

УДК 524.7-77

## ИЗУЧЕНИЕ СВЯЗИ ИЗЛУЧЕНИЯ В ДЖЕТЕ И АККРЕЦИОННОМ ДИСКЕ БЛАЗАРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОЧАСТОТНЫХ ДАННЫХ РАТАН-600

© 2014 Т. В. Муфухаров<sup>1\*</sup>, Ю. В. Сотникова<sup>1</sup>, А. К. Эркенов<sup>1</sup>, М. Г. Мингалиев<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

Поступила в редакцию 15 июля 2013 года; принята в печать 23 июня 2014 года

В работе рассматривается корреляция между излучением из области образования широких линий (broad line region — BLR) и излучением в других диапазонах частот (от радио до рентгена) для выборки 37 блазаров (25 — квазары с плоским спектром (FSRQ), 10 — блазары типа BL Lac). Изучение соотношения светимостей различных диапазонов частот и светимости в BLR является эффективным методом при исследовании связи между темпом аккреции и светимостью в джете. Для радиодиапазона использовались одновременные измерения плотностей потоков блазаров, полученные на РАТАН-600 на частотах 1.1, 2.3, 4.8, 7.7, 11.2 и 21.7 ГГц. Данные наблюдений в других диапазонах взяты из литературы. С целью определения влияния состояния объекта на корреляцию для радиоданных использовались измерения, полученные на РАТАН-600 в двух состояниях — максимального и минимального значения плотности потока. Показано, что в некоторых состояниях радиодиапазона существует корреляция излучения с излучением BLR-области для блазаров двух типов. У FSRQ- и BL Lac-блазаров корреляция потока от BLR с потоком в радиодиапазоне неотличима за исключением случая, когда рассматривалось сильное изменение плотности потока для BL Lac-типа (десятки процентов). При этом уровни значимости для BL Lac (на некоторых частотах  $p$  хуже 0.05) в активном состоянии позволяют говорить лишь о вероятном наличии связи. На примере выборки показано, что переменность излучения значительно влияет на уровень корреляции. Результат работы не противоречит теоретическим предположениям о тесной взаимосвязи аккреционного диска и джета в блазарах.

Ключевые слова: квазары — лацертиды — галактики: ядра — галактики: джеты — радиоконтинуум: галактики

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Блазары — относительно редкий подкласс активных ядер галактик (АЯГ), характеризующийся наличием релятивистского джета, расположенного близко к лучу зрения наблюдателя ( $\theta < 20^\circ$ ) [1], поэтому считается, что релятивистские эффекты играют определяющую роль в наблюдаемых свойствах блазаров [2]. Объекты этого класса показывают переменность блеска на различных длинах волн и временных масштабах от часов до десятков лет, обнаруживают высокую и переменную поляризацию излучения [1, 3–5].

По наблюдательным свойствам блазары разделяют на два основных подкласса: квазары с плоским радиоспектром (flat-spectrum radio quasars — FSRQ) и объекты типа BL Lacertae. В оптическом спектре FSRQ наблюдаются сильные и широкие

эмиссионные линии, в то время как у объектов типа BL Lac редко имеются слабые эмиссионные или абсорбционные линии, чаще всего их спектр вовсе без каких-либо линий [1]. Предполагается, что FSRQ-блазары являются радиогалактиками типа FR II [6], ориентированными к нам своими джетами, а BL Lac-блазары — FR I-радиогалактиками (Fanaroff–Riley радиогалактики второго и первого типа).

Вопрос связи между излучением в джете и в аккреционном диске является одним из важных и до конца не изученных в исследовании АЯГ. В современных теоретических моделях предполагается, что джет образуется вблизи центральной черной дыры (ЧД), усиливаясь за счет её вращения, или происходит из аккреционного диска [7, 8]. В обоих случаях подразумевается существование связи между светимостью в джете и темпом аккреции вещества на ЧД. Эффективным методом исследова-

\*E-mail: timmy23@mail.ru

дования этой связи является изучение соотношения светимостей в различных диапазонах частот и светимости в области образования широких линий (broad line region — BLR), которая находится вблизи центрального объекта и ионизируется его излучением (см., например, работы [7, 9–12]). Сао и Jiang [10] обнаружили значительную корреляцию между излучением в радиодиапазоне и в BLR для 198 блазаров. В работе [13] авторы рассмотрели выборку из пятидесяти радиогромких квазаров, также продемонстрировав заметную корреляцию между потоками в различных диапазонах и в BLR, сделав вывод о существовании тесной связи релятивистского джета с аккрецией вещества на ЧД. Magaschi и Tavecchio [7] также обнаружили корреляцию между светимостью джета и светимостью ядра, вызванной аккрецией вещества, для небольшой выборки блазаров (одиннадцать FSRQ и пять BL Lac). Согласно этой работе, джеты блазаров подпитываются энергией быстро вращающейся ЧД посредством магнитного поля. Предполагается, что у FSRQ-блазаров масса ЧД приблизительно  $10^8$ – $10^9 M_\odot$  и высокий темп аккреции. У BL Lac-блазаров светимость джета сильнее, чем светимость диска. Это может быть объяснено тем, что у них темп аккреции значительно меньше, чем у FSRQ, и аккреционный диск светит незначительно, при этом масса центрального объекта может быть как у FSRQ [7].

В настоящей работе рассмотрена корреляция между излучением в BLR и в других диапазонах частот (от радио до рентгена) для выборки из 37 блазаров. Для этих источников известны потоки в широком диапазоне частот. Для радиодиапазона использовались квазиодновременные измерения на радиотелескопе РАТАН-600. Чтобы понять, как влияет состояние объекта на корреляцию потоков в разных диапазонах, мы выбрали для каждого объекта два состояния: максимального и минимального значения плотности потока, полученного на РАТАН-600 в 2005–2014 гг. Наиболее комплексным подходом для исследования взаимосвязи излучения в джете и в аккреционном диске является анализ потоков от BLR в широком диапазоне частот. Данная работа отличается от выполненных ранее (например, [13]) тем, что при анализе используются две декады радиодиапазона, измерения в которых выполнены одновременно, а также сравнивается корреляция в двух выделенных состояниях — активном и спокойном (в радиодиапазоне).

#### *Теоретические предсказания соотношения потоков от BLR и от джета*

Не до конца ясно, что является основным переносчиком энергии в джете: протоны и электроны

или вектор Пойнтинга? Энергии одних лишь электронов (позитронов) недостаточно для объяснения наблюдаемых энергий вспышек и светимостей «радиоушей». Поэтому в джетах, предположительно, должны доминировать протоны или присутствовать сильное магнитное поле. Также возможен механизм генерации джета, при котором в основании джета доминирует вектор Пойнтинга, а на больших (килопарсековых) расстояниях от основания — вещество [14]. Согласно работе [15], если возникновение джета можно приписать потоку Пойнтинга, то светимость может быть записана в виде:

$$L_{BZ} \sim 6 \times 10^{20} \left(\frac{a}{m}\right)^2 \left(\frac{M_{BH}}{M_\odot}\right)^2 B^2, \quad (1)$$

где  $L_{BZ}$  — светимость в эрг  $s^{-1}$ ,  $M_{BH}$  — масса ЧД,  $M_\odot$  — масса Солнца,  $B$  — величина магнитной индукции в Гс,  $\frac{a}{m}$  — угловой момент (примерно равен единице для наиболее быстро вращающихся ЧД). Если опустить промежуточные выкладки, которые можно посмотреть в работе [15], записываем максимальную светимость джета как:

$$L_{jet} \sim \frac{L_{disc}}{\eta} \sim \frac{dM}{dt} c^2, \quad (2)$$

где  $\frac{dM}{dt}$  — темп аккреции,  $L_{jet}$  — светимость джета,  $\eta$  — коэффициент, показывающий, какая минимальная часть энергии джета ( $P_{jet}$ ) должна высветиться, чтобы воспроизвести наблюдаемую светимость джета ( $L_{jet}$ ):

$$\eta = \frac{L_{jet}}{P_{jet}}. \quad (3)$$

Из работы [7], в которой обсуждается взаимосвязь излучения различных областей блазаров, известно следующее соотношение:

$$L_{BLR} = \tau L_{disc} = \tau \eta L_{jet}. \quad (4)$$

Здесь  $\tau$  — коэффициент, который показывает, какое количество энергии диска переизлучается в BLR. В итоге можно записать:

$$\lg L_{BLR} = \lg L_{jet} + \lg \eta + \text{const}. \quad (5)$$

Согласно этой формуле, коэффициент, характеризующий линейную регрессию  $\lg L_{BLR} - \lg L_{jet}$ , должен быть равен единице, а коэффициент  $\eta$ , характеризующий «эффективность» джета, ответственен за отклонение от линейной зависимости.

## 2. ОПИСАНИЕ ВЫБОРКИ И НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

При составлении выборки мы руководствовались следующим критерием: необходимы данные

для как можно большего диапазона частот и для как можно большего числа блазаров. На сегодняшний день известны несколько крупных обзоров блазаров (в радио- и рентгеновском диапазонах), но они проводились не одновременно, и по большинству источников данного класса практически невозможно найти наблюдательные данные во всех диапазонах, тем более проведенных хотя бы в один и тот же год. Для тридцати семи объектов, представленных в работе, известны потоки в широком диапазоне частот и доступны квази-одновременные радионаблюдения на РАТАН-600. Наблюдения неоднородны, проведены в различные эпохи — это, безусловно, влияет на результат: блазары являются сильнопеременными объектами во всех диапазонах.

