

УДК 520.872:524.884:52-732

РЕЛЯТИВИСТСКИЕ УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В КОМПАКТНОМ ВЫБРОСЕ ОБЪЕКТА ТИПА BL LACERTAE 1823+568

Пушкарев А.Б.^{1,2}

¹НИИ «Крымская астрофизическая Обсерватория», Научный, Украина

²Главная Астрономическая Обсерватория (Пулково), Санкт-Петербург, Россия

E-mail: pushkarev@crao.crimea.ua

С помощью метода радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) были проведены наблюдения ядра активной галактики 1823+568 одновременно на частоте 2.3 и 8.6 ГГц при участии 17 антенн. Восстановлены карты распределения радиояркости и спектрального индекса объекта. Установлено, что эволюция яркостной температуры и поперечных размеров РСДБ компонентов выброса согласуются с моделью релятивистских ударных волн, излучение которых доминировано потерями энергии на адиабатическое расширение.

Ключевые слова: активные ядра галактик, выбросы, магнитные поля, интерферометрия.

ВВЕДЕНИЕ

Объекты типа BL Lacertae (лацертиды) являются подклассом активных ядер галактик и характеризуются нетепловым спектром, быстрой и сильной переменностью излучения во всем электромагнитном спектре, от радио- до гамма-диапазона, высокой степенью линейной поляризации, видимыми сверхсветовыми скоростями движения ярких компонентов струй, а также слабыми, часто совсем необнаружимыми эмиссионными линиями в их оптических спектрах. Последнее свойство обусловлено не отсутствием тепловой плазмы, а высокой направленностью излучения по отношению к наблюдателю, что приводит к повышению уровня континуума, вызванное эффектом доплеровского усиления излучения. Тепловая плазма присутствует в источнике и проявляет себя посредством эффекта фарадеевского вращения, при котором регистрируется поворот плоскости линейной поляризации при прохождении линейно-поляризованного излучения сквозь плазму с магнитным полем [1].

Активность галактических ядер является результатом дисковой аккреции на компактный центральный объект, скорее всего, представляющий собой сверхмассивную (до $\sim 10^9$ масс Солнца) черную дыру, и проявляется в высоком энерговыделении, до 10^{46} эрг/с [2], и образовании узконаправленных биполярных потоков вещества (выбросов, струй) перпендикулярно плоскости аккреционного диска. Магнитное поле, а именно его тороидальная составляющая, играет ключевую роль в ускорении частиц до ультррелятивистских скоростей, а также в процессе коллимации образующихся струй, которые становятся обнаружимыми в радиодиапазоне на расстояниях порядка 10^4 - 10^6 гравитационных радиусов ($R_g = 2GM/c^2$) для источников, находящихся на красных смещениях $z \sim 1$. РСДБ

наблюдения близкой ($z = 0.00436$, что соответствует 16 Мпк) радиогалактики M87 показали, что выброс на частоте 43 ГГц формируется в непосредственной близости от «центральной машины», уже на расстоянии в несколько десятков гравитационных радиусов [3].

На РСДБ изображениях выбросов активных ядер галактик, как правило, обнаруживается ряд компонентов (уярчений), природа которых до сих пор окончательно не установлена. В данной работе исследуется структура струи в источнике 1823+568 на парсековых и гектопарсековых масштабах и тестируется модель релятивистских ударных волн, распространяющихся по джету. В работе используется неоднородная фридмановская модель Вселенной (λ -CDM космология) с параметрами $\Omega_m = 0.27$, $\Omega_\lambda = 0.73$ и постоянной Хаббла $H_0 = 71h$ км с⁻¹ Мпк⁻¹ [4]. Все позиционные углы даны в градусах и отсчитывается от направления на Север к направлению на Восток.

