
13.08.2017	3.625	0.183	0.8	6.49	4.10	5	0.165	2.5	Z
03.09.2017	3.211	0.920	4.0	137.5	5.42	3	0.776	>5.0	В
17.09.2017	3.205	0.098	0.5	3.22	3.74	6	0.094	_	В
15.10.2017	3.152	0.106	0.5	3.41	2.84	11	0.092	4.4	В
17.12.2017	3.620	0.133	0.4	2.72	2.66	13	0.096	1.7	B + Z
31.12.2017	3.577	0.123	0.4	2.49	2.31	19	0.093	1.9	B + Z
07.01.2018	3.536	0.114	0.4	2.20	2.35	18	0.081	_	B + Z
14.01.2018	3.540	0.127	0.4	2.26	3.10	9	0.087	—	B + Z
07.04.2018	3.291	0.059	—	0.73	2.84	11	—	—	B + Z
28.04.2018	3.147	0.167	0.7	5.72	3.74	6	0.130	2.3	B + Z

$\langle S \rangle$	ΔS	m	χ^2	$\chi^{2}_{0.1\%}$	N-1	$S_{ m var}$	$ au_{ m acf}$	Обсерватория
1.086	0.087	0.9	3.34	5.42	3	0.056	_	В
1.144	0.070	0.3	1.36	4.10	5	0.021	;	B + Z
1.111	0.027	_	0.58	3.74	6	_	_	B + Z
1.107	0.062	0.7	2.41	4.10	5	0.049	;	B + Z
1.106	0.046	0.6	3.37	3.47	7	0.042	;	$B + Z^*$
1.506	0.048	_	0.82	5.42	3	_	_	Z
1.344	0.055	_	0.47	5.42	3	_	_	Z
1.458	0.008	_	0.05	5.42	3	_	_	Z
1.804	0.034	_	0.46	2.58	14	_	_	B + Z
1.864	0.074	0.5	2.27	2.74	12	0.051	;	B + Z
1.828	0.055	_	0.92	2.84	11	_	_	B + Z
2.011	0.087	0.7	4.81	2.96	10	0.083	;	B + Z
1.993	0.055	0.2	1.17	2.66	13	0.019	_	B + Z
2.193	0.063	0.3	2.87	2.66	13	0.041	_	B + Z
2.251	0.087	0.6	3.30	2.23	21	0.078	4.4	B + Z
1.840	0.051	0.2	1.41	2.51	8	0.025	_	B + Z
	$\begin{array}{r} \langle S \rangle \\ \hline 1.086 \\ 1.144 \\ 1.111 \\ 1.107 \\ 1.106 \\ 1.506 \\ 1.344 \\ 1.458 \\ 1.804 \\ 1.864 \\ 1.828 \\ 2.011 \\ 1.993 \\ 2.193 \\ 2.193 \\ 2.251 \\ 1.840 \end{array}$	$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	$\begin{array}{ c c c c c c c } & & & \Delta S & m \\ \hline & & & & \\ \hline 1.086 & & 0.087 & & 0.9 \\ \hline & & & & \\ 1.144 & & & & 0.070 & & 0.3 \\ \hline & & & & & \\ 1.144 & & & & & 0.027 & - \\ \hline & & & & & \\ 1.107 & & & & & 0.062 & & 0.7 \\ \hline & & & & & & & \\ 1.106 & & & & & & 0.062 & & 0.7 \\ \hline & & & & & & & \\ 1.106 & & & & & & & 0.062 & & 0.7 \\ \hline & & & & & & & & \\ 1.506 & & & & & & & & \\ 1.506 & & & & & & & & \\ 0.046 & & & & & & & \\ \hline & & & & & & & & \\ 1.506 & & & & & & & & \\ 1.506 & & & & & & & & \\ 1.506 & & & & & & & & \\ 1.506 & & & & & & & & \\ 1.106 & & & & & & & & \\ 1.506 & & & & & & & & \\ 1.506 & & & & & & & & \\ 1.506 & & & & & & & & \\ 1.506 & & & & & & & & \\ 1.506 & & & & & & & & \\ 1.458 & & & & & & & & \\ 0.055 & & & & & & & \\ 1.828 & & & & & & & & \\ 1.828 & & & & & & & & \\ 1.828 & & & & & & & & \\ 0.055 & & & & & & & \\ 1.828 & & & & & & & \\ 1.840 & & & & & & & \\ 0.051 & & & & & & & \\ 1.840 & & & & & & & \\ 0.051 & & & & & & \\ 1.840 & & & & & & \\ 1.840 & & & & & & \\ 1.840 & & & & & & \\ 1.810 & & & & & & \\ 1.810 & & & & & & \\ 1.810 & & & & & & \\ 1.810 & & & & & & \\ 1.810 & & & & & & \\ 1.810 & & & & & & \\ 1.810 & & & & & & \\ 1.810 & & & & & & \\ 1.810 & & & & \\$	$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$

Таблица 2. IDV J1504+1029 на 4.84 ГГц

Одновременные наблюдения на двух разнесенных по долготе антеннах, в принципе, позволяют разделить переменность, связанную с межзвездной средой, и собственную переменность в источнике по наличию или отсутствию временной задержки максимумов переменности. Хотя однозначного результата мы не получили, но ряд кривых блеска показывает наличие стыковки данных с учетом разницы во времени двух обсерваторий, что должно получаться, если IDV вызывается межзвездной средой.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнены длительные, с 2010 по 2018 г., наблюдения блазара J1504+1029 на радиотелескопах РАТАН-600 САО РАН на частотах 2.3 (2.27), 3.9 (4.7), 7.7 (8.2), 11.2 и 21.7 ГГц. Долговременная кривая блеска показывает перманентную активность, на фоне которой были зарегистрированы три вспышки с максимумами в 2002, 2009 и 2018 г.

