АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ БЮЛЛЕТЕНЬ, 2019, том 74, № 1, с. 13–30

УДК 524.7-77:520.84

СПЕКТРЫ И ПЕРЕМЕННОСТЬ ВЫБОРКИ ИСТОЧНИКОВ JVAS

© 2019 В. К. Конникова[1*], М. Г. Мингалиев[2,3**], А. К. Эркенов[2]

[1]Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

[2]Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

[3]Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

Поступила в редакцию 26 апреля 2018 года; после доработки 9 октября 2018 года; принята к публикации 9 октября 2018 года

Представлены результаты наблюдений выборки сильных источников ($S > 0.5$ Ян) с плоскими спектрами из каталога JVAS в области склонений 10°.5–18° (J2000) в 2015, 2016 и 2017 гг. на частотах 2.3, 4.7, 8.2, 11.2 и 21.7 ГГц на РАТАН-600. Получены спектры всех 45 источников, выделены объекты со значительной переменностью. У четырех объектов впервые обнаружена переменность с характерными временами от 8 до 35 дней. Получены спектры переменных компонент.

Ключевые слова: *радиоконтинуум: общее — радиоконтинуум: МЗС*

1. ВВЕДЕНИЕ

Переменность внегалактических источников на разных масштабах времени в диапазонах от гамма до радио активно исследуется многими авторами: долговременная переменность (годы), переменность на масштабах от нескольких дней, до нескольких недель и внутрисуточная переменность (intraday variability, IDV).

Наименее исследования область характерных времен — от нескольких дней до нескольких недель (мы называем ее недельной переменностью), так как для ее обнаружения и получения параметров необходимы ежедневные наблюдения в течение нескольких месяцев.

О существовании переменности с характерными временами в несколько дней впервые сообщил Хишен [1] в 1984 г. Причина переменности на коротких масштабах может быть как внутренней — процессы внутри источника, так и внешней — рассеяние на неоднородностях межзвездной среды (interstellar scintillation, ISS). При наблюдении на нескольких частотах возможно разделение этих видов переменности. С 1999 г. мы активно занимались этой проблемой, проведено четырнадцать сессий длительных ежедневных наблюдений на радиотелескопе Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук РАТАН-600 двух полных по плотности потока выборок в областях склонений 4°–6° (B1950) и 10°–12°30′ (J2000) [2, 3]. Наблюдались полные выборки 69 и 83 источников с плоскими спектрами ($\alpha \geq -0.5$, $S_\nu \sim \nu^\alpha$) одновременно на пяти частотах в диапазоне 2.3–21.7 ГГц. В результате этих наблюдений у 30 источников обнаружена переменность с уровнем значимости, не превышающим 1%. На основе анализа кривых блеска, структурных и автокорреляционных функций получены характерные времена, индексы модуляции и спектры переменных компонент.

Наблюдения показали, что один и тот же источник в разные годы может иметь как растущий, так и падающий спектр переменной компоненты. Растущий к высоким частотам спектр наблюдался в основном в активных фазах долговременной переменности, а падающий — в минимумах. Падающий к высоким частотам спектр указывает на внешнюю причину переменности, а растущий спектр, коррелированность плотности потока и запаздывание максимумов на низких частотах — вероятнее всего, на внутреннюю. Это позволяет определить линейные и угловые размеры излучающих областей в источнике. При этом само существование или отсутствие недельной переменности не зависят от фазы долговременной переменности. Как примеры — большая переменность блазара J0530+1029 с характерными временами 7–21 день в фазе минимальной активности [4] и отсутствие переменности излучения блазара 3C 454.3 на протяжении шести сетов наблюдений [5].

Для поиска новых источников с быстрой переменностью и отбора кандидатов для наблюдения долговременной переменности мы сформировали выборку из каталога JVAS [6], в которую вошли

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

источники с плоскими спектрами и плотностями потоков $S_{8.4} > 0.5$ Ян. Выборка содержит 30 квазаров с красными смещениями от $z = 0.605$ до $z = 2.730$, десять объектов типа BL Lac, $z = 0.137$–0.871, три активные галактики и два неотождествленных объекта.

В настоящей работе представлены результаты наблюдений объектов выборки в 2015–2017 гг.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Список наблюдавшихся объектов и некоторые сведения о них приведены в таблице: (1) – имя источника; (2) — экваториальные координаты на эпоху 2000 г. из каталога JVAS; (3) — оптическое отождествление/тип объекта из каталога [7], где Q — квазар, HPQ — блазар, L — объект типа BL Lac, G — галактика, EF — объект не отождествлен; (4) — красное смещение из каталога SDSS; (5) — галактическая широта источника. Спектр J1603+1105, приведенный в каталоге SDSS[1], не содержит линий, а фотометрическая оценка красного смещения вызывает сомнения.

Наблюдения источников выборки проводились на Северном секторе РАТАН-600 в верхней кульминации. Проведено три сета: 16 июня–18 сентября 2015 г. (95 дней), 15 июня–08 сентября 2016 г. (87 дней) и 02 июня–03 сентября 2016 г. (94 дня). Источники наблюдались ежедневно на частотах 2.27, 4.7, 8.2, 11.2 и 21.7 ГГц. В 2015 г. наблюдения на 2.27 ГГц начались только в конце сета.

Для обработки наблюдений использовался пакет программ, позволяющий получать как плотность потока индивидуального наблюдения источника, так и среднюю плотность потока на любом интервале внутри цикла наблюдений. В основу обработки положена оптимальная фильтрация исходных данных. Подробно методика описана в работе [8].

Для калибровки плотностей потока и учета изменения площади антенны с высотой источника в указанном диапазоне склонений наблюдались опорные источники J0521+1638, J0625+1440, J1347+1217 и J1643+1715. Их спектры построены по данным о плотностях потоков на всех частотах, приведенных в каталоге CAT [9], и показаны на рис. 1a–1d.

[1] https://www.sdss.org

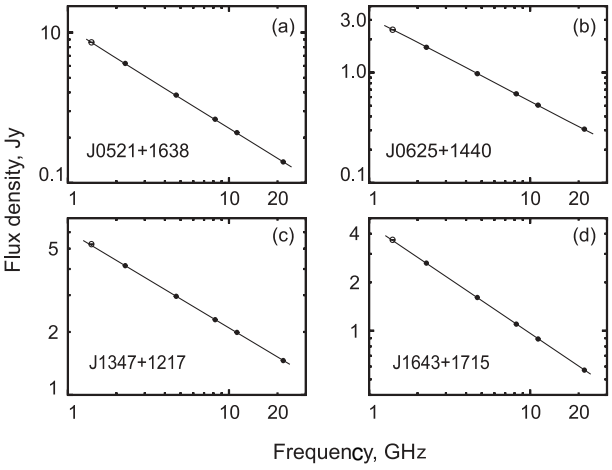

Рис. 1. Спектры опорных источников.

2.1. Поиск переменности и определение её параметров

Подробно методика поиска переменности описана в работе [2]. Здесь приведем основные этапы обработки и используемые термины.

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

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

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

Характерные времена переменности оценивались по виду структурных функций первого порядка (SF):

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

где τ — временной сдвиг.

Если в процессе присутствует нешумовая компонента, то выше уровня аппаратурных шумов структурная функция растет по степенно́му закону, пока не достигает уровня насыщения, характеризующего суммарную дисперсию процесса. Пересечение степенно́й части с уровнем насыщения дает характерное время $\tau_{\rm sf}$.

Структурные функции также использовались для определения дисперсии переменной составляющей:

$$\sigma^2_{\rm var} = \sigma^2_{\rm pr} - \sigma^2_n,$$

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

Сведения об объектах выборки

Источник	RA(J2000.0)Dec	Id	z	b	Источник	RA(J2000.0)Dec	Id	z	b
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
J0010+1724	00:10:33.992 17:24:18.79	Q	1.601	−44	J1007+1356	10:07:41.498 13:56:29.60	Q	2.707	50
J0039+1411	00:39:39.620 14:11:57.56	Q	1.738	−48	J1025+1253	10:25:56.285 12:53:49.02	Q	0.663	53
J0056+1625	00:56:55.295 16:25:13.34	L	0.206	−46	J1122+1805	11:22:29.711 18:05:26.35	Q	1.041	68
J0117+1418	01:17:25.203 14:18:12.43	Q	0.839	−48	J1215+1654	12:15:03.978 16:54:37.94	Q	1.132	77
J0139+1753	01:39:41.979 17:53:07.54	Q	2.730	−43	J1255+1817	12:55:31.761 18:17:50.92	Q	1.366	81
J0204+1514	02:04:50.414 15:14:11.04	Q	0.405	−44	J1309+1154	13:09:33.933 11:54:24.56	HPL	0.415	74
J0238+1636	02:38:38.931 16:36:59.28	HPQ	0.940	−39	J1415+1320	14:15:58.819 13:20:23.71	L	0.246	66
J0256+1334	02:56:34.985 13:34:35.33	EF		−39	J1425+1424	14:25:49.01 14:24:56.91	Q	0.780	65
J0309+1029	03:09:03.625 10:29:16.34	Q	0.863	−40	J1446+1721	14:46:35.348 17:21:07.60	Q	1.024	62
J0345+1453	03:45:06.418 14:53:49.56	Q	1.556	−30	J1504+1029	15:04:24.980 10:29:39.20	Q	1.838	55
J0409+1217	04:09:22.009 12:17:39.85	HPL	0.504	−28	J1524+1521	15:24:41.612 15:21:21.06	HPQ	0.628	53
J0449+1121	04:49:07.672 11:21:28.63	G	1.207	−21	J1540+1447	15:40:49.492 14:47:45.90	HPQ	0.605	49
J0510+1800	05:10:02.369 18:00:41.59	Q	0.416	−13	J1603+1105	16:03:41.930 11:05:48.68			42
J0530+1331	05:30:56.417 13:31:55.15	Q	2.060	−11	J1707+1331	17:07:45.636 13:31:05.22	Q	0.936	29
J0539+1433	05:39:42.366 14:33:45.56	Q	2.690	−9	J1719+1745	17:19:13.049 17:45:06.44	HPL	0.137	28
J0613+1306	06:13:57.690 13:06:45.39	Q	0.745	−2	J1745+1720	17:45:35.208 17:20:01.42	Q	1.702	22
J0700+1709	07:00:01.526 17:09:21.70	EF		9	J2051+1743	20:51:35.583 17:43:36.91	G	0.195	−17
J0725+1425	07:25:16.80 14:25:13.73	Q	1.038	14	J2139+1423	21:39:01.310 14:23:35.99	Q	2.427	−27
J0738+1742	07:38:07.394 17:42:19.00	HPL	0.424	18	J2152+1734	21:52:24.820 17:34:37.80	HPL	0.871	−28
J0750+1823	07:50:00.331 18:23:11.41	Q	1.163	21	J2203+1725	22:03:26.895 17:25:48.27	Q	1.075	−30
J0802+1809	08:02:48.033 18:09:49.26	Q	1.586	24	J2219+1806	22:19:14.095 18:06:35.62	Q	1.071	−32
J0842+1835	08:42:05.094 18:35:40.99	Q	1.276	32	J2253+1608	22:53:57.748 16:08:53.56	HPQ	0.859	−38
J0954+1743	09:54:56.825 17:43:31.24	Q	1.477	48					

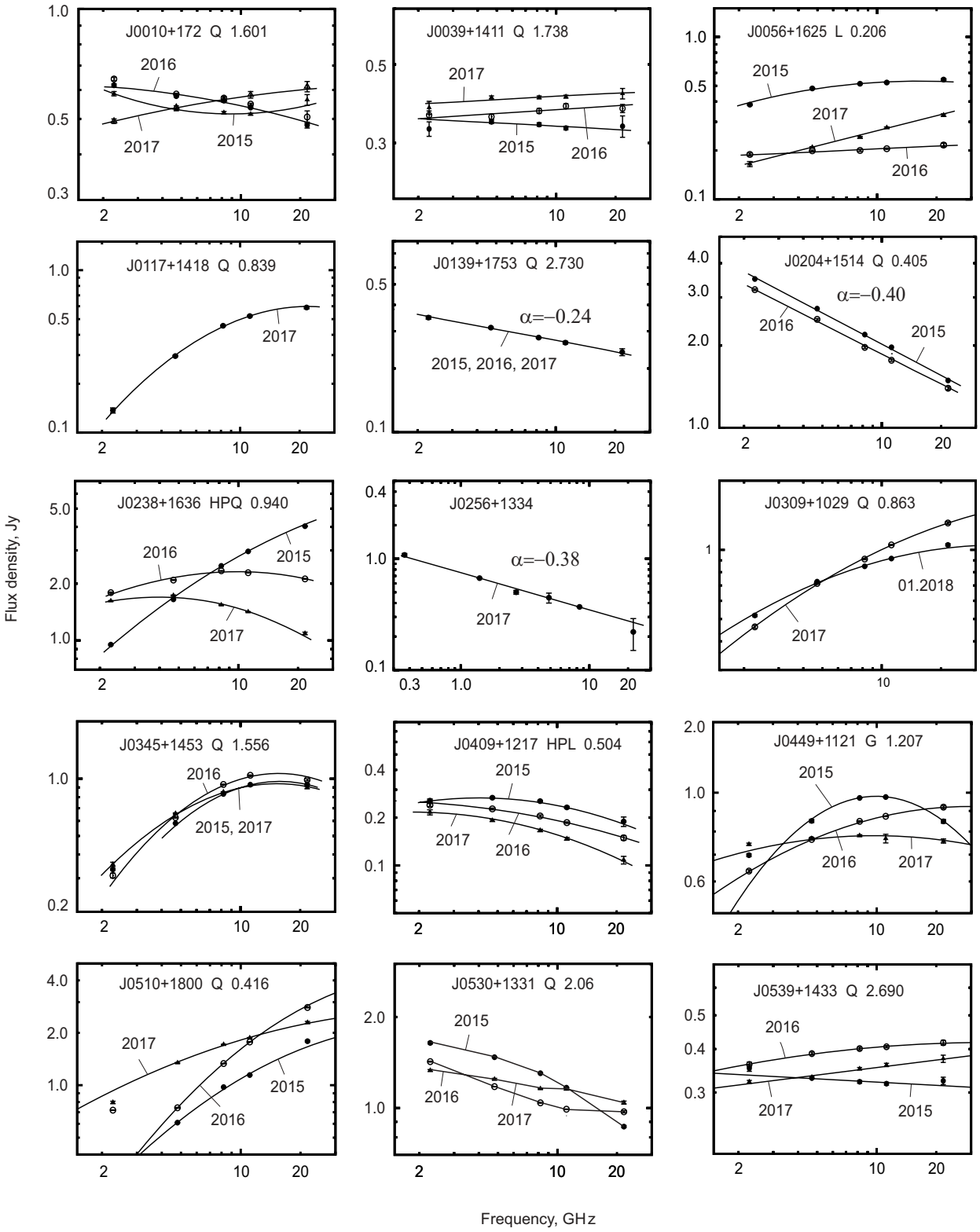

Рис. 2. Спектры источников выборки в наблюдениях 2015–2017 гг.

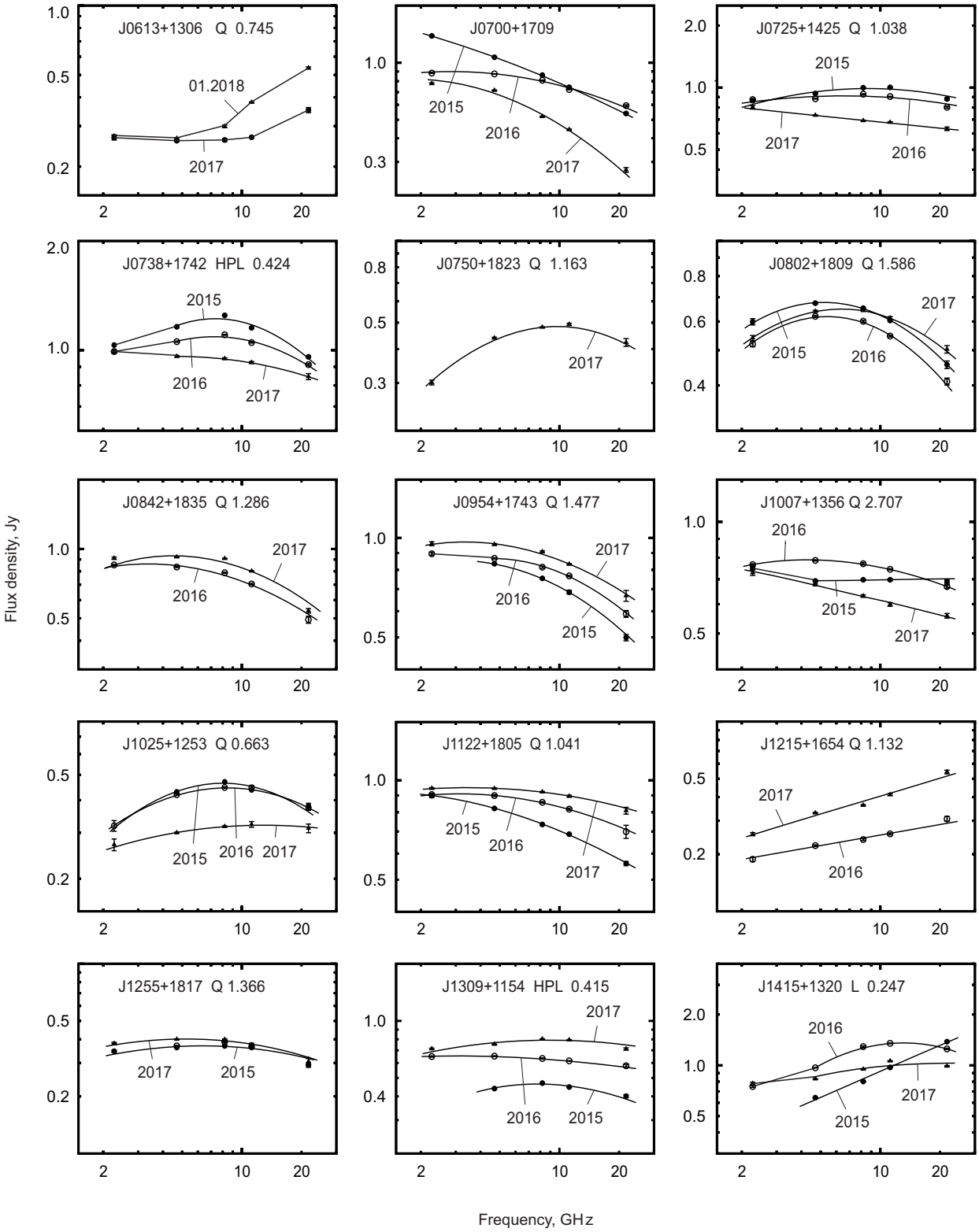

Рис. 2. (Продолжение).

