

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИООБЪЕКТОВ С КONTИНУАЛЬНЫМИ
ОПТИЧЕСКИМИ СПЕКТРАМИ.
БЫСТРАЯ РАДИОПЕРЕМЕННОСТЬ
ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА РАТАН-600**

С. А. Пустильник, К. Д. Амиахберов

Приводятся результаты поиска быстрой переменности радиопотока на волне 8.2 см (шкала 1—10 дней) у 13 объектов с сильным нетепловым континуумом. 8 из них являются радиообъектами с чисто континуальными оптическими спектрами (сокращенно РОКОСы) и 5 — внегалактическими объектами типа BL Lac. Наблюдения были проведены в течение 3 нед в декабре 1982 г. на радиотелескопе РАТАН-600. У всех исследованных объектов переменность была больше, чем у объектов контрольной группы, причем у 5 из них она отвечала доверительной вероятности 0.999. В эти достоверно переменные объекты входят 3 РОКОСа (OE 400, OI 090.4 и PI 034—293) и 2 лацертиды (AO 0235+164 и OJ 287). Индекс быстрой переменности для этих объектов в период наблюдений составлял 0.03—0.08; относительные амплитуды вариаций потока на временах в дни иногда достигали 0.1—0.2. Для остальных источников переменность отвечала доверительной вероятности меньше 0.99. Их индексы переменности в этот период были в диапазоне от ~ 0.02 до ~ 0.08 . Не обнаружено различий в характеристиках быстрой радиоперменности РОКОСов и лацертид. Для 2 достоверно быстропеременных объектов (OI 090.4 и OJ 287) при координированных наблюдениях в тот же период обнаружена быстрая переменность оптического потока. Значимых корреляций в вариациях потока в двух диапазонах не обнаружено. Приводятся средние за 3 нед плотности потоков всех наблюдавшихся источников на частотах 2.3, 3.65, 3.95 и 7.7 ГГц (эпоха 1982.97). Анализ результатов наблюдений быстрой радиоперменности (вместе с другими данными) позволяет сделать выбор между некоторыми альтернативными вариантами моделей, претендующих на объяснение этого феномена.

The results of search for rapid variability of the radio flux at the wavelength 8.2 cm (time scale 1—10 days) in 13 objects with strong nonthermal continuum are reported. 8 of them are radio objects with continuous optical spectra (ROCOSes) and 5 ones are extragalactic BL Lacertae type objects. Observations were carried out during a 3 week set in December 1982 using the RATAN-600 radiotelescope.

All the studied objects have proved to be more variable than the sources of control group, and in 5 of them the variability was detected with the confidence probability of 0.999. These are 3 ROCOSes (OE 400, OI 090.4 and PKS 1034—293) and 2 BL Lac objects (AO 0235+164 and OJ 287). Their indices of rapid variability (r. m. s. deviations / mean flux density) during the observational set were from ~ 0.03 to 0.08. Relative amplitudes of variations on time scale of days sometimes reached values of 0.1 to 0.2. For the rest of the studied objects the variability was not so strongly pronounced and confidence probabilities of its detection were lower than 0.99. Their observed indices of variability were from ~ 0.02 to 0.08.

No differences are detected in the characteristics of rapid radiovariability of ROCOSes and BL Lac objects.

Two of rapidly variable sources — OI 090.4 and OJ 287 have been observed on optical domain during the same period and both have shown rapid variations of optical flux also. No significant correlations ($\alpha=0.01$) have been detected in variations of flux in two regions.

The averaged for a 3 week period flux densities of all observed sources at frequencies 2.3, 3.65, 3.95 and 7.7 GHz (epoch 1982.97) are presented.

The analysis of the presented results on rapid radiovariability (together with the other data) allows us to make the choice between some alternative variants of the models which pretend to explain this phenomenon.

1. Введение. Радиообъекты с континуальными оптическими спектрами (РОКОСы) представляют собой относительно немногочисленную (около 80), но необычную по своим свойствам группу объектов [1].

Оптические изображения РОКОСов на снимках Паломарского обзора неба неотличимы от звезд, так же как у многих внегалактических радиоисточников (квазаров, многих лацертид). Однако в отличие от квазаров и лацертид в оптических спектрах РОКОСов не обнаружено ни эмиссионных, ни абсорб-

ционных деталей. Совокупность наблюдательных свойств (и в первую очередь высокая степень линейной поляризации) свидетельствует в пользу нетепловых механизмов излучения у большинства РОКОСов.

Выборка РОКОСов, однако, не является однородной по наблюдательным свойствам, и это указывает на то, что среди РОКОСов имеются объекты разных классов. Не исключено, в частности, что кроме активных внегалактических объектов типа квазаров и лацертид в эту выборку могли войти релятивистские объекты нашей Галактики: нейтронные звезды наподобие пульсара в Крабовидной туманности или одиночные черные дыры в режиме аккреции [2].

Сравнение известных к настоящему времени свойств РОКОСов со свойствами других объектов приводит к выводу о том, что большинство РОКОСов близки по своим проявлениям к одному из классов активных внегалактических объектов — лацертидам [3], а также к редкому классу квазаров, описанному в [4], — сильнополяризованным квазарам.

ТАБЛИЦА 1
Параметры использованных приемников
(Юг+Перископ, декабрь 1982 г.)

| Длина волны, см | Центральная частота, ГГц | Полоса приемника, МГц | Тип | Чувствительность * ΔT_A , мК ($\tau = 1$ с) |
|-----------------|--------------------------|-----------------------|--------|--|
| 3.9 ** | 7.7 | 400 | ПУ *** | 16 |
| 7.6 **** | 3.95 | 500 | ПУ | 5 |
| 8.2 | 3.65 | 500 | ПУ | 9 |
| 13.0 | 2.3 | 200 | ПУ | 90 |

* Чувствительности на волнах 3.9, 7.6 и 8.2 см приводятся для наилучших погодных условий. Средние значения в этом сете приблизительно в 1.5—2 раза хуже. См., например, оценку $S_{\text{ш}}(\lambda = 8.2 \text{ см})$ после свертки с диаграммой направленности (полуширина по $\alpha = 1.4$) в п. 4.

** Наблюдения в режиме двухлучевого приема.

*** Приемник с параметрическим усилителем.

**** Криорadioметр.

Общими для этих объектов является высокая и переменная линейная поляризация в инфракрасном и оптическом диапазонах, сильная переменность блеска, форма спектра от радио до оптического диапазона, переменность радиопотока в коротковолновом диапазоне на временной шкале месяцы—годы.

Для некоторых, наиболее активных лацертид (OJ 287, BL Lac) неоднократно регистрировалась переменность радиопотока в сантиметровом и миллиметровом диапазонах с характерными временами несколько дней [5—10].

Согласно современным представлениям быстрая переменность внегалактических радиоисточников является проявлением релятивистского джета [11, 12]. Джеты обнаружены во многих радиоисточниках [13]. Явление «сверхсветового» разлета, обнаруженное у нескольких компактных объектов [14], также свидетельствует о релятивистских скоростях джетов у части радиоисточников. В связи с многочисленными указаниями на реальность релятивистских струй в компактных внегалактических источниках среди астрофизиков весьма популярна гипотеза Блэндфорда и Риса [15], согласно которой наблюдательный феномен объектов типа BL Lac определяется главным образом излучением релятивистского джета, наблюдаемого под небольшим углом к его оси.

Насколько большинство РОКОСов близки к лацертидам, в частности, по наличию быстрой радиоперемежности?

Первая попытка ответить на этот вопрос была предпринята нами в 1979 г. [16]. Из 14 изученных РОКОСов у девяти была обнаружена переменность потока на днях с доверительной вероятностью больше 0.98. Эти выводы были сделаны по очень ограниченному материалу: число наблюдений — от 4 до 6 на каждый объект; число контрольных источников было мало. Поэтому выводы упомянутой работы расценивались нами как предварительные.

Поскольку, однако, вывод о большой доле быстропеременных радиоисточников среди исследованных РОКОСов представляется очень важным, мы решили для его проверки провести новый патрульный цикл наблюдений, увеличив полное число измерений каждого объекта и включив в программу большую группу контрольных источников.

В настоящей работе мы исследовали быструю радиопеременность 8 РОКОСов с «плоскими» спектрами. Цель работы — сравнить РОКОСы и лацертиды по характеристикам быстрой радиопеременности. Для наблюдений были отобраны РОКОСы, уже изучавшиеся в работе [16], а также 5 наиболее активных объектов типа BL Lac.