В выборке представлены два различных типа объектов, относящихся к классу блазаров. У объектов типа FSRQ красное смещение заметно выше, чем у BL Lac, согласно данным каталога [16]. Для нашей выборки медианное значение красного смещения составило 0.67 для BL Lac- и 0.92 для FSRQ-блазаров.

2.1. Наблюдения на РАТАН-600

Наблюдения объектов проводились на радиотелескопе РАТАН-600 в период 2005–2014 гг. в рамках наблюдательных программ по многочастотному мониторингу ярких представителей АЯГ. Использовался режим меридианного инструмента — прохождение объектов через неподвижную диаграмму направленности антенны в верхней и нижней кульминациях северного и южного секторов [17]. Наблюдения проводились с использованием штатного комплекса радиометров на частотах 1.1, 2.3, 4.8, 7.7, 11.2 и 21.7 ГГц. Каждый объект наблюдался от пяти до пятнадцати раз за один наблюдательный цикл. Систематический мониторинг объектов выборки проводился в 2009 г.; в 2005, 2007 и 2010–2012 гг. наблюдались отдельные объекты. Все представленные в данной работе измерения блазаров, проведенные на РАТАН-600, опубликованы в работах [18–22]. Измерения некоторых объектов типа BL Lac также доступны в онлайн-каталоге.<sup>1</sup>

Обработка экспериментальных данных производилась с использованием модулей штатного комплекса FADPS — Flexible Astronomical Data Processing System [23], представляющего собой систему обработки для данных широкополосных радиометров континуума вторичного зеркала РАТАН-600. Методика обработки и калибровки измерений по плотности потока описана в работах [20–22]. Для калибровки измерений по

Таблица 1. Принятые значения плотностей потоков калибровочных объектов (в Ян)

| Источник | Частота, ГГц |      |      |      |       |       |
|----------|--------------|------|------|------|-------|-------|
|          | 21.7         | 11.2 | 7.7  | 4.8  | 2.3   | 1.1   |
| 3C 48    | 1.20         | 2.43 | 3.57 | 5.62 | 10.77 | 22.33 |
| J0237–23 | 1.00         | 1.18 | 1.64 | 2.66 | 4.74  | 7.01  |
| J0410+76 | 1.28         | 1.79 | 2.26 | 2.97 | 4.30  | 6.36  |
| 3C 138   | 1.07         | 1.93 | 2.62 | 3.75 | 6.14  | 10.23 |
| 3C 147   | 1.81         | 3.60 | 5.19 | 8.05 | 15.08 | 28.96 |
| 3C 161   | 1.26         | –    | 4.22 | 6.80 | 12.97 | 24.75 |
| J1154–35 | 0.73         | 1.43 | 1.99 | 2.93 | 4.59  | 7.76  |
| 3C 286   | 2.60         | 4.26 | 5.52 | 7.49 | 11.54 | 17.79 |
| J1347+12 | 1.12         | 1.76 | 2.13 | 2.95 | 4.13  | 6.02  |
| 3C 295   | 0.97         | 2.34 | 3.81 | 6.51 | 14.17 | 31.10 |
| 3C 309.1 | 1.05         | 1.73 | 2.27 | 3.19 | 5.35  | 10.02 |
| NGC 7027 | 5.34         | 6.21 | 6.40 | 5.32 | 2.68  | 0.81  |

плотности потока использовались стандартные вторичные и традиционные для РАТАН-600 калибровочные объекты : 3C 84, 3C 138, 3C 147, 3C 161, 3C 286, 3C 295, 3C 309.1 и NGC 7027, J0240–23, J1154–35, J0521+16, J0410+76. Параметры калибровочных объектов приведены в таблице 1. Предел обнаружения объектов при наблюдениях отдельного сектора РАТАН-600 приблизительно 8 мЯн на частоте 4.8 ГГц при хороших погодных условиях на средних углах ( $\delta \sim 40^\circ$ ). Средние относительные ошибки калибровки 2–10% на средних углах в зависимости от длины волны. Ошибки абсолютной шкалы потоков, оцененной в работах [24, 25], составляют 10% на 21.7 ГГц и 3–5% на остальных частотах. Суммарная среднеквадратичная ошибка измерения спектральной плотности потока исследуемых объектов 5–20% на 11.2, 7.7 и 4.8 ГГц и 10–25% на 1.1, 2.3 и 21.7 ГГц.

Использованные в работе экспериментальные данные РАТАН-600 представлены в таблице 2, где (1) — имя объекта; (2) — тип блазара по классификации [16]; (3) — состояние в радиодиапазоне: f — активное, l — спокойное; (4) — эпоха наблюдений на РАТАН-600; (5–10) — значения плотностей потоков и их стандартные ошибки на частотах 1.1, 2.3, 4.8, 7.7, 11.2 и 21.7 ГГц в Ян. Все объекты выборки достаточно яркие — плотность потока на 4.8 ГГц от 1 Ян и больше.

<sup>1</sup><http://www.sao.ru/blcat/>

**Таблица 2.** Значения плотностей потоков исследуемых блазаров, измеренных на РАТАН-600 в разные наблюдательные эпохи

| Имя (IAU)  | Тип    | s   | Эпоха      | S, Ян      |            |            |            |            |           |
|------------|--------|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|
|            |        |     |            | 21.7       | 11.2       | 7.7        | 4.8        | 2.3        | 1.1       |
| (1)        | (2)    | (3) | (4)        | (5)        | (6)        | (7)        | (8)        | (9)        | (10)      |
| J0217+7349 | FSRQ   | l   | 2011.02.25 | 2.51±0.08  | 3.51±0.09  | 3.73±0.17  | 3.64±0.10  | —          | 2.84±0.21 |
|            |        | f   | 2012.11.16 | 3.18±0.18  | 3.52±0.09  | 3.71±0.09  | 3.62±0.12  | —          | —         |
| АО 0235+16 | BL Lac | l   | 2014.01.23 | 0.65±0.01  | 0.70±0.04  | 0.67±0.04  | 0.78±0.08  | —          | —         |
|            |        | f   | 2008.12.25 | 5.73±0.07  | 6.35±0.33  | 6.36±0.24  | 5.48±0.49  | 2.69±0.17  | 1.35±0.10 |
| B0420–0127 | FSRQ   | l   | 2009.05.01 | 5.10±0.48  | 4.75±0.69  | 4.17±0.61  | 3.22±0.23  | 2.09±0.21  | —         |
|            |        | f   | 2010.01.22 | 7.89±0.06  | 6.46±0.13  | 5.90±0.14  | 4.22±0.08  | 2.53±0.11  | —         |
| J0646+4451 | FSRQ   | l   | 2009.04.27 | 2.87±0.09  | 3.96±0.11  | 4.31±0.15  | 3.05±0.13  | 1.55±0.31  | —         |
|            |        | f   | 2009.11.16 | 2.87±0.04  | 4.06±0.11  | 4.50±0.17  | 2.72±0.12  | 1.46±0.07  | —         |
| J0739+0137 | FSRQ   | f   | 2009.04.23 | 1.32±0.09  | 1.43±0.04  | 1.47±0.06  | 1.59±0.06  | 1.57±0.26  | —         |
|            |        | l   | 2010.10.27 | 0.81±0.05  | 0.79±0.05  | 0.84±0.03  | 0.80±0.03  | —          | 1.49±0.19 |
| J0808+4950 | FSRQ   | f   | 2009.05.04 | 0.53±0.03  | 0.63±0.03  | 0.58±0.02  | 1.26±0.06  | 1.16±0.21  | —         |
|            |        | l   | 2011.04.07 | 0.61±0.01  | 0.45±0.03  | 0.32±0.01  | 0.33±0.09  | —          | —         |
| B0814+4232 | BL Lac | l   | 2014.01.23 | 0.67±0.06  | 0.81±0.05  | 0.96±0.06  | 1.04±0.02  | —          | —         |
|            |        | f   | 2011.03.17 | 1.56±0.07  | 2.04±0.09  | 1.97±0.08  | 1.75±0.08  | —          | —         |
| 4C 22.21   | BL Lac | f   | 2012.12.25 | 0.59±0.10  | 1.04±0.05  | 1.21±0.06  | 1.49±0.19  | —          | —         |
|            |        | l   | 2014.01.05 | 0.81±0.08  | 0.99±0.06  | 1.16±0.08  | 1.36±0.05  | —          | —         |
| 4C 71.07   | FSRQ   | l   | 2010.01.19 | 2.51±0.09  | 1.97±0.12  | 1.79±0.06  | 2.05±0.10  | 2.37±0.45  | —         |
|            |        | f   | 2012.11.11 | 2.40±0.61  | 3.17±0.13  | 3.28±0.11  | 2.74±0.28  | —          | —         |
| J0854+2006 | BL Lac | l   | 2014.03.31 | 2.40±0.18  | 2.41±0.12  | 2.72±0.14  | 2.72±0.11  | —          | —         |
|            |        | f   | 2011.04.15 | 7.82±0.09  | 6.85±0.24  | 5.64±0.11  | 4.49±0.09  | —          | —         |
| 3C 216     | —      | l   | 2009.04.22 | 0.88±0.09  | 1.32±0.05  | 1.58±0.08  | 1.74±0.88  | 2.89±0.55  | —         |
|            |        | f   | 2013.03.07 | 0.98±0.15  | 1.37±0.18  | 1.64±0.21  | 1.92±0.19  | —          | —         |
| 4C 39.25   | FSRQ   | l   | 2010.09.16 | 7.06±1.50  | 11.62±0.77 | 12.31±0.30 | 10.76±0.27 | 5.09±0.69  | 2.60±0.98 |
|            |        | f   | 2011.03.23 | 9.03±0.26  | 12.21±0.32 | 12.05±0.38 | 11.37±0.47 | —          | —         |
| 4C 40.24   | FSRQ   | l   | 2009.11.13 | 0.47±0.01  | 1.18±0.04  | 1.52±0.06  | 1.33±0.06  | 1.90±0.09  | —         |
|            |        | f   | 2010.05.04 | 1.14±0.10  | 1.69±0.05  | 1.90±0.07  | 1.82±0.07  | 1.63±0.08  | —         |
| B0954+658  | BL Lac | f   | 2010.01.20 | 1.68±0.06  | 1.85±0.08  | 1.82±0.09  | 1.51±0.10  | 1.44±0.02  | —         |
|            |        | l   | 2012.10.31 | 1.35±0.14  | 1.14±0.05  | 0.91±0.04  | 0.74±0.09  | —          | —         |
| 4C 01.28   | —      | f   | 2009.04.25 | 4.51±0.15  | 4.08±0.10  | 3.56±0.10  | 3.19±0.08  | 2.98±0.32  | —         |
|            |        | l   | 2013.03.22 | 2.38±0.44  | 2.48±0.50  | 2.57±0.41  | 2.71±0.34  | —          | —         |
| J1147–3812 | BL Lac |     | 2010.01.18 | 0.95±0.07  | 1.02±0.04  | 0.97±0.09  | 0.96±0.13  | 0.90±0.14  | —         |
| 4C 49.22   | FSRQ   | f   | 2009.04.30 | 0.10±0.07  | 1.06±0.03  | 1.07±0.04  | 1.36±0.05  | 1.64±0.22  | —         |
|            |        | l   | 2010.05.21 | 0.79±0.27  | 1.01±0.09  | 0.96±0.09  | 1.11±0.07  | 1.12±0.11  | 1.47±0.46 |
| 3C 273     | FSRQ   | l   | 2009.05.04 | 21.62±1.77 | 28.47±0.66 | 32.85±1.61 | 39.02±1.01 | 44.78±3.99 | —         |
|            |        | f   | 2009.11.21 | 20.57±0.25 | 28.69±0.75 | 34.89±1.19 | 41.79±0.95 | 48.51±1.58 | —         |

