

РАДИОАСТРОНОМИЯ И АСТРОФИЗИКА

УДК 524.7; 524.8

PACS numbers: 95.75.Wx,
95.85.Bh

М. И. РЯБОВ¹, А. Л. СУХАРЕВ¹, А. И. ДОНСКИХ²

¹ Обсерватория “УРАН-4”, Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Пушкинская, 37, г. Одесса, 65011, Украина
E-mail: magister_phys@yahoo.com; mir-astro@mail.ru

² Астрономическая обсерватория,
Одесский Национальный университет им. И. И. Мечникова,
ул. Маразлиевская, 1в, (парк Т. Г. Шевченко), г. Одесса, 65014, Украина
E-mail: donsikh.ann@yandex.ua

КАТАЛОГ ПЕРИОДОВ ПЕРЕМЕННОСТИ ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИХ РАДИОИСТОЧНИКОВ В САНТИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Предмет и цель работы: *Исследуется переменность плотностей потоков излучения внегалактических радиоисточников (3C 273, 3C 120, 3C 345, 3C 446, 3C 454.3, OJ 287, OT 081, BL Lac, DA 55, CTA 102) по данным многолетнего (1965–2011 гг.) мониторинга на частотах 14.5, 8, 4.8 ГГц, выполненного на 26-метровом телескопе Мичиганского университета (UMRAO). Целью работы является составление каталога значений и свойств квазипериодов изменения плотностей потоков радиоизлучения исследуемых радиоисточников, а также прогнозирование на его основе изменений плотностей потоков после 2011 г. на частоте 14.5 ГГц.*

Методы и методология: *С применением вейвлет-анализа, полосовой фильтрации и анализа сингулярного спектра (“Гусеница”-SSA) получена информация о значениях и свойствах квазипериодов изменения плотностей потоков радиоизлучения отдельно для долговременной и быстрой составляющих переменности. С использованием этих значений впервые выполнено прогнозирование двумя методами: гармоническим методом и методом авторегрессионного линейного предсказания. Результаты: Построен каталог квазипериодических составляющих переменности плотностей потоков радиоизлучения 10 радиоисточников, отражающих динамику их активности. Показано, что переменность внегалактических радиоисточников формируется за счет сложения квазипериодических составляющих на различных временных масштабах. Полученные результаты прогнозов показали хорошее соответствие реальным наблюдениям из базы данных MOJAVE. Авторегрессионный метод предпочтителен для краткосрочного прогнозирования изменения плотностей потоков у радиоисточников со сложным характером переменности.*

Заключение: *Представленные значения и свойства квазипериодов предназначены для построения теоретических моделей быстрой и долговременной переменности внегалактических радиоисточников. Возможность прогнозирования изменений плотностей потоков внегалактических радиоисточников на основе данных об их переменности позволяет осуществлять эффективное планирование программ наблюдений.*

Ключевые слова: *внегалактические радиоисточники, квазипериод, переменность радиоизлучения, вейвлет-анализ, “Гусеница”-SSA, прогноз*

1. Введение

Изучение долговременной переменности потоков излучения внегалактических радиоисточников является эффективным инструментом для понимания их физической структуры и процессов, формирующих эту переменность. В настоящей работе впервые представлен каталог основных свойств переменности внегалактических радиоисточников, построенный с использованием взаи-

модополняющих методов вейвлет-анализа и сингулярного спектра. Представленные значения и распределения во времени квазипериодов могут применяться в теоретических моделях быстрой и долговременной переменности активных ядер галактик. Из обширной базы данных мониторинга потоков излучения радиоисточников Радиоастрономической обсерватории Мичиганского университета (UMRAO) использовались данные, относящиеся к десяти наиболее исследованным внегалактическим объектам, наблюдавшимся более 40 лет с незначительными пропусками в данных.

Радиоисточники 3С 345, 3С 454.3, DA 55, СТА 102 относятся к классу квазаров, 3С 120, 3С 273 – сейфертовские галактики первого типа, 3С 446, BL Lac, OJ 287, OT 081 – объекты типа BL Lac (лацертиды) [1]. Используемый в дальнейшем для краткости термин “период” означает квазипериодические изменения (а не строгие периодичности).

Физические процессы, которые могут обеспечивать наблюдаемую переменность, довольно разнообразны и подробно рассматриваются во многих обзорных работах, например [2]. Широко распространена модель долговременной переменности, основанная на возможной прецессии аккреционного диска и, соответственно, джета, что в свою очередь может быть вызвано наличием второй черной дыры – спутника [3]. Долговременная переменность внегалактических радиоисточников часто объясняется также нестабильностью аккреционного диска и его возможным частичным разрушением [4, 5]. Быстрая переменность радиоизлучения может быть объяснена ударными волнами, распространяющимися в джете [6], вращением внутренних частей джета [7], а также процессом магнитного динамо и пульсациями в аккреционном диске [8, 9]. Множество различных моделей переменности показывает, что единой точки зрения на причины квазипериодической переменности внегалактических радиоисточников пока нет. Поэтому долговременный мониторинг, исследование переменности плотности потоков радиоизлучения, а также поиск квазигармонических составляющих плотностей потоков являются важной частью создания, проверки и уточнения моделей, описывающих физические процессы в активных галактических ядрах. Поиск периодичностей в изменениях плотностей потоков для больших выборок внегалактических радиоисточников, включая и рассматриваемые в этой статье, проводился в ряде работ (например, в работе [10] (J. H. Fan et al., 2006) методом Юркевича исследованы 168 радиоисточников), в том числе с применением вейвлет-анализа (например, в работе [11] (T. Novatta et al., 2008) исследованы 80 радиоисточников). Однако в большинстве работ частотно-временному распределению периодов уделяется незначительное внимание. Сама возможность оценки поведения временного ряда после окончания наблюдений, т. е. экстраполяция, рассматривается в очень малом количестве работ.

Целью нашей работы является не только построение каталога основных периодов переменности и их свойств для 10 внегалактических радиоисточников, но и прогнозирование изменения плотностей потоков радиоизлучения разными методами. Во втором разделе настоящей статьи описываются исходные данные, математические методы их анализа, а также предварительные процедуры подготовки, предшествующие анализу. В разделах 3, 4 и 5 приведены результаты исследований для радиоисточников, сгруппированных с учетом их классификации и свойств переменности. Для сравнения приводится краткий обзор результатов, полученных другими авторами. Раздел 6 посвящен прогнозированию плотностей потоков радиоизлучения. Даны описание применяемых методов, их особенностей и краткий обзор работ других авторов в области прогнозирования плотностей потоков излучения внегалактических радиоисточников. В заключительном разделе 7 делаются выводы по результатам проведенной работы.

2. Методы анализа исходных данных

Исходные данные на частоте 14.5 ГГц получены на 26-метровом радиотелескопе (РТ-26) Мичиганского университета [12] и предоставлены для работы Марго Ф. Аллер (научный сотрудник отделения астрономии Мичиганского университета). Методика получения и обработки данных на РТ-26 описана в работе [13]. Были предоставлены усредненные значения плотности потока радиоизлучения с интервалом времени между отсчетами 7 дней. При подготовке данных к анализу применялись стандартные процедуры сглаживания (метод скользящего среднего), вычитания тренда (полиномы 1–3 степени) и получения равномерных отсчетов по времени (интерполяция полиномом Фурье) с интервалом 0.02 года (по гистограмме распределения временных разностей между точками данных) [14]. Равномерные отсчеты по времени необходимы для применения быстрого вейвлет-преобразования, а также выполнения прогноза. Применение процедур сглаживания и вычитания тренда уменьшает частотное рассеяние на цифровых спектрах и подавление значимых пиков периодом, близким к длине исследуемого ряда. Для выделения короткопериодических составляющих рядов данных, которые

были незаметны на фоне основной медленной переменности, была проведена фурье-фильтрация [15]. Подтверждение того, что выделяемые таким образом короткопериодические колебания не являются шумовыми компонентами, получалось проверкой гипотезы о принадлежности наблюдаемой выборки нормальному закону несколькими методами (модифицированные критерии Колмогорова и Смирнова, критерии Крамера-Мизеса и Андерсона-Дарлингга [14].

Значения параметров исходных данных для групп радиогалактик, квазаров и лацертид показаны в табл. 1, 2 и 3 (здесь F – частота наблюдений; t – интервал наблюдений; N – число точек данных; I_{mean} , I_{min} , I_{max} – среднее, минимальное, максимальное значения плотности потока радиоизлучения; δI – погрешность измерения плотности потока; σ – стандартное отклонение).

Переменность многих внегалактических радиоисточников имеет неоднородную структуру. Периодограммный анализ, в основе которого лежит преобразование Фурье, позволяет выделить в анализируемом временном ряду его гармонические составляющие и оценить их периоды. Однако он не дает информации о том, как именно эти гармонические составляющие изменяются во времени. Частично эта задача решается с помощью применения оконного преобразования Фурье. Однако недостаток этого метода состоит в том, что ширина окна не изменяется в зависимости от локальных особенностей исследуемых данных. Для анализа быстрой переменности ширина окна должна уменьшаться, а для медленной – увеличиваться. Если же применять только “широкое” или “узкое” окно, будет существенная потеря информации о частотном составе исследуемых данных. Приме-

Таблица 1. Параметры временных рядов для сейфертовских галактик 3С 273 и 3С 120

3С 373							
F , ГГц	t , гг.	N	I_{mean} , Ян	I_{min} , Ян	I_{max} , Ян	δI , Ян	σ
14.5	1974.4 – 2011.1	1429	31.28	18.33	53.95	0.36	7.88
8	1965.6 – 2011.1	1738	37.54	24.71	51.95	0.43	5.95
4.8	1978.4 – 2011.0	1025	37.24	32.78	44.56	0.30	2.55
3С 120							
14.5	1974.6 – 2011.0	1096	3.21	1.60	11.77	0.06	1.70
8	1966.7 – 2011.1	1182	4.57	1.84	15.30	0.08	2.48
4.8	1980.3 – 2009.7	629	3.74	2.21	5.55	0.08	0.70

Таблица 2. Параметры временных рядов для квазаров 3С 345, 3С 454.3, DA 55 и СТА 102

3С 345							
F , ГГц	t , гг.	N	I_{mean} , Ян	I_{min} , Ян	I_{max} , Ян	δI , Ян	σ
14.5	1974.4 – 2011.1	1289	8.68	4.50	17.48	0.13	2.71
8	1965.7 – 2011.1	1196	9.50	4.62	16.05	0.12	2.61
4.8	1978.4 – 2011.0	1094	8.51	5.11	13.12	0.10	2.03
3С 454.3							
14.5	1974.2 – 2011.1	1558	10.05	5.11	28.04	0.13	3.86
8	1966.6 – 2011.1	1529	12.30	6.51	26.91	0.14	3.73
4.8	1978.5 – 2011.1	885	11.70	7.61	17.16	0.13	2.06
DA 55							
14.5	1999.1 – 2011.0	519	3.95	1.56	5.73	0.07	0.77
8	1991.1 – 2011.1	354	3.36	1.60	4.90	0.08	0.65
4.8	1999.1 – 2011.0	403	2.64	1.37	4.63	0.06	0.58
СТА 102							
14.5	1999.1 – 2011.1	481	4.18	2.22	7.22	0.07	0.98
8	1999.1 – 2011.0	301	4.50	2.85	7.03	0.07	0.73
4.8	1999.1 – 2011.1	259	4.92	3.83	6.28	0.07	0.44

Таблица 3. Параметры временных рядов для лацертид OJ 287, OT 81, BL Lac и 3C 446

OJ 287							
$F, \Gamma\text{Гц}$	$t, \text{гг.}$	N	$I_{\text{mean}}, \text{Ян}$	$I_{\text{min}}, \text{Ян}$	$I_{\text{max}}, \text{Ян}$	$\delta I, \text{Ян}$	σ
14.5	1974.5–2011.1	1121	3.81	1.25	10.00	0.08	1.72
8	1971.1–2011.1	936	3.47	1.15	7.67	0.07	1.37
4.8	1979.3–2011.0	766	2.44	1.05	4.57	0.07	0.80
OT 81							
14.5	1999.1–2011.1	707	4.10	0.90	8.36	0.06	1.42
8	1999.1–2011.1	364	3.46	1.20	5.93	0.07	0.11
4.8	1999.1–2011.0	409	2.72	0.64	5.31	0.07	0.82
BL Lac							
14.5	1974.2–2011.1	1441	3.56	1.50	15.46	0.06	1.60
8	1968.1–2011.1	1138	4.18	1.67	13.33	0.08	2.01
4.8	1979.3–2011.1	1010	3.41	1.70	10.22	0.06	1.23
3C 446							
14.5	1979.9–2011.1	949	6.33	2.90	10.37	0.08	1.66
8	1979.0–2011.1	752	5.86	3.04	8.95	0.08	1.45
4.8	1980.4–2011.1	603	5.36	3.53	8.20	0.09	1.07

нение вейвлет-анализа позволяет увидеть детальную структуру процесса и эволюцию гармонических компонент сигнала во времени.