Второй целью был поиск корреляции быстрых вариаций потока в оптическом и радиодиапазонах. Такая корреляция ранее предполагалась в работах Эндрю и др. [4, 5] и была обнаружена у РОКОСа OI 090.4 в работе Пустильника и др. [17].

2. Наблюдения и ошибки измерений. Все наблюдения по этой программе проведены с помощью радиотелескопа РАТАН-600 в период с 9 по 31 декабря 1982 г. Наблюдения проводились в конфигурации Южный сектор + плоский отражатель (Перископ) [18] со штатным комплектом широкополосных радиометров. Диаграмма направленности на волне 8.2 см — $1'4 \times 48'$, эффективность — (0.14—0.18) К/Ян.

Переменность изучалась на двух самых чувствительных приемниках диапазонов 7.6* и 8.2 см. Их параметры приведены в табл. 1. Измерение потока источников производилось квазисовременно на всех волнах ($\Delta t < 2$ мин) при прохождении источником неподвижной диаграммы направленности телескопа вблизи местного меридиана. Калибровочный сигнал от полупроводникового генератора шума (ГШ) впрыскивался в канал приемника до и после прохождения источника.

Для поиска переменности были отобраны 8 РОКОСов с плоскими или инверсионными радиоспектрами, для которых уже сообщалось в литературе [16] о периодах либо быстрой радиопеременности, либо о быстрых вариациях оптического блеска. Для сравнения в этой же программе проводились наблюдения 5 лацертид с известными красными смещениями, отобранных по тем же критериям. Список исследованных объектов приведен в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2
Список исследованных объектов

| Радиоисточник | Другое имя | Тип | z | Радиоисточник | Другое имя | Тип | z |
|---------------|------------|--------|--------|---------------|------------|--------|-------|
| 0109+224 | OC 215.7 | РОКОС | — | 1034—293 | OL—259 | РОКОС | — |
| 0138—097 | OC—065 | РОКОС | — | 1147+245 | OM 280 | РОКОС | — |
| 0235+164 | OD 160 | BL Lac | 0.852 | 1219+285 | W Com | BL Lac | 0.102 |
| 0300+470 | OE 400 | РОКОС | — | 1308+326 | OP 313 | BL Lac | 0.996 |
| 0754+100 | OI 090.4 | РОКОС | — | 1418+546 | OQ 530 | РОКОС | — |
| 0829+046 | OJ 049 | РОКОС | — | 2200+420 | BL Lac | BL Lac | 0.069 |
| 0851+202 | OJ 287 | BL Lac | 0.306? | | | | |

При изучении переменности необходимо уметь хорошо оценивать все погрешности измерений сигнала. Однако на практике трудно гарантировать, что все факторы, приводящие к дисперсии постоянного сигнала, учтены правильно. Для того чтобы уйти от этой проблемы, было решено при изучении переменности интересующих нас объектов использовать в качестве опорной выборку 11 контрольных источников. Они наблюдались в тот же период вре-

* Анализ результатов наблюдений позволил, однако сделать, вывод о нестабильности температуры генератора шума (и коэффициента усиления) на волне 7.6 см, что приводило в некоторые даты к вариациям T_A (7.6 см) на фактор (5—10 %). Поэтому было решено не использовать результаты измерений на волне 7.6 см при поиске переменности. Однако эти данные вполне пригодны для определения средних за цикл потоков (табл. 5).

мени в промежутках между исследуемыми источниками. Их список приведен в табл. 3. Большая часть этих источников имеет нормальные радиоспектры и использовалась для привязки по потоку. Для привязки по потоку использованы также результаты наблюдений стандартных калибровочных источников непосредственно перед началом нашей программы.

Поскольку при поиске переменности ошибка абсолютной привязки по плотности потока незначительна, мы в дальнейшем будем анализировать лишь вариации антенной температуры T_A , которая пропорциональна плотности потока.

В ошибку определения T_A дают вклад два типа шумовых процессов: аддитивный шум системы приемник+антенна со стандартным отклонением (S_m), не зависящим от T_A , и мультипликативный компонент шума, для которого стандартное отклонение пропорционально величине сигнала: $S \propto a \times T_A$.

ТАБЛИЦА 3
Список контрольных источников

| Радиоисточник | Другое имя | Тип спектра |
|---------------|------------|--------------------|
| 0035+36 | 4С 36.01 | Плоский |
| 0055+30 | ОВ 392 | » |
| 0159-117 * | 3С 57 | Нормальный |
| 0316+16 * | СТА 21 | » |
| 0906+430 | 3С 216 | Нормальный+плоский |
| 0941-080 * | Р 0941-080 | Нормальный |
| 1004-018 | Р 1004-018 | Плоский |
| 1116+128 | Р 1116+12 | Нормальный+плоский |
| 1241+166 * | 3С 275.1 | Нормальный |
| 1328+30 * | 3С 286 | » |
| 1409+52 * | 3С 295 | » |

* Источники использовались в качестве калибровочных по плотности потока.

Мультипликативный компонент обусловлен различными нестабильностями в приемной системе и эффектами среды распространения. В нашем случае в первую очередь сюда входят ошибки в установках элементов главного и вторичного зеркал (ошибки наведения), что приводит к вариациям эффективной площади, и ошибки определения уровня калибровочной ступеньки (сигнала генератора шума).

Таким образом, стандартное отклонение антенной температуры для последовательности наблюдений непрерывного источника со средней температурой T_A будет $S = (S_m^2 + a^2 T_A^2)^{1/2}$.

3. Обработка и результаты наблюдений. Сигнал с выхода радиометров с помощью устройства автоматической регистрации записывался в цифровом коде на магнитную ленту с дискретом по времени $\Delta t = 0.18$ с.

Вся обработка проводилась с помощью комплекса ИВК-2 на базе ЭВМ СМ-4 набором штатных программ обработки наблюдений дискретных источников (В. В. Витковский, М. Л. Моносов, В. С. Шергин).

Наш вариант обработки содержал три основных элемента: а) обработка калибровочных ступенек (сигнал шумового генератора), б) проведение уровня фона и вычитание его из исходной записи, в) свертка участка записи, содержащей источник, с диаграммой направленности телескопа и определение максимального значения T_A . Для определения сечения двумерной диаграммы использовалась программа, созданная А. Н. Корявиным и адаптированная для штатного набора программ обработки Г. А. Мальковой.

Как известно (например, [19]), свертка с диаграммой является для точечных источников наиболее оптимальным процессом фильтрации высокочастотных шумов и позволяет получить наилучшее отношение сигнал/шум.

В результате первой обработки наблюдений на волне 8.2 см мы получили для всех дат наблюдений для каждого источника набор значений антен-

ных температур $T_A(t)$, а также значения стандартного отклонения $S_{\text{ш}}$ после свертки на соседнем с источником участке записи. На этом этапе обработки производилась также отбраковка некоторых наблюдений — при попадании помех на кривую прохождения источника или резком изменении фона на вре-

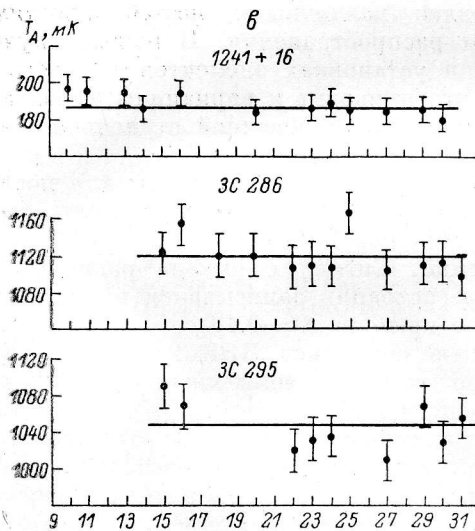
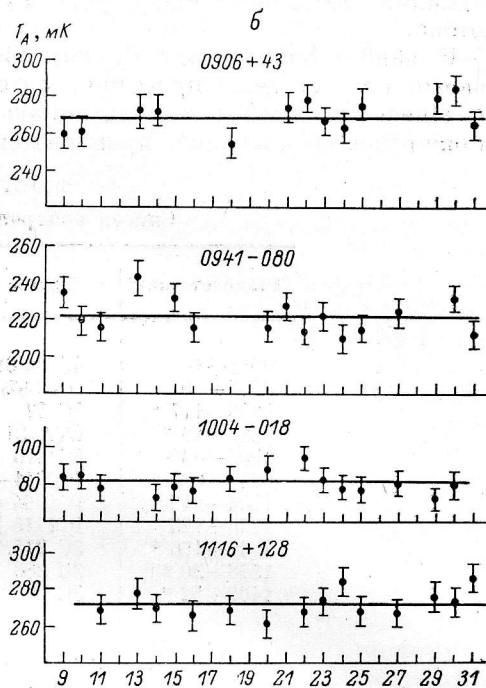
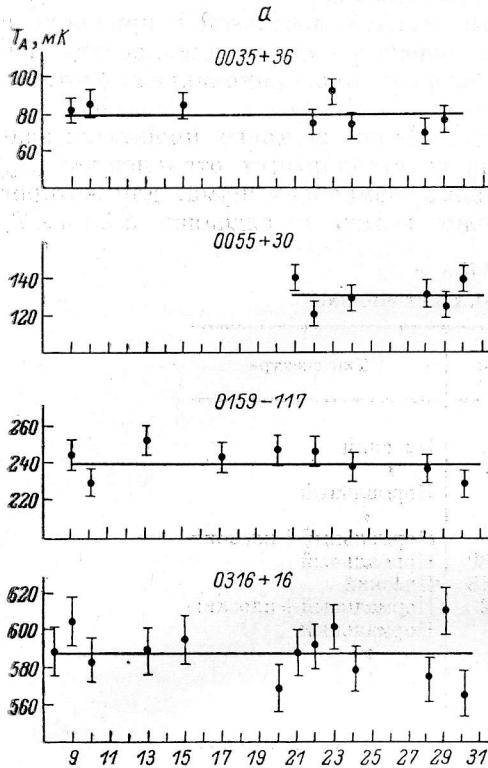


