СТРУКТУРЫ, ПЕРЕМЕННОСТЬ И ВСПЫШЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ ЧЕТЫРЕХ ОБЪЕКТОВ ТИПА BL Lac

А. Е. Вольвач[1], **Л. Н. Вольвач**[1], **А. Б. Пушкарев**[1,3], **А. М. Кутькин**[2], **М. Г. Ларионов**[2]

[1] *Научно-исследовательский институт Крымская астрофизическая обсерватория 98680 Ялта, п. Кацивели, ул. Шулейкина, 1, РТ-22, Украина*
e-mail: volvach@ukrpost.ua

[2] *Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева, Россия*

[3] *Институт аэрономии им. Макса Планка, Германия*

С использованием многочастотных данных длительного мониторинга на частотах 4.8, 8, 14.5, 22.2 и 36.8 ГГц в обсерваториях Мичиганского университета (США) и НИИ КрАО (Украина) активных ядер галактик 3C 120, BL Lac, 1308+326 и OJ 287 определены составляющие переменности потоков излучения на масштабах от одного года до десятков лет. В рамках международных геодезических РСДБ-программ с участием РТ-22 НИИ КрАО, собрана и исследована информация по изменениям во времени РСДБ-структур этих источников. На основе полученных данных проанализированы кинематические модели объектов с определением орбитальных и прецессионных периодов в системах из двойных сверхмассивных черных дыр, локализованных в ядерных областях данных представителей активных ядер.

ВВЕДЕНИЕ

Принято считать, что основным механизмом энерговыделения активных галактических ядер (АЯГ) является аккреция вещества на компактное центральное тело – сверхмассивную черную дыру (СЧД). Нестационарные внегалактические источники – АЯГ – в коротковолновом участке сантиметрового диапазона длин волн и в миллиметровом диапазоне составляют заметную долю от всех радиоизлучающих объектов [1]. В подавляющем большинстве случаев на этих длинах волн это сильно переменные источники.

Чтобы объяснить переменность излучения, особенности морфологии и вспышечную активность некоторых АЯГ, часто прибегают к модели двойной системы из сверхмассивных черных дыр (ДСЧД) в центральных областях данных объектов [11, 13]. ДСЧД должны образовываться в результате слияния галактик, что является прямым следствием гипотезы иерархического скучивания и хорошей предпосылкой для появления теории двойных ядер галактик (см., например, [11]).

Рассматриваемые двойные системы состоят из центральных СЧД и менее массивных компаньонов, движущихся вокруг общего центра масс по эллиптическим орбитам. Размер орбиты составляет 0.01–0.1 пк. При этом скорость орбитального движения компаньона составляет порядка нескольких тысяч км/с. Центральная СЧД имеет массивный аккреционный диск и участвует в преобразовании и передаче общего с внутренними областями аккреционного диска момента вращения в выбрасываемую с релятивистскими скоростями плазму, коллимируемую в узкие противоположно направленные выбросы – “джеты” [8]. Компаньон может потерять свой аккреционный диск при подходе к центральной черной дыре уже на расстояниях порядка 0.1–1 пк за счет динамического трения [9]. В перицентре орбиты компаньон пересекает плотные области центрального аккреционного диска со сверхзвуковой скоростью, в результате чего в диске возникают ударные волны, которые могут достигать истоков джета. Таким образом, вспышечная составляющая переменности потока излучения может формироваться через механизм ударных волн в выбросах, создающих уплотнения в релятивистской плазме [3, 10]. Отражением прецессионных движений осей центральной черной дыры и центральных областей аккреционного диска могут являться винтовые движения в истекающих струях [5, 6, 13]. В результате сложного взаимодействия двух СЧД и аккреционного диска могут возникать также движения нутационного характера и появляться дополнительные периодические составляющие в переменности потока излучения [12, 14].

Анализируя компоненты переменности потока излучения на масштабах времени в десятки лет при определенных предположениях можно получить выражения для масс компонентов системы и центральных СЧД, а также выражение для параметров орбит ДСЧД [1].