Таблица 2. (Продолжение)

| Имя (IAU)  | Тип    | s   | Эпоха      | $S, Y_n$   |            |            |            |            |            |
|------------|--------|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|            |        |     |            | 21.7       | 11.2       | 7.7        | 4.8        | 2.3        | 1.1        |
| (1)        | (2)    | (3) | (4)        | (5)        | (6)        | (7)        | (8)        | (9)        | (10)       |
| 3C 279     | FSRQ   | l   | 2010.01.19 | 11.40±0.08 | 8.13±0.34  | 8.23±0.21  | 7.93±0.19  | 7.84±0.20  | —          |
|            |        | f   | 2011.12.08 | 27.37±0.93 | 19.10±0.38 | 14.33±0.28 | 10.83±0.18 | —          | —          |
| J1337–1257 | FSRQ   | f   | 2009.05.04 | 7.03±0.18  | 6.42±0.17  | 5.42±0.20  | 4.70±0.19  | 2.92±0.27  | —          |
|            |        | l   | 2010.07.29 | 4.47±0.95  | 4.17±0.18  | 4.09±0.25  | 3.59±0.18  | 3.41±0.36  | 2.32±0.33  |
| B1445+101  | FSRQ   |     | 2010.07.31 | 0.39±0.98  | 0.47±0.11  | 0.63±0.14  | 0.95±0.16  | 1.69±0.31  | 1.91±0.19  |
| J1512–0906 | FSRQ   | l   | 2009.04.25 | 2.48±0.20  | 2.16±0.24  | 1.79±0.07  | 1.83±0.05  | 1.84±0.28  | —          |
|            |        | f   | 2009.11.15 | 2.46±0.03  | 1.96±0.22  | 2.07±0.09  | 2.23±0.08  | 2.31±0.15  | —          |
| 4C 14.60   | BL Lac | f   | 2008.05.06 | 1.36±0.03  | 1.50±0.04  | 1.57±0.05  | 1.57±0.04  | 1.52±0.06  | 1.63±0.09  |
|            |        | l   | 2011.03.26 | 0.59±0.04  | 0.76±0.03  | 0.89±0.02  | 0.97±0.03  | —          | —          |
| J1549+0237 | FSRQ   | f   | 2009.04.28 | 1.48±0.09  | 1.56±0.04  | 1.63±0.06  | 1.93±0.04  | 1.83±0.18  | —          |
|            |        | l   | 2009.11.14 | 1.41±0.02  | 1.66±0.04  | 1.73±0.08  | 1.86±0.05  | 1.53±0.09  | —          |
| J1613+3412 | FSRQ   | f   | 2009.04.25 | 1.89±0.09  | 3.11±0.11  | 3.45±0.15  | 3.84±0.15  | 4.58±0.68  | —          |
|            |        | l   | 2009.11.15 | 1.77±0.03  | 2.67±0.09  | 3.17±0.19  | 3.26±0.15  | 4.18±0.19  | —          |
| 4C 38.41   | FSRQ   | l   | 2009.04.27 | 2.29±0.12  | 2.89±0.09  | 2.95±0.12  | 2.94±0.11  | 2.47±0.14  | —          |
|            |        | f   | 2013.12.27 | 5.61±0.84  | 4.75±0.62  | 4.36±0.57  | 3.56±0.36  | —          | —          |
| 3C 345     | FSRQ   | l   | 2009.04.27 | 6.71±0.24  | 7.25±0.23  | 6.54±0.27  | 5.90±0.24  | 6.99±0.65  | —          |
|            |        | f   | 2009.11.14 | 7.01±0.10  | 7.99±0.26  | 7.79±0.33  | 5.72±0.25  | 7.15±0.31  | —          |
| 8C 1803+78 | BL Lac | l   | 2005.04.19 | 1.75±0.35  | 1.89±0.17  | 1.88±0.13  | 2.05±0.10  | 1.98±0.12  | 2.01±0.16  |
|            |        | f   | 2011.02.22 | 2.17±0.14  | 2.97±0.12  | 2.75±0.15  | 2.41±0.09  | —          | 1.99±0.10  |
| 4C 56.27   | BL Lac | f   | 2012.10.26 | 1.61±0.08  | 1.63±0.04  | 1.51±0.04  | 1.33±0.06  | —          | —          |
|            |        | l   | 2014.02.06 | 1.10±0.11  | 1.18±0.08  | 1.18±0.08  | 1.12±0.07  | —          | —          |
| 4C 73.18   | FSRQ   | f   | 2010.01.24 | 5.06±0.17  | 4.79±0.16  | 4.15±0.06  | 3.68±0.16  | 3.33±0.28  | —          |
|            |        | l   | 2012.11.27 | 3.32±0.13  | 3.25±0.08  | 3.22±0.08  | 3.18±0.10  | —          | —          |
| B2126–15   | FSRQ   | f   | 2006.07.25 | 1.09±0.25  | 1.48±0.05  | 1.49±0.04  | 1.46±0.04  | 0.87±0.07  | 0.37±0.07  |
|            |        | l   | 2010.09.17 | 0.57±0.12  | 0.89±0.03  | 1.31±0.05  | 1.47±0.03  | 1.25±0.18  | 1.15±0.19  |
| B2134+0028 | FSRQ   | f   | 2010.05.21 | 6.25±0.49  | 7.89±0.24  | 9.04±0.47  | 9.37±0.29  | 6.96±1.24  | 3.12±1.01  |
|            |        | l   | 2011.12.05 | 5.60±0.39  | 7.52±0.16  | 8.07±0.17  | 9.00±0.13  | —          | —          |
| B2155–152  | FSRQ   |     | 2010.05.17 | 1.58±0.42  | 2.03±0.06  | 2.18±0.10  | 2.37±0.09  | 2.46±0.16  | 2.94±0.21  |
| 3C 446     | FSRQ   | f   | 2010.05.23 | 6.58±0.11  | 7.68±0.23  | 8.50±0.21  | 8.19±0.20  | 5.12±0.33  | 8.85±0.66  |
|            |        | l   | 2007.06.03 | 3.92±0.06  | 3.95±0.12  | 4.16±0.13  | 4.16±0.12  | 3.98±0.16  | —          |
| 4C 11.69   | FSRQ   | f   | 2009.10.23 | 4.24±0.06  | 5.32±0.09  | 5.84±0.13  | 5.39±0.12  | 5.63±0.56  | —          |
|            |        | l   | 2011.12.05 | 1.79±0.11  | 2.54±0.06  | 3.04±0.06  | 4.20±0.14  | —          | —          |
| B2240–260  | BL Lac | f   | 2012.03.18 | 0.61±0.16  | 0.57±0.03  | 0.69±0.04  | 0.91±0.03  | —          | —          |
|            |        | l   | 2014.01.23 | 0.59±0.06  | 0.51±0.03  | 0.61±0.03  | 0.69±0.01  | —          | —          |
| 3C 454.3   | FSRQ   | f   | 2010.07.22 | 26.84±2.07 | 20.46±0.52 | 16.08±0.55 | 11.57±0.38 | 11.39±0.28 | 15.48±0.54 |
|            |        | l   | 2007.06.05 | 4.41±0.07  | 6.44±0.23  | 7.92±0.39  | 9.37±0.56  | 11.66±0.89 | 16.31±0.82 |

