

УДК: 524—56—77

## СВЯЗЬ МЕЖДУ ПЕРЕМЕННОСТЬЮ VL Lac В РАДИО И ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНАХ

В. Н. БЕЛОВ, В. А. ГАГЕН-ТОРН, С. Г. МАРЧЕНКО

Поступила 15 февраля 1988

Принята к печати 16 марта 1988

Проводится сопоставление изменений потоков в оптическом и радио диапазонах у VL Lac по данным в полосе  $B$  и на  $3.7$  см за период 1968—1984 гг. Установлено присутствие корреляции между радио и оптической переменностью при запаздывании вариаций в радиодиапазоне на  $\approx 480$  дней. Это указывает на общность причин переменности и дает сведения о различиях в пространственной структуре оптического и радиоконсточника. Сопоставление поляризованных данных в оптике и радио указывает на наличие у VL Lac крупномасштабного стабильного магнитного поля, охватывающего области, излучающие и в оптике, и в радио.

**1. Введение.** Одним из характерных свойств лацертид является переменность их потока как в оптическом, так и в радио диапазонах. Изучение связи между этими изменениями может дать важную информацию об источнике, ответственном за переменность. Существование корреляции между изменениями потоков в разных диапазонах может свидетельствовать об общности причин, вызывающих эти изменения, а величина временной задержки дает сведения о пространственной структуре источника.

В литературе имеются указания на наличие корреляции между изменениями потока в радио и оптическом диапазонах у лацертид. Так, OJ 287 по данным за 1970—75 гг. отмечена такая корреляция при задержке вариаций радиопотока относительно оптического на 0.9 года [1], а у AO 0235+164 уверенно зарегистрированы две одновременные вспышки (в 1975 г. и в 1979 г.) большой амплитуды в радио и оптическом диапазонах [2].

Имеются некоторые указания на наличие подобных корреляций и у VL Lac. Так, в работе Хекни и др. [3] по данным за период с апреля 1968 г. по декабрь 1971 г. было отмечено запаздывание радиовспышек на  $2.8$  см по отношению к оптическим (в полосе  $B$ ) на 2—8 месяцев. В работе Помфри и др. [1], в которой проводилось сопоставление изменений потоков в радио и оптическом диапазонах для целого ряда активных внегалактических объектов, изучена и VL Lac. Для нее по данным за 1968—76 гг.

отмечено возможное существование корреляции между изменениями потоков в оптике и на 2.8 см с запаздыванием в радиодиапазоне примерно на 0.5 года.

В 80-х годах у BL Lac была отмечена повышенная активность в радиодиапазоне. На сантиметровых волнах зарегистрирован целый ряд вспышек: наиболее сильная — в середине 1980 г., следующая — в начале 1981 г., третья — в конце 1982 г. и четвертая — в середине 1983 г. [4, 5]. Нами в этот период велись фотометрические наблюдения BL Lac в полосе  $B$  [6]. Таким образом, для BL Lac в настоящее время имеется богатый наблюдательный материал для проведения поисков взаимной корреляции в изменениях потоков в радио и оптическом диапазонах. Этому вопросу и посвящена настоящая статья.

2. Построение сводных кривых блеска в радио и оптическом диапазонах. Основу исследуемого ряда наблюдений BL Lac в оптике составляют оценки блеска в полосе  $B$ , полученные в Астрономической обсерватории Ленинградского университета в рамках обширной программы фотометрического патрулирования компактных внегалактических объектов. Этот ряд был дополнен данными других авторов. Большая часть их наблюдений также выполнена в полосе  $B$ , но нами использовались и оценки блеска в полосе  $V$ . Для этого на основании фотоэлектрических оценок блеска BL Lac в полосах  $B$  и  $V$  была изучена связь между показателем цвета  $B-V$  и величиной  $V$  (соответствующий график приведен в нашей работе [7]). Эта связь была представлена линейной зависимостью, по которой по величине  $V$  находился показатель цвета  $B-V$ , а затем величина  $B$ . Для фотоэлектрических наблюдений (которых немного по сравнению с фотографическими оценками блеска) проводилась коррекция результатов к диафрагме диаметром 7", для чего были использованы результаты наблюдений BL Lac с разными диафрагмами из работы Кинмана [8]. Сводная кривая блеска BL Lac в полосе  $B$ , построенная нами по данным 1968—1982 гг. [9], была дополнена данными работы [6].

Величины  $B$  переводились в плотности потока в миллианских с использованием абсолютной калибровки Джонсона [10]. Полученный ряд оценок плотностей потока BL Lac в полосе  $B$  за период с 1968 г. по 1984 г., насчитывающий 1089 точек, изображен графически на рис. 1а. Ошибки оценок плотностей потока в оптике не превышают 0.5 мЯн.