Таблица 1

Параметры 17 антенн, участвовавших в наблюдениях

Антенна	Страна	Диаметр, м	Чувствительность, мК/Ян	
			2.3 ГГц	8.6 ГГц
Brewster (VLBA)	США	25	98	106
Fort Devis (VLBA)	США	25	100	77
Hancock (VLBA)	США	25	85	102
Kokkee	США	20	53	38
Kitt Peak (VLBA)	США	25	86	86
Los Alamos (VLBA)	США	25	86	103
Matera	Италия	20	20	45
Medicina	Италия	32	140	114
Mauna Kea (VLBA)	США	25	76	110
North Liberty (VLBA)	США	25	87	110
Onsala	Швеция	20	28	34
Owens Valley (VLBA)	США	25	80	106
Pie Town (VLBA)	США	25	94	115
St. Croix (VLBA)	США	25	84	110
Tsucuba	Япония	32	227	335
Westford	США	18	77	33
Wettzell	Германия	20	62	72

1. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Объект 1823+568 наблюдался в рамках долгосрочного геодезического РСДБ проекта Research and Development – VLBA (RDV), проведенного 12 марта 2003 г. с помощью системы Very Long Baseline Interferometry Array (VLBA), состоящей из десяти 25-м антенн, а также семи дополнительных геодезических станций. В

Таблице 1 приведены характеристики участвующих в эксперименте антенн, а именно их диаметр и коэффициент усиления, т.е. чувствительность радиотелескопа в направлении зенита. Запись сигнала велась в правой круговой поляризации с однобитным квантованием одновременно в восьми частотных каналах (IF) шириной 8 МГц каждый: в S-полосе с центрами на 2.233, 2.263, 2.353, 2.373 ГГц и в X-полосе с центрами на 8.406, 8.476, 8.791, 8.896 ГГц. Общая ширина полосы составила 32 МГц при 16 спектральных каналах в каждом частотном. Источник 1823+568 имел 5 сканов наблюдений с общим временем слежения 23 мин., что при используемой конфигурации антенн обеспечило 22.3 тыс. измерений амплитуды и фазы функции видности. Корреляция данных была проведена на VLBA корреляторе в Сокорро (Нью-Мексико, США) со временем интегрирования четыре секунды.

Калибровка амплитуды и фазы данных наблюдений проводилась в программном пакете AIPS [5] с использованием стандартных процедур. Картографирование, а также моделирование структуры объекта в плоскости пространственных частот было выполнено в пакете Difmap [6]. При моделировании использовалось минимальное число круговых гауссовых компонент, которые будучи свернуты с синтезированной диаграммой направленности, адекватно воспроизводили распределение яркости источника. Подробное описание наблюдений, процесса калибровки и картографирования приведено в [7], где обсуждается специфика геодезических РСДБ данных проекта RDV.

2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЯРКОСТИ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА

Полученные РСДБ изображения объекта 1823+568, представленные на Рис. 1, показывают типичную для лацертид морфологию – яркое ядро и односторонний (приближающийся к наблюдателю) выброс. Следует отметить, что радиоядро является частью струи, где оптическая толщина излучения достигает $\tau_\nu \approx 1$ на частоте наблюдения. Контрвыброс (удаляющийся от наблюдателя) не детектируется ввиду ограниченности динамического диапазона карт и малости угла между направлением на наблюдателя и осью выброса.

Источник 1823+568 находится в красном смещении $z = 0.664$, что соответствует фотометрическому расстоянию ~ 3990 Мпк ($1 \text{ пк} = 3.086 \cdot 10^{18} \text{ см}$). Тогда одна миллисекунда дуги эквивалентна 6.99 пк в линейной шкале. Таким образом, выброс прослеживается до расстояний порядка 50 и 210 пк в проекции на небесную сферу для наблюдений на 8.6 и 2.3 ГГц, соответственно. Угол к лучу зрения φ можно оценить из соотношения $\varphi \sim \arcsin(1/\beta_{\text{app}})$, где β_{app} – видимая скорость движения компонент струи, измеренная в скоростях света. Максимальная величина β_{app} для объекта 1823+568 составила 20.85 по кинематическим измерениям [8]. Тогда угол к лучу зрения $\varphi \sim 2.7^\circ$.

Результаты моделирования структуры источника на 8.6 ГГц, представленные в Таблице 2, содержат параметры шести подогнанных круговых гауссовых компонент, а именно их потоки, размеры, а также местоположения в полярной системе координат с полюсом, совмещенным с РСДБ ядром. Ошибки даны на уровне 1σ .

