

# **Определение характера спектральных и временных изменений потоков радиоизлучения активных ядер галактик и квазаров на различных фазах их активности**

М. И. Рябов, А. Л. Сухарев

*Одесская обсерватория “Уран-4” Радиоастрономического института НАН Украины,  
ул. Пушкинская, 37, г. Одесса, 65125, Украина  
E-mail: ryabov-uran@ukr.net*

Данные почти 40-летнего мониторинга, проведенного на 26-метровом радиотелескопе Мичиганского университета на частотах 14.5 ГГц (1974-1999 гг.), 8 ГГц (1966-1999 гг.) и 4.8 ГГц (1978-1999 гг.), были использованы для обработки методики исследования спектральных и временных особенностей изменений потока внегалактических радиоисточников 3C273, 3C279 и 3C454.3. Применена методика обработки, позволяющая последовательно выявлять периоды переменности потоков от самых продолжительных до самых коротких. Основными периодами долговременной переменности потоков у источника 3C273 были 7÷8 и 11 лет, у источника 3C279 – 3÷6 и 12 лет, у 3C454.3 – 6 и 12 лет. В то же время найдено большое число периодов на всех частотах в интервале от 3 до 0.6 года. Рассматривались отдельные периоды активности каждого источника, которые одновременно наблюдались на трех частотах. В каждом периоде активности выделялись фазы роста потока, фазы максимума и минимума и промежуточные экстремумы. Показано, что в каждом периоде активности временной сдвиг изменений потока между соседними различными парами частот отличался на различных фазах активности. При этом он менялся для источника 3C273 от 0.1 до 2.5 года, для 3C279 от 0 до 0.7 года, для 3C454.3 от 0 до 0.5 года.

## **Введение**

Радиоисточники 3C273, 3C279 и 3C454.3 относятся к числу ярких и быстропеременных объектов, называемых блазарами, и исследуются во всех диапазонах электромагнитного спектра. Длительный мониторинг их потоков на сантиметровых и миллиметровых волнах проводится на радиотелескопах РТ-26 Радиоастрономической обсерватории Мичиганского университета (UMRAO) в США (4.8, 8 и 14.5 ГГц), РТ-22 НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория” (22 и 36.8 ГГц) и РТ-14 обсерватории Хельсинского университета [1]. При обработке данных наблюдений на этих радиотелескопах различными коллективами авторов использовались самые современные методы анализа временных рядов, которые применялись ко всему периоду наблюдений радиоисточников [2].