Данные для радиодиапазона представляют собой оценки плотностей потока в ясных на 3.7 см. Результаты за 1968—76 гг. найдены по таблице, содержащейся в работе [11], в которой приведены плотности потоков на 2.8 см и 4.5 см. Данные на 3.7 см получены интерполяцией с учетом спектрального индекса, найденного в тех случаях, когда имеются одновременные наблюдения на 2.8 см и 4.5 см. За период с 1979 г. по 1984 г. данные

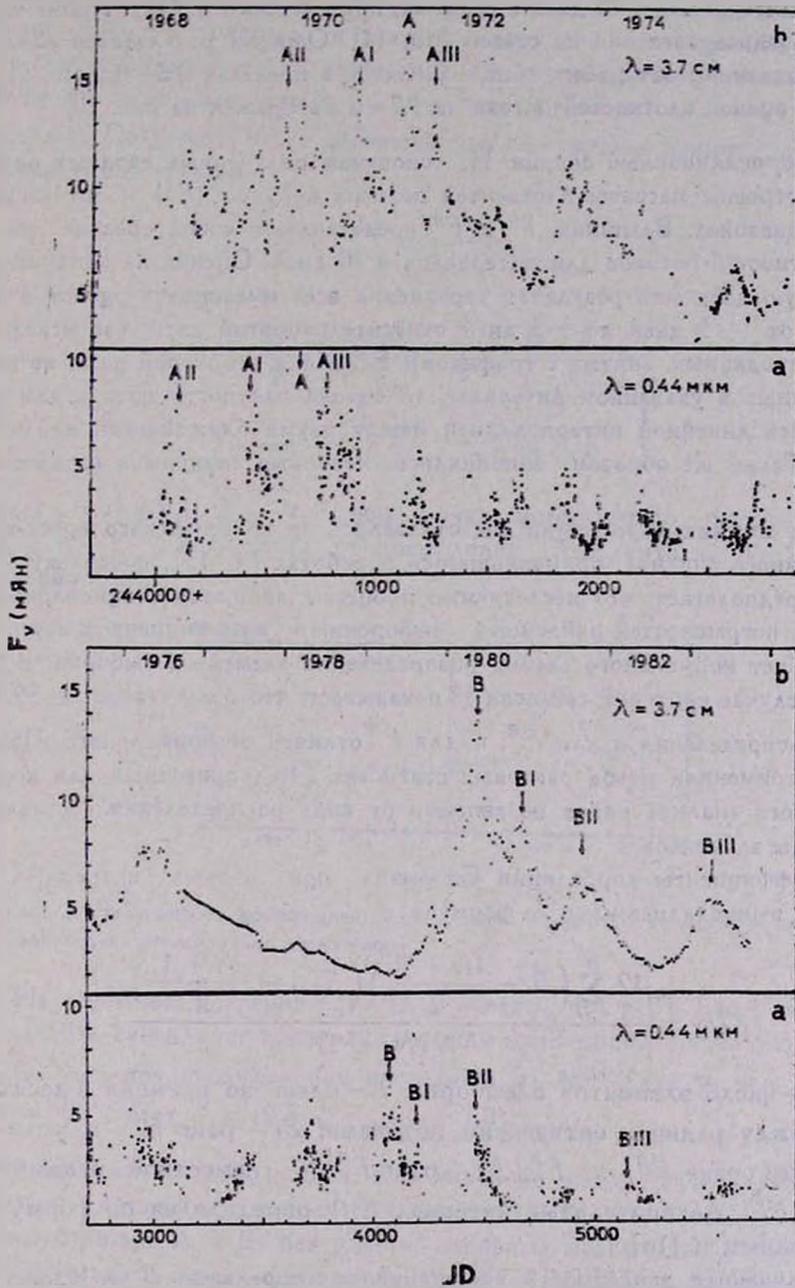


Рис. 1. Изменение со временем плотности потока BL Lac: а) в оптическом диапазоне; б) в радиодиапазоне.

сняты с интервалом в 10 дней с графика, приведенного в [12]. Кроме того использовались сведения из статей [13, 14]. Ошибки результатов наблюдений, указанные авторами работ, находятся в пределах 0.2—0.5 Ян. Полный ряд оценок плотностей потока на 3.7 см изображен на рис. 1б.