Таблица 3. Список исследуемых блазаров и некоторые их параметры

| Имя (IAU)  | RA(2000.0)<br>hh:mm:ss | Dec(2000.0)<br>dd:mm:ss | $z$   | Тип    | $\nu F_{1.4 \text{ GHz}}$ | $\nu F_{143 \text{ GHz}}$ | $\nu F_{5500}$ | $\nu F_{1 \text{ keV}}$ | $\nu F_{\text{BLR}}$ | Ссылки           |
|------------|------------------------|-------------------------|-------|--------|---------------------------|---------------------------|----------------|-------------------------|----------------------|------------------|
| (1)        | (2)                    | (3)                     | (4)   | (5)    | (6)                       | (7)                       | (8)            | (9)                     | (10)                 | (11)             |
| J0217+7349 | 02:17:30               | +73:49:32               | 2.370 | FSRQ   | -13.50                    | -11.82                    | -11.61         | -12.20                  | -13.69               | [41]             |
| AO 0235+16 | 02:38:38               | +16:36:59               | 0.940 | BL Lac | -13.57                    | -11.75                    | -10.85         | -11.44                  | -13.90               | [42]             |
| B0420-0127 | 04:23:15               | -01:20:33               | 0.915 | FSRQ   | -13.42                    | -11.12                    | -11.73         | -12.05                  | -12.70               | [43]             |
| J0646+4451 | 06:46:32               | +44:51:16               | 3.400 | FSRQ   | -14.20                    | -11.85                    | -12.09         | -12.54                  | -12.91               | [44]             |
| J0739+0137 | 07:39:18               | +01:37:04               | 0.191 | FSRQ   | -13.56                    | -11.74                    | -11.14         | -11.44                  | -11.80               | [44, 45]         |
| J0808+4950 | 08:08:39               | +49:50:36               | 1.433 | FSRQ   | -13.81                    | -                         | -11.67         | -12.39                  | -12.71               | [41]             |
| B0814+4232 | 08:18:16               | +42:22:45               | 0.258 | BL Lac | -13.82                    | -11.87                    | -12.09         | -12.92                  | -14.50               | [41]             |
| 4C 22.21   | 08:23:24               | +22:23:03               | 0.951 | BL Lac | -13.50                    | -12.26                    | -12.48         | -12.92                  | -14.58               | [42]             |
| 4C 71.07   | 08:41:24               | +70:53:42               | 2.172 | FSRQ   | -13.27                    | -11.52                    | -11.24         | -11.26                  | -12.12               | [41]             |
| J0854+2006 | 08:54:48               | +20:06:31               | 0.306 | BL Lac | -13.67                    | -11.11                    | -10.84         | -11.27                  | -12.88               | [42, 46]         |
| 3C 216     | 09:09:33               | +42:53:46               | 0.669 | -      | -13.23                    | -12.16                    | -12.06         | -12.57                  | -13.95               | [41]             |
| 4C 39.25   | 09:27:03               | +39:02:21               | 0.695 | FSRQ   | -13.39                    | -11.29                    | -11.63         | -11.67                  | -11.55               | [41, 47]         |
| 4C 40.24   | 09:48:55               | +40:39:45               | 1.252 | FSRQ   | -13.65                    | -12.01                    | -11.68         | -12.57                  | -12.37               | [41]             |
| B0954+658  | 09:58:47               | +65:33:54               | 0.367 | BL Lac | -13.99                    | -11.90                    | -11.03         | -12.41                  | -14.04               | [41]             |
| 4C 01.28   | 10:58:29               | +01:33:59               | 0.888 | -      | -13.35                    | -11.38                    | -11.66         | -12.29                  | -13.05               | [43]             |
| J1147-3812 | 11:47:01               | -38:12:11               | 1.048 | BL Lac | -13.60                    | -11.81                    | -11.36         | -12.00                  | -13.39               | [46]             |
| 4C 49.22   | 11:53:24               | +49:31:09               | 0.334 | FSRQ   | -13.66                    | -11.78                    | -11.51         | -11.82                  | -12.18               | [48]             |
| 3C 273     | 12:29:06               | +02:03:09               | 0.158 | FSRQ   | -12.11                    | -10.59                    | -9.82          | -10.31                  | -10.27               | [44, 45, 48]     |
| 3C 279     | 12:56:11               | -05:47:22               | 0.536 | FSRQ   | -12.87                    | -10.86                    | -11.04         | -11.44                  | -12.42               | [47-49]          |
| J1337-1257 | 13:37:39               | -12:57:24               | 0.539 | FSRQ   | -13.43                    | -11.40                    | -11.48         | -11.96                  | -12.88               | [50]             |
| B1445+101  | 14:45:16               | +09:58:36               | 3.530 | FSRQ   | -13.47                    | -                         | -11.82         | -12.54                  | -13.13               | [51]             |
| J1512-0906 | 15:12:50               | -09:06:00               | 0.361 | FSRQ   | -13.42                    | -11.63                    | -11.23         | -11.70                  | -12.00               | [44, 49, 52, 53] |
| 4C 14.60   | 15:40:49               | +14:47:46               | 0.605 | BL Lac | -13.71                    | -                         | -11.62         | -12.17                  | -14.07               | [42]             |
| J1549+0237 | 15:46:58               | +02:46:05               | 1.450 | FSRQ   | -13.93                    | -11.79                    | -11.90         | -11.69                  | -12.10               | [43]             |
| J1613+3412 | 16:13:41               | +34:12:48               | 1.400 | FSRQ   | -13.25                    | -12.09                    | -11.72         | -12.24                  | -12.17               | [47]             |
| 4C 38.41   | 16:35:15               | +38:08:04               | 1.814 | FSRQ   | -13.42                    | -11.42                    | -11.90         | -11.99                  | -12.52               | [41]             |
| 3C 345     | 16:42:58               | +39:48:37               | 0.594 | FSRQ   | -13.00                    | -11.24                    | -11.31         | -11.62                  | -11.69               | [41, 47]         |
| 8C 1803+78 | 18:00:45               | +78:28:04               | 0.684 | BL Lac | -13.51                    | -11.64                    | -11.48         | -12.20                  | -12.75               | [41]             |
| 4C 56.27   | 18:24:07               | +56:51:01               | 0.664 | BL Lac | -13.70                    | -11.85                    | -12.01         | -12.00                  | -13.96               | [41]             |
| 4C 73.18   | 19:27:48               | +73:58:01               | 0.360 | FSRQ   | -13.26                    | -11.46                    | -11.22         | -11.45                  | -11.29               | [41, 48]         |
| B2126-15   | 21:29:12               | -15:38:41               | 3.268 | FSRQ   | -14.08                    | -                         | -11.50         | -11.68                  | -12.25               | [44]             |
| B2134+0028 | 21:36:38               | +00:41:54               | 1.936 | FSRQ   | -13.31                    | -11.85                    | -11.41         | -12.20                  | -12.13               | [43, 44]         |
| B2155-152  | 21:58:06               | -15:01:09               | 0.672 | FSRQ   | -13.37                    | -11.94                    | -11.64         | -12.27                  | -13.59               | [46]             |
| 3C 446     | 22:25:47               | -04:57:01               | 1.404 | FSRQ   | -12.98                    | -11.44                    | -11.25         | -11.45                  | -12.46               | [47, 54]         |
| 4C 11.69   | 22:32:36               | +11:43:51               | 1.037 | FSRQ   | -13.00                    | -11.55                    | -11.42         | -11.75                  | -11.87               | [47]             |
| B2240-260  | 22:43:26               | -25:44:30               | 0.774 | BL Lac | -13.81                    | -12.27                    | -11.85         | -12.77                  | -13.92               | [42]             |
| 3C 454.3   | 22:53:57               | +16:08:53               | 0.859 | FSRQ   | -12.75                    | -10.40                    | -11.25         | -11.48                  | -11.88               | [45, 47, 49]     |

2.2. Литературные данные

Список исследуемых объектов основан на каталоге блазаров, представленном в работе [26]. Из нее взяты потоки в рентгеновском (1 keV) и в оптическом (5500 Å) диапазонах. Авторы собрали наиболее полную информацию для всех известных блазаров в рентгеновском диапазоне. В диапазоне 0.1–2 keV использованы данные из обзора ROSAT, а для 2–10 keV — из EXOSAT, ASCA, ВерроSAX. Использованные нами потоки в рентгеновском и оптическом диапазонах взяты из работ [27–36], а также из базы данных NED.

Значения потоков из области BLR взяты из работы [10]. В ней рассматривается корреляция между излучением на частоте 5 ГГц (используются данные различных радиообзоров) и суммарным излучением в линиях. Исследовались более трехсот объектов, оптически отождествленных как квазары и лацертиды, а не как галактики. Для этой выборки мы искали информацию о спектре. Предпочтение отдавалось наиболее поздним наблюдательным данным. После такого рода отбора осталось 184 квазара и 14 объектов типа BL Lac. Для различных источников наблюдались спектры с разными линиями, с разными красными смещениями. Поэтому для корректного сравнения потока в линиях правильнее будет подсчитать интегральный поток из этой области. Для подсчета полного потока в линиях применялся метод, описанный в [9]:

- (1) определяются линии, доминирующие в спектре;
- (2) устанавливается, как соотносятся потоки между ними;
- (3) с использованием соотношений для этих линий из работы [37] методом экстраполяции определяются потоки в других линиях.