Непрерывное вейвлет-преобразование можно получить, если в выражении вейвлета $\psi_{j,k}(x) = 2^{j/2} \psi(2^j x - k)$ разрешить числам j и k принимать непрерывные значения, а их суммы заменить на интегралы. Тогда получим семейство функций

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right), \quad a, b \in R, \quad a \neq 0,$$

зависящее от двух непрерывных параметров a и b . Параметр b определяет сдвиг по оси X , параметр a – это масштабный коэффициент. Непрерывное (интегральное) вейвлет-преобразование функции $f(x)$ определяется формулой

$$W_\psi[f](a,b) = (f, \psi_{a,b}) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \overline{\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)} dx.$$

Применение непрерывного вейвлет-преобразования обусловлено тем, что в сравнении с дискретным преобразованием оно более удобно для анализа временных рядов за счет избыточности, связанной с квазинепрерывным изменением масштабного коэффициента a и параметра сдвига b . Это позволяет определить на вейвлет-спектре

незначительные изменения периодов и амплитуды колебаний. Для поиска периодических компонент сигнала хорошо подходит комплексный вейвлет Морле, представляющий собой синусоидальную волну, модулированную гауссианой. В отличие от других вейвлетов для непрерывного преобразования, например вейвлета Пауля и производных функции Гаусса (DOG), вейвлет Морле имеет хорошее частотное разрешение и определяется следующей формулой:

$$\Psi_M(l, w) = \frac{w}{\sqrt{c_\psi}} \left(e^{2i\pi w t} - e^{-z_0^2/2} \right) e^{-2\pi^2 w^2 t^2 / z_0^2}.$$

Здесь c_ψ – нормализующая константа, w – частота локальных колебаний. Волновое число z_0 задает количество колебаний в волновом пакете. Корректирующий коэффициент $e^{-z_0^2/2}$ очень мал при $z_0 \geq 5$, и им часто пренебрегают. С увеличением z_0 возрастает угловое разрешение базиса, но ухудшается пространственное. Малые значения z_0 приводят к существенному понижению частотного разрешения спектра, при этом временная чувствительность максимальна. Увеличение z_0 приводит к увеличению частотного разрешения [16].

На практике вычисление непрерывного вейвлет-преобразования методом прямого интегрирования может занимать много времени. Поэтому удобно использовать быстрое непрерывное вейвлет-преобразование на основе быстрого преобра-

зования Фурье. Это обеспечивает очень быстрые вычисления (в сравнении с прямой сверткой сигнала с масштабированным вейвлетом) при больших объемах исходных данных, а также выборочное восстановление компонент временных рядов в интересующей части вейвлет-спектра (полосовая фильтрация). Подробное описание этого метода можно найти в работах [17, 18].

Уровни значимости максимумов вейвлет-спектра наносились на график вейвлет-спектра в виде цветовых градиентов (от $10 \div 50\%$ до $99 \div 99.9\%$). Например, уровень 95% показывает, что только в 1 случае из 20 для случайных наборов данных, аналогичных по размеру исходным, максимальный спектральный пик на вейвлет-спектре достигнет этой высоты случайно. Если спектральный пик превышает уровень 99.9% , то есть лишь один шанс из тысячи, что этот пик случайный.

Поскольку при вычислении непрерывного вейвлет-спектра используется быстрое преобразование Фурье, на краях спектра могут появляться искажения. Обычно они проявляются в низкочастотной

области спектра. Это связано с тем, что высокочастотная часть спектра вычисляется на основе малых по длительности участков анализируемого ряда, а низкочастотная часть – на основе больших. Поэтому достоверной является область спектра, вне которой вейвлет-коэффициенты вычисляются по отрезкам, выходящим за границы анализируемого ряда. Чтобы уменьшить этот эффект данные дополняются необходимым количеством нулей до ближайшей степени двойки. Это приводит к уменьшению амплитуды вейвлет-коэффициентов на краях спектра. Для учета области возможных краевых эффектов на вейвлет-спектр добавляются уровни конуса влияния, а значения периодов лучше брать из достоверной области спектра [19].

Вейвлет-спектр одномерного сигнала представляет собой поверхность в трехмерном пространстве, где по оси Z откладывается спектральная плотность мощности или значения коэффициентов вейвлет-преобразования, по оси X – время, а по оси Y – частота (количество циклов в год) или период, что удобнее (см. рис. 1).

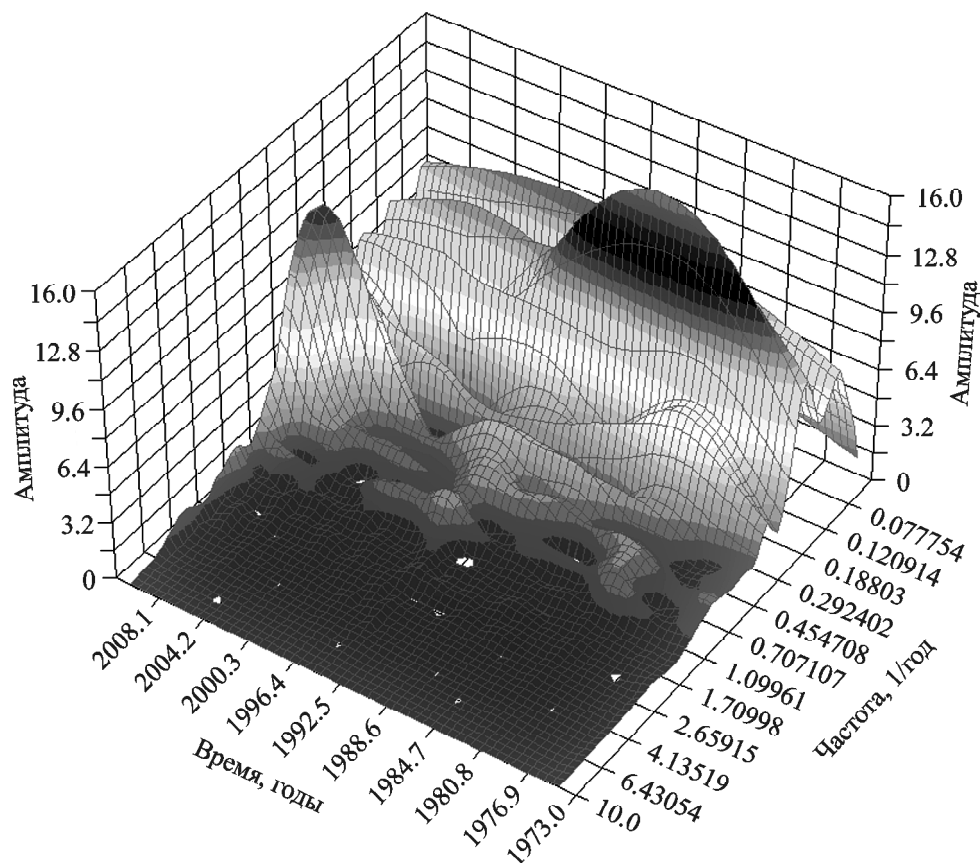


Рис. 1. Пример вейвлет-спектра в трехмерном изображении для источника 3C 454.3 на частоте 14.5 ГГц

Поскольку изображения поверхностей неудобны при изучении структуры сигнала, их заменяют проекциями на плоскость “частота–время” с изолиниями или изоуровнями (где изменение величины, отложенной по оси Z , показано цветом, например в градациях серого цвета), позволяющими проследить изменение интенсивности амплитуд вейвлет-преобразования на разных периодах и во времени. Когда необходимо показать очень широкий диапазон периодов, например от ≈ 0.5 года до ≈ 15 лет, вейвлет-спектр строится в логарифмических координатах. На графике “частота–время” гармонические компоненты сигнала видны в виде ярких пятен, вытягивающихся в полосы вдоль оси времени. Пример показан на рис. 2.

Кроме частотно-временного спектра, вейвлет-преобразование дает возможность строить дополнительно два вида интегральных (двумерных) спектров.

Интегральный спектр с усреднением по времени представляет собой аналог сглаженной периодограммы и позволяет выделить на спектре области с наибольшей спектральной мощностью.

Интегральный спектр с усреднением по частоте показывает распределение спектральной

плотности мощности по времени. Показывает моменты наилучшего сопоставления анализирующего вейвлета и сигнала на разных периодах на одном интервале времени. Подробное описание приведено в работе [20]. Пример интегрального спектра с усреднением по частоте для источника 3С 273 на частоте 14.5 ГГц показан на рис. 3.

Значения периодов изменений плотностей потоков излучения исследуемых радиоисточников, полученные на основе применения вейвлет-анализа, уточнялись с использованием анализа сингулярного спектра. В работе для этих целей был применен программный пакет “Гусеница”-SSA (Singular Spectrum Analysis). Подробное описание метода дано в работе [21]. Процедура анализа сингулярного спектра раскладывает исходный сигнал по частотным полосам (узкополосная фильтрация). Они содержат медленно меняющийся компонент (тренд), периодические составляющие и шум. Особенность анализа сингулярного спектра заключается в том, что в расчетах он не использует анализирующую функцию, поэтому этот метод позволяет с большой точностью выделять различные компоненты переменности исследуемого временного ряда.

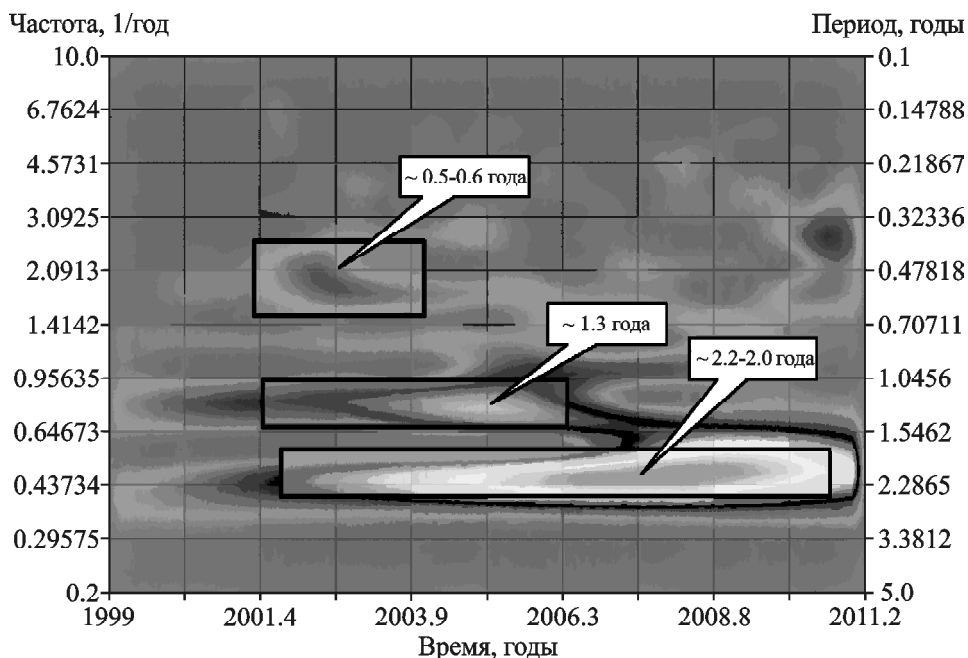


Рис. 2. Пример вейвлет-спектра для источника DA 55 на частоте 4.8 ГГц, O – C (компонент кратковременной переменности). Флажками указаны периоды, соответствующие выделенным участкам спектра

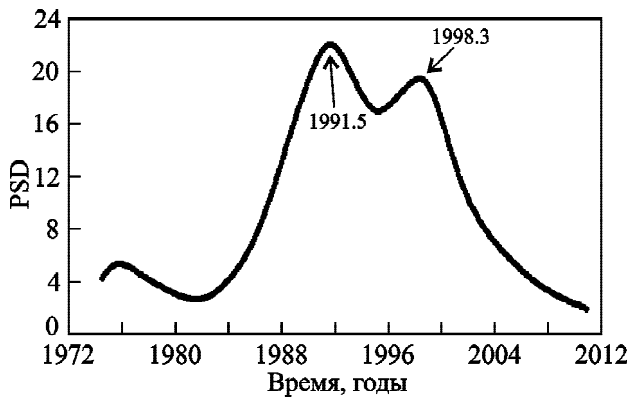


Рис. 3. Интегральный спектр с усреднением по частоте для источника 3C 273 на частоте 14.5 ГГц, O – C (компонент кратковременной переменности). Времена максимумов спектральной плотности мощности – 1991.5 и 1998.3. На вейвлет-спектре эти максимумы соответствуют наложению спектральных полос с различными периодами

Анализ сингулярного спектра основан на преобразовании одномерного временного ряда в многомерный с помощью однопараметрической сдвиговой процедуры, после чего применяется метод главных компонент.

Для того чтобы анализировать временной ряд $F_N = (f_0, \dots, f_{N-1})$ длиной N , используется целый параметр L (длина окна), который выбирается произвольно, но при этом он не должен превышать половину длины ряда [22]. Большие значения L улучшают разрешение метода. Затем

составляется траекторная матрица ряда размерности $L \times K$ (где число векторов вложения $K = N - L + 1$):

$$X = [X_1, \dots, X_K].$$

Далее происходит сингулярное разложение матрицы X , в результате получаем

$$X = X_1 + X_2 + \dots + X_d, \quad X_i = \sqrt{\lambda_i} U_i V_i^T,$$

где $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \lambda_d > 0$ собственные числа матрицы XX^T , λ_i – собственное число, U_i – собственный вектор, V_i^T – факторный вектор. Набор $\sqrt{\lambda_i} U_i V_i^T$ называют i -й собственной тройкой (eigen triple) [23].

Затем проводится группировка компонент разложения, множество $\{1, \dots, d\}$ разбивается на m непересекающихся подмножеств I_j :

$$X = X_{I_1} + X_{I_2} + \dots + X_{I_m}, \quad X_{I_j} = \sum_{k \in I_j} X_k.$$

В конце по сгруппированным матрицам восстанавливается исходный ряд.