Система ДСЧД быстро сливается за счет потерь на излучение гравитационных волн начиная с расстояний порядка 0.01 пк. До этой границы компоненты могут сближаться за счет динамического трения и за счет "эффекта пращи" (выбрасывания звезд, газа и, возможно, темной материи из внутренних областей орбиты).

Несмотря на прорабатываемые модели, остается ряд открытых вопросов, требующих теоретических уточнений и наблюдательного подтверждения. Среди прочих, вопросы о времени жизни таких систем до слияния, о механизмах перекачки энергии орбитального движения в нагрев газа и излучение, магнитных полях и характеристиках среды. В данной работе рассматриваются вопросы связи вспышечной активности со структурой РСДБ-компонентов для четырех объектов: 3C 120, BL Lac, 1308+326 и OJ 287.

НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения на частотах 22.2 и 36.8 ГГц проводились с помощью 22-метрового радиотелескопа (РТ-22) НИИ КрАО при помощи модуляционных радиометров.

Перед измерением интенсивности излучения положение источника уточнялось сканированием по прямому восхождению и склонению. Антенная температура от источника определялась как разность между усредненными в течение 30 секунд откликами радиометра в двух различных положениях антенны (при наведении на один и другой лепесток диаграммы направленности радиотелескопа). В зависимости от интенсивности излучения источника, проводились серии из 6–20 измерений, после чего рассчитывалось среднее значение сигнала, и оценивалась среднеквадратичная ошибка среднего.

Поглощение излучения в атмосфере Земли учитывалось методом "разрезов атмосферы", производившихся каждые 3–4 часа. Измеренные антенные температуры, исправленные за поглощение излучения в атмосфере Земли, пересчитывались в плотности потоков по данным наблюдений калибровочных источников [2].

Наблюдения переменности радиоисточников на частотах 4.8, 8 и 14.5 ГГц проводились на 26-м радиотелескопе Радиоастрономической обсерватории Мичиганского университета. Методика наблюдений и обработки данных на РТ-26 приведены в [4].

РСДБ-наблюдения с участием глобальной радиоинтерферометрической сети одновременно на частотах 2.3 и 8.6 ГГц начиная с 1994 г. проводились с участием 22-м радиотелескопа НИИ КрАО (станция Симеиз) [7]. Обработка данных проводилась в одном их центров корреляционной обработки: в Институте аэрономии им. Макса Планка (Германия), Хайтекской обсерватории или Военно-морской обсерватории (США).

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1–4 приведены кривые блеска источников, полученные на пяти частотах радиодиапазона, РСДБ-структуры и функции видности на частотах 2.3 и 8.6 ГГц.

На основе полученных баз данных миллиметрового и сантиметрового диапазонов длин волн был проведен гармонический анализ кривых изменения потока излучения источников методом Шустера. Параметры гармоник, найденных из анализа временных рядов, позволили сделать следующие выводы:

1. Во всех рассматриваемых источниках присутствуют на высоком уровне значимости гармонические составляющие, которые можно соотнести с прецессионным и орбитальным периодами в системах ДСЧД. Это позволяет получить информацию о массах двойных черных дыр и параметрах орбит этих двойных систем.
2. Орбиты рассматриваемых АЯГ заключены в узком интервале расстояний от центральных черных дыр – от 10^{17} см до 10^{18} см. Интервал скоростей движения компаньонов сосредоточен вблизи значения $v \approx 4{\cdot}10^3$ км/с. Это говорит о том, что указанные АЯГ являются довольно тесными двойными системами. При этом, когда находится в перицентре, компаньон может пересекать аккреционный диск центральной черной дыры. Последнее и может быть причиной активности АЯГ.
3. Сверхзвуковые скорости движения компаньонов порождают мощные ударные волны, которые в плотной среде аккреционного диска ($n \sim 10^{10}$ см^3) могут приводить к подъему температуры выше 10^9 K и являться спусковым механизмом для выбросов плазмы в джетах.
4. Анализ кривых блеска источников на частотах 4.8, 8, 14.5, 22.2 и 36.8 ГГц (рис. 1–4). показывает, что всплески обнаруживают запаздывание максимума на низких частотах. Запаздывание всплесков 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