3. *Корреляционный анализ.* На основании полученных сводных рядов были построены массивы плотностей потоков в радио  $\{F^R\}$  и оптическом  $\{F^B\}$  диапазонах. Величины  $F^R$  и  $F^B$  представляют собой средние значения плотностей потоков для интервалов в 10 дней. Оценка на конкретную юлианскую дату есть результат усреднения всех имеющихся оценок в интервале от  $-5$  дней до  $+5$  дней относительно этой даты (за исключением радиоданных, снятых с графиков). Если для некоторой даты не имелось данных в указанном интервале, то оценка плотности потока для нее получалась линейной интерполяцией между двумя ближайшими наблюдениями. Таким же образом заполнялись сезонные лакуны в оптическом ряду.

При поисках корреляции мы отказались от классического кросс-корреляционного анализа, применявшегося в работах [1, 15], поскольку этот метод предполагает, что исследуемые процессы являются стационарными, а оценка погрешностей найденных выборочных коэффициентов корреляции требует нормального закона распределения элементов выборки. В нашем же случае критерий согласия  $\chi^2$  показывает, что с вероятностью 99.9% закон распределения и для  $F^R$ , и для  $F^B$  отличается от нормального. Поэтому мы применили метод ранговых статистик [16], пригодный для корреляционного анализа рядов независимо от вида распределения составляющих: ряды элементов.

Коэффициенты корреляции Спирмена при разных временных задержках вычислялись нами по формуле

$$S(t) = \frac{12 \sum_{i=1}^N \left( B_i - \frac{N+1}{2} \right) \left( R_{i+t} - \frac{N+1}{2} \right)}{N(N^2 - 1)}, \quad (1)$$

где  $N$  — число элементов в выборке;  $t$  — сдвиг по времени в десятках дней между радио и оптическим потоками;  $B_i$  — ранг  $F_i^B$  в совместной ранжировке  $F_1^B, \dots, F_N^B$ ;  $R_i$  — ранг  $F_i^R$  в совместной ранжировке  $F_1^R, \dots, F_N^R$ . Доверительный интервал  $S(t)$  определялся по формулам, приведенным в [16].

Полученная зависимость коэффициента корреляции  $S$  от сдвига по времени между радио и оптическими потоками представлена на рис. 2. Вертикальной чертой отмечена величина доверительного интервала для  $S$  при уровне значимости  $\alpha = 0.01$ . Максимальное значение  $S$  ( $0.63 \pm$

$\pm 0.12$ ) достигается при времени запаздывания радиопотока на  $480^d$ . Можно оценить, является ли указанное значение коэффициента корреляции достаточным для того, чтобы принять гипотезу о существовании корреляции между изменениями радио и оптического потоков при найденной задержке. Согласно [16], с вероятностью  $1-\alpha$  можно принять рассматриваемую гипотезу, если

$$J > J_{(\alpha, N-2)}, \quad (2)$$

где

$$J = \frac{S}{2} \left( \sqrt{N-1} + \sqrt{\frac{N-2}{1-S^2}} \right), \quad (3)$$

$$J_{(\alpha, N-2)} = \frac{1}{2} Z_{\alpha_1} + \frac{1}{2} T_{(\alpha_2, N-2)}$$

здесь  $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$ ;  $Z_{\alpha_1}$  —  $\alpha_1$  %-ная точка нормального распределения;  $T_{(\alpha_2, N-2)}$  —  $\alpha_2$  %-ная точка распределения Стьюдента с  $N-2$  степенями свободы.

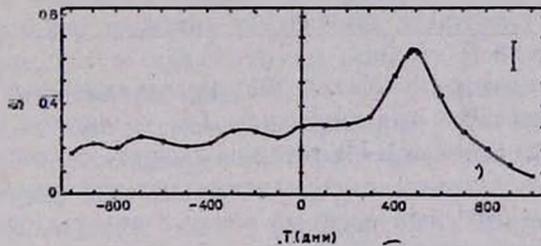


Рис. 2. Зависимость коэффициента корреляции Спирмена от времени запаздывания радиопотока относительно оптического.

На основании критерия (2) можно считать, что у BL Lac с вероятностью 99.8% существует корреляция между изменениями оптического и радио потоков при запаздывании последнего на  $480^d$  (для  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.001$  и  $N = 500$  будет  $J = 12.8$ ,  $J_{(\alpha, N-2)} = 3.3$ ).

4. *Обсуждение результатов.* Как видно из рассмотрения рис. 1, и в радио, и в оптических данных выделяются две группы вспышек. Они отмечены буквами А и В: без цифр — основные максимумы, с цифрами — максимумы до и после основного (будем называть их боковыми). Обе группы вспышек имеют одинаковую продолжительность в оптическом и радио диапазонах: А  $\sim 4$  лет, В  $\sim 2.5$  лет. Максимальная плотность потока, зафиксированная на длине волны 3.7 см во время вспышки А

(14.8 Ян), является самой большой за весь исследуемый период. Основной максимум в оптике (если считать, что запаздывание радиопотока равняется  $480^d$ ) должен приходиться на период, когда оптические наблюдения отсутствуют, но ближайшее к этому моменту зарегистрированное значение плотности потока (9.5 мЯн) также является максимальным в полосе В за 1968—84 гг.