Применительно к переменности потоков излучения внегалактических радиоисточников с помощью метода “Гусеница” ряд раскладывается на трендовые, квазигармонические и шумовые компоненты, суммарно формирующие наблюдаемую переменность (рис. 4). Используя

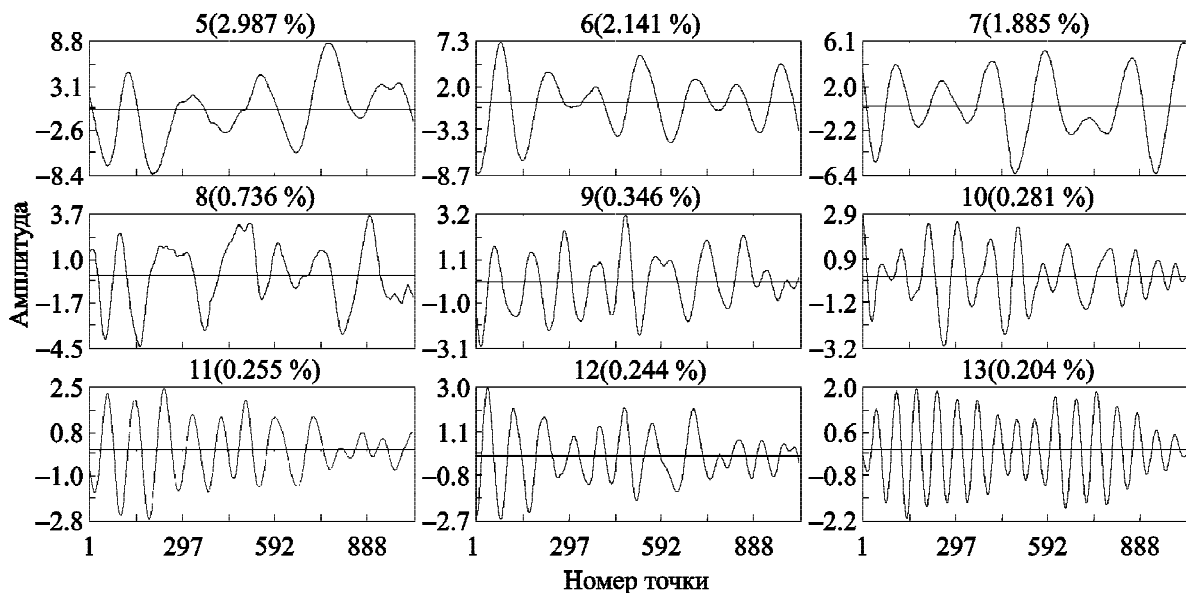


Рис. 4. Главные компоненты для источника 3C 446 на частоте 14.5 ГГц. Видно, что изменение плотности потока излучения представляет сложную сумму колебаний с разными амплитудами и характерными временами изменения

для восстановления компоненты временного ряда с разными периодами колебаний, можно исследовать данные в отдельных спектральных полосах [24].

Этот метод хорошо приспособлен для анализа радиоастрономических временных рядов, но время вычислений значительно больше, чем у быстрого вейвлет-преобразования.

3. Группа сейфертовских галактик 3С 273, 3С 120

Радиоисточники разбиты на группы в соответствии с физическими особенностями и классификацией (сейфертовские галактики первого типа, квазары, лацертиды). Радиоисточники 3С 273 и 3С 120 часто относят к сейфертовским галактикам первого типа (но 3С 273 классифицируется и как квазар), и объединены в одну группу.

Графики изменения плотностей потоков излучения радиоисточников 3С 273 и 3С 120 показаны на рис. 5.

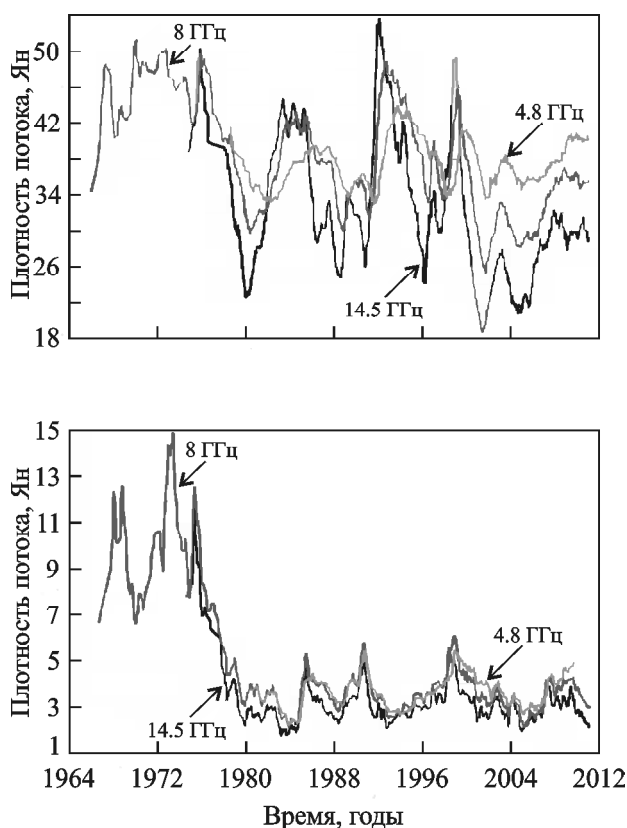


Рис. 5. Графики изменения плотностей потоков радиоизлучения источников 3С 273 (вверху) и 3С 120 (внизу)

Свойства переменности 3С 273 и 3С 120 описаны во многих работах. Например, в работе [25] (Z. Abraham & G. Romero, 1999) по данным, полученным методом РСДБ (радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами), исследовалось спиральное движение компонент в джете с возможным периодом его прецессии около 16 лет. В работе [26] (Bi Xiongwei et. al., 2012) обсуждается период продолжительностью около 8 лет, наблюдаемый в радио и миллиметровом диапазоне. В работе [27] (Mao Li-Sheng et. al., 2007) исследовался источник 3С 120 на частотах 37, 22, 14.5, 8, 4.8 ГГц, и был обнаружен период 4.2 года. В работе [28] (Е. Т. Белоконь, 1987) была установлена взаимосвязь между свойствами радиоджета и оптическим излучением у источника 3С 120.

Значения периодов для источников 3С 273 и 3С 120, полученные в результате вейвлет-анализа, показаны в табл. 4 и 5, здесь и далее используются следующие обозначения: F – частота, на которой велись наблюдения; P_{\max} , P_{\min} – наибольшее и наименьшее значения периода в годах на его временном интервале (если приведено одно значение, это означает, что период на указанном интервале времени не изменялся); P_{err} – погрешность определения периода; T_{start} , T_{end} – начальный и конечный моменты времени, в интервале между которыми проявляется период; PSD_{\max} – наибольшее значение спектральной мощности периода; $T_{\text{PSD}_{\max}}$ – момент времени, в который спектральная мощность была наибольшей; $T_{\text{GWS}_{\max}}$ – момент времени для максимума спектральной мощности глобальных спектров, курсивом и подчеркиванием выделены значения, соответствующие ее наибольшему значению.

У источника 3С 273 есть изменение основного периода, ≈ 8 лет, с уменьшением к концу ряда. Лучше это заметно на частотах 14.5 и 4.8 ГГц. К 2011 г. сильно падает также амплитуда колебаний плотности потока. В работе [29] (А. Е. Вольвач и др., 2013) предполагается, что у источника происходит сбой основного периода. Однако аппроксимация синусоидой с периодом ≈ 8.11 года показывает, что возможен не сбой периода, а лишь уменьшение его амплитуды (рис. 6). На частоте 8 ГГц (период ≈ 8 лет) волна накладывается на длительную фазу высокой плотности потока, приблизительно

Таблица 4. Значения периодов изменения плотности потока радиоизлучения источника 3С 273

3С 273, долговременная переменность								
F , ГГц	P_{\max} , Гг.	P_{\min} , Гг.	P_{err} , Гг.	T_{start} , Гг.	T_{end} , Гг.	PSD_{\max}	$T_{\text{PSD}_{\max}}$, Гг.	$T_{\text{GWS}_{\max}}$, Гг.
14.5	8.0	7.4	0.05	1977.7	2000.0	36333	1987.4	<u>1991.3</u>
8	11.3		0.40	1974.5	1993.0	10051	1984.4	<u>1990.6</u>
	7.8		0.06	1981.5	1998.0	13086	1988.8	
4.8	8.0	7.6	0.07	1981.4	2001.6	4400	1991.4	<u>1992.5</u>
3С 273, кратковременная переменность (O – C)								
14.5	3.4	3.0	0.04	1989.4	2004.3	500	1997.8	<u>1991.5</u>
	2.3	2.0	0.02	1985.0	1998.5	482	1990.4	
	1.4	1.2	0.03	1990.0	1997.6	190	1990.8	
	1.2		0.01	1980.0	1984.0	136	1983.5	
8	3.4		0.05	1991.8	2003.7	384	1999.3	1967.2
	2.8	2.3	0.03	1967.4	1997.0	232	1991.7	1975.5
	1.6	1.0	0.02	1982.8	1998.4	157	1995.9	1991.4
	1.5	1.3	0.02	1966.5	1970.5	63	1967.3	<u>1999.0</u>
4.8	3.3	2.9	0.06	1987.7	2004.6	202	2001.2	1980.4
	2.3		0.02	1990.0	1998.0	147	1994.8	1991.1
	1.3		0.04	1990.9	1995.6	50	1992.9	<u>1999.2</u>

Таблица 5. Значения периодов изменения плотности потока радиоизлучения источника 3С 120

3С 120, долговременная переменность								
F , ГГц	P_{\max} , Гг.	P_{\min} , Гг.	P_{err} , Гг.	T_{start} , Гг.	T_{end} , Гг.	PSD_{\max}	$T_{\text{PSD}_{\max}}$, Гг.	$T_{\text{GWS}_{\max}}$, Гг.
14.5	4.6	3.8	0.03	1980.3	2008.5	195	1989.6	<u>1985.0</u>
	6.3	5.9	0.07	1979.0	1997.8	97	1989.2	1990.2
	10.1		0.20	1988.4	2009.9	198	1994.8	1998.0
8	4.8	4.3	0.04	1982.2	1996.5	230	1987.8	<u>1985.2</u>
	8.5	8.1	0.06	1990.4	2007.7	118	1991.1	1990.0
	12.4		0.30	1970.0	2005.0	1613	1979.0	1998.3
4.8	4.5		0.02	1983.3	1994.0	194	1988.4	<u>1986.0</u>
	10.0		0.10	1989.7	2009.2	401	1996.7	1989.3 2007.6
3С 120, кратковременная переменность (O – C)								
14.5	1.8	1.5	0.03	1979.3	1984.3	19	1980.8	1985.0
	1.6		0.02	1989.2	2000.7	29	1998.2	1992.0
	2.1		0.03	2005.5	2010.2	18	2008.7	<u>1998.2</u>
	0.8	0.7	0.01	1981.1	1985.1	13	1983.6	2003.7
	0.7		0.01	1996.3	1999.5	10	1997.8	2007.2
8	1.9	1.6	0.03	1978.7	2007.4	32	1979.5	1978.4
	3.4		0.06	1999.5	2008.4	43	2006.8	1985.1
	2.7	2.3	0.03	1979.1	1991.6	15	1980.1	1990.5 1999.8
	2.4	1.2	0.05	1970.8	1975.7	12	1973.4	2004.0 <u>2007.0</u>
4.8	3.3	2.7	0.05	1981.5	2006.5	20	1983.5	1981.6
	1.9	1.3	0.02	1985.7	1994.0	16	1991.2	1984.8 <u>1990.5</u>
	1.9	1.5	0.02	1997.8	2007.2	10	1999.5	1998.8 2002.1 2004.0

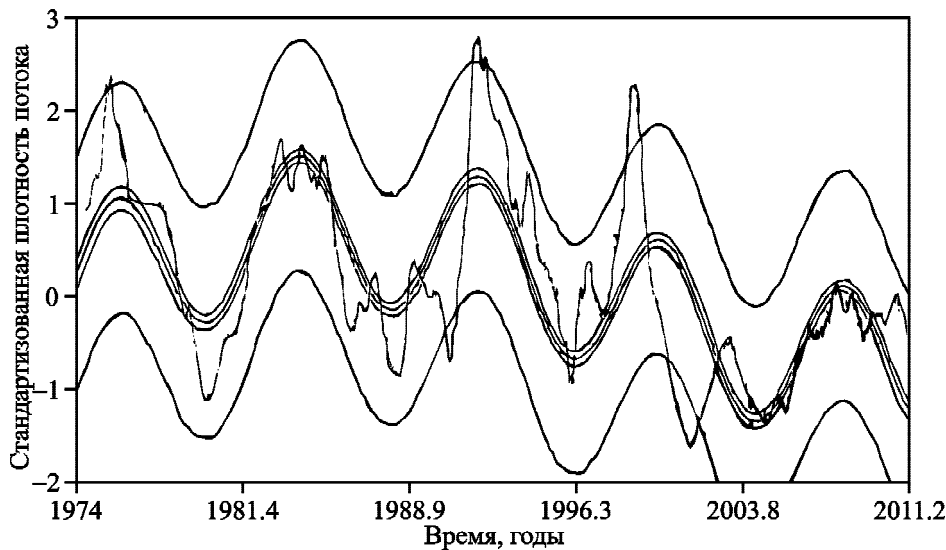


Рис. 6. Пример исходного изменения плотности потока радиоизлучения на частоте 14.5 ГГц и аппроксимация двумя синусоидами для источника 3С 273 (коэффициент детерминации $r^2 = 0.60452$, стандартная ошибка аппроксимации $SE = 0.629977$, статистика Фишера $F = 434.725$). Период основной волны составляет ≈ 8.11 года. Вспомогательный сегмент синусоиды с периодом ≈ 50 лет описывает тренд, близкий к линейному

с 1966 по 1980 г., (≈ 51 Ян при средней плотности потока 37.5 Ян).