Рис. 1а. Кривые блеска на волне 8.2 см контрольных источников 0035+36, 0055+30, 0159-117 и 0316+16.

Рис. 1б. Кривые блеска на волне 8.2 см контрольных источников 0906+43, 0941-080, 1004-018, 1116+128.

Рис. 1в. Кривые блеска на волне 8.2 см контрольных источников 1241+126, 3C 286 и 3C 295.

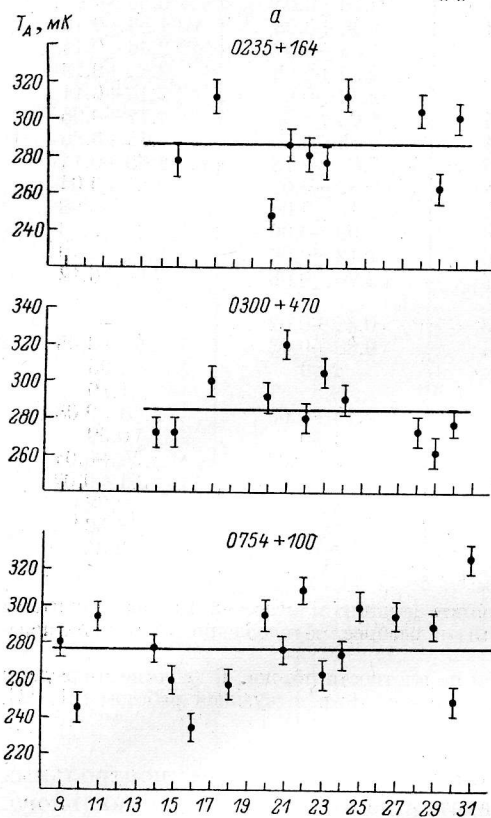
менных масштабах порядка ширины диаграммы. Отброшено около 5 % наблюдений.

Полученные массивы антенных температур T_A являлись первичным материалом для дальнейшего статистического анализа.

Результаты обработки представлены в виде кривых блеска T_A —дата на рис. 2 для трех значимо переменных РОКОСов и для двух значимо переменных лацертид, а на рис. 1 — для 11 контрольных источников. На каж-

дом из рисунков горизонтальной линией нанесено средневзвешенное значение T_A , которое использовано в дальнейшем для определения среднего уровня потока за период наблюдений. Вертикальные отрезки на рисунках соответствуют величине стандартного отклонения ($\pm S_0$) из п. 2 (вычисление величины S_0 см. в п. 4).

Переход от антенных температур к плотностям потоков производился с использованием зависимости эффективной площади от высоты над горизонтом (h) по наблюдениям калибровочных источников, так же как в работе Алиакберова и др. [20]. Средние плотности потоков на волне 8.2 см, а также на волнах 3.9, 7.6 и 13 см приведены в табл. 4.



Средние плотности потоков на волне 8.2 см, а также на волнах 3.9, 7.6 и 13 см приведены в табл. 4.

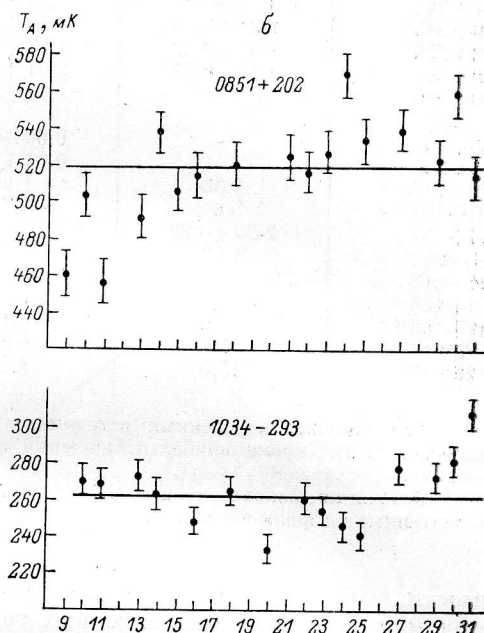


Рис. 2а. Кривые блеска на волне 8.2 см переменных источников 0235+164, 0300+470 и 0754+100.

Рис. 2б. Кривые блеска на волне 8.2 см переменных источников 0851+202 и 1034-293.

Для калибровочных источников приведены принятые плотности потоков, соответствующие шкале из работ [21, 22].

4. Статистический анализ результатов наблюдений. В используемом нами методе поиска переменности мы сравниваем дисперсии временных рядов исследуемых и контрольных источников и проверяем значимость их различий. В математической статистике известно распределение вероятностей для отношения дисперсий двух выборок из одной генеральной совокупности, подчиняющейся нормальному распределению (статистика Фишера). Поэтому если мы хотим воспользоваться данной статистикой, нам следует выяснить, насколько распределение для контрольных источников близко к нормальному.

4.1. Проверка нормальности распределения T_A . Мы выдвигаем нулевую гипотезу о нормальности распределения антенных температур контрольных непериодических источников, т. е. для каждого источника i $T_A(i) \sim N(m(i), \sigma(i))$ со своим математическим ожиданием и стандартным отклонением. При проверке гипотезы H_0 для каждого из контрольных источников мы подставляли вместо m и σ их несмещенные выборочные оценки.

Ввиду малости проверяемых выборок ($n=10-15$) для проверки H_0 мы использовали модифицированные статистики омега-квадрат и Колмогорова—Смирнова, квантили для которых приведены например в [23]. Уровень зна-

ТАБЛИЦА 4

Средние за период наблюдений плотности потоков источников
(эпоха 1982.97), Ян ($1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц})$)