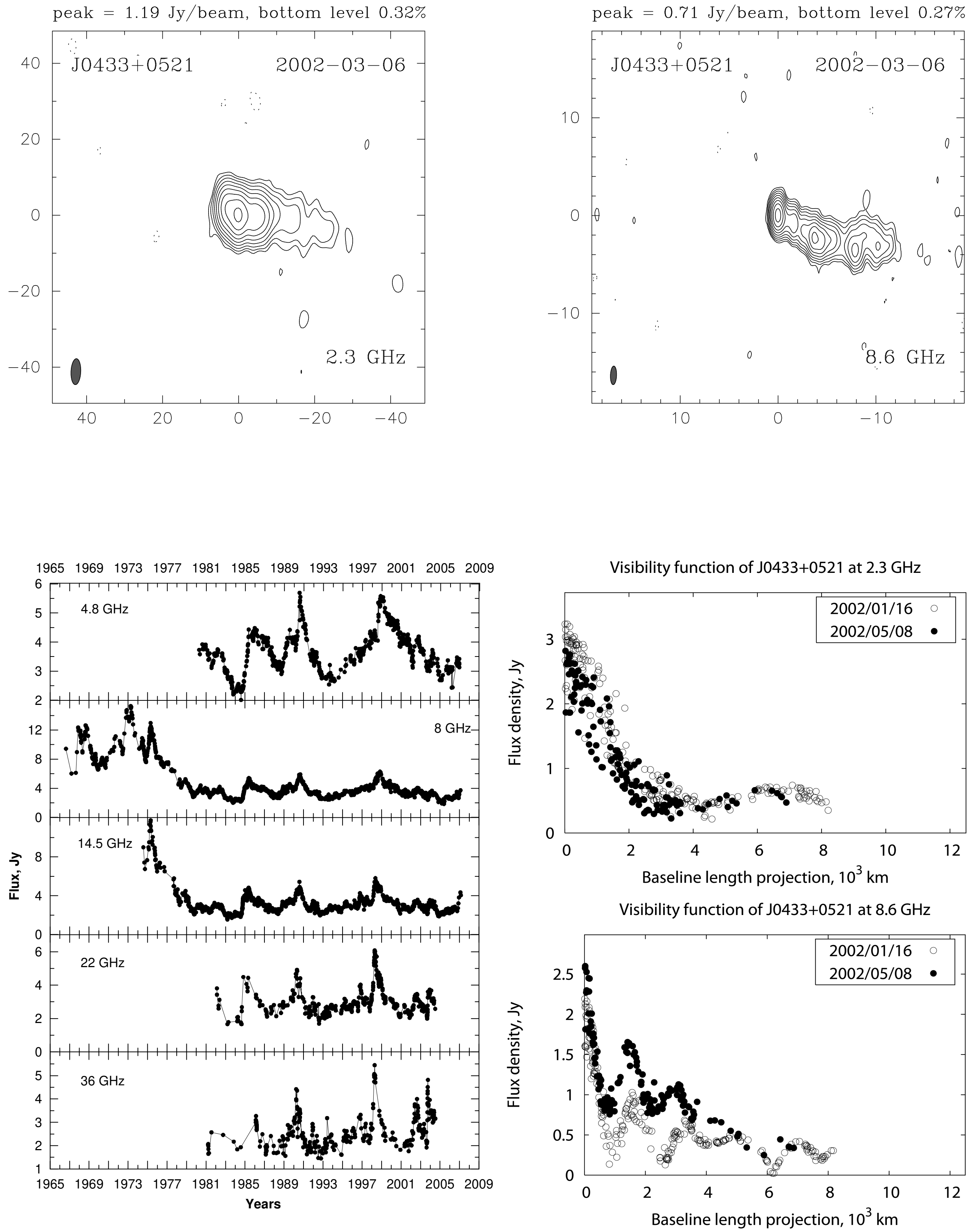

Рис. 1. Многочастотные кривые блеска, а также РСДБ-карты и амплитуды функции видности для 3C 120. Оси РСДБ-карт даны в миллисекундах дуги