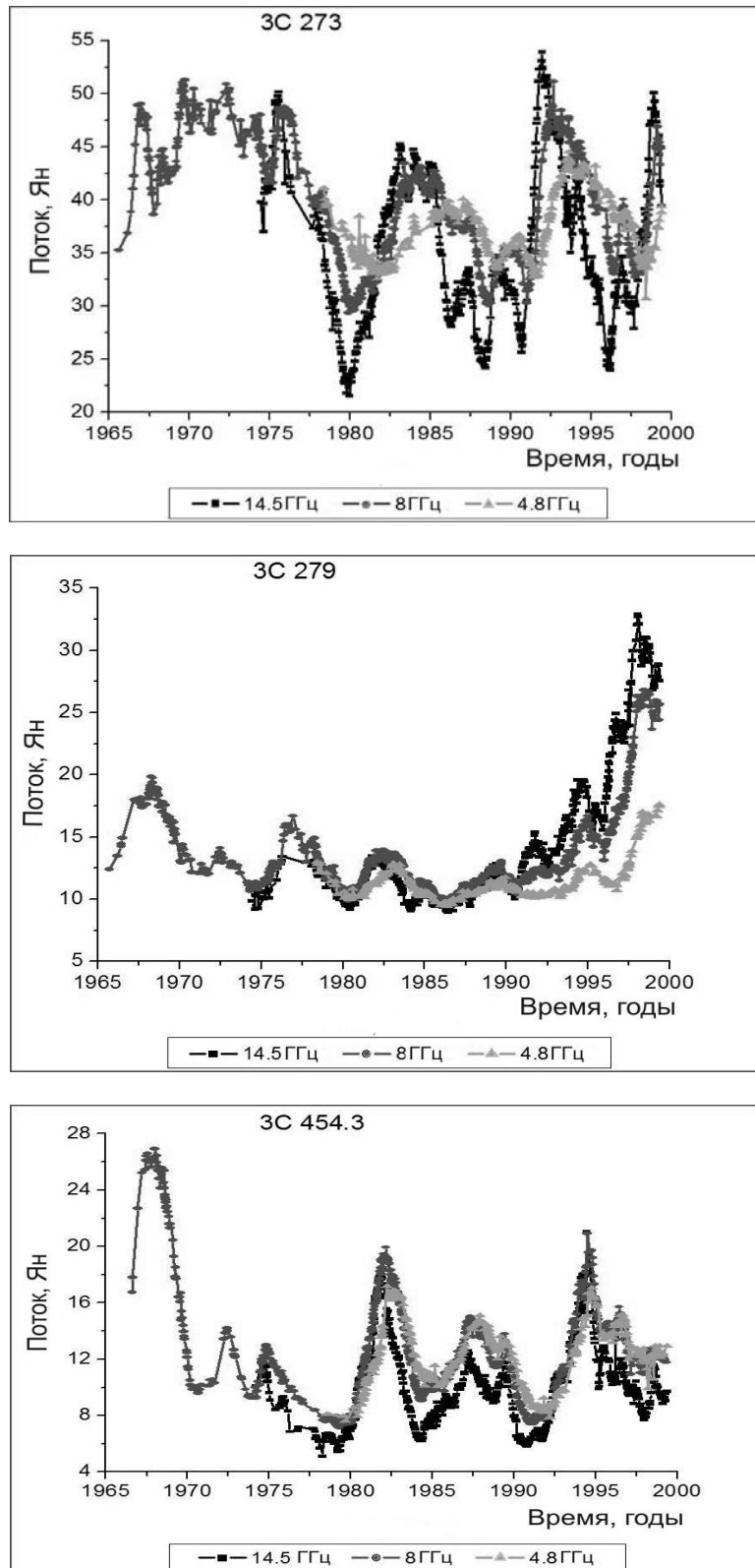
В данной работе исследовался характер временных изменений потока радиоисточников по данным мониторинга на РТ-26 Мичиганского университета. В нашем распоряжении были данные наблюдений радиоисточников 3C273, 3C279 и 3C454.3 на частоте 8 ГГц с 1965 по 1999 гг., на частоте 14.5 ГГц с 1974 по 1999 гг. и на частоте 4.8 ГГц с 1978 по 1999 гг.

При обработке данных наблюдений применялись стандартные методы анализа временных рядов с применением различных методов фильтрации данных в предположении, что наблюдаемые изменения потока представляют собой суперпозицию различных процессов и периодов активности.

## **Методика обработки данных**

Данные наблюдений источников представлены в виде средних значений за периоды в 7 суток на указанном выше временном интервале с неравномерной сеткой отсчетов (рис. 1). Количество “пропусков данных” было невелико, и это позволило применить обычные методы интерполяции тригонометрическими полиномами. По гистограмме распределения

временных интервалов между отсчетами был выбран наиболее оптимальный временной интервал в 0.04 года (14.6 дня).



**Рис. 1.** Изменения потока радиосточников 3C273, 3C279 и 3C454.3 по наблюдениям на RT-26 UMRAO на частотах 14.5, 8 и 4.8 ГГц

Следующим шагом стало выявление трендов в данных и проведение процедуры сглаживания с целью определения многолетних изменений потока источников. Тренд присутствовал в данных наблюдений источника 3C279 на всех частотах. Процедура сглаживания с применением метода скользящего среднего по 5-ти интервалам эффективно отфильтровывала короткопериодические флуктуации.

Для выявления короткопериодических изменений потоков была применена “О–С” процедура путем вычитания данных исходного интерполированного ряда из ряда сглаженных данных.

Подготовленные таким образом данные создали основу для применения стандартного метода анализа временных рядов, реализуемого в программе StatSoft Statistica 7.0. Далее приводятся результаты проведенной обработки.

### Результаты обработки наблюдений

Проведенный спектральный фурье-анализ показал наличие в исследуемых радиоисточниках нескольких периодических составляющих. В результате по каждой из трех частот для каждого радиоисточника были получены периодограммы, по которым определены периоды изменения потоков радиоизлучения от радиоисточников 3C273, 3C279 и 3C454.3 с применением указанной выше методики обработки.

### Радиоисточник 3C273

Перечень периодов вариаций потока радиоисточника 3C273 приведен в таблице 1.