| Объект | S_{ν} (2.3 ГГц) | S_{ν} (3.65 ГГц) | S_{ν} (3.95 ГГц) | S_{ν} (7.7 ГГц) |
|-------------|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 0109+224 | <0.7 | 0.49 ± 0.03 | 0.50 ± 0.03 | 0.55 ± 0.04 |
| 0138-097 | 1.20 ± 0.17 | 1.41 ± 0.07 | 1.48 ± 0.08 | 1.63 ± 0.10 |
| 0235+164 * | 1.79 ± 0.17 | 1.82 ± 0.08 | 1.86 ± 0.07 | 2.46 ± 0.14 |
| 0300+470 * | 2.01 ± 0.23 | 2.35 ± 0.10 | 2.36 ± 0.08 | 2.82 ± 0.13 |
| 0754+100 * | 1.32 ± 0.19 | 1.70 ± 0.07 | 1.80 ± 0.06 | 2.14 ± 0.11 |
| 0829+046 | 0.96 ± 0.11 | 0.97 ± 0.04 | 1.04 ± 0.06 | 1.17 ± 0.06 |
| 0851+202 * | 2.65 ± 0.24 | 3.42 ± 0.14 | 3.73 ± 0.10 | 5.15 ± 0.26 |
| 1034-293 * | 1.53 ± 0.17 | 2.17 ± 0.20 | 2.05 ± 0.18 | 1.68 ± 0.14 |
| 1147+245 | 0.95 ± 0.39 | 0.84 ± 0.04 | 0.87 ± 0.03 | 0.82 ± 0.04 |
| 1219+285 | 1.95 ± 0.19 | 2.10 ± 0.08 | 2.15 ± 0.06 | 1.93 ± 0.08 |
| 1308+326 | 1.54 ± 0.20 | 1.97 ± 0.08 | 2.03 ± 0.06 | 2.33 ± 0.10 |
| 1418+546 | 2.46 ± 0.57 | 2.01 ± 0.10 | 2.12 ± 0.06 | 2.11 ± 0.10 |
| 2200+420 | — | 2.61 ± 0.12 | 2.70 ± 0.08 | 2.66 ± 0.12 |
| 0035+36 | — | 0.60 ± 0.03 | 0.55 ± 0.02 | — |
| 0055+30 | — | 0.93 ± 0.04 | 0.88 ± 0.03 | 0.93 ± 0.05 |
| 0159-417 ** | 2.30 | 1.68 | 1.60 | 1.00 |
| 0316+162 ** | 5.6 | 3.75 | 3.5 | 1.80 |
| 0906+43 | 2.60 ± 0.29 | 2.12 ± 0.10 | 2.16 ± 0.05 | 1.60 ± 0.08 |
| 0941-080 | 1.90 | 1.40 | 1.30 | 0.69 |
| 1004-018 | — | 0.50 ± 0.02 | 0.51 ± 0.02 | 0.55 ± 0.04 |
| 1116+128 | 1.90 ± 0.12 | 1.71 ± 0.06 | 1.76 ± 0.07 | 1.54 ± 0.07 |
| 1241+166 ** | 1.90 | 1.19 | 1.14 | 0.78 |
| 3C 286 ** | 11.0 | 8.80 | 8.30 | 5.50 |
| 3C 295 ** | 15.0 | 8.80 | 8.0 | 3.85 |

* Для значимо переменных источников ошибки средних плотностей потока посчитаны формально. В них кроме ошибок наблюдений входит и разброс, обусловленный истинной переменностью.

** Источники, использованные для калибровки по плотности потока. В таблице приведены пересчитанные на наши частоты плотности потоков в шкале, соответствующей работам [21, 22].

чимости выбран равным 0.01. Расчеты показали, что для всех контрольных источников распределение антенных температур не отличается от нормального.

Дальнейшим шагом для сравнения дисперсий исследуемых и контрольных источников является получение параметров эмпирической зависимости дисперсии непременного источника от его антенной температуры, которая из общих соображений должна иметь вид (см. п. 2), $S_0^2 = S_m^2 + (aT)^2$.

4.2. Получение параметров эмпирической зависимости. Параметр S_m должен показывать слабую зависимость от высоты источника h или склонения δ . Однако анализ средних значений по всем 11 контрольным источникам в диапазоне склонений от -11.7 до $+52^\circ$ показывает, что значимое отличие от среднего по всем источникам имеется только для самого высокого — 3C295 ($\delta = +52$). Коэффициент a , который составляет несколько процентов, не должен зависеть от h , так как вклад эффекта поглощения в атмосфере для рассматриваемого диапазона меньше 1 %.

Таким образом, мы пытаемся представить дисперсию T_A для непременных источников во всем диапазоне высот единой зависимостью и оценим параметры этой зависимости S_m и a методом наименьших квадратов, взяв выборочные значения $S^2(i)$ для 10 контрольных источников (без 3C295) с их стандартными уклонениями.

Исходные точки $S(\langle T(i) \rangle)$ и вычисленная линия регрессии на волне 8.2 см показаны на рис. 3. Линия регрессии хорошо воспроизводит расположение эмпирических точек — отношение остаточной (относительно линии регрессии) дисперсии эмпирических точек к средневзвешенной дисперсии самих эмпирических точек незначимо отличается от единицы. Регрессионная зависимость имеет вид

$$S_0(T) = \sqrt{(6.3 \text{ мК})^2 + (0.0185T)^2}. \quad (1)$$

Для параметра S_m мы имеем независимую оценку, полученную усреднением величин S_m по всем наблюдениям на соседних с источником участках неба после свертки с диаграммой.

Поскольку оценки S_m , полученные двумя независимыми методами, значимо не различаются (с уровнем значимости $\alpha=0.05$) и имеют близкое число степеней свободы, мы можем получить сводную оценку для S_m , взяв среднее двух независимых оценок. Таким образом, окончательно имеем для дисперсии T_A непременного источника со средней антенной температурой T

$$S_0(T) = \sqrt{(6.8 \text{ мК})^2 + (0.0185T)^2}. \quad (2)$$

Далее мы будем пользоваться именно этой формулой. У всех исследуемых объектов переменность в период наблюдений была больше, чем у объектов

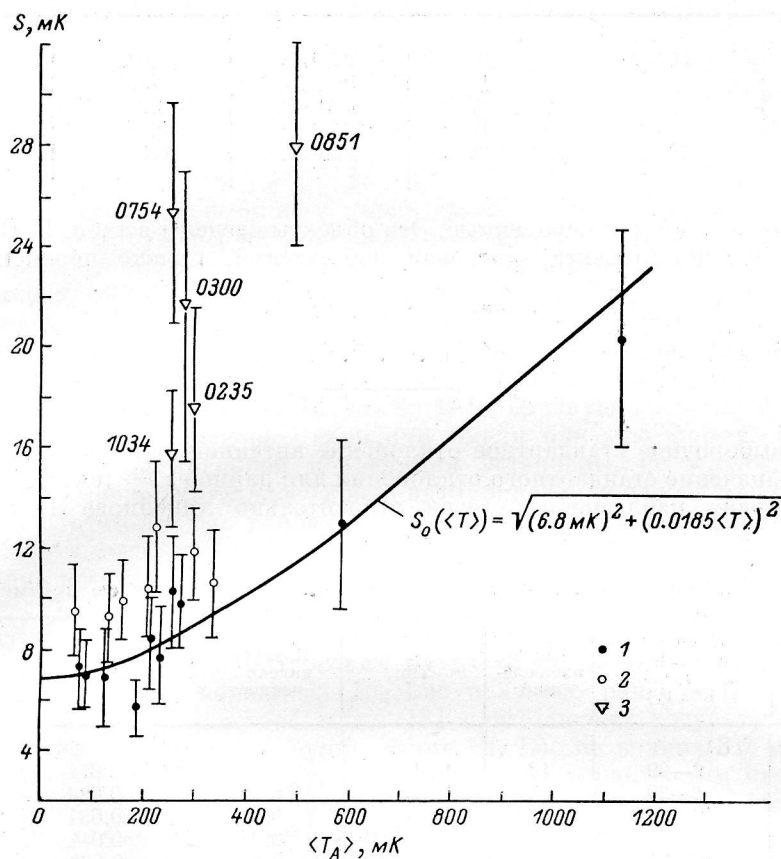


Рис. 3. Стандартные отклонения контрольных (1) и исследуемых (2 — «непеременных», 3 — переменных) источников в зависимости от средней антенной температуры на волне 8.2 см. Эмпирическая зависимость найдена методом наименьших квадратов по точкам для контрольных источников.

контрольной группы (рис. 4). Необходимо установить значимость такого вывода для каждого из исследуемых объектов индивидуально.

4.3. Поиск переменности. Далее для каждого из исследуемых источников мы выдвигаем нулевую гипотезу H_0 о том, что он является непременным. Тогда, поскольку нормальность распределения $T(i)$ для непременных источников уже проверена, мы можем проверить H_0 , воспользовавшись статистикой Фишера $V^2 = (S_1)^2 / (S_0)^2$ — отношения дисперсий с известным распределением вероятностей. В качестве S_0^2 берется дисперсия, получаемая из эмпирической зависимости (2), для источников с данной $\langle T \rangle$. В качестве S_1^2 берется выборочная дисперсия антенных температур проверяемого источника. Число степеней свободы соответственно для верхней дисперсии $n(j) - 1$, где $n(j)$ — число наблюдений данного источника. Для нижней дисперсии мы

условно рассчитывали число степеней свободы по формуле $\sum_{i=1}^{10} n(i) - 12 = 114$.
 Разумеется, она не вполне корректна, однако на окончательный результат это не влияет.