Вспышка 2009 г. выделяется на фоне общей активности на частотах 8.2, 11.2 и 21.7, временная

шкала $\tau \approx 1$ г. Полученные параметры для нисходящей ветви вспышки 2009 г. на 21.7 ГГц: $\tau_{\rm var} =$ = 1 год, линейный размер $R \leq 0.3$ пк, угловой размер $\theta \leq 0.05$ mas, яркостная температура $T_{\rm b} \geq 2.6 \times$ $\times 10^{13}$ K, доплер-фактор $\delta \geq 3$. На частоте 7.7 ГГц яркостная температура $T_{\rm b} \geq 1.6 \times 10^{14}$ K, доплерфактор $\delta \geq 5.5$.

Вспышка с максимумом в 2018 г. имеет длинную восходящую ветвь с одной небольшой промежуточной вспышкой. Перед этой вспышкой в конце 2013 г. была зарегистрирована самая низкая плотность потока за все время наблюдения. Временна́я шкала этой вспышки $\tau \approx 3$ г. Соответственно параметры излучающей области: временна́я шкала восходящей ветви $\tau_{\rm var} \approx 3$ года; параметры излучающей области на 21.7 ГГц — линейный размер $R \leq 1.1$ пк, угловой размер $\theta \leq 0.17$ тая, яркостная температура $T_{\rm b} \geq 2.2 \times 10^{12}$ К, доплер-фактор $\delta \geq 2.8$; на 7.7 ГГц соответственно $T_{\rm b} \geq 1.6 \times 10^{13}$ К, доплер-фактор $\delta \geq 5.5$.

Получены интегральные спектры блазара в разных фазах долговременной кривой блеска.



Рис. 18. Кривые блеска источника J1504+1029 с обнаруженной внутрисуточной переменностью на частоте 8.57 ГГц, полученные на обсерваториях Бадары (черные кружки) и Зеленчукская (светлые кружки). Каждая точка на графиках представляет собой усредненную за сет плотность потока.



Рис. 19. Кривые блеска источника J1504+1029 на частоте 5.05 ГГц, полученные на обсерваториях Бадары (черные кружки) и Зеленчукская (светлые кружки). Каждая точка на графиках представляет собой усредненную за сет плотность потока.

2. В восьми сетах из одиннадцати ежедневных наблюдений длительностью от 75 до 120 дней обнаружена недельная переменность на 2—4 частотах с характерными временами от 4 до 30 дней. В большинстве случаев переменность носит квазипериодический характер, только в 2004 г. переменность определяется "антивспышкой". В разные годы спектр переменного компонента менялся от $\alpha = -1.4$ до +1.6.

По крайней мере, в четырех сетах короткая переменность, вероятнее всего, обусловлена процессами внутри источника. Это подтверждается следующими свойствами переменности:

 Растущий к высоким частотам спектр переменного компонента. Коррелированность плотности потока на разных частотах.

 Наличие запаздывания максимумов на низких частотах.

 Большой индекс модуляции на высоких частотах, особенно с учетом высокой галактической широты исследуемого источника.

Отметим также, что растущие спектры переменного компонента наблюдаются в сетах, совпадающих или близких к вспышкам плотности потока на долговременной кривой блеска.

При внутренней причине недельной переменности можно оценить параметры излучающей области на 21.7 ГГц: размер излучающей области $R \leq 4000$ а.е., угловой размер $\theta \leq 3.5$ мкс дуги, яркостная температура $T_{\rm b} \geq 13 \times 10^{15}$ K, доплерфактор $\delta \geq 14$.

Природа "антивспышки" в сете 2004 г. не совсем ясна. Падающий к высоким частотам спектр предполагает внешнюю природу недельной переменности. Одной из причин может быть появление на луче зрения компактного сгустка релятивистских электронов с оптической толщей больше единицы во всем наблюдаемом частотном интервале.

Мы считаем, что имеющихся параметров недельной переменности в большинстве случаев достаточно для разделения внутренней и внешней переменности. Плоские и растущие к высоким частотам с небольшим индексом спектры при наличии когерентности кривых блеска также могут быть результатом внутренней переменности, а спектры, близкие к плоским, могут быть следствием увеличения степени компактности с ростом частоты.

3. С 2014 по 2018 гг. проведено 36 сеансов на частоте 8.63 ГГц и 16 на 5.05 ГГц. Внутрисуточная переменность на РТ-32 уверенно обнаружена в 17 и 3 сеансах соответственно. Значимая IDV отсутствует в минимальных фазах долговременной активности и появляется с середины восходящей ветви последней вспышки. Не обнаружена зависимость индекса модуляции от плотности потока.