Для источника 3С 120 характерны вспышки с высокой амплитудой ≈ 12 Ян (14.5 ГГц) и ≈ 15 Ян (8 ГГц) при средней плотности потока 3.2 и 4.6 Ян соответственно. Чтобы избежать “затенений” более слабых колебаний на вейвлет-спектрах, расчеты были проведены после удаления высокоамплитудных участков в рядах данных. В колебаниях в фазе максимума плотности потока на частоте 8 ГГц возможный период составляет $\approx 2.4 \div 1.2$ года.

Для обоих источников на всех частотах показательно изменение периодов со временем для долговременной и кратковременной переменности.

Значения периодов P для группы сейфертовских галактик, полученные методом анализа сингулярного спектра, приведены в табл. 6.

4. Группа квазаров 3С 345, 3С 454.3, DA 55, СТА 102

Радиоисточники 3С 345, 3С 454.3, DA 55, СТА 102 классифицируются как квазары. У источников 3С 345 и DA 55 на трех частотах происходит плавное изменение плотности потоков, в то время как у источников 3С 454.3 и СТА 102 хорошо выражены фазы активности из нескольких чередующихся максимумов и минимумов.

Графики изменения плотностей потоков излучения радиоисточников 3С 345, 3С 454.3 показаны на рис. 7, а для радиоисточников DA 55, СТА 102 – на рис. 8.

Таблица 6. Периоды изменения плотности потока радиоизлучения и их ошибки для источников 3С 273 и 3С 120, полученные методом анализа сингулярного спектра

$F, \text{ГГц}$	3С 273		3С 120	
	$P, \text{гг.}$	$P_{\text{err}}, \text{гг.}$	$P, \text{гг.}$	$P_{\text{err}}, \text{гг.}$
14.5	8.0	0.10	9.7	0.10
	5.2	0.20	6.5	0.05
	4	0.03	4.1	0.12
	3.5	0.04	2.5	0.03
8			2.0	0.03
	8.0	0.08	11.7	0.30
	5.0	0.04	8.8	0.16
	3.5	0.02	6.6	0.10
			4.9	0.25
			3.6	0.10
4.8			2.9	0.03
			2.5	0.02
	8.1	0.20	9.3	0.10
	7.6	0.12	6.5	0.03
	5.0	0.06	4.4	0.04
		3.4	0.04	
		2.9	0.03	
		2.5	0.01	

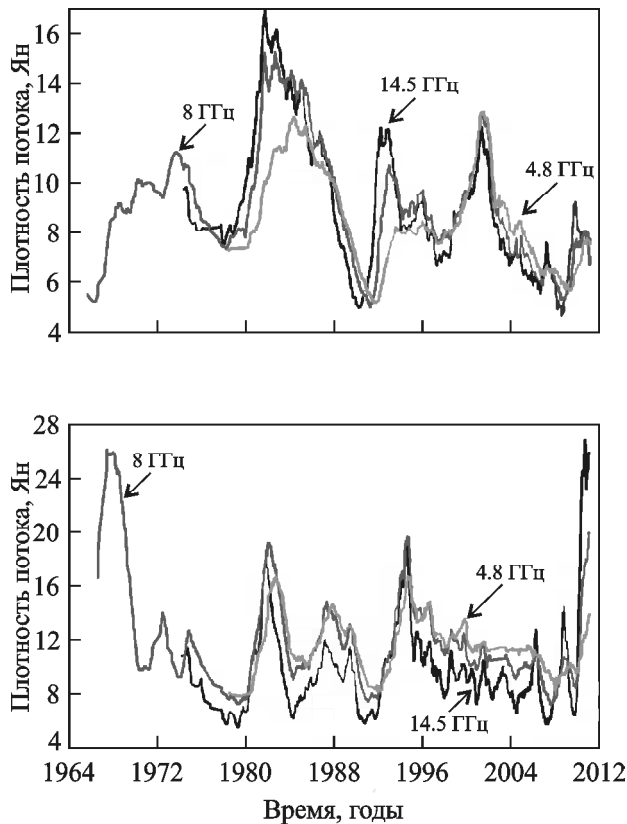


Рис. 7. Графики изменения плотностей потоков радиоизлучения источников 3C 345 (вверху) и 3C 454.3 (внизу)

В работе [30] (F. Dong et al., 2010) рассматривается оптическая переменность источника 3C 345. С помощью вейвлет-анализа обнаружено значительное изменение периодов со временем в оптическом диапазоне. Найденные периоды изменяются в интервалах $1.7 \div 2.6$, $4.5 \div 5.2$, $9.6 \div 11.5$ года. В работе [31] (S. J. Qian et al., 2009) приводятся результаты исследования 3C 345 в радиодиапазоне по РСДБ данным спирального движения компонент в джете. Предполагается, что найденный период 6.9 лет соответствует прецессии джета радиоисточника. Однако в работе [32] (J. Klare et al., 2005) также по данным РСДБ указывается, что направление выброса компонент изменяется с периодом $8 \div 10$ лет. Многолетние наблюдения в оптическом диапазоне [33] (М. К. Бабаджанянц, Е. Т. Белоконь, 1984) показали, что на кривых блеска есть долгопериодические колебания (десяtkи лет), на фоне которых проявляются быстрые двугорбые всплески с длительностью у основания ≈ 400 дней, а между горбами ≈ 150 дней, чередующиеся через несколько лет. Это может быть след-

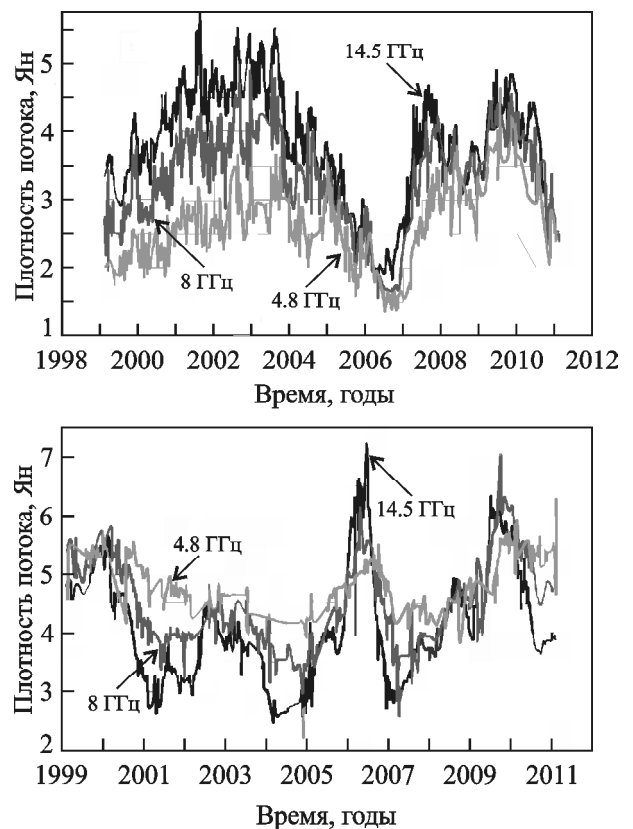


Рис. 8. Графики изменения плотностей потоков радиоизлучения источников DA 55 (вверху) и STA 102 (внизу)

ствием прохождения спутника через аккреционный диск вокруг более массивной черной дыры.

Переменность источника 3C 454.3 широко исследовалась многими авторами. Например, в работе [34] (А. Е. Volvach et al., 2006) сообщается о периодах 1.5 и 13.5 года. По данным на частотах 15 и 8 ГГц в работе [35] (Shan-Jie Qian et al., 2006) найден период 12.8 года и переменность объясняется моделью двойной черной дыры – периодические изменения плотности потока происходят за счет эффекта “маяка” или изменения доплеровского усиления прецессирующего джета из-за орбитального движения. Возможны также колебания темпа аккреции вещества.

Группой исследователей из Мичиганской обсерватории проводилась обработка данных плотности потока излучения источника DA 55 с помощью вейвлет-анализа [36] (B. C. Kelly et al., 2003). Ими был обнаружен период 2.3 года на частоте 14.5 ГГц. Авторы работы [11] (Т. Novatta et al., 2008), используя вейвлет-анализ, обнаружили период 2.2 года на частотах 22 и 37 ГГц.

Мониторинг источника СТА 102 длительное время проводится в обсерватории Метсахови (Финляндия) на частотах 22, 37 и 90 ГГц. Авторы [11], применяя вейвлет-анализ, обнаружили период продолжительностью 8.7 года на частоте 22 ГГц, период 6.9 года на частоте 37 ГГц и период 7.7 года на частоте 90 ГГц.

Значения периодов для источников ЗС 345, ЗС 454.3, DA 55 и СТА 102, полученные в ре-

зультате вейвлет-анализа, показаны в табл. 7, 8, 9 и 10.

У квазара ЗС 345 наблюдается значительное изменение амплитуды и несинусоидальность кривых изменения плотности потока излучения. На фазы максимума плотности потока (на частотах 14.5, 8 ГГц) накладываются быстрые его колебания. Подобная картина есть и у некоторых других источников, например у ЗС 273.

Таблица 7. Значения периодов изменения плотности потока радиоизлучения источника ЗС 345

ЗС 345, долговременная переменность								
F , ГГц	P_{\max} , Гг.	P_{\min} , Гг.	P_{err} , Гг.	T_{start} , Гг.	T_{end} , Гг.	PSD _{max}	T_{PSDmax} , Гг.	T_{GWSmax} , Гг.
14.5	15.7		0.4	1976.8	2004.8	3545	1985.7	<u>1992.1</u>
	10.5	9.1	0.2	1980.2	1998.0	3180	1984.6	
8	15.3		0.3	1969.6	2007.5	4050	1988.8	<u>1993.2</u>
	12.0	9.3	0.2	1969.6	2004.5	2800	1985.1	
4.8	15.8		0.5	1984.5	2005.3	3200	1994.6	<u>2000.4</u>
	9.3	8.7	0.2	1983.4	2004.3	890	1992.4	
ЗС 345, кратковременная переменность (O – C)								
14.5	4.8	4.4	0.04	1981.7	2003.0	104	1993.0	1981.6
	3.0	2.8	0.01	1996.0	2008.0	30	2008.8	<u>1992.4</u>
	1.5	1.2	0.02	1980.0	1992.3	20	1985.1	2009.4
8	4.8	4.5	0.06	1970.0	1980.0	33	1973.0	1981.6
	3.5		0.02	1980.5	1990.0	21	1988.3	<u>1993.2</u>
	4.5	4.3	0.03	1992.2	2005.5	50	1996.3	2001.7
	1.7		0.01	1996.6	2005.3	10	2001.2	
4.8	3.0	2.4	0.05	1980.6	2009.0	13	2000.1	1983.7 <u>2002.0</u>

Таблица 8. Значения периодов изменения плотности потока радиоизлучения источника ЗС 454.3

ЗС 454.3, долговременная переменность								
F , ГГц	P_{\max} , Гг.	P_{\min} , Гг.	P_{err} , Гг.	T_{start} , Гг.	T_{end} , Гг.	PSD _{max}	T_{PSDmax} , Гг.	T_{GWSmax} , Гг.
14.5	6.4		0.1	1976.3	1996.0	4805	1986.6	<u>1982.7</u> 2008.2
8	6.8		0.1	1971.1	1998.0	9015	1976.8	<u>1970.0</u>
	14.5		0.3	1968.0	2009.2	6340	1978.8	
4.8	6.1		0.1	1980.0	1997.2	3100	1986.0	<u>1984.5</u>
ЗС 454.3, кратковременная переменность (O – C)								
14.5	2.6	2.3	0.03	1977.8	2011.0	180	2008.8	1981.4
	1.6	1.4	0.02	1980.7	2004.5	18	1992.7	1989.5
	1.0	0.8	0.02	1994.4	2009.2	12	1996.3	<u>1994.8</u>
8	2.6	2.3	0.03	1970.8	2011.0	40	2009.1	1973.0
	1.5	0.9	0.05	1970.8	1983.8	21	1982.5	1989.6
	1.5		0.01	1990.2	2004.2	15	1992.7	<u>1994.6</u>
4.8	2.6	2.0	0.03	1980.7	2011.0	33	1995.4	1982.1
	1.1		0.01	1982.3	2000.0	13	1998.6	<u>1995.5</u>

Таблица 9. Значения периодов изменения плотности потока радиоизлучения источника DA 55

DA 55, кратковременная переменность (O – C)								
F , ГГц	P_{\max} , гг.	P_{\min} , гг.	P_{err} , гг.	T_{start} , гг.	T_{end} , гг.	PSD _{max}	$T_{\text{PSD}_{\max}}$, гг.	$T_{\text{GWS}_{\max}}$, гг.
14.5	2.2		0.02	2003.7	2010.1	86	2008.1	2001.6
	0.8	0.5	0.01	2000.8	2009.8	14	2009.3	2003.5 <u>2008.3</u>
8	2.2		0.02	2003.5	2010.1	91	2007.8	2001.1
	1.3	1.0	0.05	2000.0	2006.0	12	2005.1	2004.1 <u>2007.7</u>
4.8	2.2	2.0	0.03	2004.0	2010.1	53	2007.6	2002.6
	1.3		0.01	2001.3	2006.2	22	2005.0	2005.2
	0.6	0.5	0.01	2001.5	2004.1	12	2002.5	<u>2008.3</u>