**Таблица 1.** Результаты обработки данных переменности потока радиоисточника 3C273

Частота, ГГц	Временной интервал, годы	Периоды по исходным данным, годы	Периоды по сглаженным данным, годы	Периоды по О-С данным, годы
14.5	1974 – 1999	8.23; 2.51	7.97	2.39; 1.25; 1.13; 0.99; 0.74
8	1965 – 1999	11.02; 8.04; 2.48	10.77; 5.38	2.30; 1.79; 1.24; 1.15; 0.97
4.8	1978 – 1999	7.01; 2.53	9.96; 3.32	3.32; 2.21; 1.24; 0.79; 0.58

Временной интервал используемых нами данных исследований этого источника на частоте 14.5 ГГц составил 25 лет, на частоте 8 ГГц – 34 года и на частоте 4.8 ГГц – 21 год.

Долговременные периоды изменений потока продолжительностью около 10÷11 и 8 лет присутствуют на всех частотах. Менее продолжительные периоды около 3 и 5 лет также существуют на различных частотах. Результаты расчетов периодов по О–С данным обнаруживают серии из 5-ти различных периодов переменности на различных частотах получились в интервале от 0.6 до 3 лет. Причем такие периоды как 2.2÷2.4 и 1.24÷1.25 года повторяются на всех частотах. Полученные нами результаты в целом согласуются с ранее опубликованными работами.

Так, в работе [3] был применен метод гармонического анализа к наблюдениям радиоисточника 3C273 на частотах 4.8, 8, 14.8, 22 и 36.8 ГГц. При этом был определен средний период в 7.9 года на временном интервале с 1965 по 2005 гг. Средняя величина самого короткого периода для этого источника определена в 2 года.

В работе [4] найден период переменности в 16 лет, который объясняется прецессионными изменениями в системе. Таким образом, из литературных источников следует, что существует ряд кратных периодов в 2, 8 и 16 лет. В тоже время по данным наших расчетов, если долгопериодические изменения практически совпадают, количество менее продолжительных периодов оказывается заметно большим.

### Радиоисточник 3C279

При анализе данных о переменности этого источника использовались материалы исследований на частотах 14.5, 8 и 4.8 ГГц в такие же периоды, как и для источника 3C273. Изменение потока источника на исследуемом временном интервале показывает наличие тренда с существенным ростом потока к 2000 г. Учет этого тренда, проведение процедуры сглаживания и определение разностного “О–С” ряда позволило выявить широкий спектр периодов. Результаты исследований представлены в таблице 2. Здесь самый продолжительный период переменности на исследуемом нами временном интервале составил порядка 16 лет на частоте 8 ГГц. Второй по продолжительности период в 12 лет проявляется на частоте 4.8 ГГц. На частоте 14.5 ГГц самый продолжительный период составил около 8 лет. 5-ти и 3÷4-летние периоды присутствуют на всех исследуемых частотах. В интервале периодов от 3 до 0.6 лет обнаружено 8 периодов на частоте 14.5 ГГц, 7 периодов на частоте 8 ГГц и 4 периода на частоте 4.8 ГГц. Многие из периодов на различных частотах достаточно близки друг к другу.

**Таблица 2.** Результаты обработки данных переменности потока радиоисточника 3C279

Частота, ГГц	Временной интервал, годы	Периоды по исходным данным, годы	Периоды (с учетом тренда), годы	Периоды по сглаж. данным, годы	Периоды по О–С данным, годы
14.5	1974 – 1999	5.29; 3.02	8.29; 4.97; 3.11	7.97; 3.98; 2.99	2.99; 2.17; 1.70; 1.32; 1.08; 0.85; 0.74; 0.62
8	1965 – 1999	5.05; 4.22	16.64; 4.16	16.16; 5.38; 4.04	5.38; 3.23; 1.61; 1.34; 1.01; 0.73; 0.71; 0.63
4.8	1978 – 1999	12.05; 6.08	5.22	4.98	3.98; 2.84 1.66; 0.79; 0.66

В работе [3] для радиоисточника 3C279 определены самый продолжительный квазипериод переменности в 30 лет, и самый короткий – в 1 год. Таким образом, проведенный нами анализ показывает разнообразную картину масштабов переменности потока данного радиоисточника.

