

Российская академия наук
Институт прикладной астрономии

Сообщения ИПА РАН

№ 158

Т. Б. Пятунина, Д. К. Габузда, С. Г. Марченко-Эрштад

**Эволюционные закономерности в вариациях потоков,
спектров и структуры избранных блазаров**

Санкт-Петербург
2003

Т. В. Пятунина, Д. К. Габузда, С. Г. Марченко-Эрштад. Эволюционные закономерности в вариациях потоков, спектров и структуры избранных блазаров.

Ключевые слова: Галактики, квазары, переменность, наблюдения.

Представлены результаты исследований переменности блазаров по данным РСДБ наблюдений на частотах 8 и 43 ГГц, а также мониторинга в диапазоне (4.8–37) ГГц. Анализ временных рядов избранных блазаров обнаруживает квази-периодические вариации потоков с характерными временами от 1 года до 13 лет. Эволюция структуры блазаров свидетельствует о том, что коротко-периодические вариации потоков с масштабами (1–4) года обусловлены эволюцией джета и могут быть объяснены, например, эволюцией отдельных сгустков, прецессией джета, либо развитием внутри джета системы ударных волн, создающей последовательные разрежения и сжатия. Вариации с характерными временами от 4 лет и более, вероятно, связаны с глобальной эволюцией источника, а в некоторых случаях, с цикличностью его активности. Обсуждается типовой сценарий цикла активности, построенный на основании комплексного анализа вариаций потоков, спектров и структуры этих блазаров.

T. V. Pyatunina, D. C. Gabuzda, S. G. Marchenko-Jorstad. Evolutionary features in variations of fluxes, spectra and structure of selected blazars.

Keywords: Radiogalaxies, quasars, variability, observations.

Results of VLBI imaging of selected blazars at frequencies 8 and 43 GHz combined with integral flux density monitoring in the frequency range (4.8–37) GHz are discussed. Time series analysis of the blazars reveals quasi-periodic flux variability with time-scales from 1 to 13 years. Evolution of structure of the blazars testifies that variations of flux densities with time-scales from 1 to 4 years are probably connected with evolution of jet and can be explained by evolution of separate blobs, precession of jet or shocks in jet induced by pressure imbalance with external medium. Variations with time-scales from 4 to 13 years, are probably connected with global evolution of the sources and quasi-periodicity of their activity. A probable activity script is proposed on the base of complex analysis of fluxes, spectra and structure variations of the blazars.

Сообщения Института прикладной астрономии РАН № 158 – Санкт-Петербург, 2003. – 29 с.

Содержание

1. Введение	4
2. Вариации интегральных потоков	7
2.1. Анализ временных рядов	8
2.2. Частотное запаздывание всплесков	11
2.3. Эволюция спектров	12
3. Эволюция структуры по данным РСДБ-наблюдений	13
3.1. 0059+581	13
3.2. 0133+476	16
3.3. 0202+149	19
4. Заключение	20
4.1. Вероятный сценарий типового цикла активности.	21
4.1.1. “Ядерная” фаза активности	22
4.1.2. Развитие активности в джете	22
4.2. Причины цикличности	22
4.3. Перспективы	23
Список литературы	25

1. Введение

Переменность активных галактических ядер представляет собой исключительно сложное и многообразное явление. Уже одно то, что она наблюдается во всем доступном диапазоне электромагнитного спектра от гамма до радио и на характерных масштабах от часов до десятков лет (Вагнер [1]), свидетельствует о множественности явлений, отражающихся в этой переменности, начиная с эффектов мерцания на неоднородностях межзвездной и межгалактической среды, а также развития локальных неустойчивостей в джете и аккреционном диске и кончая эффектами глобальной эволюции источников. Настоящая работа ставит своей целью выделение тех явлений в активности избранных блазаров, которые могут быть связаны с их крупномасштабной эволюцией от момента зарождения первичного возмущения в недрах “центральной машины”, до заглухания сопровождающих его вторичных процессов в джете [2]. Теоретические основы такого анализа в настоящее время достаточно разработаны (см. обзор Маршера [3] и ссылки, приведенные ниже). С другой стороны, две с половиной декады регулярного мониторинга обширной выборки источников в диапазоне частот от 4.8 до 37 ГГц, который проводится в Радиоастрономической обсерватории Мичиганского университета (США) [4] и Радиоастрономической обсерватории в Метсахови (Финляндия) [5] совместно с данными РСДБ-наблюдений предоставляют наблюдательную базу для такой попытки.

В оптическом диапазоне, где ряды наблюдений имеют наибольшую длительность, уже к концу 80-х годов в исторической кривой блеска источника OJ287, включающей данные с 1890, была обнаружена периодическая составляющая с характерным временем около 12 лет. Периодические составляющие были найдены также в оптическом излучении других источников (см. табл. 1).

Убедительным подтверждением двенадцатилетней периодичности OJ287 явилось обнаружение в 1994 г. всплеска, предсказанного на основе исторической кривой блеска (Силлания и др. [16], Пурсимо и др. [17], Валтаоя и др. [24]).

На основе баз данных Радиоастрономической обсерватории Мичиганского университета (США) [4] и Радиоастрономической обсерватории в Метсахови (Финляндия) [5] неоднократно выполнялся анализ кривых блеска методами структурных функции, а в последнее время вейвлет-анализа (Хьюдж и др. [25]; Лайнела и др. [26]; Хьюдж и др. [27];). Особняком стоят работы Абрахам и др. [28, 29], а также Ромеро и др. [30], авторы которых стремились оценить периоды прецессии джетов в источниках 3C 273 [29] и 3C 279 [28, 30] из анализа позиционных углов и скоростей компонент джетов в этих источниках.

Поиск связей между переменностью в оптике и радио, в том числе связь оптических всплесков с выбросом новых сверхсветовых компонент, имеет не менее сложную предысторию. Пионерские работы в этой области были выполнены Бабаджаняном и Белоконь [31] по источнику 3C 345, позднее такие связи были обнаружены и в ряде других источников (см. табл. 2).

Таблица 1. Периодичность в вариациях блеска блазаров

Источник	Период	Диапазон	Ссылка
3C 345	10, 22	оптика	Вэбб и др. [6], Цхан и др. [7, 8]
3C 273	13	оптика	Белоконь, Бабаджанянц [9, 10]
3C 120	15	оптика	Гаген-Торн и др. [11]
BL Lac	7.8	оптика	Гаген-Торн и др. [11]
OJ 287	14	оптика	Фан и др. [12]
	12	оптика	Силланпяя и др. [13]
	11		Гаген-Торн и др. [11]
	11.9, 6		Марченко и др. [15]
3C 279	12, 6	оптика+радио	Силланпяя и др. [16], Пурсимо и др. [17]
	7.1	ближний ИК	Фан и др. [18]
	7.1	ближний ИК	Фан и др. [18]
ON 231	3.8	оптика	Белоконь и др. [19]
2155-304	7, 4.2	оптика	Фан и др. [20]
0235+164	5.8	оптика+радио	Рой и др. [21]
0202+149	4, 2	радио	Пятунина и др. [22]
0133+476	12, 2.6	радио	Пятунина и др. [23]

Совместный анализ вариаций интегральных потоков и спектров, а также структур на миллисекундных масштабах, выполненный нами для блазаров 0202+149 и 0133+476, позволил не только обнаружить в этих источниках периодичность в вариациях радиоизлучения, но также выделить из общей картины переменности всплески, связанные с возникновением первичного возмущения в ядре, и всплески, вызванные распространением этого возмущения

Таблица 2. Связь вспышек в оптике с рождением сверхсветовых компонент

Источник	Ссылка
3C 345	Бабаджанянц и Белоконь [31]
3C 120	Бабаджанянц и Белоконь [32]
3C 273	Белоконь [9], Бабаджанянц и Белоконь [10]
0528+134	Бритцен и др. [33]
3C 84	Нестеров и др. [34]
0420-014	Вагнер и др. [35], Бритцен и др. [36]
NRAO 530	Боуэр и др. [37]
1611+343	Пинер и др. [38]
3C 273	Кричбаум и др. [39]
0836+710	Отгербейн и др. [40]
2255-282	Торникоски и др. [41]

по джету [22, 23]. Действительно, возникновение сильной ударной волны в основании джета должно сопровождаться мощной вспышкой радиоизлучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, которая по мере уменьшения оптической толщины возмущенной области будет перемещается на более длинные волны (Маршер и Гир [42]; Стивенс и др. [43]).