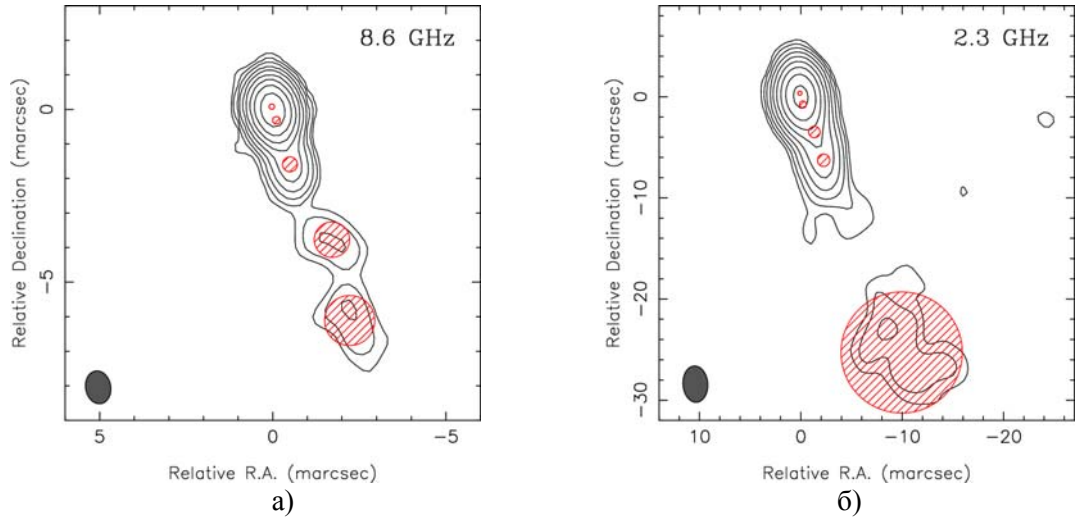


Рис. 1. Восстановленные РСДБ изображения источника 1823+568 на частоте 8.6 ГГц (а) и 2.3 ГГц (б) с использованием естественного взвешивания данных. Эллипс синтезированной диаграммы направленности по уровню половинной мощности показан в левом нижнем углу. Контуров равной интенсивности потока проведены с шагом 2. Нижний контур соответствует 0.22 % и 0.31 % от пикового значения карты 912 и 546 мЯн/луч на 8.6 и 2.3 ГГц, соответственно. Положения и размеры компонент, полученные из моделирования, показаны заштрихованными кружками.

Таблица 2

Модель источника 1823+367 на частоте 8.6 ГГц на эпоху 12 марта 2003 г.

Компонент	S , мЯн	r , мсек	θ , град	d , мсек
Ядро	751 ± 2	0.000 ± 0.001	0.0 ± 0.0	0.152 ± 0.002
C4	296 ± 2	0.322 ± 0.009	-161.5 ± 0.3	0.220 ± 0.004
C3	66 ± 2	1.570 ± 0.036	-162.7 ± 0.4	0.429 ± 0.029
C2	23 ± 2	4.463 ± 0.104	-155.7 ± 1.1	1.020 ± 0.128
C1	24 ± 4	6.584 ± 0.193	-160.1 ± 1.7	1.448 ± 0.364

Распределение ансамбля релятивистских электронов по энергиям в выбросе неравномерно и чаще всего аппроксимируется степенной зависимостью вида $N(E) \sim E^{-\gamma} dE$, где γ – показатель энергетического спектра электронов, а величина $\alpha = (1 - \gamma)/2$ называют спектральным индексом, связывающим интенсивность синхротронного излучения с частотой соотношением $S \sim \nu^\alpha$. Таким образом, если наблюдения проведены на двух разных частотах ν_1 и ν_2 , становится возможным определение величины $\alpha = \log(S_1 / S_2) / \log(\nu_1 / \nu_2)$. В нашем случае, источник наблюдался одновременно на 2.3 и 8.6 ГГц, что дало возможность

исследования спектральных характеристик объекта путем построения карты спектрального индекса α .