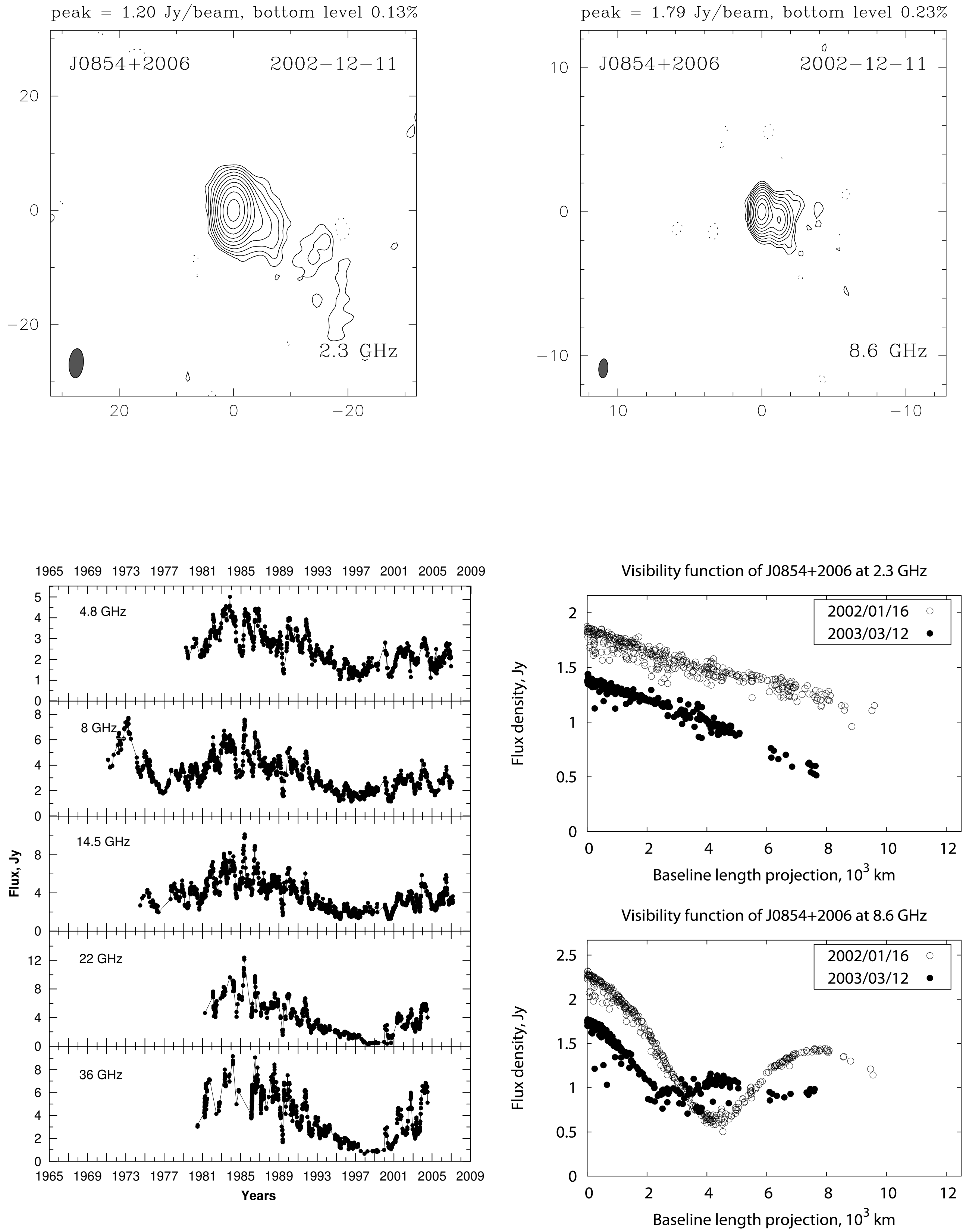

Рис. 2. Многочастотные кривые блеска, а также РСДБ-карты и амплитуды функции видности для OJ 287. Оси РСДБ-карт даны в миллисекундах дуги