О том, какие линии и из каких источников использовались для определения потока в BLR, можно узнать из таблицы в работе [10].

Список объектов и использованные в работе литературные данные представлены в таблице 3, где (1) — имя объекта, (2, 3) — экваториальные координаты на эпоху 2000.0, (4) — красное смещение  $z$ , (5) — тип блазара по классификации [16], (6, 7) — логарифм потока на частотах 1.4 ГГц ( $\nu F_{1.4\text{ GHz}}$ ) и 143 ГГц ( $\nu F_{143\text{ GHz}}$ ), (8) — логарифм потока на длине волны 5500 Å ( $\nu F_{5500}$ ), (9) — логарифм потока в рентгеновском диапазоне ( $\nu F_{1\text{ keV}}$ ), (10) — логарифм потока из области образования широких линий (broad-line region) ( $\nu F_{\text{BLR}}$ ) (11) — литературные ссылки. Величина логарифма потока на всех частотах — в единицах эрг см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>.

2.3. Особенности некоторых источников

На частоте 1.1 ГГц измерений недостаточно для большинства объектов, а на частоте 2.3 ГГц из BL Lac-типа представлено только несколько источников. Такая статистически ограниченная выборка недостаточна для корректного проведения анализа корреляции данных, поэтому эти диапазоны не участвуют в дальнейшем анализе.

По классификации каталога BZCAT [16], который на сегодняшний день является наиболее полным каталогом блазаров, из тридцати семи блазаров нашей выборки двадцать пять являются FSRQ-типа, десять — BL Lac, и два — блазары неопределенного типа. Два источника, для которых не определен тип, — это 3C 216 и 4C 01.28. Согласно информации, доступной в базе данных NED<sup>2</sup> и расчетам ASDC Sky Explorer,<sup>3</sup> 3C 216 — это блазар LSP (low synchrotron-peaked), обладающий низкочастотным максимумом синхротронного излучения,  $\lg \nu_p^s = 13.5$ , с сильной оптической поляризацией [38]; 4C 01.28 — также LSP с  $\lg \nu_p^s = 12.9$ , с сильной оптической поляризацией [38], в работе [39] упоминается как BL Lac, но в работе [40] — как FSRQ. Так как нет единого мнения, к какому подклассу блазаров отнести эти объекты, из дальнейшего анализа они исключены.

3. АНАЛИЗ КОРРЕЛЯЦИИ ПОТОКОВ В BLR И В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

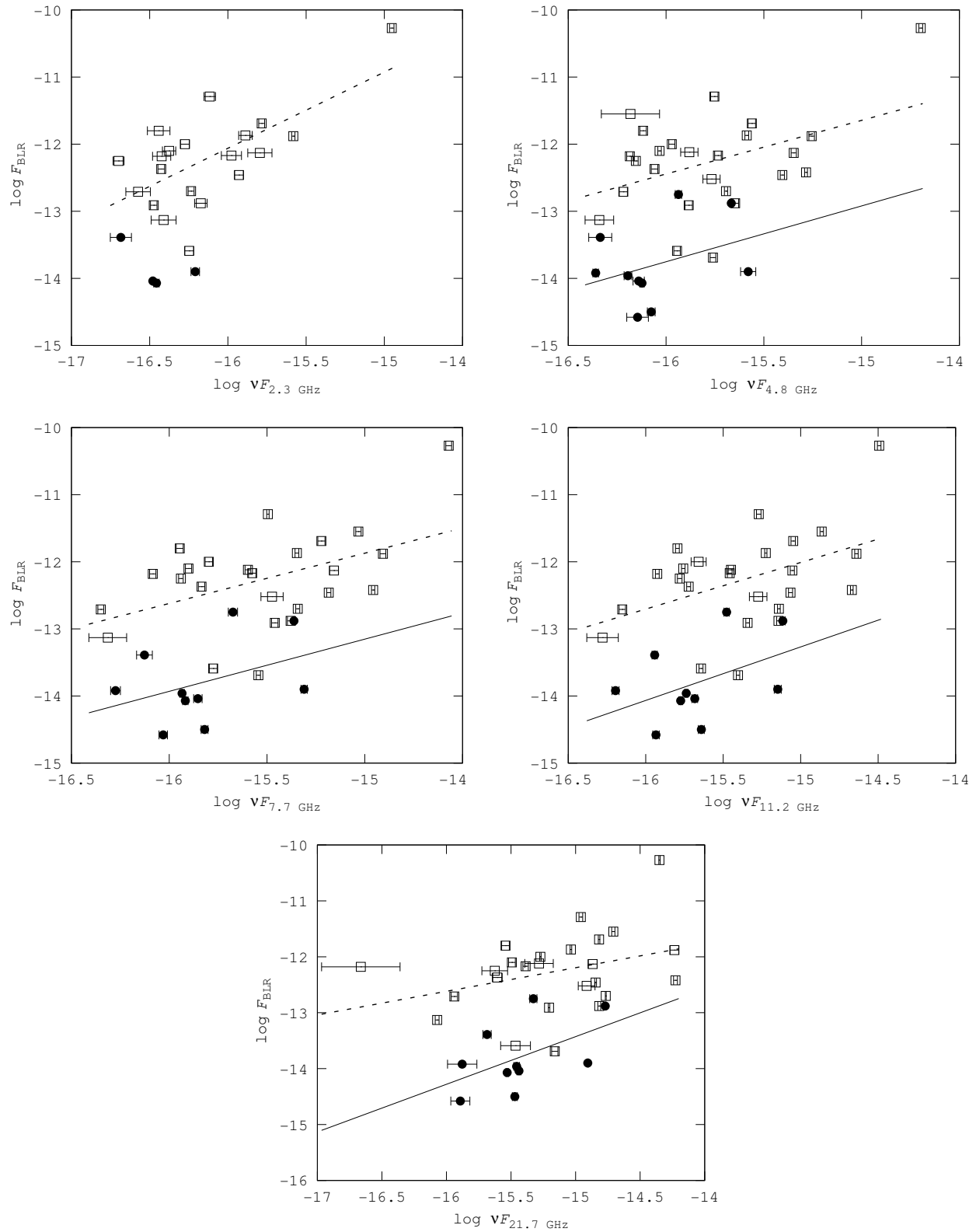
Результаты сопоставления отношения логарифма потоков в BLR и в различных диапазонах частот представлены на рис. 1–3. На рис. 1 используются радиоданные для блазаров, находившихся в активном состоянии в период наблюдений на РАТАН-600, на рис. 2 — для блазаров, находившихся в менее активном состоянии.

На графиках также показана аппроксимация данных для различных типов блазаров: штриховой линией показана линейная регрессия для FSRQ-блазаров, а сплошной линией — для объектов типа BL Lac. В таблицах 4 и 5 приведены параметры линейной регрессии для FSRQ- и BL Lac-объектов. Также в этих таблицах приведены коэффициенты корреляции Пирсона  $\sigma$  и уровень его значимости  $p$ .

Для FSRQ-объектов наибольшая корреляция потока в BLR ( $F_{\text{BLR}}$ ) наблюдается с потоком в рентгеновском диапазоне ( $F_{1\text{ keV}}$ ) ( $\sigma = +0.79$ ,  $p = 0.001$ ). На всех радиочастотах корреляция примерно одного порядка, в среднем  $\sigma = 0.46$ , причем не зависит от состояния (активного или спокойного) объектов.

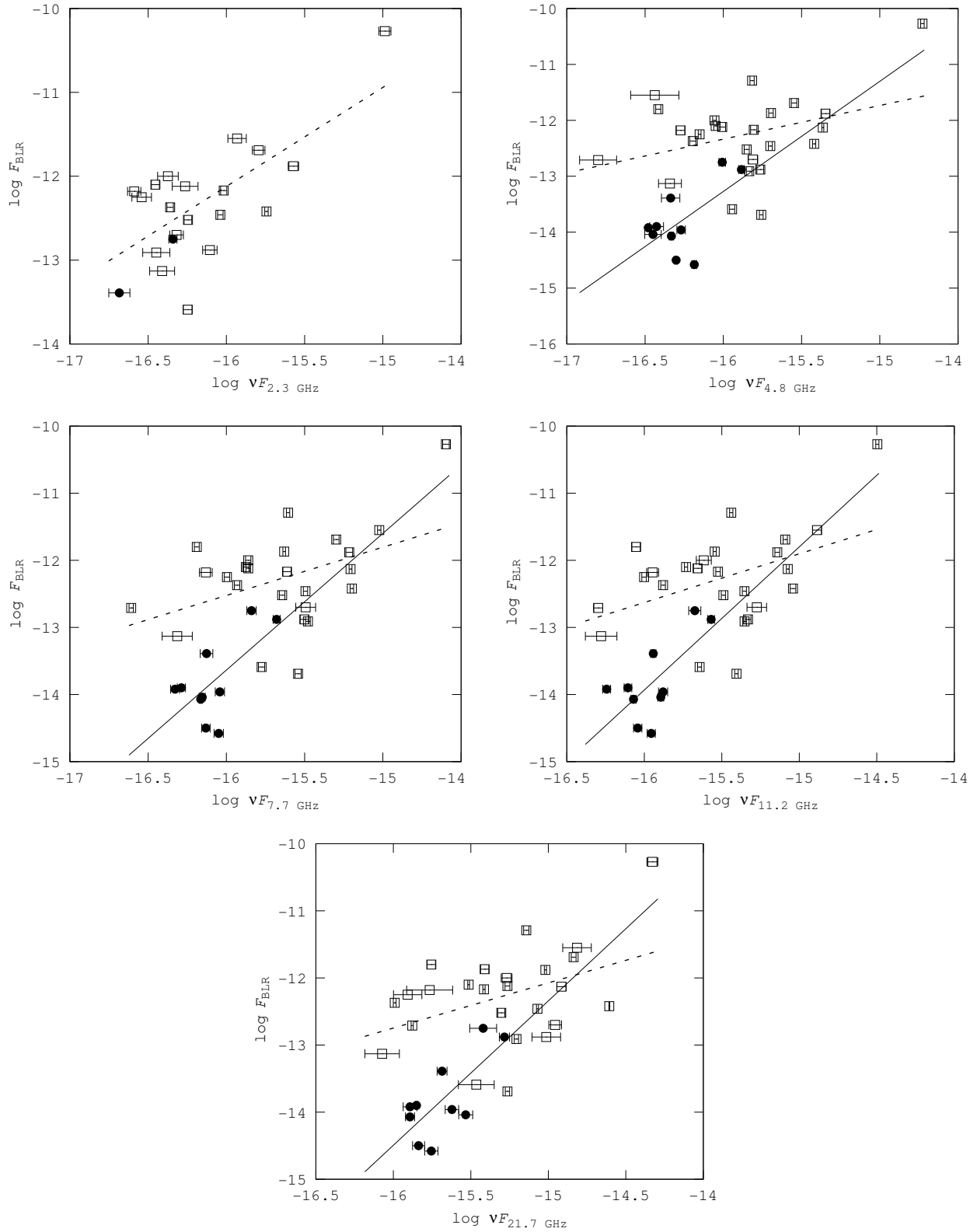
<sup>2</sup><http://ned.ipac.caltech.edu>