Для корректного построения распределения спектрального индекса нужно не только привести карты интенсивности к одинаковому разрешению, свернув изображения с одинаковой (например, усредненной) диаграммой, использовать одинаковый размер пикселя и поля зрения, но что самое главное – совместить изображения с максимальной точностью. Дело в том, что в процессе гибридного картографирования теряется абсолютная координатная привязка, и самая яркая деталь изображения имеет тенденцию располагаться вблизи фазового центра. К тому же, на разных частотах наблюдения оптически толстое РСДБ ядро располагается на разных расстояниях от начала струи из-за эффектов поглощения, в основном синхротронного самопоглощения [9]. Таким образом, для совмещения карт должны использоваться только ахроматические области выброса, т.е. положение которых не зависит от частоты наблюдения, причем, не имеющие значительных градиентов спектрального индекса. В данной работе для нахождения соответствующего сдвига между картами использовался метод двумерной кросс-корреляции [10]. Найденный и в дальнейшем учтенный сдвиг между картами на 2.3 и 8.6 ГГц, при котором достигается максимальный коэффициент корреляции, составил 0.13 мсек вдоль оси прямого восхождения и 0.42 мсек вдоль оси склонения. Полученная карта распределения спектрального индекса показана на Рис. 2 (слева). Видно, что область РСДБ ядра характеризуется значениями спектрального индекса ~ 0.5 .

Чтобы оценить типичное значение спектрального индекса струи, а именно оптически тонкой его области, был проведен следующий анализ. Сначала была определена так называемая хребтовая линия (продольный профиль) яркости выброса, местоположение каждой точки которой определяется координатами максимума вписанной в поперечное сечение струи гауссианы. Точки хребтовой линии располагаются примерно на одинаковом расстоянии друг от друга, соответствующем размеру пикселя, 0.2 мсек. Начальная точка соответствует положению РСДБ ядра на 8.6 ГГц. Процедура останавливается, когда пиковое значение вписанной гауссианы становится меньше четырехкратной величины остаточного шума на карте. На Рис. 2 (справа вверху) показан продольный профиль яркости на 8.6 ГГц. Значения α вдоль хребтовой линии были извлечены из карты распределения спектрального индекса, а соответствующий профиль показан на Рис. 2 (справа внизу). Далее, чтобы исключить влияние оптически частично непрозрачной области на оцениваемую величину спектрального индекса струи необходимо замаскировать область РСДБ ядра до расстояния $r_{core} < 0.5(b_{\theta}^2 + d_{\theta}^2)^{0.5}$, где b_{θ} и d_{θ} – размеры диаграммы направленности и РСДБ ядра вдоль позиционного угла θ внутренней области джета. Наконец, величина спектрального индекса струи $\alpha_{jet} = -0.54$ была оценена как медианное значение оставшихся точек профиля. Ошибки спектрального индекса оценивались из соотношения $\Delta\alpha = [(\Delta S_1 / S_1) + (\Delta S_2 / S_2)]^{0.5} / |\ln(\nu_1 / \nu_2)|$, где ΔS и S – остаточный шум на карте и плотность потока излучения в данном пикселе.