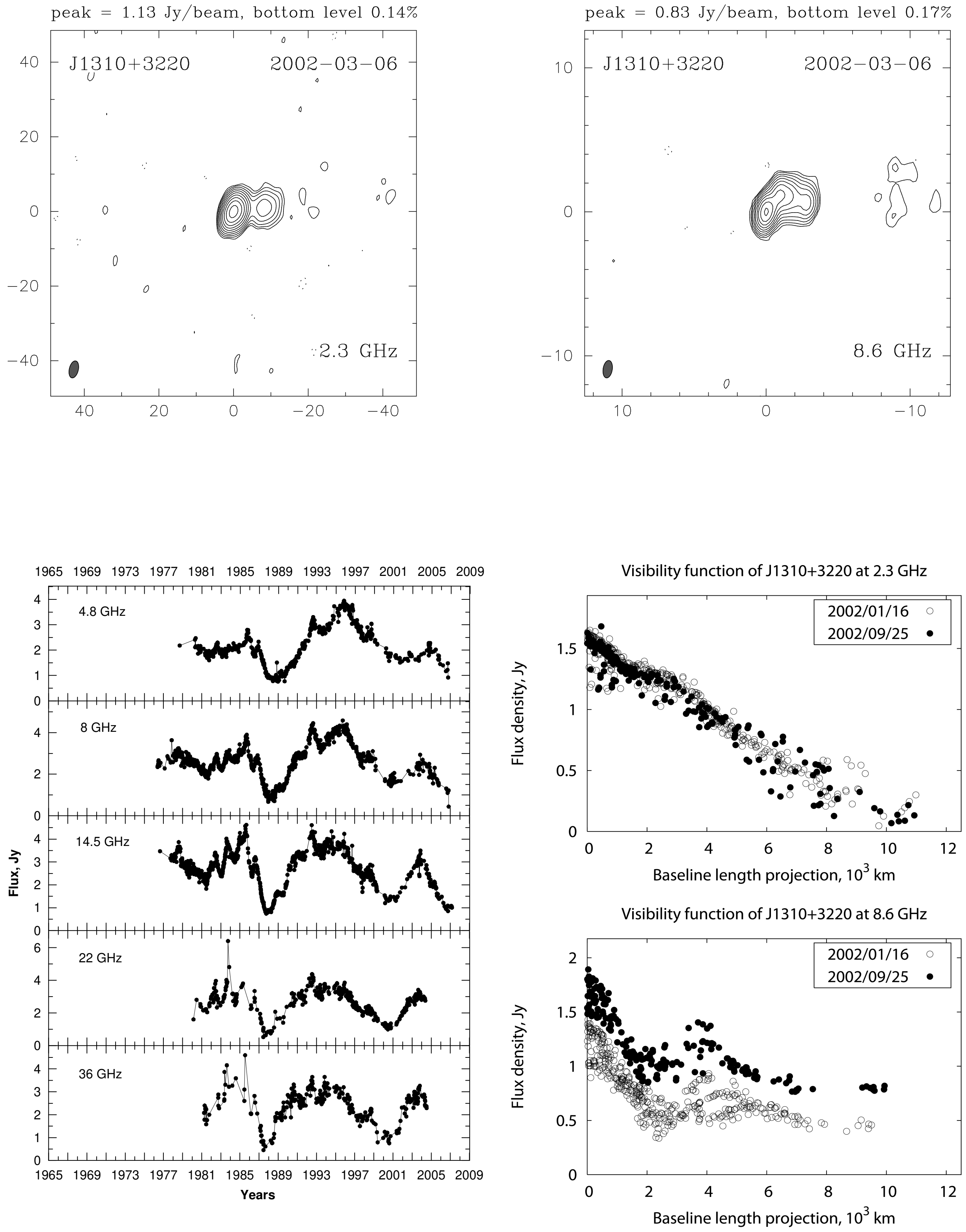

Рис. 3. Многочастотные кривые блеска, а также РСДБ-карты и амплитуды функции видности для 1308+326. Оси РСДБ-карт даны в миллисекундах дуги