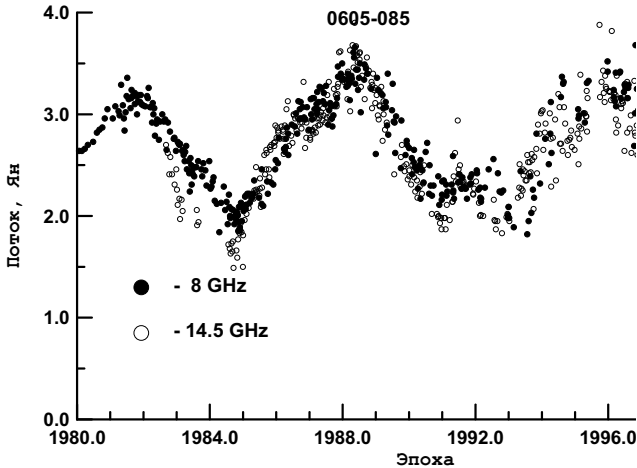


Рис. 1. **0605-085** Кривые блеска на частотах 8 и 14.5 ГГц по данным Радио Обсерватории Мичиганского университета.

Как следствие, всплески, возникающие в оптически-толстом ядре, должны обнаруживать частотно-зависимое запаздывание, в то время как всплески, связанные с оптически-тонким джетом, будут происходить на разных волнах синхронно, что и подтверждается сопоставлением кривых блеска с эволюцией компактной структуры источников. Разделение всплесков на ядерные всплески и всплески радиоизлучения в джете было выполнено также Цхоу и др. [44] для источника 0420-014. Возникновение нового возмущения в ядре источника и его эволюция могут сопровождаться также значительными и быстрыми вариациями интенсивности поляризованного излучения и поворотом позиционного угла, как показали Габузда и др. [45] и Гомец и др. [46]. Исследование кривых блеска по данным Мичиганской обсерватории также показывает, что всплески поляризованного излучения зачастую предшествуют ядерным всплескам, наблюдаемым в полной интенсивности.

Наблюдаемые в вариациях оптического и радио-излучения периодические или скорее квази-периодические составляющие могут иметь различную природу. Например, распространение возмущения по спирально искривленному джету будет сопровождаться квази-периодическими вариациями потока вследствие чисто геометрического эффекта — изменения угла зрения (Каменцинд и Крокенбергер [47]; Вагнер и др. [35]; Бритцен и др. [36]; Пятунина и др. [23]). Распространение возмущения по джету будет приводить также к нарушению

равновесия между джетом и окружающей средой и может сопровождаться чередованием квази-периодических сжатий и разрежений, наблюдаемых как кратковременные квази-периодические вспышки радиоизлучения (Гомец и др. [48]). Наконец, наиболее фундаментальная и представляющая наибольший интерес периодичность повторения циклов активности может быть связана с наличием в ядре родительской галактики двойной черной дыры [13,14]. Квази-периодические возмущения при этом могут быть вызваны либо усилением аккреции на первичную черную дыру при прохождении меньшей компоненты через периастрон (Силланпяя и др. [13]), либо возмущением аккреционного диска первичной дыры при пересечении его вторичной дырой (Лехто и Валтонен [49]; Валтаоя и др. [24]).

Из всего вышесказанного следует, что комплексный анализ вариаций интегрального и поляризованного излучения блазаров, их спектров и структуры на масштабах мсек дуги может дать ключ к обнаружению и пониманию наиболее важных свойств активности галактических ядер. В данной работе суммируются некоторые результаты, полученные нами в этой области. Во второй части, следующей за настоящим введением, приводятся результаты анализа вариаций интегральных потоков избранных источников на частотах 37, 22, 14.5, 8 и 4.8 ГГц, в том числе оценка характерных масштабов изменчивости, оценка низкочастотного запаздывания отдельных всплесков и эволюции спектров. В третьей части обсуждается эволюция структуры отдельных источников по данным многочастотных РСДБ-наблюдений. В четвертой части обсуждается вероятный сценарий развития активности, а также подводятся итоги и обсуждаются некоторые перспективы дальнейших исследований.

2. Вариации интегральных потоков

Эволюция интегральных потоков источников на частотах (4.8–37) ГГц исследовалась по данным Радиоастрономической обсерватории в Метсахови (Терасранта и др. [5]) и Радиоастрономической обсерватории Мичиганского университета (Аллер и др. [4]). Для наиболее изученных источников эти базы данных охватывают интервал времени около 25 лет. Библиография статистических исследований на основе этих баз довольно обширна, интересующие ссылки можно найти в публикациях Аллер [50] и Терасранта и др. [51]. В цитированных выше работах Хьюджа и др. [25], а также Лайнела и Валтаоя [26] показано, что наблюдаемые кривые блеска, как правило, представляют композицию вариаций на разных временных масштабах: от долговременных трендов (~ 10 лет и более), наблюдаемых в $\sim 85\%$ всех источников, до короткоживущих вариаций ($\sim (1-2)$ года). Мы предприняли попытку выделить из общего числа источников те, в которых наблюдаемые вариации имеют квази-периодический характер на всей кривой блеска (0605-085, рис. 1) или на ее части (0133+476, рис. 2). Из более чем 50 просмотренных нами кривых блеска было выбрано 5 наиболее убедительных. По ним был выполнен численный анализ временных

рядов методом Шустера. Описание метода можно найти в работе Гаген-Торн и др. [11], а его применение к анализу радиоданных Пятунина и др. [22].

0133+476

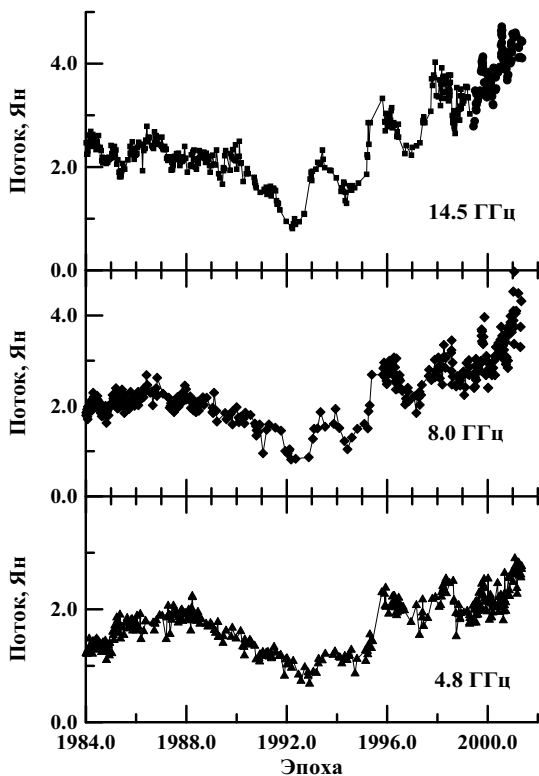


Рис. 2. 0133+476 Кривые блеска на частотах 4.8, 8 и 14.5 ГГц по данным Радио Обсерватории Мичиганского университета.

2.1. Анализ временных рядов

Параметры гармоник, найденных из анализа временных рядов по методу Шустера, для избранных источников приведены в табл. 3. К сожалению, наиболее интересный источник 0059+581 наблюдался более или менее регулярно только после 1998 года и выполнить численный анализ кривой блеска этого источника не представляется возможным, хотя сводная по всем частотам кривая блеска, дополненная значениями полного потока по геодезическим картам за период с 1994 по 1999 гг., обнаруживает цикличность переменности с периодом около 4 лет (см. ниже). Как видно из таблицы, амплитуды гармоник на разных частотах существенно отличаются, отчасти из-за погрешностей определения, а также из-за частотной зависимости самого излучения.