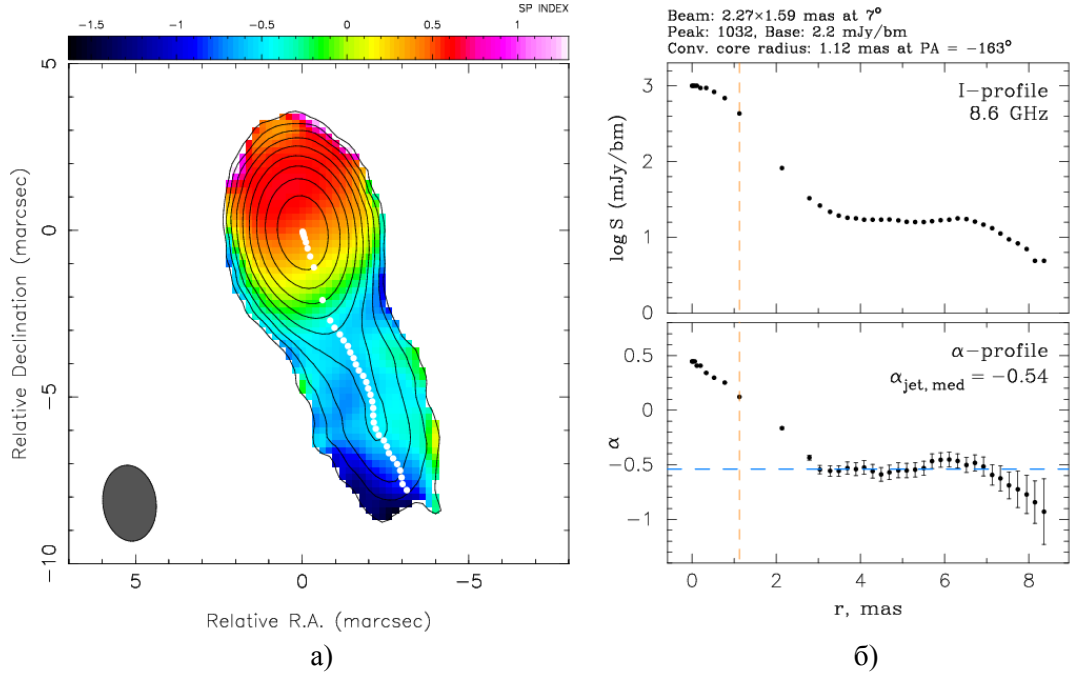


Рис. 2. Карта распределения спектрального индекса (а), совмещенная с контурами равной интенсивности по данным на частоте 8.6 ГГц, проведенными с коэффициентом 2. Нижний контур показан на уровне 0.21 % от пикового значения 1032 мЯн/луч. Карта свернута с диаграммой направленности, усредненной по размерам соответствующих диаграмм на 2.3 и 8.6 ГГц. Белыми точками показана хребтовая линия выброса. Эволюция яркости (б, вверху) и спектрального индекса (внизу) вдоль хребтовой линии. Вертикальная пунктирная линия ограничивает область РСДБ ядра. Горизонтальная пунктирная линия задает медианное значение спектрального индекса струи. Ошибки значений спектрального индекса показаны на уровне 1σ.

3. ЭВОЛЮЦИЯ ЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО СТРУЕ

Когда источник имеет богатую структуру выброса, становится возможным измерение яркостной температуры его компонент с помощью соотношения

$$T_b = \frac{2 \ln 2}{\pi k} \frac{S \lambda^2 (1+z)}{d^2}, \quad (1)$$

где λ – длина волны наблюдения, k – постоянная Больцмана. Таким образом, можно исследовать характер эволюции яркостной температуры в зависимости от расстояния до РСДБ ядра. Сгусток релятивистской плазмы, регистрируемый нами как компонент выброса, двигаясь по центральному каналу струи, интенсивно высвечивается, теряя энергию на синхротронное излучение и на адиабатическое расширение. При этом размеры компонента растут. Оба эти фактора приводят к

довольно быстрому падению яркостной температуры вдоль струи. Анализ, проведенный в работе [7] показывает, что яркостная температура в зависимости от расстояния r до ядра, а также в зависимости от размера компонента d хорошо аппроксимируется степенной зависимостью вида $T_b \sim r^{-k}$ и $T_b \sim d^{-\xi}$, соответственно.

Зависимости вида $T_b \sim d^{-\xi}$ с учетом компонента РСДБ ядра могут быть использованы для проверки модели, обсуждаемой в работе [11], в которой наблюдаемые уярчения (компоненты) в выбросах объектов связаны с релятивистскими ударными волнами, а доминирующий вклад в регистрируемое излучение из этих областей связан с потерями энергии на адиабатическое расширение. В данной модели постулируется степенное распределение излучающих частиц по энергиям $N(E) \sim E^{-\gamma} dE$ и магнитное поле, эволюционирующее как $B \sim d^{-a}$, где d – поперечный размер выброса, a – параметр, задающий направление магнитного поля относительно локального направления выброса ($a=1$ в случае ортогональной ориентации магнитного поля, $a=2$ в случае продольной ориентации), а также предполагается, что Допплер-фактор в пределах детектируемого выброса постоянен или слабопеременен. Тогда, как показано в работе [12], яркостная температура компонентов струи $T_{b,jet}$ связана с яркостной температурой РСДБ ядра (как основания выброса) $T_{b,core}$ следующим образом:

$$T_{b,jet} = T_{b,core} \left(\frac{d_{jet}}{d_{core}} \right)^{-\xi}, \quad (2)$$