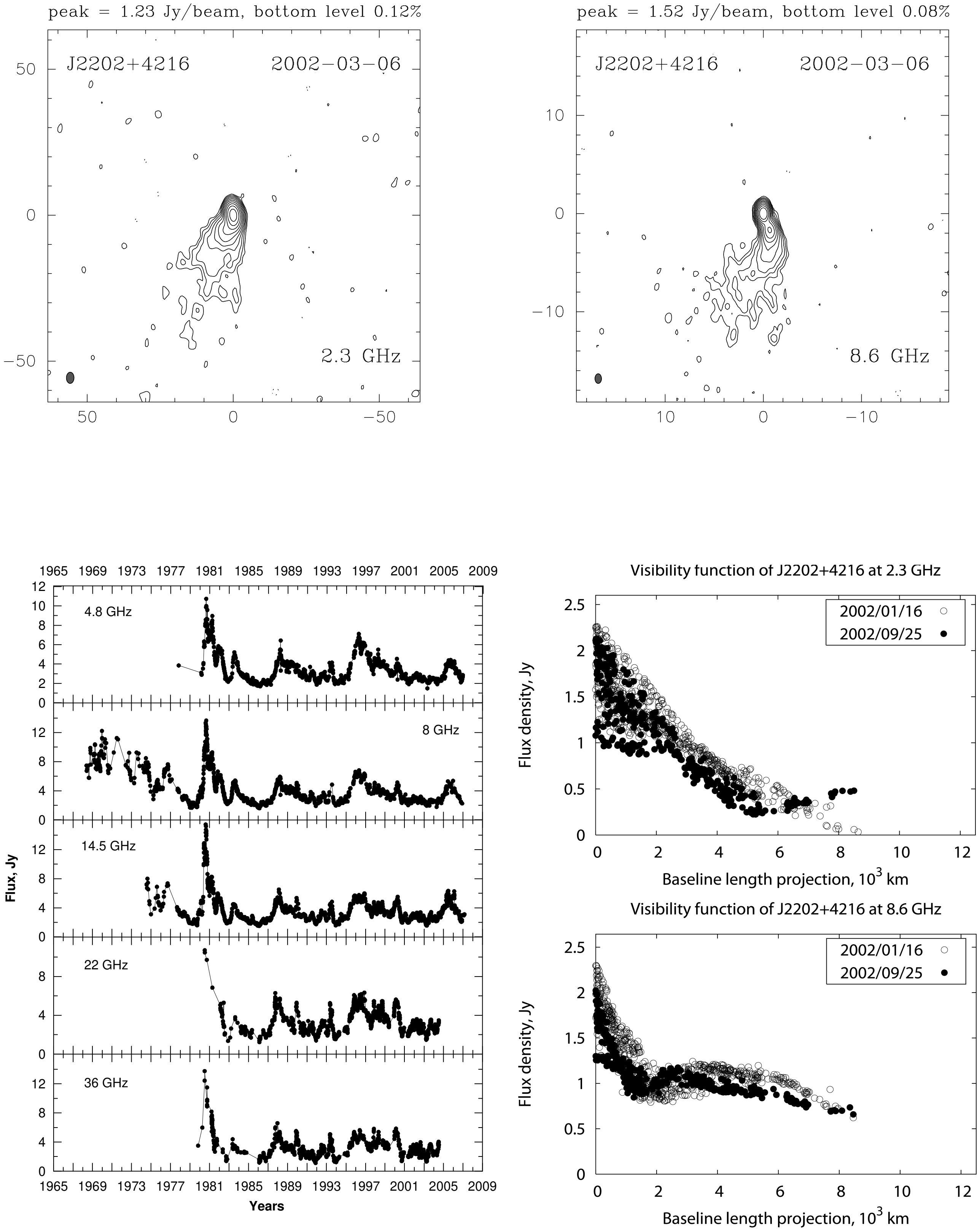

Рис. 4. Многочастотные кривые блеска, а также РСДБ-карты и амплитуды функции видности для BL Lac. Оси РСДБ-карт даны в миллисекундах дуги

толщиной ≥1, на разных частотах. А эти величины, в принципе, позволяют оценить светимость, значение магнитного поля и геометрические свойства джета.

5. Поведение функции видности (рис. 1–4) свидетельствует о том, что все исследуемые объекты частично или полностью разрешаются на длинных базах на частоте 8.6 ГГц. Неразрешенная составляющая потока составляет незначительную часть интегрального потока источников.
6. Подавляющая доля вспышечных явлений носит либо частотно-независимый характер, либо амплитуда вспышек уменьшается в сторону низких частот. Последний закон изменения амплитуд вспышек характерен для расширяющегося оптически толстого слоя газа (плазмы).

На рис. 1–4 также представлены РСДБ-карты источников, полученные на частотах 2.3 и 8.6 ГГц на протяжении разных эпох. Все источники имеет одностороннюю структуру типа ядро-выброс из-за эффекта доплеровского уярчения. Используя стандартную фридмановскую модель Вселенной с параметром замедления $q_0 = 0.05$ и постоянной Хаббла $H_0 = 70\,h$ км·с$^{-1}$ Мпк$^{-1}$, можно поставить в соответствие угловой и линейный масштабы.