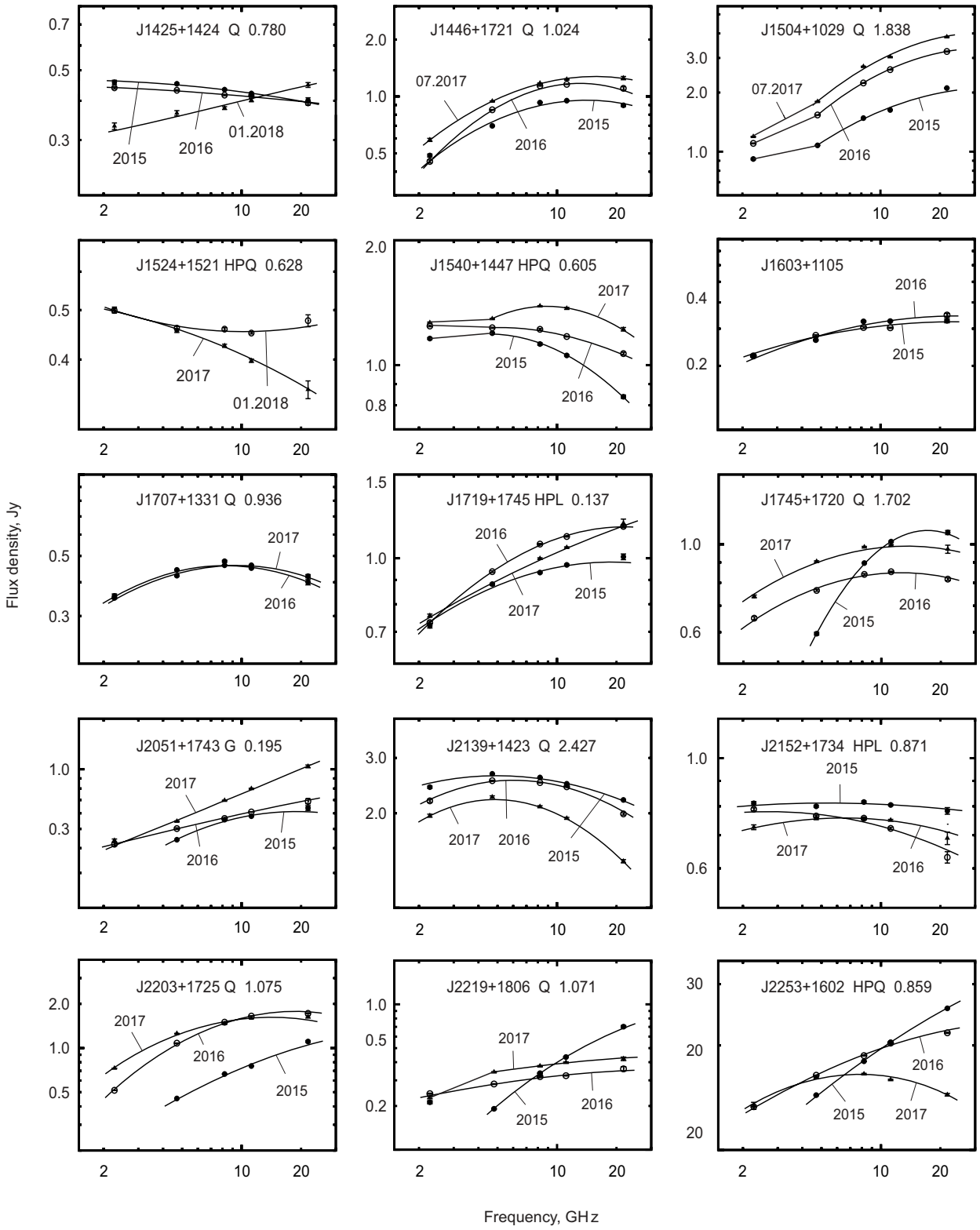

Рис. 2. (Продолжение).

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

На кривых блеска обычно наблюдаются три типа переменности: квазипериодический или циклический процесс, сумма двух или более циклических процессов с разными амплитудами и характерными временами и случайные процессы. Квазипериодический процесс — наиболее распространенный тип недельной переменности. В течение наблюдательного сета период и амплитуда цикла могут меняется. В качестве характерного времени принимается время первого минимума автокорреляционной функции (ACF), которое является средним временем полупериода цикла. Характерное время, определенное по структурной функции, и $\tau_{\rm acf}$, определенное по автокорреляционной функции, одинаковы, но структурная функция дает более точное значение.

Если наблюдается сумма двух или более циклических процессов с разными амплитудами и характерными временами, на структурной функции видны несколько минимумов, каждый определяет характерное время данного процесса.

Случайные процессы проявляются в виде одиночных или нескольких хаотично расположенных импульсов; в ACF присутствует один значимый минимум. Величина $\tau_{\rm acf}$ дает характерное время одиночного импульса или среднее время ансамбля импульсов.

Мы приняли, что уровень значимости основного процесса не должен превышать 1%. Уровень значимости остальных процессов в этом случае может быть больше. Переменность источника считалась обнаруженной, если величина χ^2 не превышала значение, соответствующее вероятности того, что процесс случайный, на уровне 1%.

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

Переменность в одном источнике обнаруживается не на всех частотах и не в каждом сете, что объясняется коротким временем жизни компоненты с данным характерным временем.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Спектры источников выборки

Спектры всех источников выборки, полученные в 2015–2017 гг., приведены на рис. 2. Наблюдения нескольких источников начались только в 2016 г.

У трех источников, J0139+1753 ($z = 2.716$), J0204+1514 ($z = 0.405$) и J0256+1334 (EF), спектры степенны́е, падающие к высоким частотам с индексами $\alpha = [-0.24; -0.40]$. Исследование долговременной переменности полных выборок в течение 18–20 лет [2, 3] показало, что переменность источников с такими спектрами слабая, а вид спектра не зависит от эпохи наблюдения.

Самая значительная переменность за три года — у источников J0238+1636 ($z = 0.940$) и J2253+1608 ($z = 0.859$). Тринадцать источников, у которых хотя бы один спектр растет к высоким частотам или максимум в спектре находится на самой высокой частоте, также показали значительные изменения плотности потока и вида спектра за три года. Эти источники — хорошие кандидаты для исследования долговременной переменности. Среднее красное смещение этих источников — $\overline{z} = 0.99 \pm 0.45$, у одного объекта типа BL Lac красное смещение не измерено.

Спектры двенадцати источников имеют максимум в исследуемом диапазоне, переменность наблюдается, но вид спектра за три года не изменился. Это в основном GPS-источники. Среднее красное смещение этой группы $\overline{z} = 1.26 \pm 0.52$. Два источника не отождествлены.

Два источника наблюдались только в 2017 г.

У остальных источников переменность наблюдается, но в основном максимальна на высокочастотном конце спектра.

3.2. Недельная переменность источников

Переменность с характерными временами от 8 до 35 дней, удовлетворяющая принятым в 2015–2017 гг. критериям, обнаружена у восьми источников исследуемой выборки. Переменность источников J0409+1217, J0449+1121, J1504+1029 и J1603+1105 была обнаружена нами раннее. В 2015–2017 гг. мы продолжили их наблюдения. Быстрая переменность источников J0530+1331, J0700+1709, J1719+1745 и J2203+1725 в 2015–2017 гг. обнаружена впервые. На рис. 3a–3d приведены спектры переменных компонент этих источников.

Ввиду большого объема полученных данных анализ результатов продолжается, мы публикуем их по мере завершения этапов анализа. Детально результаты исследования переменности излучения источников выборки будут представлены в следующих статьях. Здесь приведем только краткую информацию.

3.2.1. J0409+1217, L, $z = 0.504$

Радиоисточник J0409+1217 мы наблюдаем с 2000 г. Плотность потока на долговременной кривой блеска с октября 2000 г. по сентябрь 2017 г. по наблюдениям на 11.2 ГГц уменьшилась с $S = 0.848 \pm 0.08$ Ян до $S = 0.170 \pm 0.03$ Ян. В течение наблюдений зарегистрировано несколько

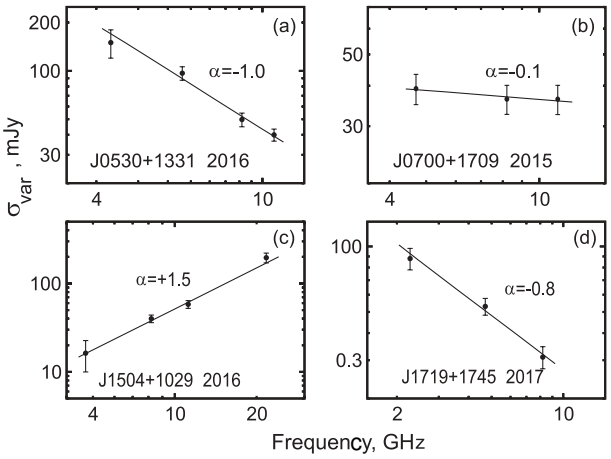

Рис. 3. Спектры переменных компонент источников J0530+1331, J0700+1709, J1504+1029 и 1719+1725.