Задавшись уровнем значимости $\alpha=0.001$, мы проверяем H_0 для всех исследуемых источников. Источники, для которых гипотеза H_0 не проходит, рас-

ТАБЛИЦА 5

Источники, значимо переменные на волне 8.2 см, и их индексы переменности

| Объект | Интервал наблюдений (даты декабря 1982 г.) | Число наблюдений | Тип | Индекс переменности μ | Индекс быстрой переменности μ' |
|----------|--|------------------|--------|---------------------------|------------------------------------|
| 0235+164 | 15-30 | 10 | BL Lac | 0.068 | 0.068 |
| 0300+470 | 14-30 | 11 | ПОКОС | 0.052 | 0.052 |
| 0754+100 | 9-31 | 17 | ПОКОС | 0.085 | 0.080 |
| 0851+202 | 9-31 | 17 | BL Lac | 0.049 | 0.034 |
| 1034-293 | 10-31 | 15 | ПОКОС | 0.049 | 0.049 |

сматриваются ниже как переменные. Эти объекты сведены в табл. 5. В ней приводятся: название объекта, интервал наблюдений, индекс переменности μ :

$$\mu = \sqrt{S_1^2 - S_0^2} / \langle T \rangle, \quad (3)$$

индекс быстрой переменности μ' (см. п. 4.4):

$$\mu' = \sqrt{S_2^2 - S_0^2} / \langle T \rangle, \quad (4)$$

где S_1 — выборочное стандартное отклонение антенной температуры T_i ; S_0 — расчетное значение стандартного отклонения для данной $\langle T \rangle$ [см. формулу (2)]; S_2^2 — дисперсия наблюдаемых точек относительно линейного тренда.

ТАБЛИЦА 6

Источники, не значимо переменные на волне 8.2 см и их индексы переменности

| Объект | Интервал наблюдений (даты декабря 1982 г.) | Число наблюдений | Тип | Измеренный индекс переменности μ | μ_{90} (90 %) | μ_{95} (95 %) |
|------------|--|------------------|--------|--------------------------------------|-------------------|-------------------|
| 0109+224 | 9-29 | 13 | ПОКОС | 0.082 | 0.074 | 0.087 |
| 0138-097 | 8-30 | 12 | ПОКОС | 0.031 | 0.029 | 0.034 |
| 0829+046 | 9-31 | 17 | ПОКОС | 0.040 | 0.034 | 0.039 |
| 1147+245 | 9-31 | 15 | ПОКОС | 0.049 | 0.044 | 0.051 |
| 1219+285 | 9-31 | 16 | BL Lac | 0.028 | 0.022 | 0.025 |
| 1308+326 | 10-31 | 14 | BL Lac | 0.034 | 0.024 | 0.028 |
| 1418+546 * | 9-31 | 12 | ПОКОС | 0.023 | 0.041 | 0.048 |
| 2200+420 | 9-29 | 10 | BL Lac | 0.016 | 0.023 | 0.027 |

* Учтено, что на высоте этого источника $S_{ш} = 10.8$ мК (среднее по соседнему с источником участку неба).

Для остальных исследованных источников гипотеза об отсутствии переменности не отвергается даже на уровне значимости $\alpha=0.01$. В табл. 6 мы приводим для этих объектов измеренный индекс переменности μ , а также для сравнения 90- и 95 %-ные доверительные интервалы для μ при случайных (шумовых) реализациях μ_{90} (90 %) и μ_{95} (95 %), посчитанные по распределению Фишера.

4.4. Быстрая переменность. Интервал наблюдений исследуемых источников составлял от 15 до 22 дней. Поэтому переменность, обнаруженная из анализа дисперсий в предыдущем пункте, могла бы быть проявлением процесса с характерной шкалой порядка месяца и более. Для того чтобы

убедиться в существовании флуктуаций на более короткой шкале, мы выделили для каждого из переменных источников методом наименьших квадратов линейный тренд. Далее с помощью критерия Фишера мы проверили гипотезу H_0 о том, что дисперсия невязок наблюдаемых величин T_A относительно линейного тренда обусловлена только погрешностями наблюдений со стандартным отклонением $S_0(\langle T \rangle)$. Для всех переменных источников из табл. 5 гипотеза H_0 отвергается при уровне значимости $\alpha=0.001$.

Отсюда мы делаем вывод, что основной вклад в вариации изученных переменных источников дают процессы со шкалой $\Delta t < 15 \div 20$ дней. Визуальный просмотр кривых блеска также подтверждает наличие вариаций на временах до $\Delta t \leq 2 \div 3$ дней. Уровень значимости индивидуальных выбросов с такими характерными временами $\alpha=0.03 \div 0.05$.

В качестве характеристики быстрых флуктуаций мы использовали в табл. 5 индекс быстрой переменности μ' , даваемой формулой (4).

5. Анализ результатов. 5.1. Сравнение быстрой переменности РОКОСов и лацертид. Что известно о быстрой радиопеременности лацертид? Впервые быстрая переменность лацертид в сантиметровом диапазоне была достоверно зарегистрирована в работах Маклеод и др. [10] у VL Lac и Эндрю и др. [6] у OJ 287.

У VL Lac быстрые «вспышки» с характерным временем подъема и спада несколько дней обнаружены на фоне значительного подъема потока с характерным временем в несколько месяцев на волнах 2.8 и 4.5 см. Амплитуда таких «вспышек» около 15–20 %.

Аналогичные «вспышки» у OJ 287 на волнах 2.8 и 4.5 см были обнаружены также в фазе повышенного потока. Их длительности 2–4 дня и амплитуды 5–20 %. Вариации блеска в оптическом диапазоне в этот же период (тоже в яркой фазе) имели амплитуду около 20 % и близкую временную шкалу. Более того, в обоих диапазонах вариации имели близкую форму. Однако, как пишут авторы, достоверной корреляции установить не удалось.

Относительно продолжительное (2 нед) патрулирование одного из РОКОСов (OI 090.4) на сантиметровых волнах и в оптическом диапазоне [17] привело к обнаружению у него близкой по характеру переменности. При общем повышенном уровне потока наблюдались «вспышки» на волне 8.2 см с характерной длительностью 1–3 дня и амплитудой около 20 %. Сравнение вариаций потока в оптическом и радиодиапазоне дало значимую корреляцию при запаздывании радиовариаций относительно оптических на $\Delta t=2$ дня. Указание на такое же запаздывание в быстрых вариациях VL Lac получено ранее в [5].

В недавней работе Джонстона и др. [8] представлены результаты более чем двухлетнего ежедневного патрулирования VL Lac на волнах 3.7 и 11 см. В кривой блеска VL Lac доминирует переменность с характерным масштабом порядка 100 дней. Однако, как отмечают авторы работы, переменность на временах в дни также имеет место и происходит в фазах больших подъемов кривой блеска на длинной шкале. Относительная амплитуда быстрых вариаций не превышает 10 %, кроме одного случая, когда за 6 дней поток возрос в 1.5 раза.

В наших наблюдениях все 5 объектов, у которых достоверно обнаружена быстрая переменность, находились в фазе повышенного потока в сантиметровом диапазоне, а два из них — OI 090.4 и P1034–293 — имели максимальный поток в диапазоне 6–8 см за весь период наблюдений с момента открытия.

Если мы аналогично Лютому [41] выделим на кривых блеска 5 вышеупомянутых источников медленнопеременную подложку ($\tau \geq 20$ дней), то наблюдаемые быстрые вариации имеют характерные длительности от 1 до 3 дней и относительные амплитуды от 10 до 20 %.

Таким образом, как по данным упомянутых работ, так и по результатам наших наблюдений лацертиды и РОКОСы оказались близки по характеристикам к быстрой радиопеременности (табл. 5 и 6).

Из-за существенно более низкого отношения сигнал/шум на остальных волнах поиск быстрой переменности для них не проводился. Поэтому спектры быстропеременного компонента мы в этой работе не имели возможности об- судить.

5.2. Проверка возможной корреляции оптической и радиопеременности. Для этой цели 5 объектов из программы радиопатруля наблюдались в тот же период в оптическом диапазоне с помощью 60-см телескопов САО АН СССР и Южной станции ГАИШ (Крым). Метод — четырехцветная электрофотометрия. Результаты подробно описаны в [24]. Наблюдались РОКОСы ОI 090.4, OJ 049 и OQ 530 и лацертиды OJ 287 и W Com. Из них значимую радиопеременность показали лишь OI 090.4 и OJ 287. Оба эти объекта также показали значимую переменность оптического блеска в период координированных наблюдений с характерными временами в несколько дней. К сожалению, кривые блеска в обоих диапазонах имеют много пропусков. Это приводит к значительному уменьшению числа точек, используемых при изучении возможной связи вариации в оптическом и радиодиапазонах.