Моделирование РСДБ-структур на частоте 8.6 ГГц, проведенное в DIFMAP, с помощью минимального количества круговых гауссовых компонент, воссоздающих при свертке изображение, схожее с оригинальным, дало возможность определить изменение расстояний от РСДБ-ядра до компонентов струи с течением времени. Линейная аппроксимация методом наименьших квадратов позволяет определить видимую скорость движения компонентов, а также дает оценку даты рождения этих компонентов, хорошо согласующуюся с пиками, зарегистрированными по мониторинговым данным (рис. 1–4). В таблице 1 приведены данные по корреляции рождения РСДБ-компонентов и вспышек, получаемых из данных многочастотного мониторинга на одиночных антеннах.

Таблица 1. Значения периодических компонентов источников и их основные характеристики

Источник B1950.0	Источник J2000.0	Другое название	μ (мсд/год)	β^*/c	РСДБ (год)	Мониторинг (год)
0430+052	0433+0521	3C 120	1.362±0.165	3.03±0.37	1998.61±0.47	1998.29±0.04
0851+202	0854+2006	OJ 287	0.569±0.016	10.95±0.31	2000.58±0.13	2000.14±0.36
1308+326	1310+3220	OP 313	0.447±0.045	23.30±2.35	1998.92±0.36	1998.74±0.36
2200+420	2202+4216	BL Lac	1.188±0.227	5.43±1.04	2000.59±0.40	2000.13±0.08

* Для модели плоской Вселенной с параметрами $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_L = 0.7$ и постоянной Хаббла $H_0 = 70$ км·с$^{-1}$ Мпк$^{-1}$.