<sup>3</sup><http://tools.asdc.asi.it>

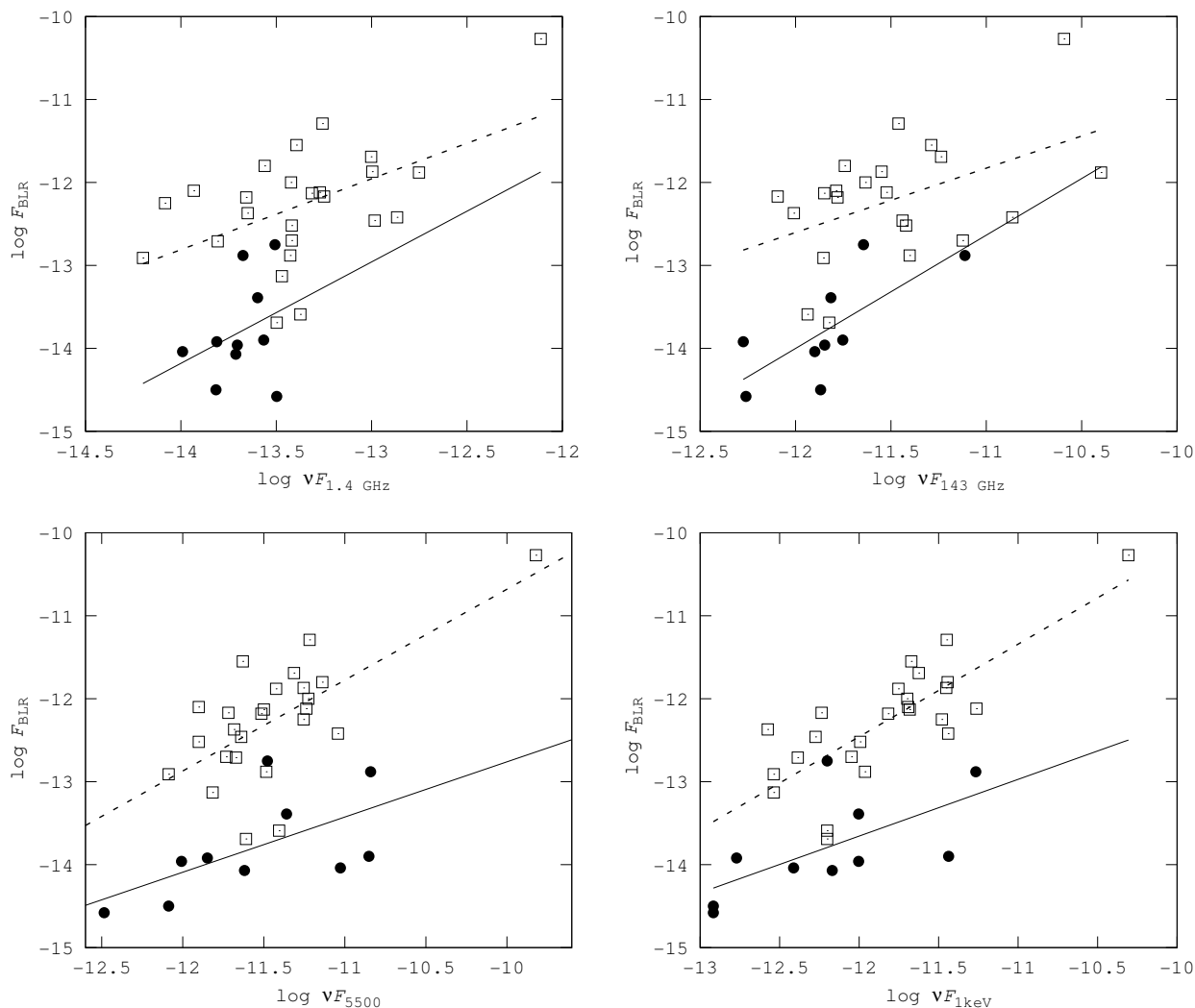


**Рис. 1.** Корреляция потоков из области образования широких линий и в радиодиапазоне в активном состоянии источников. Незаполненными квадратами обозначены FSRQ, заполненными кружками — BL Lac. Штриховой линией показана аппроксимация прямой для FSRQ, а сплошной линией — для BL Lac-объектов.





**Рис. 2.** Корреляция потоков из области образования широких линий и в радиодиапазоне в спокойном состоянии источников. Обозначения те же, что на рис. 1.



**Рис. 3.** Корреляция потоков из области образования широких линий и в различных диапазонах частот (использованы данные из других работ). Обозначения те же, что на рис. 1.

Для BL Lac-объектов наибольшая корреляция наблюдается в миллиметровом диапазоне ( $F_{143 \text{ GHz}}$ ):  $\sigma = +0.73$  ( $p = 0.03$ ), и в активном состоянии на частоте 21.7 ГГц ( $F_{21.7 \text{ GHz}}$ ):  $\sigma = +0.74$  ( $p = 0.02$ ). Для BL Lac можно говорить лишь о вероятном наличии связи, так как уровень значимости  $p$  хуже 0.05 на некоторых частотах (см. таблицу 5).

Интересно, что в отличие от FSRQ-блазаров, для BL Lac-объектов корреляция между активным и спокойным состояниями значительно различается. Это связано с количеством объектов в выборках. Плотность потока значительно изменяется (в 3–4 раза) для 2–5 объектов из каждой подвыборки блазаров (FSRQ и BL Lac). В остальных случаях разница между активным и спокойным состоянием не так значительна. По нашей выборке видно, что плотность потока изменяется значительно:

примерно у 10–15% FSRQ-блазаров и у 40% BL Lac-блазаров.

Коэффициент, характеризующий линейную регрессию ( $a$  в таблицах 4 и 5), в случае FSRQ-блазаров для большинства диапазонов (кроме  $F_{21.7 \text{ GHz}}$  и  $F_{4.8 \text{ GHz}}$ ) близок к единице (см. таблицу 4). Для BL Lac-объектов этот коэффициент варьируется от 0.67 до 2.15 в радиодиапазоне.

При рассмотрении исходных данных заметно, что поток в BLR у BL Lac в среднем на порядок меньше, чем у FSRQ, во всех диапазонах. Это обычно объясняется тем, что у FSRQ-блазаров вещества в области образования линий больше, чем у BL Lac. В пользу этой версии говорит то, что у FSRQ-объектов в спектре, как правило, наблюдается большой избыток в синей области спектра (big blue bump), а в спектре у BL Lac — не наблюдается. Этот избыток, предположительно,