небольших вспышек в основном на высоких частотах. В 2015–2017 гг. плотность потока плавно уменьшалась, на 11.2 ГГц — от $S = 0.231 \pm 0.02$ Ян до $S = 0.152 \pm 0.02$ Ян. Интегральные спектры имеют максимум на 3.2 ГГц (рис. 2).

С 2000 г. источник наблюдался в двенадцати длинных сетах и во всех мы зарегистрировали быструю переменность его излучения, от 5 до 30 дней. Переменность обнаруживается только на частотах ниже 8 ГГц. Спектр переменной компоненты во всех сетах — падающий к высоким частотам со спектральным индексом $\alpha > -1$, что указывает на внешнюю причину переменности — рассеяние на неоднородностях межзвездной среды.

На рис. 4a–4c приведен пример кривой блеска источника, структурной и автокорреляционной функций на частоте 4.7 ГГц в 2016 г. Кривая блеска содержит три квазипериодические компоненты с характерными временами $\tau_{\rm acf} = 7, 19, 30$ дней, максимальную амплитуду имеет компонента с $\tau_{\rm acf} = 19$ дней.

3.2.2. J0449+1121, Q, z = 1.207

Долговременная кривая блеска источника начиная с 2000 г. представляет собой цепь непрерывных вспышек с последовательно уменьшающейся амплитудой. В среднем наблюдалось непрерывно падение плотности потока с 3 до 0.7 Ян. В рассматриваемый период 2015–2017 гг. плотность потока на всех частотах уменьшалась, на частоте 11.2 ГГц — от $S = 0.978 \pm 0.02$ Ян до $S = 0.737 \pm 0.02$ Ян. Интегральный спектр источника в 2015 г. имеет максимум на 10 ГГц, в 2016 г. — растущий с $\alpha = +0.2$, в 2017 г. спектр практически плоский (рис. 2). Как и у источника, описанного выше, быстрая переменность, от 3 до 26 дней, наблюдалась во всех длинных сетах. Но в разные годы спектр переменной компоненты менялся от растущего к высоким частотам с $\alpha = +0.7$ до падающего с $\alpha = -1.0$, причем имеется четкая корреляция вида спектра переменной компоненты от фазы активности на долговременной кривой блеска: во вспышках спектр растущий к высоким частотам, в минимумах — падающий. По-видимому, во вспышках быстрая переменность вызывается процессами в самом источнике, а в минимумах является результатом рассеяния на межзвездной среде.

Значительная быстрая переменность наблюдалась и в 2015–2017 гг. На рис. 4d–4f приведены примеры кривой блеска, структурной и автокорреляционной функций на 8.2 ГГц в 2016 г. На кривой блеска имеются две квазистационарные компоненты с характерными временами $\tau_{\rm acf} = 11$ и 28 дней.

В 2015–2017 гг. источник находился в фазе минимальной активности. По данным наших наблюдений, спектр переменной компоненты — падающий к высоким частотам с $\alpha = -0.17$. Результаты полного исследования данного источника будут опубликованы в следующей статье.

3.2.3. J0530+1331, HPQ, z = 2.07

Блазар J0530+1334 регулярно наблюдался в Радиообсерватории Мичиганского университета (США) на частотах 4.8, 8.0 и 14.5 ГГц [10]. С 1980 по 2012 гг. долговременная кривая блеска показывает ряд вспышек с амплитудой, растущей к высоким частотам. Самая большая вспышка наблюдалась в 1996 г., плотность потока на 14.5 ГГц достигла 10 Ян. Долговременная переменность источника в 1981–2013 гг. зарегистрирована на частотах от 4.8 до 36.8 ГГц, ссылки на работы по исследованию гамма- и рентгеновского излучения можно найти в статье [11].

В 2015–2017 гг. источник находится в минимуме активности, плотность потока на 21.7 ГГц не превышает 1 Ян. Интегральный спектр источника близок к плоскому, $\alpha = [-0.1; -0.027]$ (рис. 2). В 2015 г. на частотах 4.7, 8.2 и 11.2 ГГц обнаружена быстрая переменность плотности потока, кривая блеска содержит квазипериодическую компоненту с характерным временем 21 день. Спектр переменной составляющей — падающий к высоким частотам со спектральным индексом $\alpha = -0.76$. Блазар J0530+1334 — один из самых известных и наблюдаемых источников, но переменность на малых масштабах времени не исследовалась, поэтому мы сразу опубликовали данные 2015 г. [4].

В 2016 г. также регистрируется значительная переменность плотности потока источника на частотах 2.27, 4.7, 8.2 и 11.2 ГГц. Кривая блеска на этих частотах в сете 2016 г. приведена на рис. 5a, а на рис. 5b и 5c — соответствующие структурная и автокорреляционная функции. Кривые блеска на

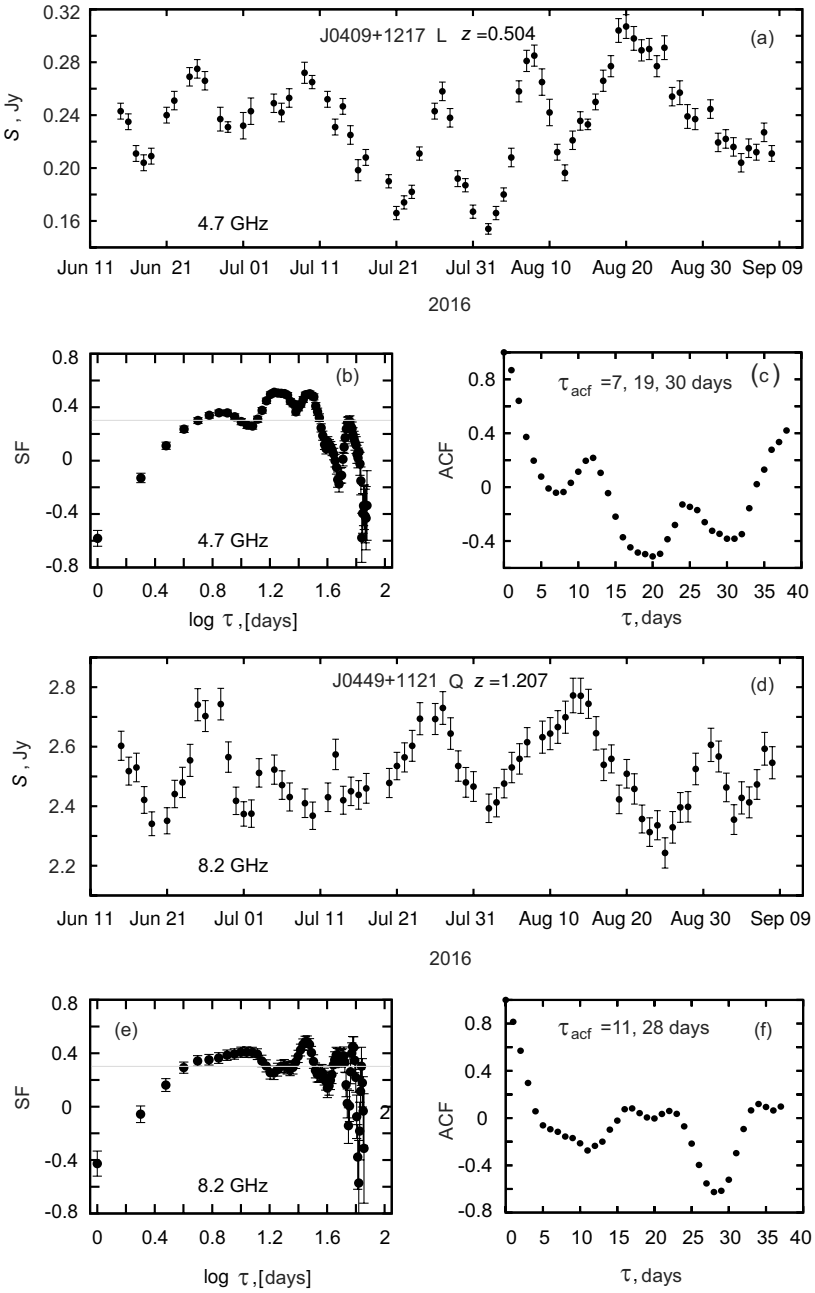

Рис. 4. (a)–(c) Кривая блеска, структурная и автокорреляционная функции объекта типа BL Lac J0449+1217 на частоте 4.8 ГГц; (d)–(f) — то же для квазара J0449+1121 на частоте 8.2 ГГц в 2016 г.

всех частотах показывают значительную корреляцию, характерное время — 15–16 дней. На 8.2 ГГц структурная функция показывает два максимума, 16 и 23 дня, что, возможно, связано с плоской частью второго минимума. Спектр переменной составляющей аппроксимируется степенной функцией с $\alpha = -1.0$ (рис. 3а). Падающий к высоким частотам спектр указывает на основную причину переменности — рассеяние на неоднородностях межзвездной среды.

В 2017 г. переменность, удовлетворяющая принятому критерию, обнаружена только на 2.27 ГГц; характерные времена $\tau_{\rm acf} = 10$ и 27 дней; индекс модуляции не превышает $m = 0.09$. На более высоких частотах переменность существует, но ее амплитуда значительно ниже принятого критерия значимости.