Таблица 10. Значения периодов изменения плотности потока радиоизлучения источника СТА 102

F , ГГц	P_{\max} , гг.	P_{\min} , гг.	P_{err} , гг.	T_{start} , гг.	T_{end} , гг.	PSD _{max}	$T_{\text{PSD}_{\max}}$, гг.	$T_{\text{GWS}_{\max}}$, гг.
14.5	3.2		0.04	2000.3	2010.4	266	2005.1	<u>2006.4</u>
	1.1		0.03	2000.8	2004.1	17	2001.7	
8	3.3		0.03	2000.0	2010.4	218	2005.4	<u>2007.0</u>
4.8	3.6		0.08	2002.4	2010.1	183	2008.2	2001.0
	1.1		0.03	1999.6	2002.8	12	2000.9	<u>2007.5</u>

Квazar 3C 454.3 примечателен резкой сменой режима переменности с долговременной на кратковременную, которая наблюдается приблизительно с 1996 г. Основной период у него $\approx 6 \div 7$ лет представляет тройную волну на частотах 14.5 и 4.8 ГГц. Результат аппроксимации одной синусоидой на частоте 8 ГГц показан на рис. 9. Видно, что период 7 лет, полученный из перио-

дограммы Ломба–Скаргла, приблизительно соответствует фазам роста плотности потока на рассмотренном временном промежутке, кроме 2003 г. Расстояние между самыми высокими максимумами на частотах 14.5 и 4.8 ГГц составляет ≈ 13 и 12 лет соответственно. На частоте 8 ГГц более длительное время наблюдений позволяет увидеть, что промежутки времени

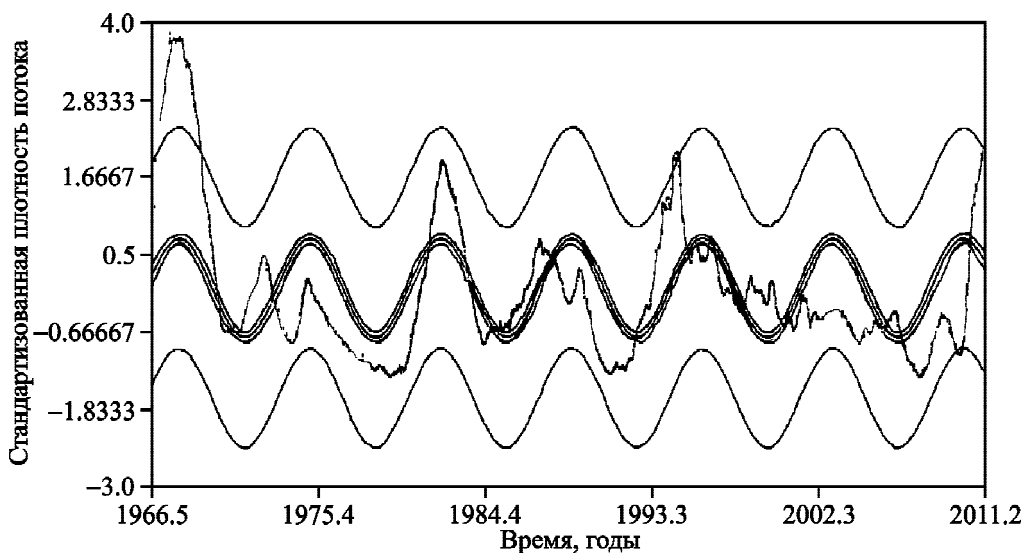


Рис. 9. Аппроксимирующая синусоида с периодом 7 лет, описывающая долговременное изменение плотности потока излучения источника 3C 454.3 на частоте 8 ГГц ($r^2 = 0.285915$, $SE = 0.845589$, $F = 305.5$). Виден сбой периода в 2003 г.

между максимумами изменяются с периодами $\approx 14.5, 12.5, 16.2$ года. Возможно, это долговременная квазипериодическая структура, лучше исследовать которую помогут будущие мониторинговые наблюдения источника 3С 454.3. С 1996 г. источник переходит в фазу быстрой переменности, которая заканчивается мощной вспышкой в 2011 г. (27 Ян при средней плотности потока ≈ 10 Ян на частоте 14.5 ГГц).

У источника DA 55 долговременная переменность может быть описана сегментом синусоиды. Это делает его похожим на источник OJ 287, у ко-

торого тоже есть такая особенность. Пример для частоты 8 ГГц показан на рис. 10. Видно, что если подобное изменение плотности потока будет устойчивым, то следующая, после окончания наблюдений в 2011 г., вспышка может произойти в 2016 г.

Значения долговременных периодов на частотах 14.5 и 4.8 ГГц составляют ≈ 7.2 и 6.2 года соответственно. Погрешность для трех частот ≈ 0.2 года.

Источник СТА 102 на исследуемом интервале времени также обладает устойчивым периодом с близкими значениями, ≈ 3 года, на разных частотах. На рис. 11 приведен график аппрокси-

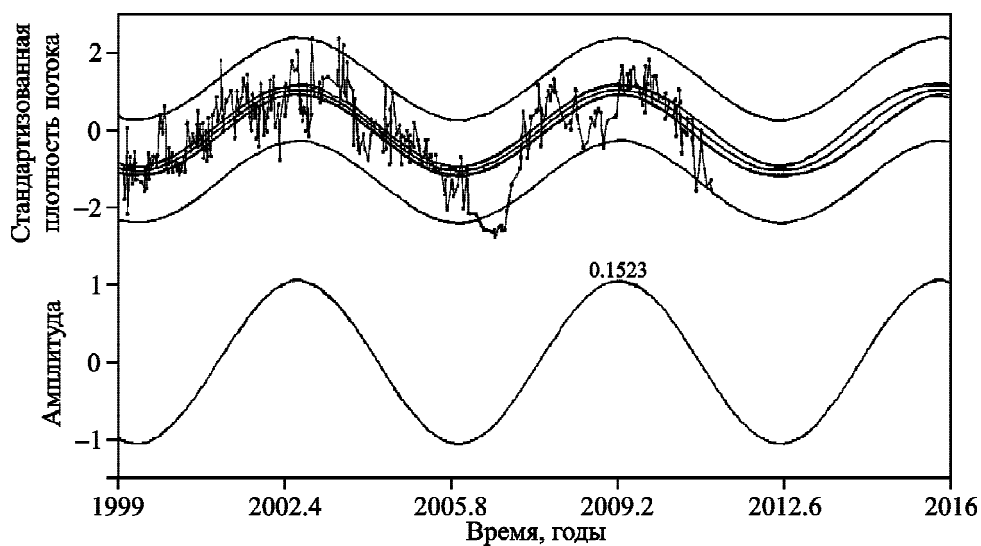


Рис. 10. Аппроксимирующая синусоида с периодом 6.56 лет, описывающая долговременное изменение плотности потока радиоизлучения источника DA 55 на частоте 8 ГГц ($r^2 = 0.54491$, $SE = 0.676523$, $F = 210.138$)

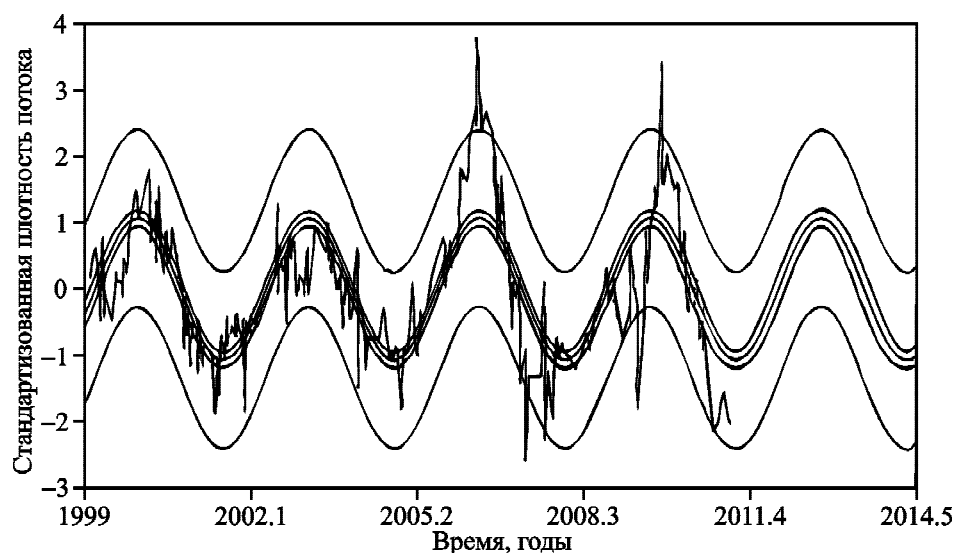


Рис. 11. Исходные данные об изменении плотности потока радиоизлучения с вычтенным полиномиальным трендом и аппроксимирующая синусоида с периодом 3.18 года для источника СТА 102 на частоте 8 ГГц ($r^2 = 0.548068$, $SE = 0.674511$, $F = 180.695$)

мации исходных данных одной синусоидой с периодом 3.18 года на частоте 8 ГГц с вычтенным полиномиальным трендом 3-й степени. Если предположить, что этот период устойчивый, то следующий максимум плотности потока мог быть в 2012.6–2013.0 годах.

Значения периодов для группы квазаров, полученные методом анализа сингулярного спектра, приведены в табл. 11.

5. Группа лацертид OJ 287, OT 081, BL Lac, 3C 446

Радиосточники OJ 287, OT 081, BL Lac, 3C 446 относятся к лацертидам, немногочисленной груп-

пе объектов, получившей свое название от переменного источника BL Lacertae. Обычно эти объекты отличаются быстрой переменностью с высокой амплитудой, что и наблюдается у OJ 287, OT 081 и BL Lac (например, у OJ 287 за ≈ 1.5 года плотность потока возрастает от ≈ 3.7 Ян до ≈ 9.5 Ян с последующим падением до ≈ 4 Ян на частоте 14.5 ГГц). Источник 3C 446 отличается от этих объектов плавным и долговременным изменением плотности потока.

Графики изменения плотности потока излучения радиосточников OJ 287, OT 081 показаны на рис. 12, а для радиосточников BL Lac, 3C 446 – на рис. 13.

Источник OJ 287 подробно исследовался во многих работах и различных диапазонах излучения. Характерная его особенность – это всплывающая структура, которая в оптическом диапазоне имеет период $\approx 11 \div 12$ лет по оценкам разных авторов [37] (Shi Weizhao et. al., 2007). Во многих работах рассматривается быстрая переменность этого объекта в радиодиапазоне с периодами ≈ 1.1 и 1.6 года [38] (Philip A. Hughes et. al., 1998).

Источник OT 081 также примечателен быстрой и регулярной переменностью. В работе [39] (Takafumi Ishida et. al., 2012) исследуется всплывающая активность этого объекта на частоте 8.4 ГГц в 2010 г. В результате обнаружена радиовспышка длительностью 19.3 дня, которая накладывается на более длительное изменение плотности потока за время ≈ 200 дней.

Источник BL Lac выделяется быстрой переменностью в различных диапазонах длин волн, которая накладывается на долговременную. Например, в работе [40] (C. Humrickhouse, 2008) по исследованию быстрой переменности BL Lac с использованием вейвлет-анализа найдены периоды 1.5, 3.5 ч в оптическом диапазоне. А в работе [41] (Y. C. Guo et. al., 2015) с помощью метода Юркевича и метода структурных функций показано, что в радиодиапазоне период составляет 7.5 года, а в оптическом – 1.2 года. Приводятся модели прецессии по спиральным движениям в джете и периодического распространения ударных волн.