**Таблица 4.** Параметры линейной регрессии ( $Y = aX + b$ ) для блазаров типа FSRQ, где  $\sigma$  и  $p$  — коэффициент корреляции Пирсона и уровень его значимости

| $X$                              | $Y$                    | $a$              | $b$              | $\sigma$ | $p$   |
|----------------------------------|------------------------|------------------|------------------|----------|-------|
| $\log(\nu F_{1.4 \text{ GHz}})$  | $\log(F_{\text{BLR}})$ | $+0.86 \pm 0.29$ | $-0.84 \pm 3.88$ | +0.52    | 0.007 |
| $\log(\nu F_{143 \text{ GHz}})$  | $\log(F_{\text{BLR}})$ | $+0.77 \pm 0.33$ | $-3.30 \pm 3.76$ | +0.47    | 0.028 |
| $\log(\nu F_{5500})$             | $\log(F_{\text{BLR}})$ | $+1.09 \pm 0.26$ | $+0.27 \pm 2.98$ | +0.66    | 0.001 |
| $\log(\nu F_{1 \text{ keV}})$    | $\log(F_{\text{BLR}})$ | $+1.12 \pm 0.18$ | $+0.93 \pm 2.18$ | +0.79    | 0.001 |
| High state                       |                        |                  |                  |          |       |
| $\log(\nu F_{2.3 \text{ GHz}})$  | $\log(F_{\text{BLR}})$ | $+1.14 \pm 0.30$ | $+6.10 \pm 5.1$  | +0.65    | 0.002 |
| $\log(\nu F_{4.8 \text{ GHz}})$  | $\log(F_{\text{BLR}})$ | $+0.80 \pm 0.36$ | $+0.34 \pm 5.63$ | +0.42    | 0.04  |
| $\log(\nu F_{7.7 \text{ GHz}})$  | $\log(F_{\text{BLR}})$ | $+0.75 \pm 0.30$ | $-0.63 \pm 4.68$ | +0.46    | 0.02  |
| $\log(\nu F_{11.2 \text{ GHz}})$ | $\log(F_{\text{BLR}})$ | $+0.69 \pm 0.29$ | $-1.59 \pm 4.49$ | +0.44    | 0.03  |
| $\log(\nu F_{21.7 \text{ GHz}})$ | $\log(F_{\text{BLR}})$ | $+0.42 \pm 0.25$ | $-5.86 \pm 3.74$ | +0.34    | 0.10  |
| Low state                        |                        |                  |                  |          |       |
| $\log(\nu F_{2.3 \text{ GHz}})$  | $\log(F_{\text{BLR}})$ | $+1.18 \pm 0.32$ | $+6.78 \pm 5.14$ | +0.67    | 0.002 |
| $\log(\nu F_{4.8 \text{ GHz}})$  | $\log(F_{\text{BLR}})$ | $+0.60 \pm 0.33$ | $-2.71 \pm 5.18$ | +0.36    | 0.08  |
| $\log(\nu F_{7.7 \text{ GHz}})$  | $\log(F_{\text{BLR}})$ | $+0.72 \pm 0.31$ | $-1.02 \pm 4.81$ | +0.44    | 0.03  |
| $\log(\nu F_{11.2 \text{ GHz}})$ | $\log(F_{\text{BLR}})$ | $+0.73 \pm 0.31$ | $-1.01 \pm 4.83$ | +0.44    | 0.03  |
| $\log(\nu F_{21.7 \text{ GHz}})$ | $\log(F_{\text{BLR}})$ | $+0.67 \pm 0.31$ | $-1.98 \pm 4.70$ | +0.42    | 0.04  |

возникает из-за теплового излучения оптически толстого аккреционного диска [55].

#### *Влияние переменности на результат корреляции*

В блазарах наблюдается сильная переменность излучения на разных масштабах времени. В настоящей выборке у шести объектов наблюдается переменность спектральной плотности потока (индекс переменности) на десятки процентов на четырех частотах РАТАН-600. Три из них — блазары FSRQ-типа (J0739+0137, 3C 446, 3C 454.3) и три — BL Lac-типа (АО 0235+16, J0854+2006, 4C 14.60).

Для оценки влияния переменности излучения в радиодиапазоне мы использовали максимальные и минимальные значения плотностей потоков, полученных на РАТАН-600. В таблицах 4 и 5 представлены коэффициенты корреляции Пирсона потока в BLR и в радиодиапазоне для этих двух состояний. Видно, что в активном состоянии больших различий в коэффициентах корреляции между двумя подклассами блазаров не наблюдается. Но в спокойном состоянии коэффициент корреляции

у BL Lac-блазаров заметно возрастает (в среднем с 0.4 до 0.7). Сильная переменность всего нескольких источников оказала значительное влияние на корреляцию. Таким образом, корреляция, безусловно, существует, но на неё может повлиять малое число объектов в выборке.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проанализирована корреляция между потоками от области BLR и на других частотах для тридцати пяти блазаров. В радиодиапазоне использовались многочастотные наблюдения на радиотелескопе РАТАН-600. Показано, что в некоторых случаях на частотах радиодиапазона существует корреляция потока излучения с потоком от BLR-области для блазаров двух типов — BL Lac и FSRQ.

В активном состоянии (радиодиапазон) корреляция потоков излучения радио- и BLR-области у FSRQ- и BL Lac-блазаров примерно одного порядка (0.4–0.5), но для BL Lac-объектов можно говорить лишь о вероятном наличии связи:  $p$  хуже

**Таблица 5.** Параметры линейной регрессии ( $Y = aX + b$ ) для блазаров типа BL Lac, где  $\sigma$  и  $p$  — коэффициент корреляции Пирсона и уровень его значимости

| $X$                              | $Y$                    | $a$              | $b$                | $\sigma$ | $p$  |
|----------------------------------|------------------------|------------------|--------------------|----------|------|
| $\log(\nu F_{1.4 \text{ GHz}})$  | $\log(F_{\text{BLR}})$ | $+1.22 \pm 1.33$ | $+2.94 \pm 18.22$  | +0.31    | 0.38 |
| $\log(\nu F_{143 \text{ GHz}})$  | $\log(F_{\text{BLR}})$ | $+1.37 \pm 0.49$ | $+2.38 \pm 5.74$   | +0.73    | 0.03 |
| $\log(\nu F_{5500})$             | $\log(F_{\text{BLR}})$ | $+0.67 \pm 0.31$ | $-6.10 \pm 3.62$   | +0.60    | 0.07 |
| $\log(\nu F_{1 \text{ keV}})$    | $\log(F_{\text{BLR}})$ | $+0.68 \pm 0.29$ | $-5.45 \pm 3.59$   | +0.64    | 0.05 |
| High state                       |                        |                  |                    |          |      |
| $\log(\nu F_{2.3 \text{ GHz}})$  | $\log(F_{\text{BLR}})$ | —                | —                  | —        | —    |
| $\log(\nu F_{4.8 \text{ GHz}})$  | $\log(F_{\text{BLR}})$ | $+0.83 \pm 0.79$ | $-0.44 \pm 12.62$  | +0.35    | 0.32 |
| $\log(\nu F_{7.7 \text{ GHz}})$  | $\log(F_{\text{BLR}})$ | $+0.78 \pm 0.65$ | $-1.48 \pm 10.24$  | +0.39    | 0.26 |
| $\log(\nu F_{11.2 \text{ GHz}})$ | $\log(F_{\text{BLR}})$ | $+0.80 \pm 0.57$ | $-1.31 \pm 8.92$   | +0.44    | 0.20 |
| $\log(\nu F_{21.7 \text{ GHz}})$ | $\log(F_{\text{BLR}})$ | $+0.85 \pm 0.51$ | $-0.65 \pm 7.86$   | +0.51    | 0.13 |
| Low state                        |                        |                  |                    |          |      |
| $\log(\nu F_{2.3 \text{ GHz}})$  | $\log(F_{\text{BLR}})$ | —                | —                  | —        | —    |
| $\log(\nu F_{4.8 \text{ GHz}})$  | $\log(F_{\text{BLR}})$ | $+1.97 \pm 0.88$ | $+18.25 \pm 14.38$ | +0.62    | 0.06 |
| $\log(\nu F_{7.7 \text{ GHz}})$  | $\log(F_{\text{BLR}})$ | $+2.0 \pm 0.85$  | $+18.95 \pm 13.63$ | +0.65    | 0.04 |
| $\log(\nu F_{11.2 \text{ GHz}})$ | $\log(F_{\text{BLR}})$ | $+2.13 \pm 0.78$ | $+20.19 \pm 12.42$ | +0.70    | 0.03 |
| $\log(\nu F_{21.7 \text{ GHz}})$ | $\log(F_{\text{BLR}})$ | $+2.15 \pm 0.70$ | $+19.91 \pm 10.91$ | +0.74    | 0.02 |

0.05 для BL Lac-объектов в активном радиосостоянии на всех частотах ПАНА-600 (см. таблицы 4 и 5). В менее активном радиосостоянии можно говорить о наличии связи для BL Lac ( $p < 0.05$ ). Объем выборки BL Lac-блазаров мал: в анализе участвовало всего десять объектов, что менее 1% от известных BL Lac.

Показано, что состояние (активное или спокойное в радиодиапазоне) влияет на характер корреляции. Из таблиц 4 и 5 видно, что в активном состоянии различий в коэффициентах корреляции между двумя подклассами блазаров не наблюдается. Но в спокойном состоянии коэффициент корреляции у BL Lac-блазаров заметно возрастает (в среднем коэффициент корреляции Пирсона увеличился на 0.25), в то время как у FSRQ-блазаров коэффициент корреляции практически не изменяется. Такое различие, вероятно, связано с количеством объектов в выборках. Плотность потока значительно изменяется (в 3–4 раза) для нескольких объектов из каждой подвыборки блазаров. Для остальных источников разница между активным и спокойным состояниями не так значительна. Если

принять во внимание количество источников в выборке (двадцать пять FSRQ и десять BL Lac), то видно, что плотность потока изменяется значительно примерно у 10–15% FSRQ-блазаров и у 40% BL Lac-блазаров.

Для анализа корреляции в других диапазонах спектра использовались неоднородные данные из литературы. Временной интервал между некоторыми измерениями (см. таблицу 3) достигает тридцати лет, что влияет на характер корреляции в первую очередь. Корреляция с потоком от BLR у FSRQ-блазаров больше, чем у BL Lac-блазаров в оптическом и рентгеновском диапазонах. Возможно, эти виды излучений (оптическое, УФ и рентгеновское) ионизируют вещество в BLR, а вещества в этой области больше именно у FSRQ-объектов, поэтому и корреляция в этих диапазонах оказалась больше. Также известно, что, как правило, родительскими галактиками для BL Lac-блазаров являются эллиптические, а у таких галактик практически нет межзвездного газа и пыли. Это различие FSRQ- и BL Lac-объектов подтверждает также и то, что поток от BLR у BL Lac в среднем на порядок меньше, чем у FSRQ в рассмотренной выборке.