3.2.4. J0700+1709

Источник присутствует во всех основных каталогах на частотах от 0.365 до 43 ГГц. В оптическом диапазоне до $21^{\rm m}$ не отождествлен. Исследования

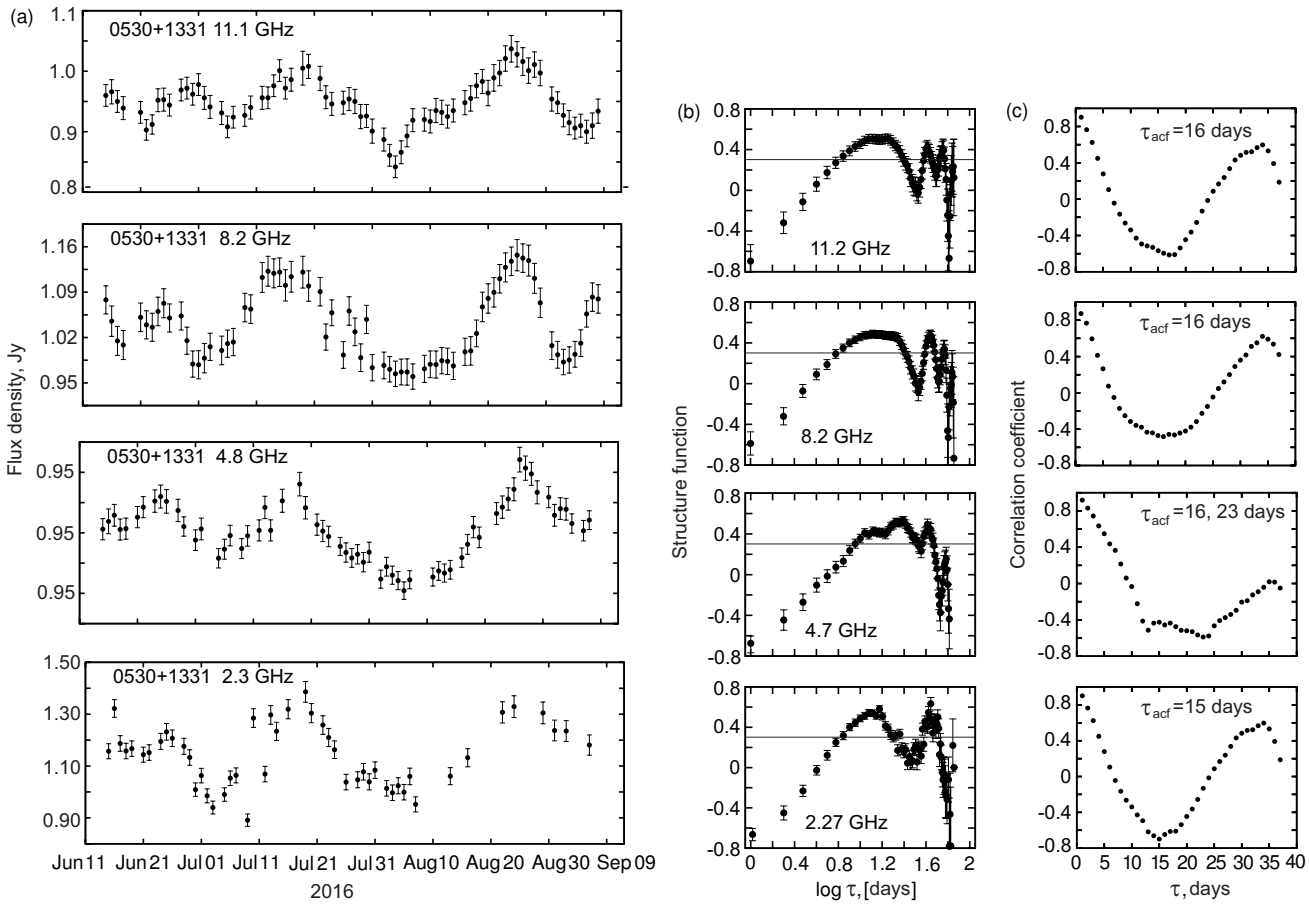

Рис. 5. Кривые блеска блазара J0530+1331 на частотах 2.27, 4.7, 8.2 и 11.2 ГГц в наблюдениях 2016 г. и соответствующие структурные и автокорреляционные функции.

переменности плотности потока в радиодиапазоне не проводились.

Интегральный спектр в 2015 г. — падающий к высоким частотам с индексом $\alpha = -0.25$; в 2016 г. получен спектр с максимумом на 3 ГГц; в 2017 г. максимум спектра находится на частоте ниже 2.27 ГГц.

В 2015 г. переменность обнаружена на частотах 4.7, 8.2 и 11.2 ГГц. На рис. 6 приведены кривые блеска, структурные и автокорреляционные функции. Кривые блеска на 11.2 и 8.2 ГГц коррелированы, присутствуют два квазипериодических процесса с характерными временами 10 и 28 дней, на 4.7 ГГц — один процесс с $\tau = 15^{\rm d}$. Спектр переменной составляющей — падающий к высоким частотам с $\alpha = -0.1$ (рис. 3b).

В 2016 г. две с квазипериодических компоненты с характерными временами 10 и 27 дней обнаружены только на частоте 4.7 ГГц; на остальных частотах переменность присутствует, но ее амплитуда значительно ниже принятого уровня значимости. В 2017 г. значимая переменность наблюдается только на низких частотах 4.7 и 2.27 ГГц. Кривые блеска, структурные и автокорреляционные функции приведены на рис. 7. Кроме основного квазипериодического процесса с характерным временем $\tau_{\rm acf} = 25$ дней, присутствуют процессы со значительно меньшей амплитудой с $\tau_{\rm acf} = 8$ и 14 дней. Спектральный индекс переменной компоненты — падающий к высоким частотам, $\alpha = -0.47$.

3.2.5. J1504+1029, Q, z = 1.839

Известный блазар, излучает во всем электромагнитном диапазоне от гамма до радио. Две большие вспышки блазара наблюдались в Радиообсерватории Мичиганского университета на частотах 4.8, 8.0 и 14.5 ГГц в середине 1985 г. и в начале 2009 г. [10]. Мы начали наблюдения блазара J1504+1029 в 2000 г. в рамках программы поиска быстрой переменности полной выборки 10°–12°.5. На долговременной кривой блеска зарегистрировали вспышку 2009 г.; в 2014 г. началась новая вспышка, максимум которой пришелся на 2017 г. Источник наблюдался в одиннадцати длинных сетах, в девяти из них обнаружена значимая переменность с характерными временами от 6 до 30 дней. В 2015–2017 гг. наблюдается растущая

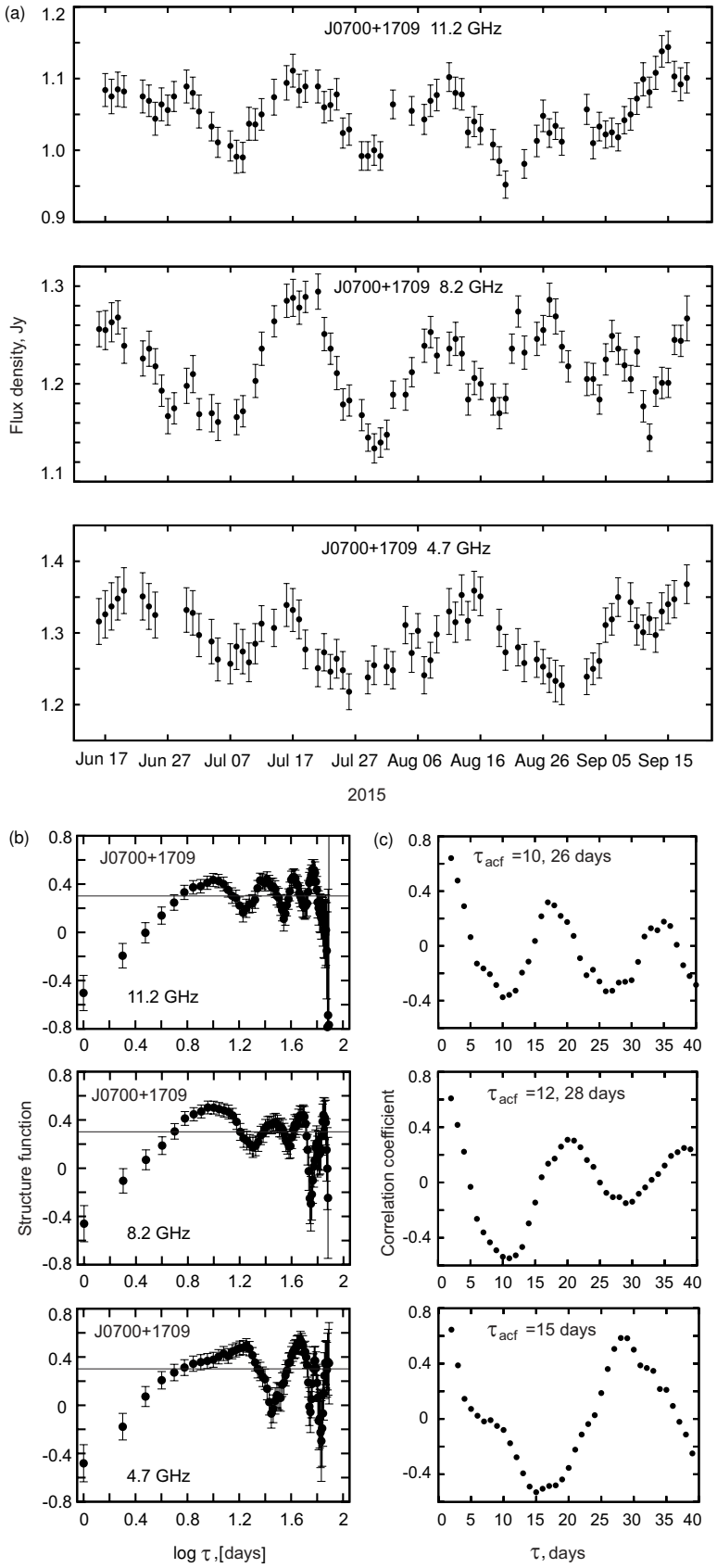

Рис. 6. Кривые блеска источника J0700+1709 на частотах 4.7, 8.2 и 11.2 ГГц в наблюдениях 2015 г. и соответствующие структурные и автокорреляционные функции.