У источника 3C 446 на частотах 37, 22, 14.5, 8, 4.8 ГГц период колебаний плотности потока, полученный методами дискретной автокорреля-

Таблица 11. Периоды изменения плотности потока радионизлучения и их ошибки для источников 3C 345, 3C 454.3, DA 55 и СТА 102, полученные методом анализа сингулярного спектра

F, ГГц	3C 345		3C 454.3	
	P, гг.	P _{err} , гг.	P, гг.	P _{err} , гг.
14.5	15.6	0.20	6.2	0.07
	11.0	0.10	3.5	0.04
	9.9	0.10	2.7	0.02
	5.1	0.02	2.3	0.02
	4.2	0.02		
	3.3	0.01		
	2.7	0.02		
	2.0	0.01		
8	14.7	0.08	7.2	0.08
	10.4	0.50	3.6	0.03
	9.4	0.07	2.7	0.03
	4.2	0.02		
4.8	3.0	0.02		
	16.0	0.60	6.3	0.08
	6.1	0.06	4.2	0.10
	4.1	0.03	3.5	0.05
	2.6	0.03	2.5	0.05
	DA 55		СТА 102	
	14.5	2.3	0.060	3.0
0.8		0.007	0.8	0.02
0.5		0.004		
8	2.3	0.050	3.0	0.07
	1.4	0.010	1.1	0.04
	0.8	0.005	0.9	0.01
4.8	2.0	0.04	2.6	0.06
	1.2	0.01	1.2	0.01
	0.9	0.01	0.9	0.01

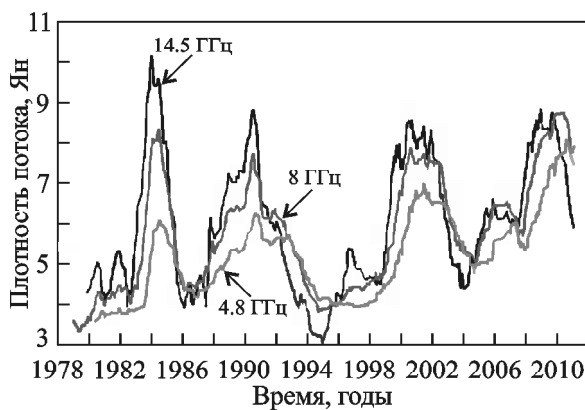
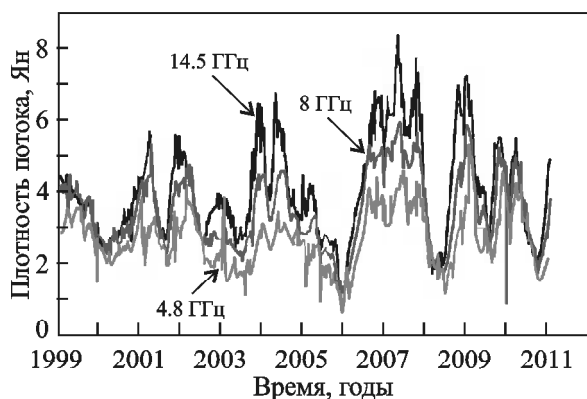
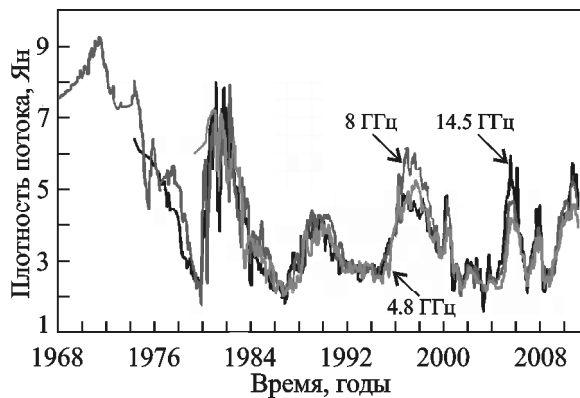
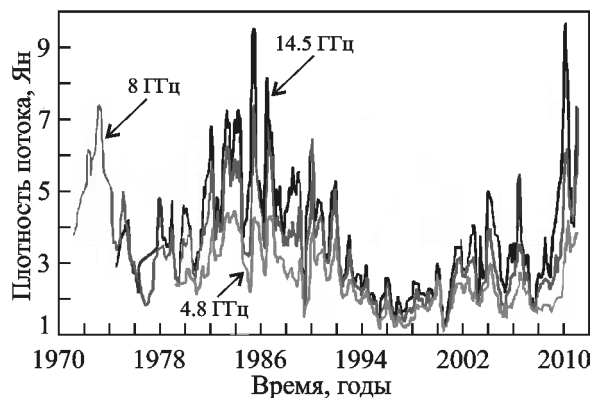


Рис. 12. Графики изменения плотностей потоков радиоизлучения источников OJ 287 (вверху) и OT 081 (внизу)

Рис. 13. Графики изменения плотностей потоков радиоизлучения источников BL Lac (вверху) и 3C 446 (внизу)

ционной функции и Юркевича, составляет 5.8 года по результатам работы [42] (N. A. Kudryavtseva, T. V. Ryatunina, 2006). В оптическом диапазоне у 3C 446 найден период 4.2 года [43] (C. Barbieri et al., 1990).

Значения периодов для источников OJ 287, OT 081, BL Lac и 3C 446, полученные в результате вейвлет-анализа, показаны в табл. 12, 13, 14 и 15.

У источника OJ 287 возможные периоды долговременного изменения плотности потока приблизительно определены из периодограммы Ломба–Скаргла [44, 45] (N. R. Lomb, 1976; J. D. Scargle, 1982): ≈ 25.5 года на частоте 14.5 ГГц, ≈ 22.2 года на частоте 8 ГГц и ≈ 26.8 года на частоте 4.8 ГГц с погрешностью $0.3 \div 0.7$ года. Пример соответствия синусоиды исходным данным показан на рис. 14. Если такое изменение плотности потока сохранится, то следующий максимум может быть в 2036–2037 гг. Особенность этого источника в том, что колебания с периодами 1.1 и 1.6 года достигают наибольшей амплитуды

в максимумах долговременного изменения плотности потока.

У источника OT 081 есть особенность в виде увеличения амплитуды переменности со временем с двумя периодами, ≈ 2.7 и 1.2 года. В максимумах наблюдаются их расщепления с характерными временами от ≈ 0.9 до ≈ 0.4 года, которые уменьшаются со временем.

Источник BL Lac обладает квазисинусоидальной долговременной переменностью $\approx 7.5 \div 8$ лет с наложением быстрых колебаний плотности потока с малой амплитудой и характерным временем до $\approx 0.5 \div 1$ года.

Источник 3C 446 не имеет ярко выраженных проявлений быстрой переменности, однако его основной период изменяется со временем от $\approx 6 \div 7$ лет до $\approx 8 \div 9$ лет. Кроме этого, вероятно, существует период около 3 лет на всех трех частотах.

Значения периодов для группы лацертид, полученные методом анализа сингулярного спектра, приведены в табл. 16.

Таблица 12. Значения периодов изменения плотности потока радиоизлучения источника ОJ 287

F , ГГц	P_{\max} , ГГ.	P_{\min} , ГГ.	P_{err} , ГГ.	T_{start} , ГГ.	T_{end} , ГГ.	PSD_{\max}	$T_{\text{PSD}_{\max}}$, ГГ.	$T_{\text{GWS}_{\max}}$, ГГ.
14.5	1.8	1.1	0.01	1978.7	1992.8	96	1985.3	<u>1985.4</u> 1989.6
	1.8	1.4	0.02	2000.5	2010.0	52	2007.6	2004.0 2006.6
8	2.5	1.1	0.01	1972.5	1993.5	83	1985.5	<u>1985.4</u> 1989.5
	1.9	1.3	0.03	2000.0	2009.6	46	2007.2	2004.1
4.8	1.8	1.1	0.02	1981.5	1993.7	71	1986.0	<u>1985.8</u> 1989.7
	2.3	1.3	0.05	1998.6	2009.8	60	2003.3	2000.5

Таблица 13. Значения периодов изменения плотности потока радиоизлучения источника OT 081

F , ГГц	P_{\max} , ГГ.	P_{\min} , ГГ.	P_{err} , ГГ.	T_{start} , ГГ.	T_{end} , ГГ.	PSD_{\max}	$T_{\text{PSD}_{\max}}$, ГГ.	$T_{\text{GWS}_{\max}}$, ГГ.
14.5	2.7	2.4	0.01	2000.2	2010.0	527	2006.1	2004.3 <u>2008.0</u>
	1.2		0.007	2006.5	2010.6	250	2008.8	
	0.9	0.5	0.006	2001.5	2008.1	68	2002.0	
8	2.7	2.5	0.01	2000.4	2009.8	325	2006.0	2002.3 <u>2009.2</u>
	1.2		0.007	2006.6	2010.7	137	2008.6	
	0.9	0.4	0.007	2001.4	2010.5	32	2002.5	
4.8	2.6		0.01	2000.3	2009.8	360	2006.2	2002.1 <u>2009.3</u>
	1.2		0.007	2006.4	2010.5	162	2008.8	
	1.4	0.4	0.007	1999.7	2010.5	23	2003.1	

Таблица 14. Значения периодов изменения плотности потока радиоизлучения источника BL Lac

BL Lac, долговременная переменность								
F , ГГц	P_{\max} , ГГ.	P_{\min} , ГГ.	P_{err} , ГГ.	T_{start} , ГГ.	T_{end} , ГГ.	PSD_{\max}	$T_{\text{PSD}_{\max}}$, ГГ.	$T_{\text{GWS}_{\max}}$, ГГ.
14.5	8.2	7.3	0.1	1975.8	2006.2	603	1985.2	<u>1980.5</u> 2006.3
8	8.0	7.5	0.2	1975.5	2008.8	207	1993.1	<u>1981.2</u>
4.8	8.1	7.6	0.1	1981.1	2004.0	486	1987.7	<u>1981.4</u> 2006.0
BL Lac, кратковременная переменность (O – C)								
14.5	3.8		0.03	1976.7	1990.0	71	1981.2	<u>1981.8</u>
	2.7	2.2	0.04	1999.0	2009.4	60	2006.5	2000.8
	1.5		0.01	1979.1	1982.7	40	1980.8	2006.1
	1.8		0.01	1998.7	2002.2	20	2000.4	2007.7
	0.6	0.5	0.01	1987.3	1992.2	10	1989.2	
8	3.9	3.5	0.02	1974.7	1995.3	50	1979.2	1975.8
	2.6	2.0	0.04	1998.3	2009.3	15	2007.1	<u>1980.4</u> 2000.7
	1.2	0.7	0.01	1979.3	1985.4	11	1980.5	2006.5
4.8	4.7	3.8	0.03	1984.3	2005.4	30	1993.1	<u>1983.1</u>
	2.6	2.0	0.02	2002.2	2008.8	27	2007.0	1996.2
	0.9		0.01	1996.8	2001.5	8	1999.7	2000.6 2007.6

Таблица 15. Значения периодов изменения плотности потока радиоизлучения источника 3С 446

3С 446, долговременная переменность								
$F, \text{ГГц}$	$P_{\max}, \text{гг.}$	$P_{\min}, \text{гг.}$	$P_{\text{err}}, \text{гг.}$	$T_{\text{start}}, \text{гг.}$	$T_{\text{end}}, \text{гг.}$	PSD_{\max}	$T_{\text{PSD}_{\max}}, \text{гг.}$	$T_{\text{GWS}_{\max}}, \text{гг.}$
14.5	6.0	8.3	0.1	1981.7	2008.4	1092	1998.7	<u>1985.2</u> 2000.0
8	6.0	8.8	0.1	1981.4	2008.6	808	1998.8	<u>1985.0</u>
4.8	7.0	8.6	0.2	1983.0	2009.0	407	2000.1	1986.0 <u>2004.7</u>
3С 446, кратковременная переменность (O – C)								
14.5	3.2	2.6	0.01	1981.7	2004.3	20	1983.1	<u>1983.4</u> 1987.3 1990.7 2000.0
8	3.3	3.0	0.05	1982.3	2005.4	36	1984.7	<u>1984.1</u> 1990.2 2000.8
4.8	2.6		0.01	1983.7	1994.0	37	1986.3	<u>1983.7</u> 1990.6
	3.2	2.7	0.03	1999.3	2008.3	17	2006.0	2001.5 2007.4

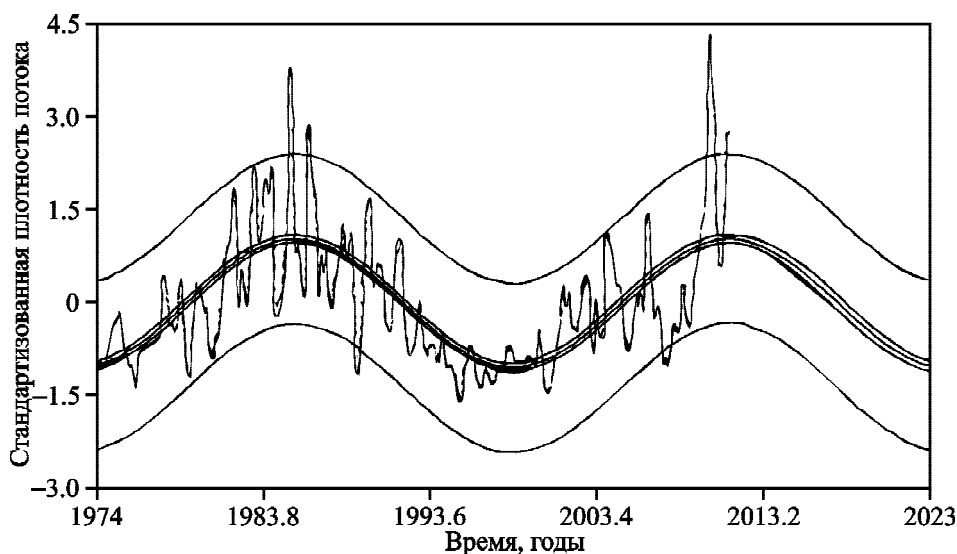


Рис. 14. Аппроксимирующая синусоида с периодом 25.5 года, описывающая долговременное изменение плотности потока радиоизлучения источника OJ 287 на частоте 14.5 ГГц ($r^2 = 0.513289$, $SE = 0.69803$, $F = 961.274$)

Проведенный анализ кривых изменения плотности потока радиоизлучения двумя разными методами показал, как видно из приведенных таблиц, хорошее совпадение результатов. Независимое выделение сходных квазипериодических составляющих при анализе временных рядов разными методами свидетельствует о реальности этих составляющих. Однако в некото-

рых случаях есть и различия, поскольку метод анализа сингулярного спектра существенно отличается от метода непрерывного вейвлет-анализа. Кривые переменности внегалактических радиоисточников очень редко имеют вид, близкий к правильной синусоиде. Это может приводить к появлению ложных периодов на вейвлет-спектрах, близких по значениям к реальным