Таблица 3. Параметры гармоник (метод Шустера)

Источник	Частота ГГц	Период год	Амплитуда Ян	Фаза радиан	Примечания	
0133+476	37	13.0	0.96	3.84	l	
		2.6	0.66	1.60	s	
		1.5	0.27	6.02	s	
		0.85	0.24	3.66	s	
	22	13.0	0.96	4.31	l	
		2.4	0.51	2.34	s	
		3.2	0.20	5.67	s	
		0.98	0.17	1.91	s	
	14.5	13.0	0.96	4.31	l	
		2.4	0.33	2.28	s	
		1.5	0.19	0.57	s	
		8.0	13.0	0.68	4.19	l
	8.0	2.4	0.31	2.73	s	
		3.2	0.17	5.76	s	
		1.9	0.15	0.08	s	
		0.98	0.09	2.90	s	
		4.8	13.0	0.58	4.13	l
			2.1	0.20	4.49	s
			5.5	0.13	0.68	s
			0.87	0.06	2.30	s
0202+149	37	12.8	0.74	3.13	t	
		4.6	0.20	2.47	l	
		1.3	0.34	0.04	s	
		0.9	0.18	4.66	s	
	22	12.8	0.68	3.78	t	
		4.6	0.19	3.48	l	
		2.4	0.17	1.00	s	
		1.2	0.15	4.58	s	
	14.5	0.84	0.19	2.32	s	
		12.8	0.44	4.13	t	
		5.8	0.16	2.63	l	
		3.2	0.10	5.79	s	

Таблица 3. Параметры гармоник (метод Шустера, *Продолжение*)

Источник	Частота Гц	Период год	Амплитуда Ян	Фаза радиан	Примечания	
0605-085	8	2.2	0.14	2.01	s	
		1.7	0.10	5.50	s	
		0.86	0.11	2.87	s	
		12.8	0.40	5.01	t	
		5.3	0.16	3.62	l	
		3.0	0.17	5.90	s	
		2.3	0.11	1.88	s	
	4.8	1.7	0.22	4.47	s	
		14.0	0.42	5.44	t	
		11.2	0.10	5.92	t	
		5.1	0.22	4.53	l	
		2.8	0.10	0.60	s	
		2.2	0.13	2.51	s	
	14.5	1.7	0.13	5.93	s	
		20.0	0.13	1.93	t	
		7.5	0.70	4.43	l	
		2.7	0.18	1.05	s	
		8	20.0	0.06	1.92	t
			7.5	0.57	0.61	l
			4.3	0.15	4.33	s
4.8	20.0	0.16	0.38	t		
	7.5	0.38	5.10	l		
	14.5	20.0	0.15	4.32	t	
		6.6	0.35	3.50	l	
		3.6	0.11	5.92	s	
8	40.0	0.48	2.71	t		
	6.6	0.19	6.01	l		
4.8	4.0	0.10	3.09	s		
	40.0	0.48	2.97	t		
	8.0	0.16	3.17	l		
	4.0	0.08	0.62	s		

Непосредственно из кривых блеска видно, что самые высокие гармоники, помеченные в табл. 3 символом “s” и имеющие для исследованных нами источников характерные времена от 1.5 до 3.5 лет, вероятно соответствуют отдельным всплескам и их тонкой структуре. Гармоники с периодами от 4 до 8 лет, помеченные в табл. символом “Г”, обусловлены квази-периодическими вариациями интегрального потока и могут быть связаны, как будет показано ниже, с глобальными циклами развития активности. Наконец вариации с характерными временами (15–20) лет, помеченные в табл. 3 символом “ч”, для выборок с продолжительностью 25 лет являются трендами и в дальнейшем обсуждении опускаются.

2.2. Частотное запаздывание всплесков

Из кривых блеска видно, что, по крайней мере, часть всплесков обнаруживает запаздывание максимума на низких частотах (рис. 3). Оценки этого запаздывания в тех случаях, когда данные на всех частотах достаточно подробны, приведены на рис. 3 и в табл. 4.

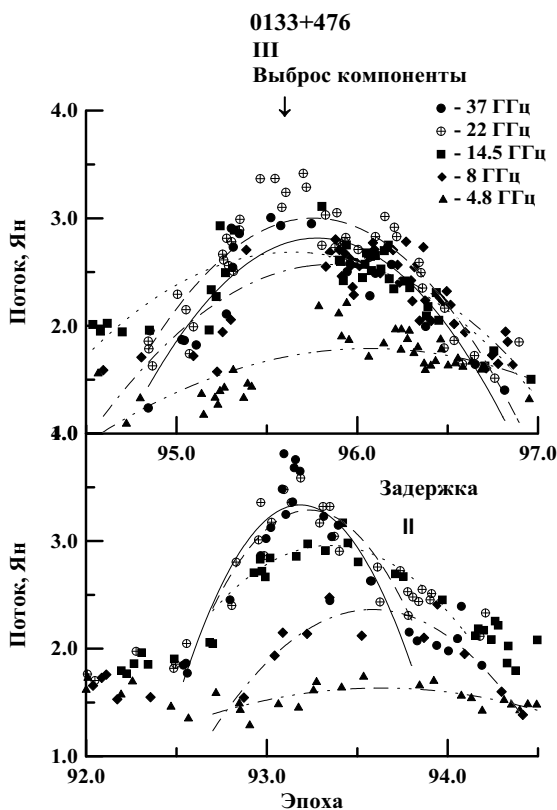


Рис. 3. **0133+476** Частотные зависимости максимумов всплесков 1993 и 1996 гг.

Таблица 4. Низкочастотное запаздывание всплесков

Источник	Эпоха всплеска	Интервал частот ГГц	Запаздывание гг.
0133+476	1993	22 - 37	0.08 ± 0.08
		14.5 - 37	0.22 ± 0.07
		8 - 37	0.38 ± 0.13
		4.8 - 37	0.40 ± 0.25
0202+149	1996		< 0.2
	1991	8 - 37	$\approx 0.7 \pm 0.1$
	1995	8 - 37	$\approx 0.7 \pm 0.1$
	1992	8 - 37	< 0.2
	1996	8 - 37	< 0.2
0605-085	1987	8 - 14.5	0.63 ± 0.28
		4.8 - 14.5	0.74 ± 0.27
	1988	8 - 14.5	0.08 ± 0.26
0945+408	1986	8 - 14.5	0.34 ± 0.30
		4.8 - 14.5	0.86 ± 0.28

Наиболее детальная частотная зависимость запаздывания всплеска для источника 0133+476 показывает, что $\Delta t \propto \nu^{-1.02}$. Как уже отмечалось выше, запаздывание всплеска на низких частотах может быть объяснено высокой оптической толщиной возмущенной области, в которой возникает всплеск, и ее изменением в ходе эволюции. Оценив из эволюции структуры источника скорость распространения возмущения по джету, можно перейти от разности моментов достижения максимума всплеска к разности абсолютных положений ядра, т.е. слоя с оптической толщиной $\tau \geq 1$, на разных частотах. Как показано в работе Лобанова [52], эта величина в свою очередь позволяет оценить ряд важных параметров источника, а именно, светимость, значение магнитного поля и геометрические свойства джета (см. ниже).

2.3. Эволюция спектров

Если, как мы полагаем, низкочастотное запаздывание, наблюдаемое у части всплесков, а также его эволюция со временем могут быть следствием появления в излучении источника спектральных составляющих с высокой частотой перегиба, то подтверждение этому можно найти в эволюции мгновенных спектров. Действительно, сводные спектры, построенные по данным Метсахови и УМРАО для интервалов времени, связанных с такими всплесками, убедительно показывают, что во время всплеска в спектре источника появляется оптически толстая составляющая, частота перегиба которой со временем перемещается на более низкие частоты (рис. 5).

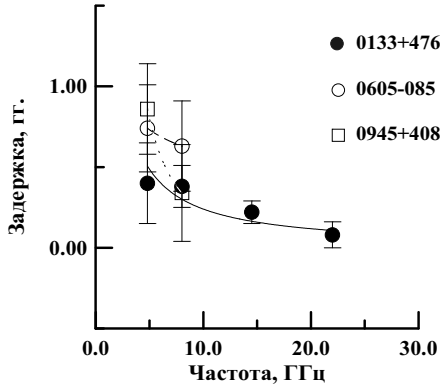


Рис. 4. Частотное запаздывание всплесков.

Если удалить медленно меняющуюся составляющую потока источника 0202+149, то спектр всплесковой компоненты на эпоху 1991.0 имеет показатель спектра в области низких частот близкий к 2 (рис. 6).

3. Эволюция структуры по данным РСДБ-наблюдений

3.1. 0059+581

0059+581 яркий и очень компактный радиоисточник, используемый в геодезических РСДБ-наблюдениях в качестве “точечного” калибратора. Источник расположен на низких галактических широтах и поэтому его красное смещение до недавнего времени не было определено. По нашей просьбе сотрудники САО РАН Афанасьев В. Л., Копылов А. И. и Желенкова О. П. отождествили источник и определили его красное смещение $z = (0.643 \pm 0.002)$. Как уже было сказано выше, регулярные наблюдения этого источника в Метсахови и УМРАО начинаются только с 1998 года, поэтому многочастотная кривая блеска дополнена интегральными значениями потоков по геодезическим картам [53] на частоте 8 ГГц, охватывающим период с июня 1994 г. по август 1999 (~ 30 карт). В мае 2000 г. и в августе 2001 были проведены также многочастотные поляризационные наблюдения на VLBA.