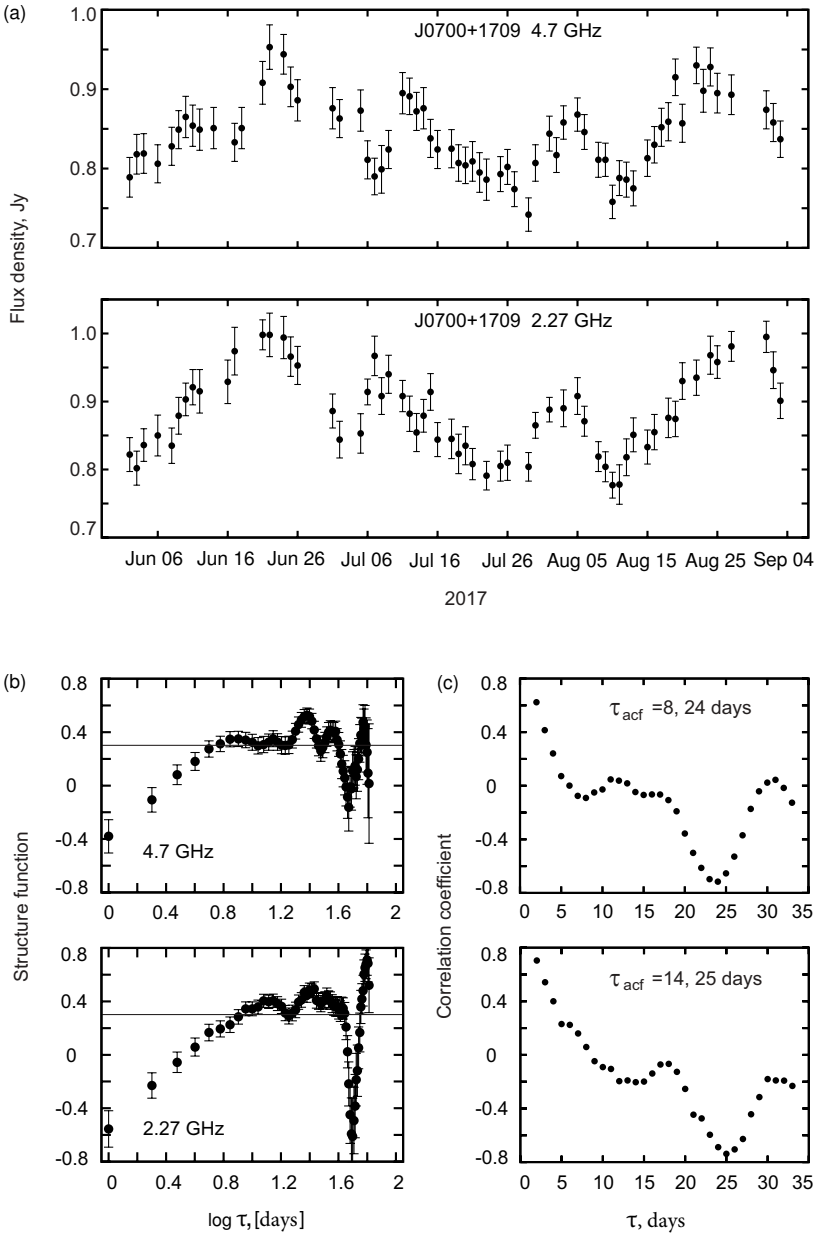

Рис. 7. Кривая блеска, структурная и автокорреляционная функции источника J0700+1709 на частотах 2.27 и 4.7 ГГц в наблюдениях 2017 г.

ветвь новой вспышки. Минимум плотности потока долговременной кривой блеска на 21.7 ГГц, $S = 0.68 \pm 0.03$ Ян, зарегистрирован в сентябре 2013 г., максимум, $S = 4.33 \pm 0.036$ Ян, — в конце января 2018 г. В 2015–2017 гг. у источника наблюдается циклическая переменность с $\tau = 8$–25 дней.

Для примера мы приводим кривую блеска (рис. 8a), структурные и автокорреляционные функции (рис. 8b и 8c), полученные в 2015 г. на частотах 8.2, 11.2 и 21.7 ГГц. Все кривые блеска содержат по две циклические компоненты с большой амплитудой и характерными временами 10–30 дней. Спектр переменной составляющей — растущий со спектральным индексом $\alpha = 1.5$ (рис. 3c), что указывает на процессы в самом источнике как на возможную причину переменности. В этом случае наиболее вероятная модель обнаруженной переменности — распространение ударной волны в джете радиоисточника [12, 13]. Для этой модели типична временна́я шкала от недели до нескольких месяцев, а также запаздывание максимума по мере уменьшения частоты. Кроме того, на этот механизм указывает растущий спектр переменной компоненты и динамика изменения

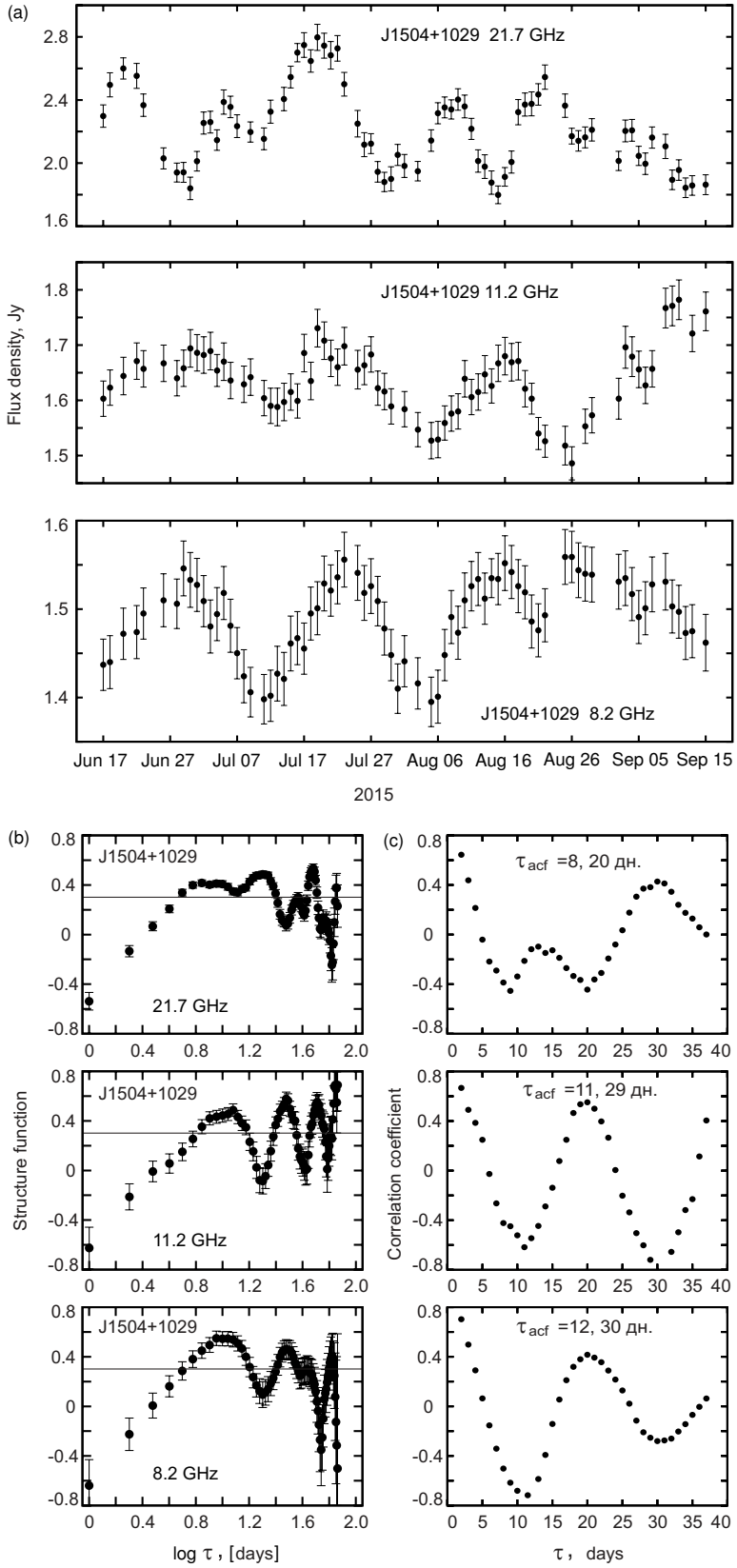

Рис. 8. Кривые блеска блазара J1504+1029 на частотах 8.2 11.2 и 21.7 ГГц в наблюдениях 2015 г. и соответствующие структурные и автокорреляционные функции.