Таким образом, есть возможность предсказывать наиболее важные события в жизни источника. Зная признаки начальной фазы цикла, мы сможем разместить на единой хронологической шкале разрозненные проявления активности. В связи с этим, необходимо подчеркнуть важность постоянного мониторинга потоков в широком диапазоне частот для прогноза и исследования вспышечной активности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием многочастотных данных длительного мониторинга четырех объектов (активных ядер галактик: 3C 120, BL Lac, 1308+326 и OJ 287) определены составляющие переменности потоков излучения на масштабах от одного года до десятков лет. Наблюдательные данные получены в обсерваториях Мичиганского университета (США) и НИИ КрАО (Украина). В рамках международных геодезических программ (IVS) с участием РТ-22 НИИ КрАО, собрана и исследована информация по изменениям во времени РСДБ-структур этих источников. На основе полученных данных проанализированы кинематические модели объектов с определением орбитальных и прецессионных периодов в системах из двойных сверхмассивных черных дыр, локализованных в ядерных областях данных представителей активных ядер. Отмечены характерные частотные спектры вспышек в контексте развития джетовой активности источников. Установлена временная связь между вспышечными явлениями, наблюдаемыми в процессе проведения мониторинга потоков на одиночных антеннах, и появлением новых сверхсветовых РСДБ-компонентов.

[1] *Вольвач А. Е., Кардашев Н. С., Ларионов М. Г. и др.* Переменность излучения блазара 3C 454.3 за период 40 лет // Астрон. журн. – 2007. – **84**. – № 6. – С. 503–513.

[2] *Моисеев И. Г., Нестеров Н. С.* Калибровочные радиоисточники в миллиметровом диапазоне волн // Изв. Крымской астрофиз. обсерв. – 1985. – **73**. – С. 154–159.

[3] *Aller H. D., Aller M. F., Hughes P. A.* Polarized radio outbursts in BL Lacertae. I. Polarized emission from a compact jet. II. The flux and polarization of a piston-driven shock // Astrophys. J. – 1985. – **298**. – P. 296–315.

[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. Ser. – 1985. – **59**. – P. 513–768.

[5] *Begelman M. C., Blandford R. D., Rees M. J.* Massive black hole binaries in active galactic nuclei // Nature. – 1980. – **287**. – P. 307–309.

[6] *Camenzind M., Krockenberger M.* The lighthouse effect of relativistic jets in blazars – A geometric origin of intraday variability // Astron. and Astrophys. – 1992. – **255**. – P. 59–62.

[7] *Clark T. A., Bosworth J., Vandenberg N., et al.* Precision measurements of the location of the VLBI Station Simeiz // Astron. Lett. – 1995. – **21**. – P. 116–117.

[8] *Kaastra J. S., Roos N.* Massive Binary Black-Holes and Wiggling Jets // Astron. and Astrophys. – 1992. – **254**. – P. 96–98.

[9] *Lobanov A. P.* Mergers and binary systems of SMBH in the contexts of nuclear activity and galaxy evolution // astro-ph/0412416. – 2004.

[10] *Marscher A. P., Gear W. K.* Models for high-frequency radio outbursts in extragalactic sources, with application to the early 1983 millimeter-to-infrared flare of 3C 273 // Astrophys. J. – 1985. – **298**. – P. 114–127.

[11] *Merritt D., Milosavljevic M.* Massive Black Hole Binary Evolution // Living Reviews in Relativity. – 2005. – **8**. – N 8.

[12] *De Paolis F., Ingrosso G., Nucita A. A.* Astrophysical implications of binary black holes in BL Lacertae objects // Astron. and Astrophys. – 2002. – **388**. – P. 470–476.

[13] *Sillanpaa A., Takalo L. O., Pursimo T., et al.* Confirmation of the 12-year optical outburst cycle in blazar OJ 287 // Astron. and Astrophys. – 1996. – **305**. – P. 17–20.

[14] *Romero G. E., Chajet L., Abraham Z., Fan J. H.* Beaming and precession in the inner jet of 3C 273. II. The central engine // Astron. and Astrophys. – 2000. – **360**. – P. 57–64.