где d_{core} и d_{jet} представляют собой измеренные размеры ядра и компонентов выброса, а $\xi = [2(2\gamma + 1) + 3a(\gamma + 1)]/6$. Переходя от индекса γ распределения частиц по энергиям к спектральному индексу $\alpha = (1 - \gamma)/2$, получим

$$\xi = a + 1 - \alpha(a + 4/3). \quad (3)$$

Величину ξ можно определить как параметр регрессионной кривой $T_b \sim d^{-\xi}$, используя размеры компонент, полученные из моделирования, а также рассчитанные яркостные температуры (Рис. 3, а). По данным на 8.6 ГГц, индекс $\xi = -3.6 \pm 0.2$. На Рис. 3, б представлены как измеренные яркостные температуры на 8.6 ГГц, так и модельные, определенные из соотношения (2). Как видно, соответствующие величины согласуются в пределах ошибок.

Дополнительной проверкой модели является оценка параметра a , как ориентации магнитного поля по отношению к локальному направлению выброса. Используя найденное медианное значение спектрального индекса струи, $\alpha_{jet} = -0.54$, а также оценку параметра $\xi = -3.6 \pm 0.2$, из равенства (3) получим, что $a = 1.2 \pm 0.2$, т.е. магнитное поле имеет преимущественно поперечный характер. Это согласуется с поляризационными картами этого объекта представленными в работе [13].

Таким образом, результаты проведенного анализа предполагают, что яркие компоненты РСДБ выброса, наблюдающиеся в источнике 1823+568, могут представлять собой фронты релятивистских ударных волн.

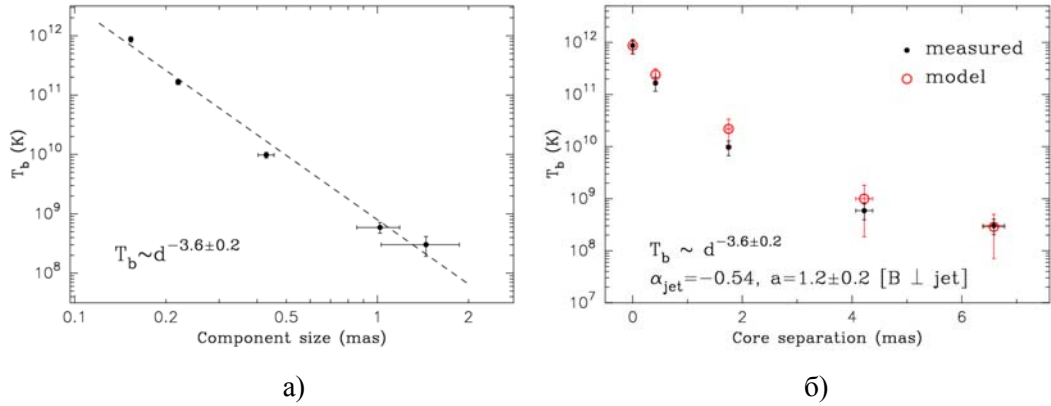


Рис. 3. Яркостная температура компонент выброса в источнике 1823+568 как функция их размера (а). Пунктирная линия представляет регрессионную зависимость методом наименьших квадратов и дает $\xi = -3.6 \pm 0.2$. Яркостная температура компонент как функция расстояния до РСДБ ядра (б). Измеренные и предсказанные моделью значения яркостных температур согласуются в пределах ошибок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате обработки данных восстановлены РСДБ карты распределения радиояркости объекта типа BL Lacertae 1823+568 на частоте 2.3 и 8.6 ГГц. Построено и исследовано распределение спектрального индекса по источнику. Область РСДБ ядра характеризуется спектральным индексом ~ 0.6 , тогда как оптически тонкое излучение струи имеет медианный спектральный индекс -0.54 . Структура источника промоделирована рядом круговых гауссовых компонент, размеры и яркостные температуры которых согласуются с излучением фронтов релятивистских ударных волн, распространяющихся по РСДБ выбросу.

Список литературы

1. Gabuzda D. C. Unusual radio properties of the BL Lac object 0820+225 / Gabuzda D. C., Pushkarev A. B., Garnich N. N. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2001. – Vol. 327. – P. 1-9.
2. Lobanov A. P. Ultracompact jets in active galactic nuclei / Lobanov A. P. // Astronomy and Astrophysics. – 1998. – Vol. 330. – P. 79-89.
3. Hada K. An origin of the radio jet in M87 at the location of the central black hole / Hada K., Doi A., Kino M., Nagai H., Hagiwara Y., Kawaguchi N. // Nature. – 2011. – Vol. 477. – P. 185-187.
4. Komatsu E. Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy probe Observations: Cosmological Interpretation / Komatsu E., Dunkley J., Nolte M. R. et al. // Astrophysical Journal Supplement – 2009. – Vol. 180. – P. 330-376.