Таблица 1  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ВСПЫШЕК В ОПТИЧЕСКОМ И  
РАДИО ДИАПАЗОНАХ

Вспышка	Момент. J. D. 2440000+		Сдвиг, дни	Амплитуда	
	Оптика	Радио		Оптика	Радио
А I	42	575	533	0.86	0.81
А II	411	907	486	0.86	0.83
А	592	1128	536	1.0	1.0
А III	774	1253	479	0.88	0.90
В	4070	4470	400	1.0	1.0
В I	4200	4670	470	0.56	0.65
В II	4460	4900	440	0.77	0.50
В III	5130	5530	400	0.27	0.39

В табл. 1 приведены моменты наблюдаемых основных и боковых максимумов и их относительные амплитуды (по сравнению с максимальной для данной группы вспышек). Из таблицы следует, что моменты наблюдаемых максимумов в радиодиапазоне запаздывают относительно максимумов в оптике на  $400^d$ — $540^d$ , причем имеет место довольно хорошее сходство в относительных амплитудах вспышек, что свидетельствует в пользу общности причины их появления.

Такая картина может наблюдаться, если первоначально событие проявляется в области, ответственной за оптическое излучение. Оценка размеров этой области, полученная по скорости переменности, составляет  $R \lesssim 10^{14} \div 10^{15}$  см [17]. Выброшенные релятивистские электроны достигают области, ответственной за радиоизлучение, за время, равное задержке изменений потока в радиодиапазоне по отношению к оптическому. При красном смещении  $z = 0.07$  [18], время запаздывания в системе источника будет  $450^d$ . Считая, что скорость электронов  $v \sim (0.5 \div 0.8) c$ , получим оценку расстояния между оптическим и радиоисточником  $d \simeq 0.2$  пк.

В работе Филлипса и Мьютела [19] приведены карты распределения радиояркости BL Lac, полученные при наблюдениях со сверхдлинной базой на  $\lambda = 2.8$  см в две эпохи: 1980.93 (декабрь 1980 г.) и 1981.44 (июнь

1981 г.). На обеих картах источник имеет вытянутую структуру и состоит из двух компонентов (обозначенных авторами «А» и «В»). Из сопоставления этих карт авторы статьи делают вывод о существовании быстрого расширения источника с видимой скоростью, превышающей  $5c$  (при  $H_0 = 55$  км/с/Мпк и  $q_0 = 0.05$ ), причем есть основания предполагать, что компонент «В» удаляется от стационарного компонента «А» («В» «выброшен» из «А»). Если считать, что скорость компонента «В» постоянна, то момент его «выброса» приходится приблизительно на JD 2444300, что совпадает с началом группы вспышек В на  $\lambda = 3.7$  см (рис. 1b).

Итак, общий сценарий события можно представить себе следующим образом. В результате взрыва на центральном объекте, природу которого мы не конкретизируем, происходит выброс релятивистских электронов, которые менее, чем за день (а возможно и сразу же) достигают области, дающей оптическое излучение (согласно [20] это излучение синхротронное). Радиоизлучающая область отстоит от излучающей в оптике на расстоянии  $\approx 0.2$  пк. По достижении электронами этой области (через  $\approx 450$  дней) начинается вспышка в радиодиапазоне. В этот момент в радиоструктуре появляется компонент, который в дальнейшем фиксируется при наблюдениях со сверхдлинной базой (компонент «В»). Кажущаяся сверхсветовая скорость его движения объясняется релятивистскими эффектами.

Отметим еще, что во время группы вспышек В были выполнены наблюдения линейной поляризации BL Lac на сантиметровых длинах волн [5] и установлено, что степень поляризации у BL Lac увеличилась до 10%, а направление поляризации менялось очень мало. Коррекция направлений поляризации, полученных на разных длинах волн, на оптическую область с использованием меры фарадеевского вращения в Галактике  $RM = -198$  рад/м<sup>2</sup>, найденной для BL Lac в [21], дает направления в интервале  $20^\circ \div 30^\circ$ . Ранее нами было установлено [17], что в оптическом диапазоне у BL Lac существует преимущественное направление поляризации  $\theta_0 \approx 20^\circ$ . Можно считать, таким образом, что у BL Lac имеется крупномасштабное стабильное магнитное поле, охватывающее области как оптического, так и радиоизлучения.