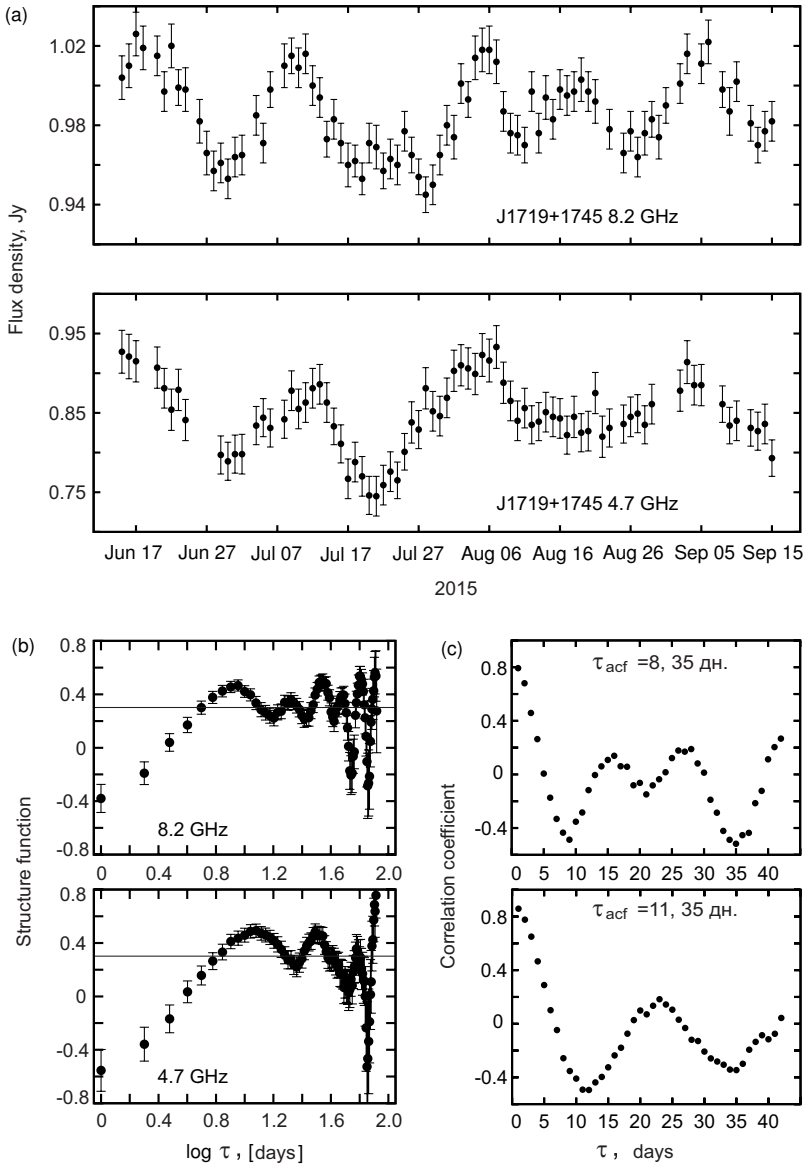

Рис. 9. Кривая блеска, структурная и автокорреляционная функции источника J1719+1745 на частотах 4.7 и 8.2 ГГц в наблюдениях 2015 г.

интегрального спектра — смещение максимума в низкочастотную область после прохождения максимума плотности потока, которое мы наблюдали в течение сета 2015 г. В этом случае видимые линейные размеры излучающей области $R < c\,\tau_{\rm acf}$ — 2000 а.е., угловые — 1.5 микросекунд дуги, яркостная температура — $T_b > 10^{14}$ K, Доплер-фактор $D > 30$ на частоте 11.2 ГГц, угол между джетом и направлением на наблюдателя не превышает 3°.

В излучении источника наблюдается также значительная внутрисуточная переменность (IDV), что подтверждает малые размеры излучающих областей независимо от природы IDV.

Статья с результатами детального исследования переменности источника в 2000–2017 гг. находится в печати.

3.2.6. J1719+1745 (OT 129), HPL

Все три интегральных спектра источника — растущие к высоким частотам (рис. 2); спектры 2015 и 2016 г. — с максимумом на частотах 20 и 15 ГГц; спектр 2017 г. — растущий с индексом $\alpha = +0.3$. На кривой блеска, полученной в Радиообсерватории Мичиганского университета с 1980 по 2010 гг., наблюдаются вспышки с амплитудой от 0.5 до 1 Ян в среднем через каждые 5 лет. По-видимому, с 2017 г. развивается очередная вспышка. В январе

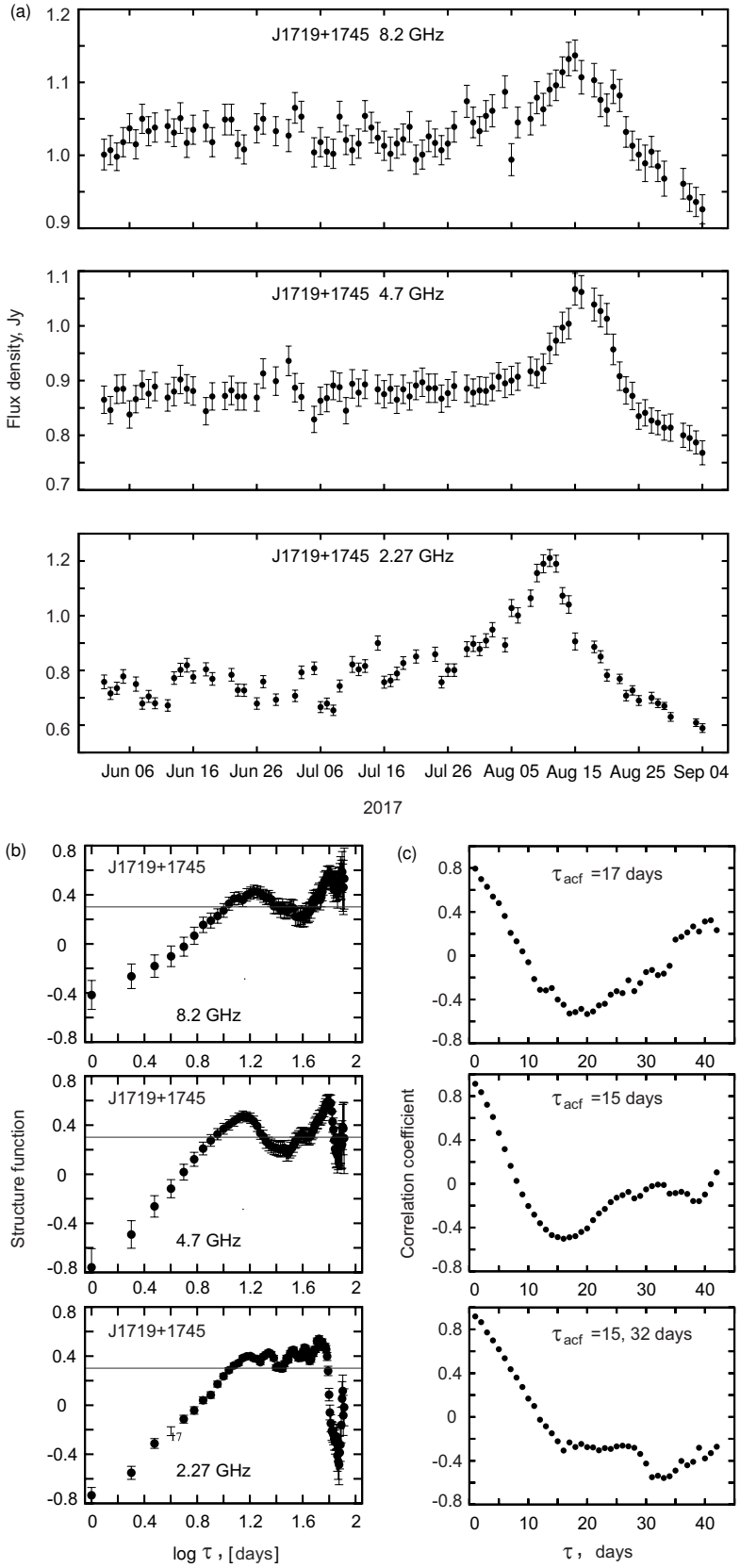

Рис. 10. Кривая блеска, структурная и автокорреляционная функции источника J1719+1745 на частотах 2.27, 4.7 и 8.2 ГГц в наблюдениях 2017 г.