Как видно из рисунка 7, кривая блеска источника обнаруживает квазипериодические всплески с интервалом ~ 2 года. Сопоставление с изменениями структуры источника (рис. 8) показывает, что всплески, связанные с увеличением яркости ядра, и всплески, связанные с эволюцией джета, чередуются. Действительно, с июня 1994 по февраль 1996 источник кроме ядра обнаруживает относительно слабый ($S_{jet}/S_{tot} \leq 0.25$) и быстро эволюционирующий джет. В начале 1996 г. яркость ядра вырастает почти в 2.5 раза и вплоть

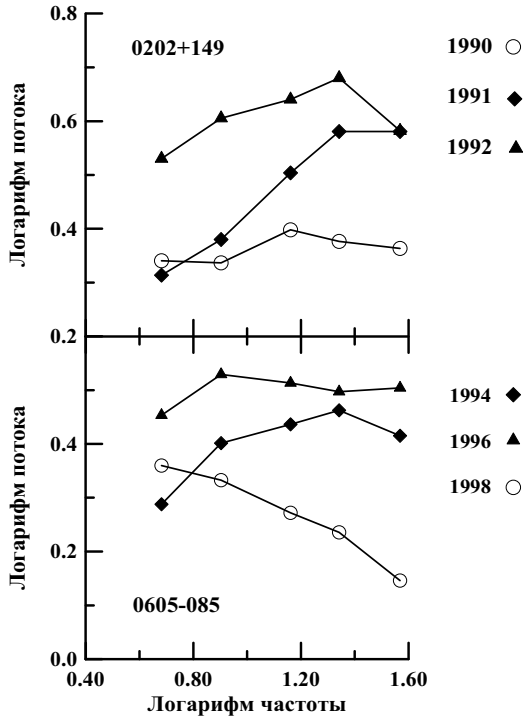


Рис. 5. Эволюция спектров источников во время всплесков, обнаруживающих запаздывание на низких частотах. Эпоха 1990 (источник 0202+149) соответствует моменту перед всплеском, а 1998 (источник 0605-085) после всплеска

до середины 1998 г. испытывает небольшие вариации. Ограниченность динамического диапазона геодезических РСДБ-наблюдений не позволяет оценить яркость джета на этой стадии эволюции. Однако карты, полученные А. Феем на 8 ГГц с помощью VLBA, свидетельствуют о том, что яркость джета скорее всего продолжает медленно убывать. Со второй половины 1998 г. поток от источника падает и на картах появляется джет. Причем позиционный угол этого джета отличается от позиционного угла джета, наблюдавшегося в предыдущем цикле, на $\approx (80 \pm 10)^\circ$, поэтому можно с уверенностью утверждать, что мы наблюдаем именно выброшенные из ядра компоненты, а не подстилающий джет, проявляющийся на картах низкого динамического диапазона при уменьшении яркости ядра. К сожалению, в течение всплеска (1994–1996) гг. удалось оценить только верхний предел угловой скорости компонент джета $\mu \leq 0.13$ мсек дуги/год. Во время всплеска (1998–1999) гг. для угловой скорости перемещения ближайшей к ядру компоненты джета была получена оценка $\mu = (0.14 \pm 0.05)$ мсек дуги/год, что при $q_0 = 0.1$ дает для видимой линейной

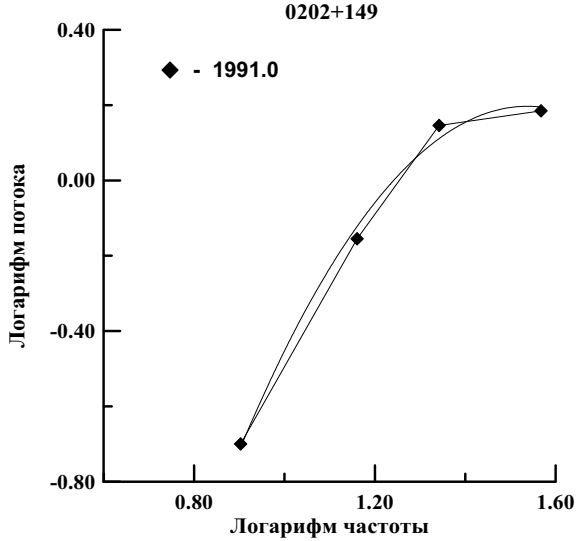


Рис. 6. Спектр источника 0202+149 на эпоху 1991.0 после вычитания медленно меняющейся составляющей

скорости значение $\beta_{app} = (3.3 \pm 1.0)h^{-1}c$ и для приближенного значения эпохи рождения компоненты $T_0 \approx 1996.3$, что совпадает по времени с началом нового всплеска в ядре.

С конца 1999 г. вновь начинается быстрый рост яркости источника, сначала на мм, а затем и на более длинных волнах. В мае 2000 года были проведены наблюдения этого источника на частотах 22, 15, 8 и 5 ГГц с помощью VLBA. К этому времени поток источника на частоте 22 ГГц вырос почти в 4 раза, но еще не достиг своего максимума, а на частотах 4.8 и 8 ГГц остался почти на уровне минимума. Как и следовало ожидать, в эту эпоху яркое точечное ядро наблюдается на фоне слабого подстилающего джета. Важно отметить, что позиционный угол поляризованного излучения на частоте 22 ГГц направлен вдоль джета, т.е. магнитное поле направлено перпендикулярно джету, что может свидетельствовать о рождении в ядре источника новой компоненты. Интересно, что с 2000.38 по 2001.65 направление позиционного угла поляризации еще изменилось на небольшую величину и совпало с направлением выброса компоненты в цикле (1994–1996) гг.

Таким образом, совокупность всех имеющихся данных позволяет предположить, что активность в источнике 0059+581 развивается циклами, длительность которых составляет около 4 лет, причем каждый цикл начинается с возникновения первичного возмущения в ядре (вспышка в ядре) и завершает-

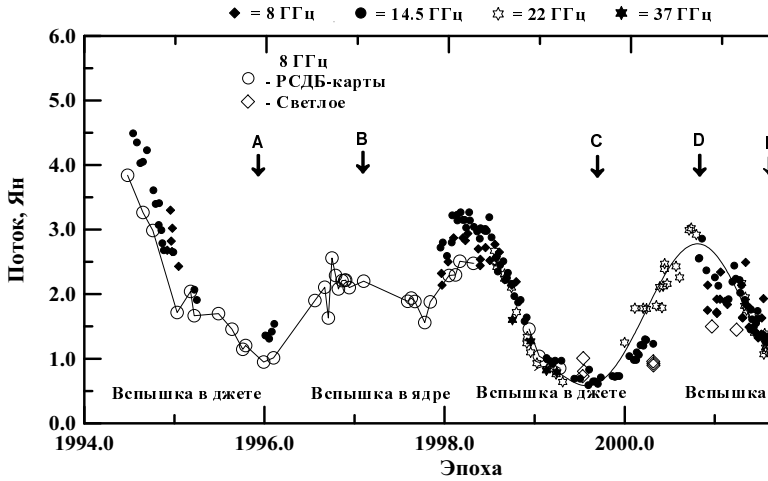


Рис. 7. **0059+581** Сводная кривая блеска 0059+581 по данным УМРАО, Метсахови и обсерватории Светлое, дополненная интегральными потоками по РСДБ-картам на 8 ГГц. Стрелками отмечены эпохи, которым соответствуют приведенные ниже карты.

ся затуханием возмущения по мере его распространения по джету (вспышка в джете). На основании предполагаемой квази-периодичности активности можно ожидать появления новой сверхсветовой компоненты в источнике до конца 2003 г.

3.2. 0133+476

Кварзар 0133+476 ($z=0.859$) имеет, как показали Импей и Тариа [56], необычно высокую степень поляризации в оптике $\sim 21\%$. В этом источнике квази-периодические вариации потока в период с 1990 по 1999 гг. видны непосредственно из кривых блеска на частотах 14.5, 22, 37 ГГц, особенно после вычитания крупно-масштабной составляющей (13.0 ± 1.4) года (рис. 10 Слева). Амплитуда гармоник (2.4 ± 0.2) года, как видно из табл. 3, растет с частотой и наиболее четко выражена в мм-диапазоне.