Отметим, что для источников с обнаруженной переменностью нет оснований считать распределение измеренных значений оптического и радиопотоков (антенных температур) нормальным. Поэтому нельзя оценивать уровни значимости линейной связи между вариациями в двух диапазонах из распределения нормального коэффициента корреляции (как, например, сделано в работе Пустильника и др. [17]). Следует строить регрессионную зависимость радио и оптических потоков и значимость линейной связи между ними оценивать по значимости отличия от нуля коэффициента наклона b в регрессионной зависимости $Y = a + bX$ [25]. Используется то обстоятельство, что в интересующем нас распространенном случае нормального распределения ошибок измерений величина $(b - \beta) / S_b$ распределена по Стьюденту. Здесь β — истинный наклон, S_b — стандартное отклонение b .

Проверка по регрессионному анализу корреляционного пика в вариациях потоков на волне 8.2 см и в оптическом фильтре R из работы Пустильника и др. [17] при смещении Δt (радио—оптика) = 2 дня показала, что вероятность случайно получить найденную величину коэффициента наклона равна 0.014, что приблизительно в 3 раза больше вероятности, оцененной из величины коэффициента корреляции.

Выбрав уровень значимости $\alpha = 0.01$, мы по данным наших наблюдений OI 090.4 и OJ 287 не нашли значимых наклонов регрессии ни при одном из сдвигов Δt (радио—оптика) = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6. Наиболее значимый наклон регрессионной зависимости получается для OJ 287 при $\Delta t = 0$. В этом случае вероятность случайно получить найденную величину наклона есть $\alpha = 0.03$.

Таким образом, мы делаем вывод, что на уровне значимости $\alpha = 0.01$ линейная связь между быстрыми вариациями потока в оптическом и радиодиапазоне отсутствовала (для запаздывания от 0 до 6 дней).

Следует также отметить, что еще один РОКОС — OJ 049, наблюдавшийся в этот период в обоих диапазонах и показывавший очень сильную и быструю переменность оптического блеска («вспышки» с амплитудой до 100 % и длительностью $\Delta t \leq 1$ дня), на волне 8.2 см вообще не имел переменности выше порога обнаружения нашей методики, т. е. средняя амплитуда его быстрых радиофлуктуаций была меньше 10 %.

5.3. О последних обзорах быстрой радиопеременности. Недавно появились работы Хишана [26] и Симонетти и др. [27], посвященные статистическому исследованию быстрой переменности внегалактических радиоисточников. Эти авторы проводили наблюдения в диапазонах 9, 13 и 21 см, включая в программу источники как с плоскими радиоспектрами, так и с крутыми. Основной вывод этих работ: многие радиоисточники с плоскими спектрами переменны на днях с амплитудой в среднем около 2 %.

В работе Симонетти и др. [27] приводятся результаты по 14 индивидуальным объектам с плоскими радиоспектрами, и мы можем их сравнить с некоторыми нашими результатами. В частности, эти авторы обнаружили быстрые флуктуации у лацертида 0235+164, который и в нашей программе показал переменность на днях. Другой объект, у которого Симонетти и др. [27] нашли быструю переменность — РОКОС 0306+102 — был также отнесен нами к быстропеременным в работе [16].

В работе Хишена [26] результаты исследования быстрой переменности индивидуальных объектов не приводятся. Сравнить же наши результаты с его общими выводами некорректно из-за того, что наши выборки качественно сильно отличаются. Выборка Хишена (более 200 радиоисточников) свободна от селекции по переменности и оптическим типам источников, в то время как у нас отобраны объекты с наиболее сильными проявлениями активности, в том числе известные или заподозренные быстропеременные в оптическом и радиодиапазонах.

6. Обсуждение и интерпретация. Основной целью наблюдательной программы был поиск среди РОКОСов с плоскими радиоспектрами объектов с наиболее короткой для внегалактических радиоисточников шкалой переменности.

Спорадическая переменность на временах 1—10 дней с амплитудой от 5 до 20 % характерна для наиболее активных представителей лацертид — OJ 287 и VL Lac. В этой же программе предполагалось проверить выводы более ранней работы [16], посвященной тому же вопросу. Другой задачей была попытка обнаружить коррелированные быстрые вариации потока в оптическом и радиодиапазоне.

Приведенные выше результаты показывают, что качественно вывод работы [16] подтвержден. У всех изученных РОКОСов переменность была выше, чем у источников контрольной группы, а три из них (~40 %) достоверно (доверительная вероятность более 0.999) оказались быстропеременными с амплитудой вариаций до 10—20 %. Эти три быстропеременных РОКОСа имеют в оптическом диапазоне свойства континуума, типичные для лацертид: большая переменная линейная поляризация, сильная переменность блеска и цвета, характерные для лацертид. Близость всех наблюдательных характеристик континуума быстропеременных РОКОСов и наиболее активных лацертид заставляет предполагать единую природу этих объектов. Поскольку и у OJ 287, и у VL Lac обнаружены очень слабые эмиссии горячего газа [28], поиск слабых эмиссий в спектрах быстропеременных РОКОСов может быть перспективным.

Из имеющихся оптических данных можно предварительно наложить нижние пределы на расстояния до трех быстропеременных РОКОСов, предполагая, что их наблюдаемые нетепловые источники находятся в ядрах таких же гигантских эллиптических галактик, как и у известных достаточно близких объектов типа VL Lac [29]. Блеск таких галактик и их цвета в зависимости от красного смещения проанализированы в работе Колемана и др. [39]. Учитывая тогда минимальный зарегистрированный блеск объектов [1, 3, 30] и малый вклад излучения E-галактики в этой фазе блеска (достаточно голубые цвета РОКОСов), можно получить для всех трех РОКОСов оценку $z \geq 0.2$.

Какова природа быстрой переменности? Наблюдения слабой быстрой переменности в диапазоне 9—21 см у радиоисточников с плоскими спектрами ($\Delta t = 1-20$ дней) Хишеном [26] и Симонетти и др. [27] и анализ этих авторов показывают, что пока нельзя полностью исключить межзвездные мерцания как возможную причину этого явления. Однако гипотеза внутренних вариаций потока источников должна рассматриваться по крайней мере на равных с мерцательной.

Что касается лацертид и РОКОСов, то для них имеются дополнительные аргументы в пользу гипотезы о внутренней природе быстрых вариаций. Это пока редкие случаи быстрых коррелированных изменений потока в оптическом и радиодиапазоне (OJ 287 — Эндрю и др. [6], VL Lac — Эндрю и др. [5], OI 090.4 — Пустильник и др. [17]). Другим важным аргументом является большая амплитуда быстрых вариаций потока в коротком сантиметровом и миллиметровом диапазонах у объектов этого типа (например, [6, 9]).

Быстрая радиопеременность внегалактических источников как внутренний процесс приводит к сильным ограничениям на физические условия в области излучения, так как яркостные температуры для типичных наблюдательных параметров на несколько порядков превышают критическое значение $T_v = 10^{12}$ К. При $T_v > 10^{12}$ К комптоновские потери в синхротронном источнике катастрофически нарастают [31, 38] и быстро гасят источник. Поэтому для интерпретации высоких яркостных температур приходится привлекать либо

когерентные механизмы, либо релятивистские скорости источников и, как следствие, анизотропию излучения канонического синхротронного источника [32].

Ввиду наличия прямых наблюдательных данных о существовании выбросов в радиоисточниках и видимых сверхсветовых скоростей в некоторых из них гипотеза о синхротронном источнике, связанном с релятивистским джетом, является наиболее привлекательной.

Можно связать яркостную температуру в собственной системе источника, движущегося со скоростью βc под углом θ к направлению на наблюдателя, с наблюдаемыми параметрами радиоисточника и его Доплер-фактором $\delta = \sqrt{1 - \beta^2} / (1 - \beta \cos \theta)$.

Для источника с плоским спектром ($\alpha=0$) можно получить для T_v (система источника) следующее выражение (см. Приложение):

$$T_v (\text{СИ}) = 10^{19} \text{ К} \cdot \frac{z^2}{1+z} \delta^{-3} \left(\frac{75}{H_0} \cdot \frac{4\Gamma_{\text{П}}}{v_{\text{набл}}} \cdot \frac{1 \text{ день}}{t_{\text{вар}}} \right)^2 \left(\frac{\Delta S_v}{1 \text{ Ян}} \right). \quad (5)$$

Параметр замедления принят $q_0=1/2$.