5. *Заключение.* Основные результаты этой работы можно резюмировать следующим образом. У BL Lac присутствует корреляция между радио и оптической переменностью при запаздывании вариаций в радиодиапазоне на  $\approx 480$  дней. Это указывает на общность причин переменности и дает сведения о различиях в пространственной структуре оптического и радиоисточника. Сопоставление поляризационных данных в оптике и в радио указывает на наличие у BL Lac крупномасштабного стабильного магнитного поля, охватывающего области, излучающие и в оптике, и в радио. Усиление активности в радиодиапазоне сопровождается появлением в ра-

диоструктуре компонента, фиксируемого впоследствии по данным интерферометрии со сверхдлинной базой.

Ленинградский государственный  
университет

## CORRELATION BETWEEN RADIO AND OPTICAL FLUX VARIATIONS OF BL LAC

V. N. BELOV, V. A. HAGEN-THORN, S. G. MARCHENKO

Comparison is carried out of BL Lac flux variations (1968—1984) in optical ( $B$ ) and radio (3.7 cm) wavelengths. The correlation is found with time delay of  $\approx 480$  days for radio fluxes. This is an evidence of common origin of variability. It gives some information on differences in space structure of optical and radio sources. Optical and radio polarization data on BL Lac indicate that both optical and radio sources are embedded in stable large-scale magnetic field.

### ЛИТЕРАТУРА

1. R. B. Pophry, A. G. Smith, R. J. Leacock, C. N. Olsson, R. L. Scott, J. T. Pollock, P. Edwards, *Astron. J.*, 81, 489, 1976.
2. T. J. Balonek, W. A. Dent, *Astrophys. J.*, 240, L3, 1980.
3. R. L. Hackney, K. R. Hackney, A. G. Smith, G. H. Folsom, R. J. Leacock, R. L. Scott, E. E. Epstein, *Astrophys. Lett.*, 12, 147, 1972.
4. H. D. Aller, P. E. Hodge, M. E. Aller, *Astrophys. J.*, 274, L19, 1983.
5. H. D. Aller, M. E. Aller, P. A. Hughes, *Astrophys. J.*, 298, 296, 1985.
6. В. А. Гаген-Торн, Н. С. Денисенко, Т. М. Максимова, С. Г. Марченко, О. Б. Михолайчук, *Тр. АО ЛГУ*, 41, 96, 1987.
7. В. А. Гаген-Торн, С. Г. Марченко, В. А. Яковлева, *Астрон. ж.*, 61, 925, 1984.
8. T. D. Kinman, *Astrophys. J.*, 197, L49, 1975.
9. В. А. Гаген-Торн, *Диссертация*, ЛГУ, 1986.
10. H. L. Johnson, *Com. LPL*, 3, 79, 1965.
11. B. H. Andrew, J. M. MacLeod, G. A. Harvey, W. J. Medd, *Astron. J.*, 83, 863, 1978.
12. E. B. Waltman, B. J. Geldzahler, K. J. Johnston, J. H. Spencer, P. E. Angerhofer, D. R. Florkowski, F. J. Josties, D. D. McCarthy, D. N. Matsakis, *Astron. J.*, 91, 231, 1986.
13. H. D. Aller, M. E. Aller, P. E. Hodge, *Astron. J.*, 86, 325, 1981.
14. K. J. Johnston, B. J. Geldzahler, J. H. Spencer, E. B. Waltman, W. J. Klepczynski, F. J. Josties, P. E. Angerhofer, D. R. Florkowski, D. D. McCarthy, D. N. Matsakis, *Astrophys. J.*, 277, L30, 1984.
15. М. К. Бабаджанян, Е. Т. Белокозь, В. А. Горохов, *Астрофизика*, 22, 247, 1985.
16. М. Холлендер, Д. А. Вульф, *Непараметрические методы статистики, Финансы в статистика*, М., 1983.
17. В. А. Гаген-Торн, С. Г. Марченко, В. А. Яковлева, *Астрофизика*, 22, 5, 1985.
18. T. X. Thuan, J. B. Oke, J. E. Gunn, *Astrophys. J.*, 201, 45, 1975.
19. R. B. Phillips, R. L. Mutel, *Astrophys. J.*, 257, L19, 1982.
20. В. А. Гаген-Торн, С. Г. Марченко, В. А. Яковлева, *Астрофизика*, 25, 485, 1986.
21. L. Rudnick, T. W. Jones, B. K. Edgar, J. A. Pedetly, *Astron. J.*, 89, 316, 1984.