Геодезические РСДБ-данные на 8 ГГц [23] позволили построить карты с разрешением около 0.6 мсек дуги на 25 эпох с декабря 1995 по март 1999. Приведенные на рис. 9 представительные карты на 4 эпохи убедительно показывают рождение в источнике новой сверхсветовой компоненты. На основе анализа изменений координат новорожденной компоненты джета и ее потока было показано (рис. 10 Справа), что вариации потока компоненты могут быть объяснены вариациями угла зрения при движении компоненты по спиральной траектории. Поскольку изменения яркости компоненты и ядра происходят почти синхронно, можно предположить, что спиральная траектория компоненты

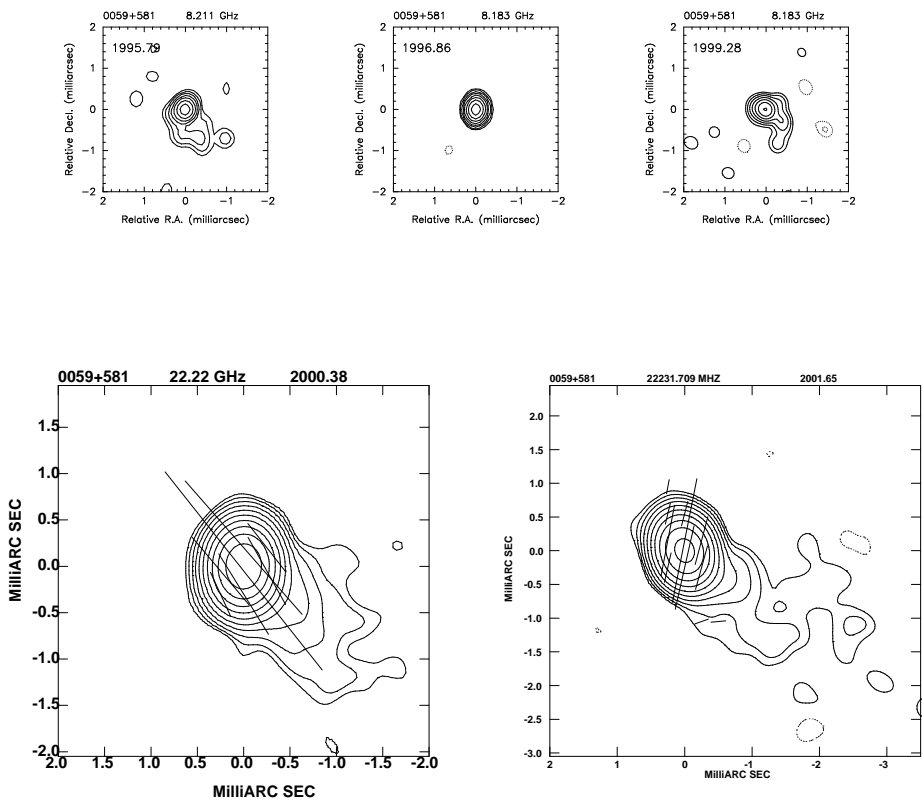


Рис. 8. (Вверху) РСДБ-карты источника 0059+581 на 8 ГГц: (А) $T = 1995.78$, $S = 0.82$ Ян/диагр; (В) $T = 1996.86$, $S = 2.00$ Ян/диагр; (С) $T = 1999.28$, $S = 0.54$ Ян/диагр. (Внизу) РСДБ-карты на 22 ГГц: (А) $T = 2000.38$, $S = 1.74$ Ян/диагр; (В) $T = 2001.65$, $S = 0.881$ Ян/диагр. Прямые линии отмечают позиционные углы поляризованного излучения

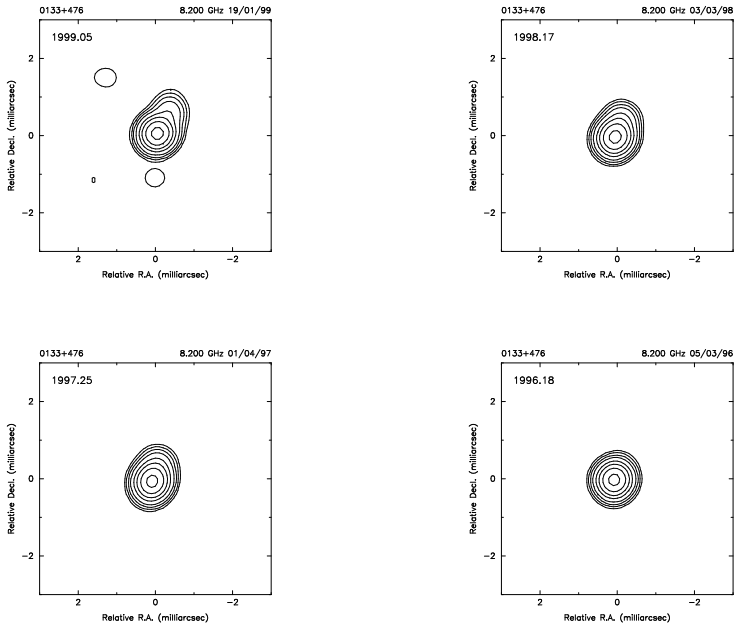


Рис. 9. **0133+476** РСДБ-карты на частоте 8 ГГц. Контурсы составляют 0.5, 1, 2, 4, 10, 20, 40 и 80% от пиковых потоков 1.735 Ян/диагр ($T=1996.18$), 1.352 Ян/диагр ($T=1997.25$), 1.356 Ян/диагр ($T=1998.17$) и 1.955 Ян/диагр ($T=1999.05$). Карты сглажены диаграммой ~ 0.6 мсек дуги.

и вариации потоков как ядра, так и компоненты обусловлены прецессией оси джета с видимым периодом ~ 2.4 года. По мере эволюции источника и удаления компоненты от ядра увеличивается фазовый сдвиг между вариациями ядра и компоненты, замывая периодичность кривой блеска. Кроме того распространение возмущения по джету приводит к развитию вторичных возмущений в самом джете, которые начинают доминировать над геометрическими эффектами. Поэтому квази-периодические вариации потока с 2000 г. сменяются быстрыми и нерегулярными (рис. 2). Угловая скорость компоненты вследствие движения по криволинейной траектории меняется от 0.23 мсек дуги/год до 0.09 мсек дуги/год, а время рождения компоненты оценивается, приблизительно, не позднее 1996.1 Как уже отмечалось выше (см. рис. 3), максимумы квази-гармонической составляющей 2.4 года, предшествующие рождению новой компоненты (всплеск 1993-1994 гг.), обнаруживают частотно-зависимое запаздывание. Максимум 1995.6 г., сопровождающий появление новой компоненты происходит практически одновременно на всех частотах.

Из всего вышесказанного можно сделать заключение, что в **0133+476**, как и в предыдущем источнике **0059+581**, коротко-периодическая составляющая

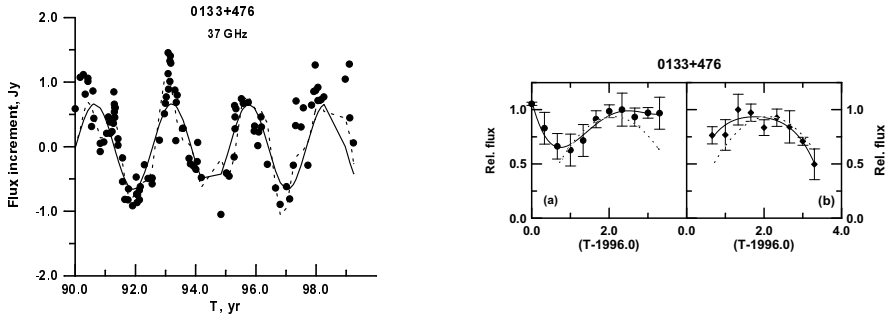


Рис. 10. **0133+476** (Слева) Квази-гармоническая составляющая (2.4 ± 0.2 года на частоте 37 ГГц. (Справа) Вариации относительного потока ядра (а) и новорожденной компоненты джета (б). Сплошная линия — наблюдения, пунктир — модель.

изменений яркости связана с рождением новой компоненты джета. Однако, в отличие от 0059+581, период 2.4 года определяется не квази-периодичностью активности, а прецессией джета. Длительность цикла активности 0133+476 можно оценить лишь очень приблизительно из-за ограниченности данных. Нижний предел этой величины задает наша оценка долго-периодической составляющей $T = (13.0 \pm 1.4)$ года. В связи с этим интересно отметить, что Коуторн и др. [54] обнаружили на карте этого источника, полученной на эпоху ($T=1984.23$), кроме ядра с потоком $S_5 = 0.8$ Ян также слабую компоненту с потоком $S_5 = 0.213$ Ян, расположенную на расстоянии 1.3 мсек дуги от ядра в направлении позиционного угла $PA = -55^\circ$. Коуторн и др. [54] зарегистрировали также слабую поляризацию ядра с $PA = 112^\circ$ и предположили, что обнаруженная поляризация ядра может быть связана с рождением новой, еще непрозрачной компоненты.

3.3. 0202+149

Периодичность в гамма-блзаре 0202+149 ($z=0.833$ [55]) была обнаружена [22], до известной степени, случайно, т. к. его кривые блеска, на первый взгляд, не обнаруживают явной периодичности из-за сильного тренда. Только после удаления тренда из данных на частотах 22 и 37 ГГц удалось выделить 4-летний цикл, структура которого сохраняется от цикла к циклу несмотря на трехкратное изменение амплитуды (рис. 11).