Подтверждается полученный для предыдущих источников [19, 24] результат исследования IDV — значимая переменность проявляется, в основном, в активной фазе долговременной переменности. Скорее всего, именно тогда возникают сверхком-пактные образования, которые и являются причиной феномена IDV, независимо от его внутреннего или внешнего происхождения.

Для нескольких источников, наблюдавшихся одновременно в двух обсерваториях, разнесенных на 4 часа по UT, видно, что данные хорошо сшиваются с учетом разницы времени, что указывает на наиболее вероятную причину IDV, связанную с межзвездной средой.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (ГК14.518.11.7054) с использованием оборудования центра коллективного пользования комплекса "Квазар-КВО" ИПА РАН. М.Г. Мингалиев благодарен финансированию за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентноспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. A. Hewitt and G. Burbidge, Astrophys. J. Suppl. **63**, 1 (1987).
- 2. M. P. Veron-Cetty and P. Veron, Astron. and Astrophys. **518**, 10 (2010).
- 3. A. A. Abdo, M. Ackermann, M. Ajello, W. B. Atwood, at al, Astrophys. J. **710**, 810 (2010).
- V. Karamanavis, L. Fuhrmann, T. P. Krichbaum, E. Angelakis, et al., Astron. and Astrophys. 586, id. A60 (2016).
- 5. https://dept.astro.lsa.umich.edu/obs/radiotel.
- H. Teräsranta, J. Achren, M. Hanski, J. Heikkilä, et al., Astron. and Astrophys. 427, 769 (2004).
- А. Г. Горшков, В. К. Конникова, М. Г. Мингалиев, Астрон. журн. 87(10), 986 (2010).
- 8. А. Г. Горшков, В. К. Конникова, М. Г. Мингалиев, Астрон. журн. **90**(5), 384 (2013).
- 9. A. G. Gorshkov, V. K. Konnikova, M. G. Mingaliev, Astrophys. Bull. 68, 423 (2013).
- 10. V. K. Konnikova, M. G. Mingaliev, A. K. Erkenov, Astrophys. Bull. (in press) (2018).
- 11. А. Г. Горшков, В. К. Конникова, М. Г. Мингалиев, Астрон. журн. **80**(11), 978 (2003).
- 12. А. Г. Горшков, В. К. Конникова, М. Г. Мингалиев, Астрон. журн. **77**(3), 188 (2000).
- Д. В. Иванов, А. В. Ипатов, И. А. Ипатова, В. В. Мардышкин, А. Г. Михайлов, М. А. Харинов, Труды ИПА РАН 12, 93 (2005).
- А. Г. Горшков, А. В. Ипатов, И. А. Ипатова, В. К. Конникова, В. В. Мардышкин, М. А. Харинов, А. Г. Михайлов, Астрон. журн. 86(5), 428 (2009).
- 15. М. А. Харинов, Труды ИПА РАН, 15, 15 (2006).
- М. А. Харинов, А. Е. Яблокова, Труды ИПА РАН, 24, 342 (2012).
- Д. В. Иванов, А. В. Ипатов, И. А. Ипатова, В. В. Мардышкин, А. Г. Михайлов, М. А. Харинов, Труды ИПА РАН, 24, 93 (2012).

- 18. G. A. Seielstad, T. J. Pearson, and A. C. S. Readhead, Publ. Astron. Soc. Pacific **95**, 842 (1983).
- 19. E. Valtaoja, A. Lähteenmäki, H. Teräsranta, and M. Lainela, Astrophys. J. Suppl. **120**, 95 (1999).
- А. Г. Горшков, А. В. Ипатов, И. А. Ипатова, В. К. Конникова, В. В. Мардышкин, М. Г. Мингалиев, М. А. Харинов, Астрон. журн. **95**(3), 193 (2018).
- 21. А. Е. Вольвач, М. Г. Ларионов, Л. Н. Вольвач, Г. М. Ларионов, Астрон. журн. **94**(11), 950 (2017).
- C. Pittori, A. Bulgarelli, F. Lucarelli, et al., Astron. Telegram № 8593 (2016).
- 23. T. Hovatta, H. J. Lehto, and M. Tornikoski, Astron. and Astrophys. **488**, 897 (2008).

- 24. А. Г. Горшков, А. В. Ипатов, В. К. Конникова, В. В. Мардышкин, М. Г. Мингалиев, А. М. Финкельштейн, М. А. Харинов, Астрон. журн. 88(2), 115 (2011).
- 25. А. Р. Marscher and W. К. Gear, Астрон. журн. 298, 114 (1985).
- 26. H. D. Aller, M. F. Aller, and P. A. Hughes, Astrophys. J. **298**, 296 (1985).
- А. Г. Горшков, А. В. Ипатов, И. А. Ипатова, В. К. Конникова, В. В. Мардышкин, М. Г. Мингалиев, М. А. Харинов, А. А. Евстигнеев, Письма в Астрон. журн. 42(8), 560 (2016).