### Радиоисточник 3C454.3

Мониторинг потока этого радиоисточника проводится в обсерватории UMRAO на частоте 8 ГГц с 1965 г., на частоте 14.5 ГГц с 1974 г., а на частоте 4.8 ГГц с 1978 г. Обработка данных наблюдений радиоисточника 3C454.3 также позволила выявить широкий спектр периодов переменности потока на исследуемых частотах. Результаты расчетов представлены в таблице 3.

**Таблица 3.** Результаты обработки данных переменности потока радиоисточника 3C454.3

Частота, ГГц	Временной интервал, годы	Периоды по исходным данным, годы	Периоды по сглаженным данным, годы	Периоды по О–С данным, годы
14.5	1974 – 1999	12.58; 6.18	12.12; 6.06	6.06; 4.04; 2.42; 1.86; 1.51; 1.27; 1.05; 0.93
8	1966 – 1999	16.04; 6.47	16.08; 6.43	5.36; 2.47; 2.14; 1.53; 1.39; 1.07; 0.91
4.8	1978 – 1999	12.04; 6.68	6.53	6.53; 2.45; 1.40; 1.03; 0.70; 0.54

Самый длительный период переменности, как и в случае радиоисточника 3C279, определен на частоте 8 ГГц продолжительностью в 16 лет. Период продолжительностью 12 и около 6 лет обнаруживается на всех частотах. По “О–С” данным в интервале периодов от 0.5 до 4 лет на частоте 14.5 ГГц найдено 7 периодов, на частоте 8 ГГц – 6 периодов и на частоте 4.8 ГГц – 5 периодов.

Обработка данных этих наблюдений с привлечением данных мониторинга потока этого источника, проводимого на РТ-22 КраО с 1980 г. на частотах 22.2 и 36.8 ГГц, представлена в работе [5]. По результатам применения гармонического анализа обнаружены периоды 12, 6.3 и 3.8 года на частоте 4.8 ГГц. На частоте 8 ГГц выявлены периоды 14.2, 6.7, 4.5, 3.4 года. Данные обработки на частоте 14.5 ГГц показали наличие периодов в 13.9, 6.6 и 4.2 года. На частоте 36.8 ГГц обнаружено наличие переменности с периодом 1.5 года. С учетом данных на частотах 22.2 и 36.8 ГГц получены средние периоды 13.5, 6.5, 4.33, 3.6, 1.55 года на всех частотах. Таким образом, несмотря на различие в коротко- и долгопериодических величинах периодов на различных частотах средние их значения совпадают с результатами проведенного нами анализа. Составляющие переменности потока этого источника интерпретированы в работе [5] в рамках модели орбитальных и прецессионных периодических изменений в системе двойных черных дыр.

### Исследование отдельных периодов активности

На рис. 1 видно, что в данных изменений потока обнаруживается наличие отдельных периодов активности, заметно различающихся по характеру изменения потока на различных частотах. Для каждого такого периода нами были найдены основные точки, определяющие изменения потока на различных частотах: начало фазы роста (ФР), фаза максимума (Max), фаза спада (ФС) и фаза минимума (Min). Взаимные положения этих точек на различных частотах отличаются в различных циклах активности.

На основе этого подхода сглаженные временные ряды были разделены на две части для источников ЗС273 (1980 – 1989, 1990 – 1997, 1987 – 1992 гг.), ЗС279 (1974 – 1980.50, 1981 – 1984, 1990.50 – 1999 гг.) и на три части для ЗС454.3 (1979 – 1984, 1984 – 1991, 1992 – 1999 гг.). По каждой из этих частей был произведен расчет временных сдвигов-лагов между соседними парами частот  $14.5 \div 8$  ГГц и  $8 \div 4.8$  ГГц. Для различных временных сдвигов определялась величина коэффициента корреляции зависимости изменений потока на двух частотах. Временной сдвиг, соответствующий максимальной величине коэффициента корреляции, обычно в интервале  $0.9 \div 1.0$ , определял величину временного лага (см. табл. 4).