Цикл начинается с двух ярких всплесков в первой половине цикла и завершается слабыми вариациями во второй. Сравнение кривых блеска в миллиметровом и сантиметровом диапазонах показывает, что первый всплеск 4-летнего цикла на частоте 8 ГГц запаздывает относительно аналогичного всплеска на частоте 37 ГГц на ~ 0.8 года, тогда как второй всплеск происходит практически одновременно на всех частотах. Предсказанный на 1999 год первый максимум кривой блеска действительно наблюдался, однако ампли-

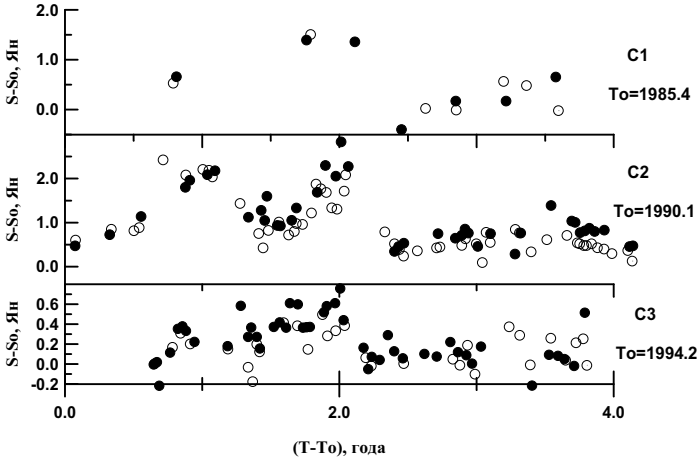


Рис. 11. **0202+149** Кривые блеска, разделенные после вычитания крупномасштабной составляющей на циклы активности ~ 4 года. Открытые кружки — 22 ГГц, заполненные кружки — 37 ГГц.

туда всплеска была невелика. Сопоставление амплитуд всплесков в четырех последовательных циклах свидетельствует о сильной долгопериодической модуляции амплитуды с характерным временем не менее 13 лет (см. табл. 3).

Исследование эволюции структуры источника по геодезическим РСДБ-наблюдениям на 8 ГГц, а также VLBA-наблюдениям на частотах 22 и 43 ГГц в 3-ем цикле (рис. 12) позволило связать первый всплеск в цикле с увеличением яркости ядра, а второй — с эволюцией новой компоненты джета [22]. Благодаря высокому разрешению, достигнутому в VLBA-наблюдениях на $\nu = 43$ ГГц (≈ 0.15 мсек дуги), была получена оценка видимой угловой скорости $\mu = 0.18 \pm 0.01$ мсек дуги/год, что при $z=0.833$ составляет $\beta_{app} = 5.2ch^{-1}$ и соответствует времени отделения компоненты $T_{ej} = (1994.83 \pm 0.06)$.

4. Заключение

Эволюция структуры блазаров 0059+581, 0133+476 и 0202+149 свидетельствует о том, что коротко-периодические вариации потоков могут иметь разную природу. Так вариации потоков с масштабами (1-2.5) года в этих источниках, вероятно, обусловлены эволюцией джета и могут быть объяснены, например, эволюцией отдельных сгустков, прецессией джета, либо развитием внутри джета системы ударных волн, создающей последовательные разреже-

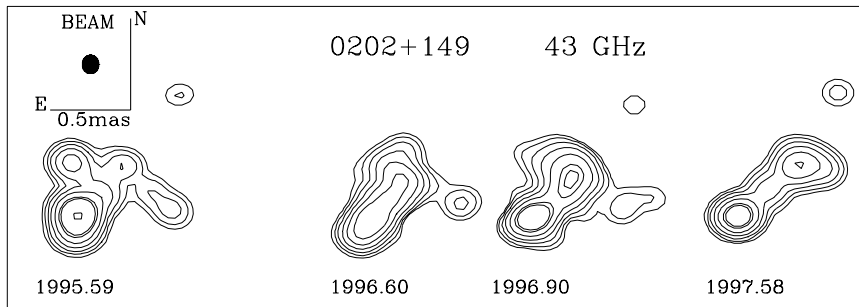


Рис. 12. **0202+149** VLBA-карты на частоте 43 ГГц, свернутые с диаграммой 0.15 мсек дуги. Пиковый поток на эпоху 1995.59 составляет $S = 0.42$ Ян/диагр. Нижний контур соответствует 0.5% от пиковой температуры.

ния и сжатия. Долгопериодические вариации (с характерными временами от 4 лет и более для перечисленных источников) вероятно связаны с глобальной эволюцией источников, в том числе, возможно с цикличностью их активности. Характерные времена переменности для двух других источников с возможной квази-периодичностью активности, 0605-085 и 0945+408, существенно больше от (2.5–8) лет. Для этих источников мы предполагаем получить информацию о структуре и ее эволюции по программе, выполняемой на VLBA. Поэтому в настоящее время мы ограничимся анализом результатов, полученных для источников 0059+581, 0133+476 и 0202+149. Следует отметить еще одну характерную особенность источников 0059+581, 0133+476 и 0202+149, а именно — эти источники принадлежат к категории источников, в радио излучении которых доминирует ядро. Мы обращаем внимание на эту особенность, поскольку она может быть существенной для обнаружения проявлений цикличности, так как эволюция слабого и коротко живущего джета (характерное время эволюции джета в источнике 0059+581 около 1 года) не “маскирует” глобальной эволюции. Итак, суммируя общие для этих источников особенности в вариациях потоков, спектров и структуры можно попытаться построить вероятный сценарий типового цикла активности.

4.1. Вероятный сценарий типового цикла активности.

В развитии цикла активности можно условно выделить две фазы: (1) начальную (“ядерную”), когда оптическая толщина возмущенной области больше единицы, возмущение ограничено ядром и области, расположенные ниже по течению джета, остаются невозмущенными; (2) более позднюю, оптически-тонкую стадию, когда возмущение выходит за пределы ядра и начинает рас-

пространяться по джете. Строго говоря, начало и продолжительность “ядерной” фазы активности должны зависеть от частоты, на которой проводятся наблюдения, а также, вероятно, и от мощности всплеска.

4.1.1. “Ядерная” фаза активности

(1) Как показано в работах Маршера и Гира [42], а также Стивенса и др. [43], сильная кумулятивная ударная волна, возникающая в результате первичного возмущения у основания джета, порождает первичный всплеск радиоизлучения на миллиметровых и субмиллиметровых длинах волн, который затем распространяется на более длинные волны. Т.о. всплески, обнаруживающие запаздывание на низких частотах, могут рассматриваться как индикаторы начала “цикла активности”, той его фазы, когда возмущение развивается внутри “ядра” источника. Подтверждением этого предположения могут служить эволюция спектра источника, а также тот факт, что всплески с запаздыванием на низких частотах сопровождаются увеличением яркости ядра источника на фоне медленно эволюционирующего джета.

(2) Распространение области $\tau \sim 1$ по прецессирующему или спирально искривленному джету может обеспечивать квази-гармонические колебания яркости ядра без изменений структуры, подобные тем, которые наблюдаются в 0133+476, 0059+581. Эти колебания будут сопровождаться также колебаниями позиционного угла поляризации (Кенигл и Чоудхури [57]). Действительно, появление новой активной области, как показано в работах Габузды и др. [45], а также Гомеца и др. [46]) может сопровождаться также поворотом позиционного угла поляризации.

4.1.2. Развитие активности в джете

Всплески, связанные с распространением возмущения вниз по джету, будут наблюдаться на разных частотах одновременно. Поскольку на этой фазе интегральный поток радиоизлучения создается интегрированием по всему джету, квази-гармонические колебания потока будут естественным образом замыкаться. Всплески, наблюдаемые на этой стадии могут быть связаны с эволюцией отдельных сгустков, развитием пограничной неустойчивости при взаимодействии со средой и неустойчивости Кельвина-Гельмгольца [58–60], а также развитием системы ударных волн (Гомец и др. [48]) из-за дисбаланса давлений внутри джета и в окружающей среде.

4.2. Причины цикличности

Для объяснения квази-периодических изменений яркости блазаров как в оптике, так и в радио диапазоне предложен ряд моделей. Довольно подробную библиографию по этому вопросу можно найти в работах Бритцен [14, 36], а также Валтаоя [24]. Все эти модели предполагают наличие в центре источника двойной черной дыры. При этом короткопериодические вариации, такие как вариации яркости ядра в 0059+581 и вариации с периодом 2.4 года в

0133+476, могут быть объяснены либо перемещением возмущенной области по спирально искривленному джету, либо прецессией джета, обусловленной взаимодействием одной или обеих черных дыр с аккреционным диском системы.

Долгопериодические вариации могут быть вызваны, например, усилением аккреции на первичную черную дыру в момент, когда вторичная черная дыра проходит через аккреционный диск первичной в момент их максимального сближения [24]. Усиление аккреции порождает долговременное возмущение в основании джета, которое распространяясь вниз по джету порождает цикл активности.