Таблица 16. Периоды изменения плотности потока радиоизлучения и их ошибки для источников OJ 287, BL Lac, 3C 446 и OT 081, полученные методом анализа сингулярного спектра

F , ГГц	OJ 287		BL Lac	
	P , гг.	P_{err} , гг.	P , гг.	P_{err} , гг.
14.5	6.0	0.10	7.3	0.20
	2.4	0.02	4.5	0.06
	2.1	0.03	3.8	0.03
	1.9	0.05	2.7	0.02
	1.6	0.03	2.4	0.06
8	6.2	0.10	7.4	0.20
	3.8	0.03	4.7	0.10
	3.1	0.03	3.3	0.07
	2.4	0.02	2.8	0.02
	1.6	0.08	1.9	0.01
4.8	6.0	0.10	7.3	0.06
	4.0	0.05	4.7	0.07
	2.4	0.02	2.8	0.04
	2.0	0.03	2.2	0.02
	1.6	0.02		
	3C 446		OT 081	
14.5	8.6	0.07	2.6	0.010
	6.5	0.06	1.1	0.005
	3.5	0.05	0.6	0.005
	2.8	0.03		
8	9.0	0.10	2.6	0.020
	6.3	0.06	1.1	0.007
	3.0	0.04	0.5	0.005
	2.3	0.03		
4.8	8.8	0.07	2.7	0.040
	7.2	0.10	1.3	0.010
	3.1	0.01	0.5	0.007
	2.3	0.01		

периодам. В таком случае метод “Гусеница” способен лучше показать особенности колебаний, выделенных из исходного ряда, поскольку использует адаптивный базис, формируемый самим рядом данных. В тоже время избыточность непрерывного вейвлет-преобразования дает преимущества в определении изменения периодов со временем. Применение полосовой фильтрации и доверительных интервалов в случае вейвлет-анализа и выборочного восстановления данных в случае анализа сингулярного спектра позволяет лучше выделять именно те периоды, которые присутствуют в анализируемых данных, и отбрасывать ложные.

6. Прогнозирование изменений плотности потоков излучения внегалактических радиоисточников

Прогнозирование плотности потоков излучения внегалактических источников на основе периодов их переменности изучалось и ранее в ряде работ как в радио, так и в оптическом диапазонах. Для источника 3C 273 попытка спрогнозировать изменение плотности потока на частоте 15 ГГц описана в работе [46] (HaoJing Zhang et al., 2010). С использованием вейвлет-анализа определен период 8.1 года и делается предположение о радиовспышке в октябре 2014 г. В работе [47] (Huai-Zhen Li et al., 2006) у источника 3C 454.3 определены периоды 6.1 и 1.5 года на частотах 22 и 37 ГГц. Делается предположение о радиовспышке в марте или апреле 2006 г. У источника OJ 287 в оптическом диапазоне найдены периоды 13.5 и 7 лет и на их основе делается предположение о следующем максимуме осенью 2020 г. [48] (XU Yun-bing et al., 2010). У источника 3C 345 в оптическом диапазоне найдены периоды 10.1 и 21.8 года [49] (Zhang X. et al., 1998), на основании чего делается прогноз следующей вспышки в январе 2002 г. Для объекта BL Lac типа S5 0716+714 в работе [50] (Zhang Hao-Jing, Zhang Xiong., 2007) обнаружен период 1.1 года в оптическом диапазоне и предсказана вспышка в июле 2006 г. Авторегрессионные методы линейного предсказания, которые являются мощным средством получения краткосрочных прогнозов, давно и весьма успешно применяются при прогнозировании индексов солнечной активности и солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см, например, в работах [51–53] (A. V. Mordvinov, 1986; Liu Si-Qing et al., 2010; R. P. Kane, N. B. Trivedi, 1985). Но применительно к внегалактическим радиоисточникам эти методы используются очень редко.

У исследуемых радиоисточников наблюдаются различные проявления переменности и подобрать единый, универсальный метод для прогноза не удастся. Поскольку в данных наблюдаются квазипериодические изменения, временной ряд можно представить в виде параметрической синусоидальной модели и построить прогноз дальнейшего изменения плотности потока. Алгоритм состоит из трех этапов. На первом этапе используется периодограмма Ломба–Скаргла для оценки значений частоты и количества синусоидаль-

ных компонентов. На втором этапе проводится линейная аппроксимация методом наименьших квадратов, чтобы определить амплитуды и фазы. Полученные значения используются на третьем этапе нелинейной оптимизации, обеспечивающей наилучшую аппроксимацию исходных данных [54].

Однако такой подход не всегда бывает применим. В случае если у радиисточника наблюдается сильное изменение амплитуды, существенно несинусоидальная форма кривой изменения плотности потока, а также сильно неустойчивые периоды, то гармонический метод прогноза оказывается неприменимым.

В исследуемой выборке таких радиисточников три. У ЗС 345 наблюдается сильное изменение амплитуды колебаний, а также периодов быстропеременной составляющей. Главный период источника ЗС 446 значительно изменяется со временем. У источника ЗС 454.3 наблюдается смена режима переменности после 1996 г. с переходом в фазу минимума плотности потока и быстрыми его изменениями.

В таком случае лучшие результаты дает построение прогноза авторегрессионными методами линейного предсказания. Они очень подробно описаны во многих работах, например [55] (S. L. Marple, 1987) и [56] (J. Makhoul, 1975).

Кратко опишем основную идею используемого метода. Для многих сигналов физических процессов, встречающихся на практике, подходит модель, описываемая выходным сигналом линейной системы в виде линейного разностного уравнения с комплексными коэффициентами. В общем случае его можно записать в виде

$$x[n] = -\sum_{k=1}^p a_k x[n-k] + \sum_{k=0}^q b_k u[n-k] = \sum_{k=0}^{\infty} h[k] x[n-k],$$

где $u[n]$ – входная последовательность данных; $x[n]$ – последовательность на выходе фильтра, формирующего наблюдаемые данные ($h[k]=0$ при $k < 0$); a_k – коэффициенты авторегрессии; b_k – коэффициенты скользящего среднего. Эта линейная система имеет рациональную дискретную передаточную функцию $H(z) = B(z)/A(z)$, полиномы в которой определяются формулами:

$$A(z) = 1 + \sum_{k=1}^p a_k z^{-k},$$

$$B(z) = 1 + \sum_{k=1}^q b_k z^{-k},$$

$$H(z) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} h_k z^{-k}.$$

Для гарантированной устойчивости фильтра требуется, чтобы полюсы и нули полиномов $A(z)$, $B(z)$ находились внутри единичной окружности в z -плоскости. Это общий подход параметрической аппроксимации. Параметрические модели разделяются на авторегрессионные (AR), процессы скользящего среднего (MA), процессы авторегрессии – скользящего среднего (ARMA). В работе применен модифицированный ковариационный метод линейного предсказания, поскольку он дает хорошие результаты для данных в виде суммы зашумленных синусоид и приводит к отсутствию расщепленных спектральных пиков (как например в AR Burg методе). AR модель дискретного случайного процесса $x[n]$ описывается линейным уравнением

$$x[n] + \sum_{k=1}^p a_k x[n-k] = u[n],$$

где $u[n]$ – задающее воздействие в виде белого шума. У AR фильтра передаточная функция $H(z)$ не имеет нулей ($q=0$) и у процесса $AR(p)$ есть p полюсов. Задача линейного предсказания – это предсказать ненаблюдаемое значение $x[n]$ по наблюдаемым отсчетам $x[n-1], x[n-2], \dots, x[n-p]$, т. е. используя p предыдущих отсчетов. Пусть $\tilde{x}^f[n] = -\sum_{l=1}^p a_l^f x[n-l]$ – оценка предсказания вперед, где a_l^f – коэффициент линейного предсказания вперед ($1 < l < p$). Необходимо вычислить такие значения коэффициентов, которые минимизируют дисперсию σ_l^2 ошибки линейного предсказания $e_p^f[n] = x[n] - \tilde{x}^f[n]$. Для этого решается система линейных уравнений Юла–Уолкера. Ошибка линейного предсказания тесно связана с AR процессом и является сигналом на выходе фильтра ошибки предсказания вперед. Если порядки фильтров AR и ошибки предсказания одинаковы, то $AR(p)$ процесс можно записать в виде

$$x[n] = \tilde{x}^f[n] + u[n],$$

где $\tilde{x}^f[n]$ – оптимальное пошаговое линейное предсказание по предыдущим отсчетам. Полином $A_p^f(z)$, в котором коэффициенты являются коэффициентами линейного предсказания, должен иметь корни, находящиеся внутри единичного круга. Так как оба направления предсказания дают одинаковую статистическую информацию, статистики ошибок предсказания вперед и назад можно объединить и улучшить таким образом оценку AR коэффициентов. В модифицированном ковариационном методе для оценок коэффициентов линейного предсказания используется минимизация методом наименьших квадратов среднего арифметического дисперсий ошибок линейного предсказания вперед и назад $\sigma_{fb}^2 = \frac{1}{2}(\sigma_f^2 + \sigma_b^2)$ для всех коэффициентов предсказания. Этот метод обеспечивает получение статистически устойчивых оценок, однако фильтр может быть неустойчивым. Поэтому при вычислении прогноза необходимо проверять расположение корней полинома внутри единичной окружности [57] (Б. И. Шахтарин, В. А. Ковригин, 2005).

Вычисление оптимального порядка авторегрессии является важной задачей. При низком порядке модели получают сглаженные спектральные оценки, а при высоком – улучшается частотное разрешение, но появляются ложные пики на AR спектре, что ухудшает качество прогноза. Поэтому в качестве начальных значений порядка AR модели применялись информационный критерий Акаике [58] (S. M. Kay, 1988) и критерий длины минимального описания [59] (J. Rissanen, 1983). Однако для реальных квазигармонических зашумленных процессов критерии выбора порядка AR модели обычно дают заниженные значения [60] (T. J. Ulrych, R. W. Clayton, 1976). Далее строились несколько AR моделей разных порядков. Те значения порядков, при которых получались наиболее высокие пики на AR спектре, применялись в вычислении прогноза. В случае если ряды данных содержат, кроме полезных, еще и нерегулярные компоненты, при расчете линейного предсказания удобно применять разделение данных на сигнальные и шумовые компоненты с использованием алгоритма сингулярного разложения SVD (Singular Value Decomposition). Такой

подход во многих случаях улучшает качество прогноза и подробно рассматривается в работах [61] (D. Tufts, R. Kumaresan, 1982) и [62] (M. Uike et al., 1992). Полученные прогнозы изменения плотности потока на частоте 14.5 ГГц после 2011 г. сравнивались с данными независимых наблюдений из каталога MOJAVE [63] на частоте 15.4 ГГц. Результаты показали хорошее совпадение прогнозов с реальным изменением плотности потока излучения у исследуемых радиосточников. Среднее отклонение прогноза от наблюдательных данных составляет от ≈ 0.6 Ян (для источника BL Lac) до ≈ 6 Ян (для источника 3C 273). У остальных источников среднее отклонение $\approx 1 \div 2$ Ян. Направление изменения плотности потока излучения (рост или спад) у всех источников было предсказано правильно. На рис. 15 и 16 приведены несколько примеров полученных прогнозов для различных типов внегалактических радиосточников.

7. Выводы

В результате проделанной работы были обработаны 30 кривых изменения плотности потока излучения для 10 радиосточников из базы данных UMRAO на частотах 14.5, 8, 4.8 ГГц за интервал времени наблюдений более чем 40 лет с временным разрешением 0.02 года. Настоящая работа обобщает результаты предыдущих работ авторов [64, 65]. С применением вейвлет-анализа построен каталог значений квазипериодических составляющих переменности плотности потоков излучения исследуемых радиосточников, формирующих динамику их активности. Показано, что наблюдаемая переменность формируется с помощью сложения квазипериодических составляющих на различных временных масштабах.

У большинства источников для короткопериодической составляющей переменности характерно наличие изменения периодов со временем, что является одним из важных свойств исследуемых источников.

Такой подход позволил впервые построить прогнозы изменения плотностей потоков излучения для всех исследуемых радиосточников с учетом индивидуальных свойств их переменности на частоте 14.5 ГГц после окончания наблюдений UMRAO в 2011 г.