**Таблица 4.** Результаты расчетов временных сдвигов изменений потоков источников между парами частот  $14.5 \div 8$  ГГц и  $8 \div 4.8$  ГГц в различные периоды и различные фазы активности (ФР – фаза роста потока, Max – фаза максимума, Min – фаза минимума потока)

Инт. частот, ГГц	ЗС 273		ЗС 279		ЗС 454.3	
	Период, годы	Временной сдвиг, годы	Период, годы	Временной сдвиг, годы	Период, годы	Временной сдвиг, годы
14.5 ÷ 8	1980 – 1989	ФР – 1.5; Max – 0.1; Min – 0.4	1974 – 1980.50	ФР – 0.1; Max – 0.4; Min – 0.0	1979 – 1984	ФР – 0.2; Max – 0.3; Min – 0.2
	1990 – 1997	ФР – 0.6; Max – 0.6; Min – 0.3	1981 – 1984	ФР – 0.8; Max – 0.3; Min – 0.5	1984 – 1991	ФР – 0.1 Max – 0.0; Min – 0.08; Max – 0.0; Min – 0.3
	1987 – 1992	ФР – 0.2; Max – 0.6; Min – 0.8	1990.50 – 1999	ФР – 0.1; Max – 0.3; Min – 0.7; Max – 0.4	1992 – 1999	ФР – 0.3; Max – 0.0; Min – 0.1
8 ÷ 4.8	1980 – 1989	ФР – 2.5; Max – 0.4; Min – 0.8	1980 – 1986	ФР – 0.6; Max – 0.7; Min – 0.2	1979 – 1984	ФР – 0.3 Max – 0.1; Min – 0.2
	1991 – 1997	ФР – 0.5; Max – 1.0; Min – 0.5	1993 – 1999	ФР – 0.08 Max – 0.1 Min – 0.6 Max – 0.1	1984 – 1991	ФР – 0 Max – 0.5; Min – 0.4
	1987 – 1992	ФР – 0.6; Max – 0.4; Min – 0.6	----	----	1992 – 1999	ФР – 0.4 Max – 0.2; Min – 0.06

Видно, что каждый из исследуемых источников имеет свои характерные периоды переменности, однако в пределах каждого цикла активности реализуются свои короткопериодические вариации и временные сдвиги на различных частотах. Можно отметить также, что флуктуации потоков радиоизлучения имеют более сложный сглаженный характер на низких частотах.

### Обсуждение результатов

Долговременные изменения потоков исследуемых источников показывают наличие близких периодов в  $6\div 8$  и  $11\div 12$  лет. Данные периоды в ряде работ интерпретируются в рамках модели орбитальных и прецессионных периодических изменений в системе “аккреционный диск-джет”. При этом предполагается наличие в ядре активной галактики или квазара системы из двойных черных дыр [4-5].

В то же время проведенный анализ наблюдений радиоисточников 3C273, 3C279 и 3C454.3 свидетельствует, что временные изменения потоков на различных частотах имеют сложный характер. Скорее всего, они не могут рассматриваться как единый процесс активности на всем исследуемом временном интервале, превышающем 20 лет. Реализация подхода, когда рассматриваются отдельные периоды активности источников в пределах  $5\div 12$  лет, позволяет выделить проявления различных процессов активности в источнике (ударные волны, выброс потоков частиц и т. д.) и определить их основные энергетические и временные характеристики. При этом в каждом периоде активности источника обнаруживаются “индивидуальные показатели” периодов изменения потоков и временных сдвигов на различных частотах.

Данная картина переменности может соответствовать модели “ударной волны в джете”, предложенной в работе [6]. Эта модель предполагает, что излучение на разных частотах рождается в джете, электроны ускоряются на фронте ударной волны и теряют энергию, удаляясь от фронта. Электроны самых высоких энергий, которые излучают на коротких длинах волн, выживают только вблизи фронта ударной волны, в то время как фотоны более низких энергий излучают в большей по объему области. В этом случае переменность на высоких частотах будет больше по амплитуде и быстрее по времени, как и наблюдается в большинстве блазаров. Использование результатов данной работы позволит в последующем по величинам спектральных индексов восстановить первоначальное распределение по энергиям излучающих частиц и тем самым определить доминирующие процессы в каждом цикле активности. В их числе могут быть выбросы потоков частиц из центрального источника, распространение ударной волны в джете и “вторичное” усиление излучения ранее выброшенных “плазмоидов” под действием ударной волны.