## 5. ВЫВОДЫ

С использованием многочастотных измерений на радиотелескопе РАТАН-600 показано, что в некоторых состояниях радиодиапазона существует корреляция потока излучения с потоком от BLR-области для блазаров двух типов — BL Lac и FSRQ. По имеющимся литературным данным обнаружена подобная корреляция в излучении блазаров в диапазоне от радио до рентгена. В активном состоянии (в радиодиапазоне) корреляция излучения с потоком от BLR у FSRQ- и BL Lac-блазаров примерно одинакова ( $\sigma = 0.4-0.5$ ), из-за малости выборки объектов BL Lac для них можно говорить лишь о вероятном наличии связи ( $p$  хуже 0.05 на некоторых частотах). Показано, что переменность излучения объектов хотя бы в одном диапазоне влияет на результат корреляции. Для исследования взаимосвязи излучения в джете и аккреционном диске требуются одновременные измерения потоков в разных диапазонах, а также сравнительный анализ корреляции излучения при разных состояниях объектов.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны рецензенту за полезные замечания, позволившие улучшить текст. При подготовке материалов этой статьи использована система обработки FADPS [23] для данных широкополосных радиометров континуума радиотелескопа РАТАН-600. Наблюдения проведены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственный контракт № 14.518.11.7054) и частично при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-02-31649).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. Urry and P. Padovani, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **107**, 803 (1995).
2. R. D. Blandford and M. J. Rees, in *Proc. Pittsburgh Conf. on BL Lac Objects* (University of Pittsburgh, 1978), pp. 328–341.
3. P. A. Strittmatter, K. Serkowski, R. Carswell, et al., *Astrophys. J.* **175**, L7 (1972).
4. R. I. Kollgaard, *Vistas in Astronomy* **38**, 29 (1994).
5. E. S. Perlman, P. Padovani, P. Goimmi, et al., *Astron. J.* **115**, 1253 (1998).
6. B. L. Fanaroff and J. M. Riley, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **167**, 31 (1974).
7. L. Maraschi and F. Tavecchio, *Astrophys. J.* **593**, 667 (2003).
8. R. D. Blandford and R. L. Znajek, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **179**, 433 (1977).
9. A. Celotti, P. Padovani, and G. Ghisellini, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **286**, 415 (1997).
10. X. Cao and D. R. Jiang, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **307**, 802 (1999).
11. C. Xu, M. Livio, and S. Baum, *Astron. J.* **118**, 1169 (1999).
12. G. Z. Xie, H. Dai, and S. B. Zhou, *Astron. J.* **134**, 1464 (2007).
13. T. F. Yi and G. Z. Xie, *Publ. Astron. Soc. Japan* **60**, 161 (2008).
14. M. Sikora, M. Begelman, G. M. Madejski, and J.-P. Lasota, *Astrophys. J.* **625**, 72 (2005).
15. G. Ghisellini in *Proc. VI Microquasar Workshop* (Como, 2006), p. 27.1.
16. E. Massaro, P. Giommi, C. Leto, et al., *Astron. and Astrophys.* **495**, 691 (2009).
17. Yu. N. Parijskij, *IEEE Antennas and Propagation Magazine* **35**, 7 (1993).
18. J. Aatrokoski et al. (Planck Collaboration), *Astron. and Astrophys.* **536**, 56 (2011).
19. P. Giommi, G. Polenta, A. Lahteenmaki, et al., *Astron. and Astrophys.* **541**, 59 (2012).
20. M. G. Mingaliev, Yu. V. Sotnikova, N. N. Bursov, et al., *Astronomy Reports* **51**, 343 (2007).
21. M. G. Mingaliev, Yu. V. Sotnikova, N. S. Kardashev, and M. G. Larionov, *Astronomy Reports* **53**, 487 (2009).
22. M. G. Mingaliev, Yu. V. Sotnikova, I. Tornainen, et al., *Astron. and Astrophys.* **544**, 21 (2012).
23. O. V. Verkhodanov, *ASP Conf. Ser.*, No. 125, 46 (1997).
24. M. Ott, A. Witzel, A. Quirrenbach, et al., *Astron. and Astrophys.* **284**, 331 (1994).
25. J. W. M. Baars, R. Genzel, I. I. K. Pauliny-Toth, and A. Witzel, *Astron. and Astrophys.* **61**, 99 (1977).
26. D. Donato, G. Ghisellini, G. Tagliaferri, and G. Fossati, *Astron. and Astrophys.* **375**, 739 (2001).
27. G. Fossati, L. Maraschi, A. Celotti, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **299**, 433 (1998).
28. R. M. Sambruna, *Astrophys. J.* **487**, 536 (1997).
29. D. M. Worrall and B. J. Wilkes, *Astrophys. J.* **360**, 396 (1990).
30. R. M. Sambruna, P. Barr, P. Giommi, et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **95**, 371 (1994).
31. P. Padovani, R. Morganti, J. Siebert, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **304**, 829 (1999).
32. M. Cappi, M. Matsuoka, A. Comastri, et al., *Astrophys. J.* **478**, 492 (1997).
33. F. Tavecchio, L. Maraschi, G. Ghisellini, et al., *Astrophys. J.* **543**, 535 (2000).
34. A. Comastri, G. Fossati, G. Ghisellini, and S. Molendi, *Astrophys. J.* **480**, 534 (1997).
35. H. Kubo, T. Takahashi, G. Madejski, et al., *Astrophys. J.* **504**, 693 (1998).
36. R. M. Sambruna, G. Ghisellini, E. Hooper, et al., *Astrophys. J.* **515**, 140 (1999).
37. P. J. Francis, P. C. Hewett, C. B. Foltz, et al., *Astrophys. J.* **373**, 465 (1991).
38. M. P. Veron-Cetty and P. Veron, *Astron. and Astrophys.* **455**, 773 (2006).
39. R. M. Plotkin, S. F. Anderson, P. B. Hall, et al., *Astron. J.* **135**, 2453 (2008).

40. S. E. Healey, R. W. Romani, G. B. Taylor, et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **171**, 61 (2007).
41. C. R. Lawrence, J. R. Zucker, A. C. S. Readhead, et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **107**, 541 (1996).
42. M. Stickel, J. W. Fried, and H. Kuehr, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **98**, 393 (1993).
43. J. A. Baldwin, E. J. Wampler, and C. M. Gaskell, *Astrophys. J.* **338**, 630 (1989).
44. P. S. Osmer, A. C. Porter, and R. F. Green, *Astrophys. J.* **436**, 678 (1994).
45. N. Jackson and J. W. A. Browne, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **250**, 414 (1994).
46. M. Stickel, J. W. Fried, and H. Kuehr, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **80**, 103 (1989).
47. B. J. Wills, K. L. Thompson, M. Han, et al., *Astrophys. J.* **447**, 139 (1995).
48. P. Marziani, J. W. Sulentic, D. Dultzin-Hacyan, et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **104**, 37 (1996).
49. G. Neugebauer, J. B. Oke, E. E. Becklin, and K. Matthews, *Astrophys. J.* **230**, 79 (1979).
50. M. Stickel, H. Kuehr, and J. W. Fried, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **97**, 483 (1993).
51. M. R. Corbin, *Astrophys. J.* **375**, 503 (1991).
52. C. N. Tadhunter, R. Morganti, S. di Serego-Alighieri, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **263**, 999 (1993).
53. J. Bergeron and D. Kunth, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **207**, 263 (1984).
54. E. Perez, M. V. Penston, and M. Moles, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **239**, 75 (1989).
55. G. A. Shields, *Nature* **272**, 706 (1978).

### Study of the Relation between the Jet and Accretion-Disk Emission in Blazars Using RATAN-600 Multifrequency Data

T. V. Mufakharov, Yu. V. Sotnikova, A. K. Erkenov, and M. G. Mingaliev

We study the correlation between the emission from the broad-line region (BLR) and the emission in other wavelength ranges (from radio to x-ray) for the sample of 37 blazars (25 flat-spectrum radio quasars (FSRQs) and 10 BL Lac blazars). Studying the relation between luminosities in various wavebands and the BLR luminosity is an effective method to examine the connection between the accretion rate and the luminosity of the jet. We used simultaneous RATAN-600 measurements of blazar flux densities at six frequencies: 1.1, 2.3, 4.8, 7.7, 11.2, and 21.7 GHz. The observational data from other bands was taken from the literature. To determine the effect produced by the state of the object on the correlation, for the radio data we used the measurements obtained with the RATAN-600 in two states—namely, the maximum and minimum flux density values. We show that at some frequencies of the radio band, there exists a correlation of emission with the emission in the BLR for two types of blazars. In the FSRQ and BL Lac blazars, the correlation between the flux from the BLR and the flux in the radio band is indistinguishable in all cases, except for the case when a strong flux density variation was considered for the BL Lac-type of blazars (tens of percent). At the same time, the levels of significance for BL Lac (at certain frequencies  $p$  is worse than 0.05) in the active state indicate only the probable presence of connection. On the example of the sample, we show that the variability of emission significantly affects the level of correlation. Our results are consistent with the theoretical predictions about the close relationship of the accretion disk and the jet in blazars.

*Keywords: quasars: general—BL Lacertae objects: general—galaxies: nuclei—galaxies: jets—radio continuum: galaxies*