4.3. Перспективы

Предполагаемое наличие в ряде источников квази-периодичности активности открывает совершенно новые возможности в исследовании этого явления.

(1) Зная признаки начальной фазы цикла, мы сможем разместить на единой хронологической шкале разрозненные проявления активности.

(2) Мы получим возможность предсказывать наиболее важные события в жизни источника. Особый интерес представляет начальная фаза активности. Например, исследуя методами дифференциальной интерферометрии эволюцию абсолютных положений ядра на разных частотах, можно оценить (по методике, предложенной Лобановым, [52]) магнитное поле и плотность релятивистских электронов как функции абсолютного расстояния до центральной машины и времени. Величину смещения ядра можно получить из приведенных в работе Лобанова [52] оценок абсолютных значений расстояний от слоя с оптической толщиной $\tau_\nu \approx 1$ до центральной машины в источнике 3C 345 (см. табл. 5) и зависимости этих расстояний от абсолютной светимости источника

Таблица 5. 3C 345. Расстояния от ядра до “центральной машины” (Лобанов[52])

ν ГГц	B_{core} Гс	Δr пс	Δr_{proj} мсек дуги
5.0	0.09±0.05	16.3±4.6	0.57±0.16
8.4	0.15±0.08	9.7±2.8	0.34±0.10
10.6	0.18±0.10	7.7±2.2	0.27±0.08
22.2	0.38±0.21	3.7±1.0	0.13±0.04

$r_{core} \propto (L_{syn})^{2/3}$. Т.о. при увеличении синхротронной светимости в 2 раза абсолютное расстояние от центральной машины до слоя $\tau \approx 1$ увеличится ~ 1.6 раза, и разность расстояний для 3C 345 на частоте 22 ГГц составит ~ 0.07 мсек дуги, а на частоте 8 ГГц — 0.2 мсек дуги. При использовании дифференциальных РСДБ-наблюдений эта задача доступна и для наземных

радиотелескопов, а для проекта РАДИОАСТРОН подобные измерения могут быть достаточно “рутинными”, даже при достаточно слабых всплесках. Проблема заключается в возможности прогноза вспышечной активности.

В связи с этим, необходимо подчеркнуть важность постоянного мониторинга потоков в достаточно широком диапазоне частот (5–22) ГГц для прогноза и исследования вспышечной активности компактных внегалактических радио источников. Результаты наблюдений по программе мониторинга потоков избранных источников на волнах 6 и 3.5 см, проведенных в обсерватории Светлое с 1999 по 2003 г. (Пятунина, Рахимов и Зборовский, в печати) показали, что даже ограниченный мониторинг на двух частотах может быть использован для прогноза активности при планировании астрометрических и астрофизических наблюдений. Расширение диапазона длин волн, на которых проводится мониторинг, до 22 ГГц — предельной частоты, на которой предусмотрены наблюдения на радиотелескопах РФ-32, значительно расширит возможности мониторинга и повысит его надежность, т.к. частоты перегиба всплесков, связанных с началом цикла, как правило значительно выше 8 ГГц.

В настоящей работе использованы базы данных Радиоастрономической обсерватории Мичиганского университета (УМРАО, США), Радиоастрономической обсерватории в Метсахови (Финляндия), а также база данных Морской обсерватории США (УСНО), содержащая изображения источников Опорной радиоастрономической системы координат. Авторы выражают признательность за многолетнее плодотворное сотрудничество коллегам из УМРАО, Метсахови и УСНО, особенно Марго Аллер (УМРАО), Харри Терасранта (Метсахови) и Алану Фею (УСНО). Авторы также выражают благодарность сотрудникам САО РАН Афанасьеву В. Л., Копылову А. И. и Желенковой О. П. за отождествление источника 0059+581 и определение его красного смещения.

Список литературы

- [1] Wagner S. J. Blazar activity across the electromagnetic spectrum. BL Lac Phenomenon, ASP Conf. Ser., 1999, 159, 279–288.
- [2] Пятунина Т. Б., Габузда Д. С., Эрштад С. Г. Эволюция потоков, спектров и структуры избранных блазаров, Тезисы всероссийской астрономической конференции, 2001, 151–152.
- [3] Marscher A. P. Variability of the nonthermal emission in the jets of blazars. ASPConf. Ser., 1996, 110, 248–260.
- [4] Aller H. D., Aller M. F., Latimer G. E., Hodge P. E. Spectra and linear polarizations of extragalactic variable sources at centimeter wavelengths. *Astrophys. J. Suppl.*, 1985, 59, 513–768.
- [5] Teräsraanta H., Tornikoski M., Valtaoja E. Ten years monitoring of extragalactic radio sources at 22, 37 and 87 GHz. *Astron. & Astrophys. S.*, 1992, 94, 121–173.
- [6] Webb J. R., Smith A. G., Leacock R. J., Fitzgibbons G. L., Gombola P. P., Shepherd D. W. Optical observations of 22 violently variable extragalactic sources 1968–1986. *Astron. J.*, 1988, 95, 374–397.
- [7] Zhang X., Xie G. Z., Bai J. M. A historical light curve of 3C 345 and its periodic analysis. *Astron. & Astrophys.*, 1998, 330, 469–473.
- [8] Zhang X., Xie G. Z., Bai J. M., Zhao G. CCD photometry and long-term optical variability of 3C 345, *Astrophys. Sp. Science*, 2000, 271, 1–10.
- [9] Белоконь Е. Т. Оптическая переменность квазара 3C 273 и сверхсетовые движения в его миллисекундном радиоджете. *Астрон. ж.*, 1991, 68, 1–13.
- [10] Бабаджанянц М. К., Белоконь Е. Т. Новые свидетельства реальности 13-летнего периода в оптической переменности квазара 3C 273 и его корреляция с наблюдаемыми параметрами парсекowego радиоджета. *Астрон.ж.*, 1993, 70, 241–257.
- [11] Гаген-Торн В. А., Марченко С. Г., Миколайчук О. В., Яковлева В. А. Поиск периодичности в кривых блеска активных внегалактических объектов. Результаты для BL Lac и OJ 287. *Астрон. ж.*, 1997, 74, 177–183.
- [12] Fan J.H., Xie G. Z., Pecontal E., Pecontal A., Copin Y. Historic light curve and long-term and optical variation of BL Lacertae 2200+420. *Astrophys. J.*, 1998, 507, 173–178.
- [13] Sillanpää A., Haarala S., Valtonen M. J., Sundelius B., Byrd G. G. OJ 287 — binary pair of supermassive black holes. *Astrophys.J.*, 1988, 325, 628–634.
- [14] Britzen S., Roland J., Laskar J., Kokkotas K., Campbell R. M., Witzel A. On the origin of compact radio sources. The binary black hole model applied to the gamma-bright quasar 0420-014. *Astron. & Astrophys.*, 2001, 374, 784–796.

- [15] Marchenko S. G., Hagen-Torn V. A., Yakovleva V. A. Two methods of time-series analysis and their application to the optical light curves of OJ 287 and 3C 66A. BL Lac Phenomenon, ASP Conf. Ser., 1999, 159, 265–268.
- [16] Sillanpää A., Takalo L. O. Pursimo T., et al. Double-peak structure in the cyclic optical outbursts of blazar oJ 287. *Astron. & Astrophys.*, 1996, 315, L13–L16.
- [17] Pursimo T., Takalo L. O., Sillanpää A. et al. Intensive monitoring of OJ 287. *Astron. & Astrophys. S.*, 2000, 146, 141–155.
- [18] Fan J. H. Infrared variability properties of the blazar 3C 279. *Monthly Notices of the RAS*, 1999, 308, 1032–1036.
- [19] Belokon E. T., Babadzhanlyants M. K., Pollock J. T. ON 231: the testing of 3.8-year period for optical outbursts with multi-peak structure. *Astron. & Astrophys.*, 2000, 361, L21–L24.
- [20] Fan J. H., Lin R. G. The variability analysis of PKS 2155-304. *Astron. & Astrophys.*, 2000, 355, 880–884.
- [21] Roy M., Papadakis I. E., Ramos-Colyn E., Sambruna R., Tsinagos K., Papamastorakis J., Kafatos M. The recent high state of the BL Lacertae object AO 0235 and cross-correlations between optical and radio bands. *Astrophys. J.*, 2000, 545, 758–771.
- [22] Pyatunina T. B., Marchenko S. G., Marscher A. P., Aller M. F., Aller H. D., Teräsranta H., Valtaoja E. Radio variability of the gamma-ray blazar 0202+149, *Astron. & Astrophys.*, 2000, 358, 451–461.
- [23] Pyatunina T. B., Teräsranta H., Valtaoja E., Aller M. F., Aller H. D. Quasi-harmonic patterns in radio variability and birth of a superluminal component in the blazar 0133+476. *JENAM-2000*, 2000, 154.
- [24] Valtaoja E., Teräsranta H., Tornikoski M., Sillanpää, Aller M. F., Aller H. D., Hughes P. A. Radio monitoring of OJ 287 and binary black hole models for periodic outbursts. *Astrophys. J.*, 531, 744–755.
- [25] Hughes P. A., Aller H. D., Aller M. F. The university of Michigan radio astronomy database. I. Structure function analysis and the relation between BL Lacertae objects and quasi-stellar objects. *Astrophys. J.*, 1992, 396, 469–486.
- [26] Lainela M., Valtaoja E. Structure function analysis of high radio frequency variability in the Metsähovi monitoring sample of active galactic nuclei. *Astrophys. J.*, 1993, 416, 485–495.
- [27] Hughes P. A., Aller H. D., Aller M. F. Extraordinary activity in the BL Lac object OJ 287. BL Lac Phenomenon, ASP Conf. Ser., 1999, 159, 273–276.
- [28] Abraham Z., Carrara E. A. The precessing jet in 3C 279. *Astrophys. J.*, 1998, 496, 172–176.
- [29] Abraham Z., Romero G. Beaming and precession in the inner jet of 3C 273. *Astron. & Astrophys.*, 1999, 344, 61–67.