### Литература

1. Turler M., Paltani S., Courvoisier T. J.-L., Aller M. F., Aller H. D., Blecha A., Bouchet P., Lainela M., VcHardy I. M., Robson E. I., Stevens J. A., Terasranta H., Torikoshi M., Ulrich M.-H., Waltman E. V., Wamsteker W., Wraight M. C. H. 30 years of multi-wavelength observations of 3C273. *Astronomy&Astrophysics. Supplement Series*. 1999, vol. 134, p. 89-101.
2. Ciaramella A., Bongardo C., Aller M. F., Aller H. D., De Zotti G., Lahteenmaki A., Longo G., Milano L., Tagliaferri R., Terasranta H., Torikoshi M., Urpo S. A multifrequency analysis of radio variability of blazars. *Astronomy&Astrophysics*. 2004, vol. 419, p. 485-500.
3. Volvach A. E., Volvach L. N., Larionov M. G., Aller H. D., Aller M. F., Yurovskiy Y. Y., Ryabov M. I. Flux density evolution of the sources 3C273, 3C279 and 3C454.3 at the frequencies 102 MHz-36.8 MHz. *Astronomical and Astrophysical Transactions*. 2006, vol. 25, No. 5-6, p. 385-391.
4. Torres D. F., Romero G. E., X. Barcons, Lu Y. Testing the Binary Black Hole Paradigm through the Fe K $\alpha$  Line Profile: Application to 3C 273. *Astrophysics J*. 2003, vol. 596, L31-L35.
5. Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Ларионов М. Г., Аллер Х. Д., Аллер М. Ф. Мощная вспышка излучения в источнике 3C454.3. *Астрономический журнал*. 2007, т. 84, №6, с.1-11.
6. Маршер А. П., Эрштадт С. Г. Взгляд на активные ядра галактик из прошлого и настоящего. *Астрономия: традиции, настоящее и будущее*. 2007, Санкт-Петербург, с. 116-140.

**Визначення характеру спектральних та часових змін потоків  
радіовипромінювання активних ядер галактик та квазарів на різних фазах  
їх активності**

**М. І. Рябов, А. Л. Сухарев**

Дані майже 40-річного моніторингу, виконаного на 26-метровому радіотелескопі університету Мічигану на частотах 14.5 ГГц (1974-1999 рр.), 8 ГГц (1966-1999 рр.), і 4.8 ГГц (1978-1999 рр.), були використані для опрацювання методики вивчення спектральних та часових особливостей змін потоку позагалактичних радіоджерел 3C273, 3C279 і 3C454.3. Застосовано методику обробки, яка дозволяє послідовно відшукати періоди змінності потоків від найтриваліших до найкоротших. Основними періодами довготривалої змінності потоків у джерела 3C273 були 7÷8 і 11 років, у джерела 3C279 – 3÷6 і 12 років, у 3C454.3 – 6 і 12 років. В той же час знайдено велику кількість періодів на всіх частотах в інтервалі від 3 до 0.6 року. Розглядалися окремі періоди активності для кожного джерела, які одночасно спостерігались на трьох частотах. У кожному періоді активності виділялися фази зростання потоку, фази максимуму і мінімуму і проміжні екстремуми. Показано, що в кожному періоді активності часовий зсув змін потоку між сусідніми різними парами частот відрізнявся на різних фазах активності. При цьому він змінювався для джерела 3C273 від 0.1 до 2.5 року, для 3C279 від 0 до 0.7 року, для 3C454.3 від 0 до 0.5 року.

**Investigation of Spectral and Time Behavior of Radio Emission Fluxes of Active Galaxy  
and Quasar Nuclei at Different Phases of their Activity**

**M. I. Ryabov and A. L. Sukharev**

Data on almost 40-year monitoring programs carried out with the 26-m radio telescope of the University of Michigan Radio Astronomical Observatory on frequencies 14.5 GHz (1974-1999), 8 GHz (1966-1999) and 4.8 GHz (1978-1999) were used for improvement of the detection of spectral and time features of changing fluxes radiation of radio-sources 3C273, 3C279 and 3C454.3. The handling procedure is applied that sequentially permits to tap periods of variability of fluxes from those most durable to the shortest ones. The long-term variability periods of fluxes for 3C273 were 7-8 and 11 years, 3C279 3-6 and 12 years, 3C454.3 6 and 12 years. Yet a lot of periods at all frequencies in an interval from 3 to 0.6 years is found. Separate periods of activity for each source simultaneously observed at three frequencies were investigated. In each activity period the growth-phases of a flux, maximum and minimum phases and intermediate extremums were found. It is shown that in each activity period the time lags of variability fluxes between neighboring pairs of frequencies were different for different activity phases. Thus they varied for 3C273 from 0.1 to 2.5 years, 3C279 from 0 to 0.7 years, 3C454.3 from 0 to 0.5 years.