Принимая далее, что во всех наблюдаемых источниках в процессе быстрой переменности сохраняется условие $T_v (\text{СИ}) \leq 10^{12} \text{ К}$, можно получить ограничения снизу на величину Доплер-фактора δ . В табл. 7 мы приводим оценки δ

ТАБЛИЦА 7

Лоренц-факторы быстропеременных источников

| Объект | z | Δt_{min} , дни | ΔS_v , Ян | δ_{min} | Γ_{min} |
|----------|--------------|-------------------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0235+164 | 0.852 | 2 | 0.2 | 49 | 25 |
| 0300+470 | $\geq 0.2^*$ | 2 | 0.3 | 31.5 | 16 |
| 0754+100 | $\geq 0.2^*$ | 2 | 0.2 | 27 | 14 |
| 0851+202 | 0.306 | 2 | 0.3 | 40 | 20 |
| 1034-293 | $\geq 0.2^*$ | 4 | 0.2 | 17 | 9 |

* Оценки опираются на гипотезу о том, что эти РОКОСы, близкие по всем свойствам к лацертидам, связаны, так же как и лацертиды, с гигантскими эллиптическими галактиками [29].

для переменных источников, посчитанные по формуле (5), исходя из оценок параметров радиопеременности и красных смещений. В табл. 7 приводятся также минимальные оценки Лоренц-фактора $\Gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$, с которым движется быстропеременный синхротронный источник ($\Gamma > \delta/2$, см. Приложение).

Совокупность наблюдательных фактов по активным внегалактическим объектам и их статистический анализ [32—34] приводят к пониманию того факта, что релятивистские выбросы являются нормальным атрибутом большинства радиогалактик и радиокварзаров, а из статистического анализа [32, 33] и данных РСДБ-наблюдений [14, 35] следует, что типичное значение Лоренц-фактора стационарного джета в этих классах объектов $\langle \Gamma \rangle = 5$. Лацертиды (и большинство РОКОСов) в такой картине являются объектами, у которых выбросы развернуты достаточно близко к направлению на наблюдателя. Значения Γ стационарных джетов должны быть для них также в среднем около 5 [32]. Отметим, однако, что максимальные значения Γ , оцениваемые из наблюдений сверхсветовых скоростей в компактных внегалактических радиоисточниках, достигают значений (для постоянной Хаббла $H_0=75$) около 15 (см. обзоры [14, 35]).

Наши оценки минимальных значений Γ для быстропеременных компонент РОКОСов и лацертид дают величины, в несколько раз превышающие $\Gamma=5$. Этот результат приводит к представлению о формировании в джете каких-то ускоренных короткоживущих структур, связанных с общей активностью объекта.

Полученные здесь результаты позволяют ограничить классы моделей, предложенных для объяснения быстрой радиопеременности. В частности, не проходит модель Маршера [36], основанная на тепловой неустойчивости элементов джета под влиянием синхротронного охлаждения. В этой модели образующиеся неоднородности, повышающие общий поток излучения, должны двигаться со скоростью общего потока $v=v$ (джет) и $\Gamma=\Gamma$ (джет). То есть в такой схеме следует ожидать по радиопеременности $\langle\Gamma\rangle \approx 5$. Однако согласно табл. 7 у достоверно быстропеременных РОКОСов и лацертид $\langle\Gamma_{\min}\rangle \approx 17$.

К значительному ускорению относительно стационарного потока приводит генерация ударных волн в джете [11]. В этом случае уплотнения за фронтом ударной волны могли бы явиться теми быстрыми и короткоживущими синхротронными источниками (см., например, [37]), которые спорадически проявляются в радиоизлучении лацертид, сильнополяризованных квазаров и РОКОСов в виде компонент с характерным временем вариаций радиопотока порядка нескольких дней.

7. Выводы. В описанной наблюдательной программе мы проверяли гипотезу о том, что РОКОСы с плоскими радиоспектрами, так же как и наиболее активные лацертиды, показывают спорадическую быструю радиопеременность в сантиметровом диапазоне на временных масштабах от 1 до 10 дней. В согласии с изложенными выше результатами наблюдений и анализом представленных данных можно сделать следующие выводы.

1. У всех 13 исследованных объектов переменность была больше, чем у объектов из контрольной группы. Для 5 объектов (из которых три РОКОСы) переменность отвечала доверительной вероятности 0.999, что подтверждает вывод предыдущей работы [16] о высокой доле быстропеременных радиоисточников в исследованной группе РОКОСов. Индексы быстрой переменности достоверно переменных источников были в диапазоне 0.03—0.08, а относительные вариации потока на временах в дни достигали значений 0.1—0.2.

2. Не обнаруживаются различия в амплитудах, характерных временах и формах «вспышек» для быстропеременных РОКОСов и лацертид.

3. Средние за период наших наблюдений плотности потоков достоверно переменных источников не противоречат гипотезе о повышении мощности быстропеременной компоненты на фазах повышенного потока медленнопеременной компоненты.

4. Для двух быстропеременных на сантиметровых волнах в этом цикле наблюдений объектов (OI 090.4 и OJ 287) не обнаружено значимых корреляций с вариациями оптического потока по результатам синхронных оптических наблюдений.

5. Высокие Γ -факторы (9—25) быстропеременных компонентов (вспышек) свидетельствуют против модели тепловой синхротронной неустойчивости и, по-видимому, в пользу моделей с ударными волнами, распространяющимися в джете вниз по течению [37].

Для дальнейшего исследования быстропеременных РОКОСов необходимо, с одной стороны, попытаться определить их красные смещения, а с другой — изучить динамику их переменности в широком диапазоне длин волн и характерных времен. Это позволит подойти к пониманию процессов выделения и трансформации энергии в центральных машинах активных ядер.

Авторы признательны всем коллегам, оказавшим помощь на разных этапах этой работы. Особо хотелось бы поблагодарить В. В. Витковского и С. А. Трушкина за сотрудничество в работе по редукции данных. Многочисленные обсуждения с Г. М. Бескиным были весьма полезны для улучшения работы. Поддержка программы на РАТАНе Ю. Н. Парийским позволила провести наблюдения с минимальными потерями. Особенно мы благодарны В. Ф. Шварцману и Л. А. Пустильнику за многочисленные обсуждения и советы и критическое прочтение первых вариантов рукописи.

ПРИЛОЖЕНИЕ

1. Оценка T_v в системе источника через наблюдаемые величины. Введем видимый угловой диаметр источника, определяемый по времени переменности $\theta_v = 2ctv/D$, где D — расстояние до объекта. Тогда телесный угол переменного источника $\Omega_v = \pi (ctv)^2/D^2$ и видимая яркостная температура.

$$T_{\nu}(\text{видим.}) = \frac{c^2}{2k^2} \left(\frac{\Delta S_{\nu}}{\nu^2 \Omega_{\nu}} \right) = \frac{2c^2}{\pi k \nu^2} \cdot \frac{\Delta S_{\nu}}{\theta_{\nu}^2}.$$

При переходе в систему, движущуюся вместе с источником (сопутствующая система), в случае плоского спектра излучения $S_{\nu} \propto \nu^{\alpha}$ с $\alpha=0$, $T_{\nu}(\text{источ.})=T_{\nu}(\text{видим.})(1+z)^3$ (например, Зельдович, Новиков [40]), поскольку частота ν и время переменности $t_{\text{вар}}$ в знаменателе выражения для T_{ν} преобразуются противоположным образом.

Движение с «пекулярной» скоростью βc в сторону наблюдателя (с Доплер-фактором δ) приводит к обратному эффекту для $T_{\nu}(\text{видим.})$, так что при учете релятивистского движения на фоне космологического разбегания

$$T_{\nu}(\text{источ.}) = T_{\nu}(\text{видим.}) [(1+z)/\delta]^3.$$

D в выражении для θ_{ν} есть D (угл.). Тогда для параметра замедления $q_0=1/2$ и уравнения состояния $P = \epsilon/3$ (Зельдович, Новиков [40]) имеем: $D(\text{угл.}, q_0=1/2) = \frac{c}{H_0} \cdot \frac{z}{(1+z)^2}$, откуда

$$T_{\nu}(\text{источ.}) = \left(\frac{c}{H_0} \right)^2 \cdot \frac{z^2}{1+z} \cdot \frac{\Delta S_{\nu}}{2\pi k \nu^2 t_{\text{вар}}^2} \delta^{-3},$$

или, вводя нормировочные множители:

$$T_{\nu}(\text{источ.}) = 10^{19} \text{ К} \cdot \frac{z^2}{1+z} \cdot \delta^{-3} \left(\frac{75}{H_0} \cdot \frac{4 \text{ ГГц}}{\nu_{\text{набл}}} \cdot \frac{1 \text{ день}}{t_{\text{вар}}} \right)^2 \cdot \frac{\Delta S_{\nu}}{1 \text{ Ян}}.$$

2. Оценка минимальной величины Лоренц-фактора. Из формулы для Доплер-фактора $\delta = \sqrt{1-\beta^2}/(1-\beta \cos \theta)$ можно получить, что максимальное значение $\delta = \delta_{\text{max}}(\Gamma, \theta) = \delta(\Gamma, \theta=0) = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} = \Gamma(1+\beta)$. Откуда следует, что минимальное значение Γ , допустимое для данного δ , есть $\Gamma_{\text{min}} = \delta/(1+\beta) > \delta/2$.