5. Greisen E. The Astronomical Image Processing System / Greisen E. // Seminar on Acquisition, Processing and Archiving of astronomical Images. – 1990. – P. 125-142.
6. Shepherd M. C. DIFMAP: an interactive program for synthesis imaging / Shepherd M. C., Pearson T. J., Taylor G. B. // Bull. Am. Astron. Soc. – Vol. 26, No 2. – P. 987-989.
7. Pushkarev A. B. Single-epoch VLBI imaging study of bright active galactic nuclei at 2 and 8 GHz / Pushkarev A. B., Kovalev Y. Y. // Astronomy & Astrophysics. – 2012. in press, arXiv:1205.5559.
8. Lister M. L. MOJAVE: Monitoring of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. VI. Kinematics Analysis of a Complete Sample of Blazar Jets / Lister M. L., Cohen M. H., Homan D. C. et al. // Astronomical Journal. – 2009. – Vol. 138. – P. 1874-1892.
9. Sokolovsky K. V. A VLBA survey of the core shift effect in AGN jets. I. Evidence of dominating synchrotron opacity / Sokolovsky K. V., Kovalev Y. Y., Pushkarev A. B., Lobanov A. P. // Astronomy & Astrophysics. – 2011. – Vol. 532. – P. 38-49.
10. Lewis J. P. Fast Normalized Corss-Correlation / Lewis J. P. // Vision Interface. Canadian Image Processing and Pattern Recognition Society – 1995. – P. 120-123.
11. Marscher A. P. Interpretation of Compact Jet Observations / Marscher A. P. // Parsec-scale radio jets, ed. J. A. Zensus & T. J. Pearson. – 1990. – P. 236-245.
12. Lobanov A. P. 86 GHz VLBI survey of compact radio sources / Lobanov A. P., Krichbaum T. P., Graham D. A. et al. // Astronomy & Astrophysics–2000. – Vol. 364. – P. 391-408.
13. Lister M. L. MOJAVE: Monitoring of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. I. First-Epoch 15 GHz Linear Polarization Images / Lister M. L., Homan D. C. // Astronomical Journal – 2000. – Vol. 130. – P. 1389-1417.

Пушкаръов О. Б. Релятивістські ударні хвилі у струмені об'єкта типу BL Lacertae 1823+568 / Пушкаръов О. Б. // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Фізико-математичні науки. – 2012. – Т. 25(64), № 1. – С. 17-25.

За допомогою методу радіоінтерферометрії з наддовгими базами (РНДБ) були проведені спостереження ядра активної галактики 1823+568 одночасно на частоті 2.3 і 8.6 ГГц за участю 17 антен. Відновлено карти розподілу радіояскравості і спектрального індексу об'єкта. Встановлено, що еволюція яркостної температури і поперечних розмірів РНДБ-компонентів викиду узгоджуються з моделлю релятивістських ударних хвиль, випромінювання яких домінували втратами енергії на адиабатичне розширення.

Ключові слова: активні ядра галактик, струмені, магнітні поля, інтерферометрія.

Pushkarev A. B. Relativistic shocks in compact jet of BL Lacertae object 1823+568 / Pushkarev A. B. // Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. – Series: Physics and Mathematics Sciences. – 2012. – Vol. 25(64), No 1. – P. 17-25.

Using the method of very long baseline interferometry (VLBI), the active galactic nucleus 1823+568 was observed simultaneously at a frequency of 2.3 and 8.6 GHz, with the participation of 17 antennas. The maps of the distribution of radio brightness and spectral index of the object were reconstructed. It is found that the evolution of brightness temperature and the transverse sizes of the VLBI jet components are consistent with a model of relativistic shocks dominated by adiabatic energy losses.

Keywords: active galactic nuclei, jets, magnetic fields, interferometry.

Поступила в редакцію 19.04.2012 г.