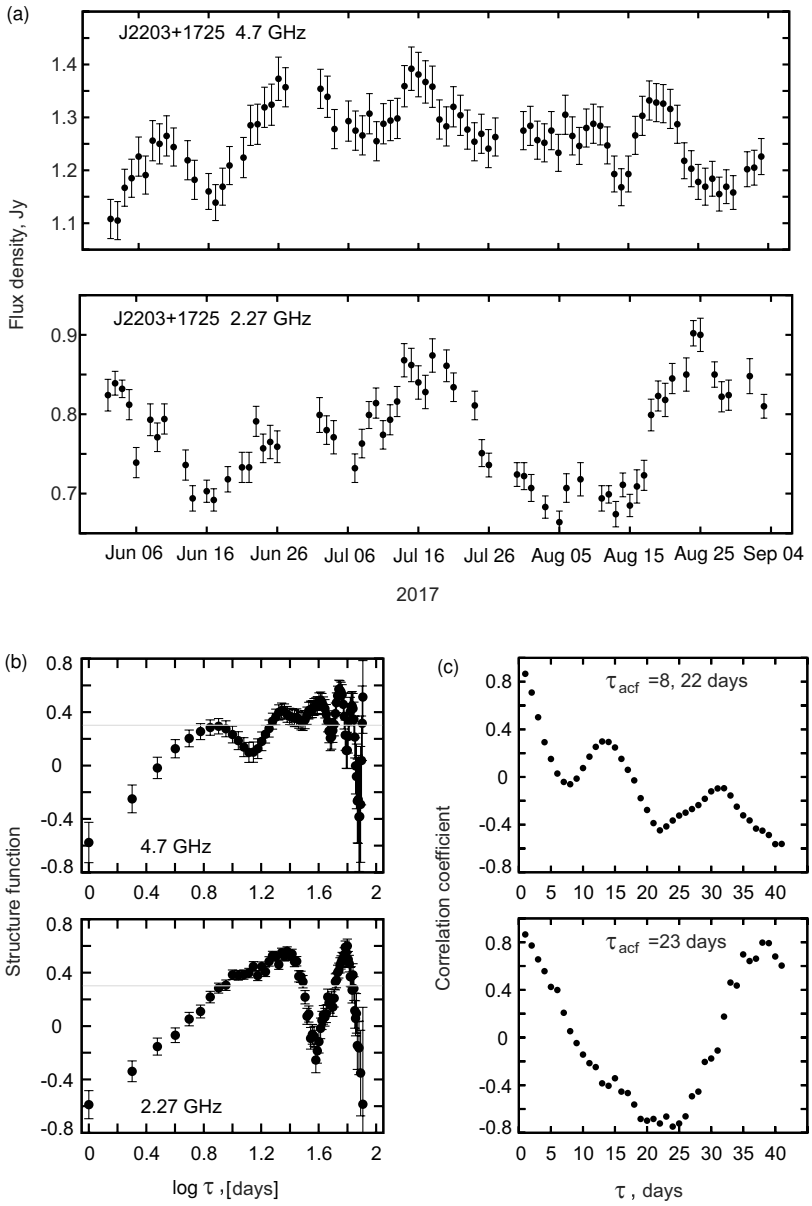

Рис. 11. Кривая блеска, структурная и автокорреляционная функции источника J2203+1725 на частотах 2.27 и 4.7 ГГц в наблюдениях 2017 г.

2018 г. плотность потока на частоте 21.7 ГГц выросла до 1.5 Ян.

В 2015 г. переменность, удовлетворяющая принятым критериям, обнаружена на частотах 8.2 и 4.7 ГГц (рис. 9). На кривой блеска выявляются две квазипериодические компоненты практически одинаковой амплитуды с характерными временами соответственно $\tau_{\rm acf} = 8$ и 35 дней и $\tau_{\rm acf} = 11$ и 35 дней. Спектр переменной составляющей — падающий к высоким частотам с индексом $\alpha_{\rm var} = -1.1$. На частоте 2.27 ГГц, где переменность должна быть самой большой, наблюдения не проводились.

В 2016 г. ни на одной частоте не обнаружена значимая переменность.

В 2017 г. на частотах 8.2, 4.7 и 2.27 ГГц мы наблюдали вспышку с характерным временем 15–17 дней (рис. 10). Амплитуда вспышки увеличивалась к низким частотам (на 2.27 ГГц плотность потока возросла в 1.8 раз). Структурная функция по первому минимуму показывает характерное время 15–17 дней на всех частотах (рис. 10). На 2.27 ГГц наблюдается циклическая компонента с $\tau_{\rm acf} = 30$ дней. Спектр переменной составляющей — падающий к высоким частотам с индексом $\alpha = -0.8$ (рис. 3d). Вид спектра и отсутствие запаздывания на более низких частотах

приводят к выводу о том, что вспышка обусловлена межзвездной средой.

3.2.7. J2203+1725, Q, $z = 1.076$

Интегральные спектры квазара в 2015–2017 гг. приведены на рис. 2. Все спектры — растущие к высоким частотам.

В 2015 г. только на 4.7 ГГц обнаружена значимая переменность с индексом модуляции $m = 0.18$ с одной квазипериодической составляющей с $\tau \approx 15$ дней.

В 2016 г. такая же переменность с характерным временем 18 дней и индексом модуляции $m = 0.22$ значима только на 4.7 ГГц.

В 2017 г. квазипериодическая переменность обнаружена на 2.27 и 4.7 ГГц. На рис. 11 приведена кривая блеска, структурная и автокорреляционная функции. Основное характерное время переменности — 22 дня; на 4.7 ГГц дополнительно присутствует компонента с $\tau = 8$ дней меньшей амплитуды. Спектр стандарта переменной составляющей — падающий к высоким частотам с индексом $\alpha_{\rm var} = -0.8$.

Кроме приведенных источников, в 2015–2017 гг. исследовался также источник J1603+1105. По нашим наблюдениям с 2000 г. до 2008 г. его плотность потока не превышала 200 мЯн, а спектр был близок к плоскому. С 2008 г. источник вошел в активную фазу, наблюдались несколько вспышек, следующих одна за другой, максимальная плотность потока первой вспышки составила 0.7 Ян. Наблюдения недельной переменности источника проводились в длинных сетах 2011, 2012, 2015 и 2016 гг. Результаты исследования переменности источника, включая 2015 и 2016 гг., опубликованы в работе [14].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Суммируем основные результаты наблюдений на РАТАН-600 выборки сильных источников ($S > 0.5$ Ян) с плоскими спектрами из каталога JVAS в области склонений $10\overset{\circ}{.}5$–18° (J2000) в 2015, 2016 и 2017 гг. на частотах 2.3, 4.7, 8.2, 11.2 и 21.7 ГГц:

- В 2015–2017 гг. для 45 исследованных источников получены интегральные спектры в диапазоне частот 2.3–21.7 ГГц. Отобраны кандидаты для дальнейших наблюдений долговременной переменности.
- У восьми источников наблюдалась недельная переменность, у четырех из них она обнаружена впервые. Основной тип переменности — одна или несколько квазипериодических компонент. У источника J1719+1745 на трех частотах наблюдались вспышки длительностью 20–25 дней. Характерные времена переменности находятся в пределах 7–30 дней. Только у одного источника, J1504+1029, спектр переменной компоненты растущий, наблюдается запаздывание максимумов на низких частотах; переменность, вероятнее всего, вызвана процессами внутри источника. Для этого объекта при характерном времени 10 дней видимые линейные размеры излучающей области $R < c\,\tau_{\rm acf}$ — 2000 а.е., угловые — 1.5 микросекунд дуги, яркостная температура — $T_b > 10^{14}$ K, Доплер-фактор $D > 30$ на частоте 11.2 ГГц. Спектры переменных компонент остальных источников — падающие к высоким частотам, их переменность обусловлена рассеянием на неоднородностях межзвездной среды.
- Наличие быстрой переменности в исследованной нами выборке (сильные источники с плоскими спектрами из каталога JVAS), не зависит от фазы долговременной активности и красного смещения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдения на РАТАН-600 были проведены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Работа также поддержана субсидией, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых образовательных центров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. S. Heeschen, Astron. J. **89**, 1111 (1984).
2. A. G. Gorshkov, V. K. Konnikova, and M. G. Mingaliev, Astronomy Reports **54**, 908 (2010).
3. A. G. Gorshkov, V. K. Konnikova, and M. G. Mingaliev, Astronomy Reports **57**, 344 (2013).
4. A. G. Gorshkov, A. V. Ipatov, I. A. Ipatova, et al., Astronomy Letters **42**, 506 (2016).
5. A. G. Gorshkov, A. V. Ipatov, I. A. Ipatova, et al., Astronomy Reports **62**, 183 (2018).
6. I. W. A. Browne, P. N. Wilkinson, A. R. Patnaik, and J. M. Wrobel, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **293**, 257 (1998).
7. M.-P. Véron-Cetty and P. Véron, Astron. and Astrophys. **518**, A10 (2010).
8. A. G. Gorshkov, V. K. Konnikova, and M. G. Mingaliev, Astronomy Reports **47**, 903 (2003).
9. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 118 (2005).
10. `https://dept.astro.lsa.umich.edu/obs/radiotel`.

11. A. E. Vol'vach, A. M. Kutkin, M. G. Larionov, et al., Astronomy Reports **58**, 71 (2014).
12. R. D. Blandford and A. Königl, Astrophys. J. **232**, 34 (1979).
13. A. P. Marscher and W. K. Gear, Astrophys. J. **298**, 114 (1985).
14. V. K. Konnikova, M. G. Mingaliev, and A. K. Erkenov, Astrophysical Bulletin **72**, 224 (2017).

Spectra and Variability of a Sample of JVAS Sources

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

We present the results of RATAN-600 observations of a sample of strong ($S > 0.5$ Jy) flat-spectrum sources from the JVAS catalog at $10\overset{\circ}{.}5$–18° (J2000) declinations in 2015, 2016, and 2017 at the frequencies of 2.3, 4.7, 8.2, 11.2, and 21.7 GHz. We have obtained spectra of all 45 sources and isolated sources with significant variations. Four sources were found for the first time to have variations with typical time scales of 8 to 35 days. Spectra of the variable components have also been obtained.

Keywords: *radio continuum: general—radio continuum: ISM*