Литература

1. Пустильник С. А. Радиообъекты с континуальными оптическими спектрами. Введение в проблему, компилятивный список и сводка наблюдательных данных // Сообщ. САО. 1982. 34. С. 13—78.
2. Шварцман В. Ф. Ореолы вокруг черных дыр // Астрон. журн. 1971. 48. С. 479.
3. Исследование радиообъектов с континуальными оптическими спектрами. Результаты четырехцветных электрофотометрических наблюдений / Г. М. Бескин, В. М. Лютый, С. И. Неизвестный и др. // Астрон. журн. 1985. 62. С. 432—449.
4. Moore R. L., Stockman H. S. A comparison of properties of highly polarized QSOs versus low polarization QSOs // Astrophys. J. 1984. 279. P. 465—484.
5. B L L a c e r t a e (VRO 42.22.01): simultaneous radio and optical observations / B. H. Andrew, G. A. Harvey, W. J. Medd et al. // Astrophys. J. 1974. 191. P. 51—54.
6. Andrew B. H., Harvey G. A., Medd W. J. OJ 287: an exceptionally active variable source // Astrophys. Letters. 1971. 9. P. 151—154.
7. Simultaneous radio and optical observations of OJ 287 / S. Kikuchi, H. Tabara, Y. Mikami et al. // Publ. Astron. Soc. Japan. 1973. 25. P. 555—561.
8. Rapid radio variations in the flux density of BL Lacertae / K. J. Johnston, B. J. Geldzahler, J. H. Spencer et al. // Astrophys. J. 1984. 277. P. L31—L34.
9. Coordinated observations of OJ 287 at radio and optical wavelengths / T. D. Kinman, J. F. C. Wardle, E. K. Conklin et al. // Astron. J. 1974. 79. P. 349—357.
10. Comprehensive observations of the rapidly varying radio source VRO 42.22.01 (BL Lac) / J. M. MacLeod, B. H. Andrew, M. J. Medd et al. // Astrophys. Letters. 1971. 9. P. 19—26.
11. Blandford R. D., Konigl A. Relativistic jets as compact radio sources // Astrophys. J. 1979. 232. P. 34.
12. Begelman M. C., Blandford R. D., Rees M. J. Theory of extragalactic radio sources // Rev. of Modern Phys. 1984. 56. P. 255—351.
13. Perley R. A. The positions, structures, and polarizations of 404 compact radio sources // Astron. J. 1982. 87. P. 859—880.
14. Marscher A. P., Scott J. S. Superluminal motions in compact radio sources // Publ. Astron. Soc. Pacific. 1980. 92. P. 127—133.
15. Blandford R. D., Rees M. J. Some comments on radiation mechanisms in lacer-tids // Pittsburgh Conf. on BL Lacertae objects. Univ. of Pittsburgh Press, 1978. P. 328—347.
16. Пустильник С. А. Обнаружение быстрой радиоперемежности у радиообъектов с континуальными оптическими спектрами // Сообщ. САО. 1982. 33. С. 28—84.
17. Пустильник С. А., Лютый В. М., Неизвестный С. И. Быстрая коррелированная переменность объекта OI 090.4 (PKS 0754+100) в оптическом и радиодиапазонах // Письма в Астрон. журн. 1981. 7. С. 547—553.

18. Радиотелескоп РАТАН-600 / С. Э. Хайкин, Н. Л. Кайдановский, Ю. Н. Парийский и др. // Изв. ГАО. 1972. № 188. С. 3—12.
19. Горшков А. Г., Хромов О. И. Обнаружение дискретных источников радиоизлучения на фоне аппаратурных шумов // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1981. 14. С. 15—23.
20. Определение плотностей потоков радионисточников на комплексе широкополосных радиометров сплошного спектра радиотелескопа РАТАН-600 / К. Д. Алиакберов, М. Г. Мингалиев, М. Н. Наугольная и др. // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1985. 19. С. 60—65.
21. A catalogue of extragalactic radio sources having flux densities greater than 1 Jy at 5 GHz / H. Kuhr, A. Witzel, I. I. K. Paulini-Toth, U. Nauber // Astron. Astrophys. 1981. 45. P. 367—430.
22. The absolute spectrum of Cas A. An accurate flux density scale and a set of secondary calibrators / J. W. M. Baars, R. Genzel, I. I. K. Paulini-Toth, A. Witzel // Astron. Astrophys. 1977. 61. P. 99—106.
23. Тюрин Ю. Н. Непараметрические методы статистики. М.: Знание, 1978. 64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Сер. Математика, кибернетика).
24. Исследование радиообъектов с непрерывными оптическими спектрами. II: Суточные вариации блеска и спектра по данным четырехцветной фотометрии / С. А. Пустильник, Л. А. Пустильник, С. И. Неизвестный и др. // Сообщ. САО. 1985. 48. С. 27—60.
25. Хальд А. Математическая статистика с техническими приложениями. М.: Иностранная литература, 1956. 664 с.
26. Heeschen D. S. Flickering of extragalactic radio sources // Astron. J. 1984. 89. P. 1114—1123.
27. Simonetti J. H., Cordes J. M., Heeschen D. S. Flicker of extragalactic radio sources at two frequencies // Astrophys. J. 1985. 298. P. 114—127.
28. Miller J. S., French H. B., Hawley S. A. Optical spectra of BL Lacertae objects // Pittsburgh Conf. on BL Lacertae objects. Univ. of Pittsburgh Press, 1978. P. 176—191.
29. Miller J. S. The galaxy components of BL Lacertae objects, N systems, and quasi-stellar objects // Publ. Astron. Soc. Pacific. 1981. 93. P. 681—694.
30. An atlas of QSO spectra / B. J. Wilkes, A. E. Wright, D. L. Jauncey, B. A. Peterson // Proc. Astron. Soc. Australia. 1983. 5.
31. Kellermann K. I., Paulini-Toth I. I. K. The spectra of opaque radio sources // Astrophys. J. 1969. 155. P. L71—L78.
32. Browne I. W. A. Is it possible to turn an elliptical radio galaxy into BL Lacertae object? // Mon. Not. R. Astron. Soc. 1983. 204. P. 23—37.
33. Orr M. J. L., Browne I. W. A. Relativistic beaming and quasar statistics // Mon. Not. R. Astron. Soc. 1982. 200. P. 1067—1080.
34. Wardle J. F. C., Moore R. L., Angel J. R. P. The radio morphology of blazars and relationships to optical polarization and to normal radio galaxies // Astrophys. J. 1984. 279. P. 93—111.
35. Porcas R. W. Radio observations of active galactic nuclei // Proc. of Conf. «Active galactic nuclei» / Ed. J. Dyson. Manchester: Manchester Univ. Press, 1984.
36. Marscher A. P. Spontaneous formation of knots in relativistic flows: a model for variability of compact synchrotron sources // Astrophys. J. 1980. 239. P. 296—304.
37. Marscher A. P., Gear W. K. Models for high-frequency radio outbursts in extragalactic sources with application to the early 1983 millimeter to infrared flare of 3C273 // Astrophys. J. 1985. 298. P. 114—127.
38. Kellermann K. I., Paulini-Toth I. I. K. Compact radio sources // Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1981. 19. P. 373—410.
39. Coleman G. D., Wu C. C., Weedman D. W. Colors and magnitudes for high redshift galaxies // Astrophys. J. Suppl. Ser. 1980. 43. P. 395—415.
40. Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Строение и эволюция Вселенной. М.: Наука, 1975. 736 с.
41. Лютый В. М. Оптическая переменность ядер сейфертовских галактик. II. UVV- и H_{α} -фотометрия // Астрон. журн. 1977. 54. С. 1153—1167.

Поступила в редакцию
12 марта 1986 г.