- [30] Romero G. E., Chajet L., Abraham Z., Fan J. H. Beaming and precession in the inner jet of 3C 273. II Central engine. *Astron. & Astrophys.*, 2000, 360, 57–64.
- [31] Бабаджанянц М. К., Белоконь Е. Т. Оптические проявления сверхсветового разлета компонентов миллисекундной радиоструктуры квазара 3C 345. *Астрофизика*, 1985, 23, 459–471.
- [32] Belokon E. T. “3C 120: Connection Between the Optical Variability and Superluminal Components of the Millisecond Radio Structure”, *Астрофизика*, 1987, 27, 429–436.
- [33] Britzen S., Witzel A., Krichbaum T. P., Qian S. J., Campbell R. M. 8.4 GHz VLBI monitoring of the gamma-bright blazar PKS 0528+134. *Astron. & Astrophys.*, 1999, 341, 418–426.
- [34] Nesterov N. S., Lyuty V. M., Valtaoja E. Radio and optical evolution of the Seifert galaxy NGC 1275. *Astron. & Astrophys.*, 1995, 296, 628–641.
- [35] Wagner S. J., Camenzind M., Dreissigacker O., Borgeest U., Britzen S., Brinkmann W., Hopp U., Schramm K. J., von Linde J. Simultaneous optical and gamma-ray flaring in PKS 0420-014. Implications for emission processes and rotating jet models. *A&A*, 298, 688–698, 1995.
- [36] Britzen S., Witzel A., Krichbaum T. H., Campbell R. M., Wagner S. J., Qian S. J. Three-year VLBI monitoring of PKS 0420-014. *Astron.& Astrophys.*, 2000, 360, 65–76.
- [37] Bower G. C., Baker D. C., Wright M., Forster J. R., Aller H. D., Aller M. F. A dramatic millimeter wavelength flare in the Gamma-ray blazar NRAO 530. *Astrophys. J.*, 1997, 484, 118–129.
- [38] Piner B. G., Kingham K. A. VLBI observations of the Gamma-ray blazar 1611+343. *Astrophys. J.*, 1997, 479, 684–697.
- [39] Krichbaum T. P., Kraus A., Otterbein K., Britzen S., Witzel A. “Sub-mas Jets in Gamma-Active Blazars from High Frequency VLBI” *ASP Conf. Ser.*, 1998, 144, 37.
- [40] Otterbein K., Krichbaum T. P., Kraus A., Lobanov A. P., Witzel A., Wagner S. J., Zensus J. A. Gamma-ray to radio activity and ejection of a VLBI component in the jet of S5-quasar 0836+710. *Astron. & Astrophys.*, 1998, 334, 489–497.
- [41] Tornikoski M., Tingay S. J., Mücke A. et al. Multi-wavelength observations of PKS 2255-282. *Astron. J.*, 1999, 118, 1161–1168.
- [42] Marscher A. P., & Gear W. K. Models for high-frequency outbursts in extragalactic radio sources with application to the early 1983 millimeter-to-infrared flare of 3C 273. *Astrophys. J.*, 1985, 295, 114–127.
- [43] Stevens J. G., Robson E. I., Gear W. K., Cawthorne T. V., Aller M. F., Aller H. D., Teräsranta H., Wright M. C. H. Variability of

- the centimeter-submillimeter spectrum and polarization of 3C 273 during outburst. *Astrophys. J.*, 1998, 502, 182–191.
- [44] Zhou J. F., Hong X. Y., Jiang D. R., Venturi T. Two classes of radio flares in the blazar 0420-014. *Astrophys. J.*, 2000, 540, L13–L16.
- [45] Gabuzda D. C., Mullan C. M., Cawthorne T. V., Wardle J. F. C., Roberts D. H. Evolution of the milliarcsecond total intensity and polarization structures of BL Lacertae objects. *Astrophys. J.*, 1994, 435, 140–161.
- [46] Gomez J. L., Marscher A. P., Alberdi A. Outburst in the polarized structure of the compact jet of 3C 454.3 *Astrophys. J.*, 1999, 522, 74–81.
- [47] Camenzind M., Krockenberger M. The lighthouse effect of relativistic jets in blazars. *Astron. & Astrophys.*, 1992, 255, 59–62.
- [48] Gómez J. L., Martí J. M., Marscher A. P., Ibáñez J. M., Alberdi A. Hydrodynamical models of superluminal sources, *Astrophys. J.*, 1997, 482, L33–L36.
- [49] Lehto H. J., Valtonen M. J. OJ 287 outburst structure and a binary black hole model. *Astrophys. J.*, 1996, 460, 207.
- [50] Aller M. Radioband variability properties of BL Lac objects. *BL Lac Phenomenon*, ASPConf. Ser., 1999, 159 31–39.
- [51] Teräsranata H., Tornikoski M., Mujunen A., et al. Fifteen years monitoring of extragalactic radio sources at 22, 37 and 87 GHz. *Astron. & Astrophys. Suppl.*, 1998, 132, 305–331.
- [52] Lobanov A. P. Ultracompact jets in active galactic nuclei, *Astron. & Astrophys.*, 1998, 330, 79–89.
- [53] Пятунина Т. Б., Финкельштейн А. М., Суркис И. Ф., Аллер Х. Д., Аллер М. Ф. Радиоисточники 0059+581 и 0202+149. Два типа переменности? 1998, Труды ИПА РАН, вып. 3, 259–286.
- [54] Cawthorne T. V., Wardle F. C., Roberts D. H., Gabuzda D. C., Browne L. F. Milliarcsecond polarization structure of 24 objects from Pearson-Readhead sample of bright extragalactic radio sources. I. Images. *Astrophys. J.*, 1993, 416, 496–518.
- [55] Stickel M., Rieke J. H., Kühr H., Rieke M. J. Flat spectrum radio sources with faint optical counterparts. *Astrophys. J.*, 1996, 468, 556–573.
- [56] Impey C. D., Tapia S. The optical polarization properties of quasars *Astrophys. J.*, 1990, 354, 124–139.
- [57] Königl A., Choudhuri A. R. A model of the polarization position-angle swings in BL Lacertae objects. *Astrophys. J.*, 1985, 289, 188–192.
- [58] Hardee P. E. Helical twisting on an adiabatically expanding jet. I. Propagation and temporal growth. *Astrophys. J.*, 1984, 287, 523–533.
- [59] Hardee P. E. On three-dimensional structures in relativistic hydrodynamic jets. *Astrophys. J.*, 2000, 533, 176–193.

- [60] Hardee P. E., Huges P. A., Rosen A., Gomez E. A. Relativistic jet response to precession and wave-wave interactions. *Astrophys. J.*, 2001, 555, 744–757.

Т. Б. Пятунина, Д. К. Габузда, С. Г. Марченко-Эрштад
Эволюционные закономерности в вариациях потоков, спектров и структуры
избранных блазаров.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **И^AТ_EX**

Подписано к печати 20.12.2003 Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Печ.л. 2.5
Уч.-изд.л. 2.5 Тираж 75 Заказ 490 бесплатно

Отпечатано в типографии ПИЯФ РАН
(188350 Ленинградская обл., г. Гатчина, Орлова роща).

Институт прикладной астрономии РАН, 197110, С.-Петербург, Ждановская ул., 8.