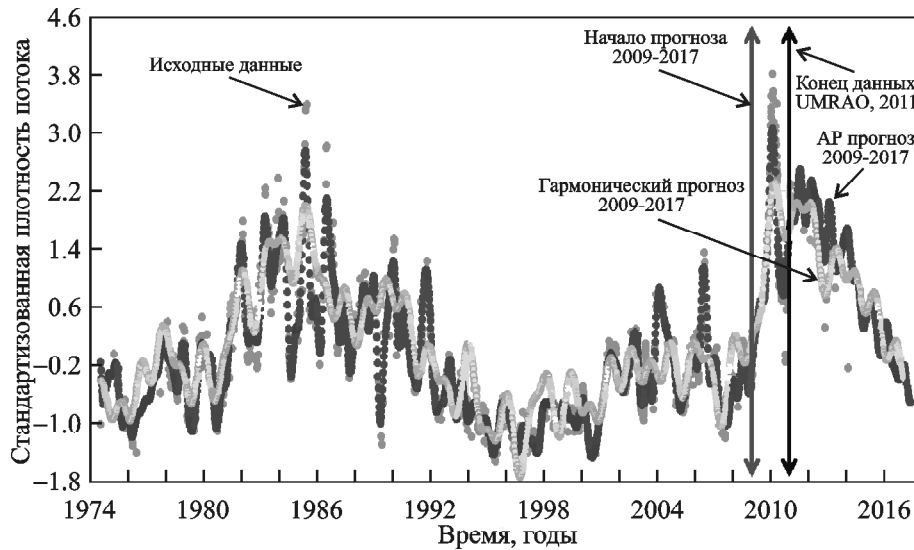


Рис. 15. Прогнозы для источника OJ 287 с 2009 по 2017 гг., полученные гармоническим и авторегрессионным (порядок 34) методами. Для источников, у которых устойчивые квазигармонические колебания плотности потока, оба метода дают близкие результаты

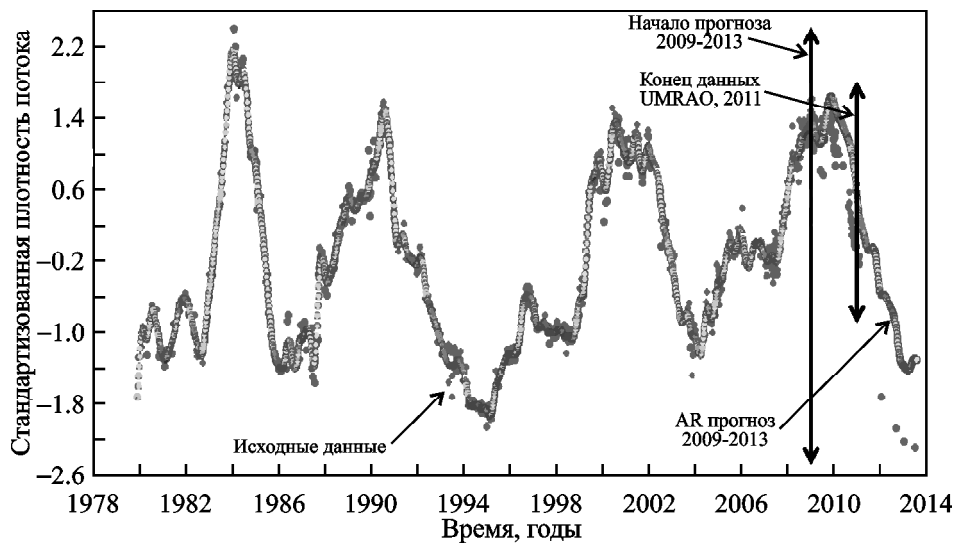


Рис. 16. Прогноз для источника 3C 446 с 2009 по 2013 гг., полученный авторегрессионным методом (порядок 22)

Так, для прогнозирования плотностей потоков излучения радиосисточников 3C 345, 3C 446, 3C 454.3, обладающих сложным характером переменности, применен только метод авторегрессионного линейного предсказания. Причиной применения данного метода является наличие значительного изменения амплитуды (3C 345), изменение главного периода (3C 446) и сложного проявления активности (3C 454.3). С учетом вышеуказанных факторов получен прогноз на интервале до $\approx 4 \div 5$ лет.

Для источников BL Lac, OJ 287, OT 081, обладающих быстрой переменностью, наиболее эффективно применение метода гармонического прогнозирования. Такой подход позволил получить прогноз продолжительностью $4 \div 9$ лет.

Для источников 3C 273, 3C 120, у которых первые изменения плотности потоков хорошо описываются суммой синусоид, также использован гармонический метод и получен прогноз длительностью до 16 лет.

Достоверность прогноза была подтверждена независимыми данными наблюдений в рамках программы MOJAVE за 2011–2015 гг.

Для источников DA 55 и СТА 102 на основе характерного квазисинусоидального изменения плотностей потоков можно предположить, что следующие максимумы пришлись на 2016 г. (DA 55) и 2012.6–2013 гг. (СТА 102). По данным MOJAVE в 2013 г. зафиксирован быстрый рост плотности потока излучения у источника DA 55, однако дальнейшие наблюдения отсутствуют. У источника СТА 102 наблюдаемый максимум плотности потока приходится на 2013 г., что соответствует прогнозу.

Таким образом, в некоторых особых случаях даже простая аппроксимация одной синусоидой может дать определенную информацию о дальнейшей эволюции плотностей потоков излучения внегалактических радиосточников. Возможность прогнозирования изменений плотности потока на основе данных полученного каталога является принципиально важной при планировании наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wenger M., Ochsenbein F., Egre D., Dubois P., Bonnarel F., Borde S., Genova F., Jasniewicz G., Laloë S., Lesteven S., and Monier R. The SIMBAD astronomical database. The CDS reference database for astronomical objects // *Astron. Astrophys. Suppl.* – 2000. – Vol. 143. – P. 9–22. DOI: 10.1051/aas:2000332
2. Комберг Б. В., Ренин С. В. Звездные острова Вселенной с релятивистскими “гейзерами” в центрах (Галактики на “рабочем столе”). – М.: Янус-К, 2014. – 312 с.
3. Rieger F. M. Periodic variability and binary black hole systems in blazars // *AIP Conf. Proc.* – 2005. – Vol. 745. – P. 487–492. DOI: 10.1063/1.1878450
4. De Vries W. H., Becker R. H., White R. L., and Loomis C. Structure Function Analysis of Long-Term Quasar Variability // *Astron. J.* – 2005. – Vol. 129, No. 2. – P. 615–629.
5. Cowperthwaite P. S. and Reynolds C. S. The Central Engine Structure Of 3C120: Evidence for a Retrograde Black Hole or a Refilling Accretion Disk // *Astrophys. J. Lett.* – 2012. – Vol. 752, No. 2. – id. L21. DOI: 10.1088/2041-8205/752/2/L21
6. Marscher A. P. Relativistic Jets in Active Galactic Nuclei // *AIP Conf. Proc.* – 2006. – Vol. 856. – P. 1–22. DOI: 10.1063/1.2356381
7. Mizuno Y., Lyubarsky Yu., Nishikawa K.-I., and Hardee P. E. Three-Dimensional Relativistic Magnetohydrodynamic Simulations of Current-Driven Instability. III. Rotating Relativistic Jets // *Astrophys. J.* – 2012. – Vol. 757, No. 1. – id. 16. DOI: 10.1088/0004-637X/757/1/16
8. King A. R., Pringle J. E., West R. G., and Livio M. Variability in black hole accretion discs // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2004. – Vol. 348, Is. 1. – P. 111–122. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2004.07322.x
9. Matsumoto R., Kato S., and Honma F. Chapter 16. Non-linear Pulsation in the Transonic Region of Geometrically Thin Accretion Disks / In: *Theory of Accretion Disks / F. Meyer, W. J. Duschl, J. Frank, and E. Meyer-Hofmeister*, eds. – Netherlands: Springer, 1989. – P. 167–172. DOI: 10.1007/978-94-009-1037-9_16
10. Fan J. H., Liu Y., Yuan Y. H., Wang H. G., Wang Y. X., Gupta A. C., Yang J. H., Li J., Zhou J. L., Xu S. X., Chen J. L., Liu F., and Li Y. Z. Radio variability properties of a sample of 168 radio sources: Periodicity analysis // *Chin. J. Astron. Astrophys.* – 2006. – Vol. 6, Suppl. 2. – P. 333–336.
11. Hovatta T., Lehto H. J., and Tornikoski M. Wavelet analysis of a large sample of AGN at high radio frequencies // *Astron. Astrophys.* – 2008. – Vol. 488, No. 3. – P. 897–903. DOI: 10.1051/0004-6361:200810200
12. Hughes P. A., Aller H. D., and Aller M. F. The University of Michigan radio astronomy data base. I - Structure function analysis and the relation between BL Lacertae objects and quasi-stellar objects // *Astrophys. J.* – 1992. – Vol. 396, No. 2. – P. 469–486. DOI: 10.1086/171734
13. Aller H. D., Aller M. F., Latimer G. E., and Hodge P. E. Spectra and Linear Polarizations of Extragalactic Variable Sources at Centimeter Wavelengths // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* – 1985. – Vol. 59. – P. 513–768. DOI: 10.1086/191083
14. Гайдышев И. Анализ и обработка данных: Специальный справочник. – СПб: Питер, 2001. – 752 с.
15. Давыдов А. В. Цифровая обработка сигналов: Тематические лекции. – Екатеринбург: УГГУ, ИГИГ, кафедра геоинформатики, 2007–2010.
16. Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в Matlab. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 448 с.
17. Божокин С. В. Непрерывное вейвлет-преобразование и точно решаемая модель нестационарных сигналов // *Журнал технической физики.* – 2012. – Т. 82, Вып. 7. – С. 8–13.
18. Mallat S. A. *Wavelet Tour of Signal Processing.* – San Diego, CA: Academic Press, 1998.
19. Torrence C. and Compo G. P. A practical guide to wavelet analysis // *Bul. Amer. Met. Soc.* – 1998. – Vol. 79, No. 1. – P. 61–78. DOI: 10.1175/1520-0477(1998)079<60061:apgtwa62>2.0.co;2
20. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // *Успехи физических наук.* – 1996. – Т. 166, № 11. – С. 1145–1170.
21. Александров Ф. И., Голяндина Н. Э. Автоматизация выделения трендовых и периодических составляющих временного ряда в рамках метода “Гусеница”-SSA // *Exponenta Pro. Математика в приложениях.* – 2004. – № 3–4. – С. 54–61.
22. Голяндина Н. Э. Метод “Гусеница”-SSA: анализ временных рядов (учебное пособие). – СПб.: Из-во Санкт-Петербургского университета, 2004. – 74 с.
23. Чистякова А. А., Шамша Б. В. Идентификация структуры нестационарного временного ряда при помощи метода сингулярного спектрального анализа // *Радио-*

- электронні і комп'ютерні системи. – 2011. – № 4 (52). – С. 105–111.
24. Шиманов С. Н., Цимбал В. А., Прасолов В. А., Франков С. В. Адаптивная цифровая фильтрация сигналов на фоне “белого” гауссовского шума на основе сингулярного разложения в линейных многообразиях // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Тула: Из-во ТулГУ, 2015. – Вып. 11. – С. 128–136.
 25. Abraham Z. and Romero G. E. Beaming and precession in the inner jet of 3C 273 // *Astron. Astrophys.* – 1999. – Vol. 344, No. 1. – P. 61–67.
 26. Bi Xiongwei, He Wanquan, Tian Jiajin, Zhang Qingyou, and Cai Qun. Analysis of Multi-Wavelength Variation Periods of the Quasar 3C 273 // *Astron. Res. Technol.* – 2012. – Vol. 9, No. 4. – P. 339–347.
 27. Mao Li-Sheng. A Possible Periodicity in the Radio Light Curves of 3C 120 // *Astron. Res. Technol.* – 2007. – Vol. 4, No. 4. – P. 307–312.
 28. Белоконь Е. Т. 3C 120: связь оптической переменности со сверхсветовыми компонентами миллисекундной радиоструктуры // *Астрофизика.* – 1987. – Т. 27, № 3. – С. 429–446.
 29. Вольвач А. Е., Кутькин А. М., Вольвач Л. Н., Ларионов М. Г., Лахтеенмаки А., Торникоски М., Ниеспола Е., Тамми Дж., Саволаинен П., Леон-Таварес Дж., Аллер М. Ф., Аллер Х. Д. Результаты долговременного мониторинга 3C 273 в широком диапазоне длин волн // *Астрономический журнал.* – 2013. – Т. 90, № 1. – С. 40–52.
 30. Dong Futong, Zhang Zuojing, Mao Lisheng, Zhang Xiong, Zheng Yonggang, and Tang Ling. Wavelet Analysis of the Variability Periodicity Data of Quasar 3C 345 // *Acta Astronomica Sinica.* – 2010. – Vol. 51, No. 2. – P. 117–126.
 31. Qian Shan-Jie, Witzel A., Zensus J. A., Krichbaum T. P., Britzen S., Zhang Xi-Zhen. Periodicity of the ejection of superluminal components in 3C 345 // *Res. Astron. Astrophys.* – 2009. – Vol. 9, Is. 2 – P. 137–150. DOI: 10.1088/1674-4527/9/2/003
 32. Klare J., Zensus J. A., Lobanov A. P., Ros E., Krichbaum T. P., and Witzel A. Quasi-Periodic Changes in the Parsec-Scale Jet of 3C 345 // *J. Romney and M. Reid, eds. In: Future Directions in High Resolution Astronomy: The 10th Anniversary of the VLBA, ASP: Conf. Proc.* – San Francisco, USA: Astronomical Society of the Pacific. – 2005. – Vol. 340. – P. 40.
 33. Бабаджанянц М. К., Белоконь Е. Т. Свойства оптической переменности квазара 3C 345 // *Астрофизика.* – 1984. – Т. 21, Вып. 2. – С. 217–232.
 34. Volvach A. E., Volvach L. N., Larionov M. G., Aller H. D., Aller M. F., Yurovskiy Yu. Yu., and Ryabov M. I. Flux density evolution of the sources 3C 273, 3C 279 and 3C 454.3 at the frequencies 102 MHz – 36.8 GHz // *Astron. Astrophys. Trans.* – 2006. – Vol. 25, No. 5–6. – P. 385–391. DOI: 10.1080/10556790601135059
 35. Qian Shan-Jie, Kudryavtseva N. A., Britzen S., Krichbaum T. P., Gao Long, Witzel A., Zensus J. A., Aller M. F., Aller H. D., and Zhang Xi-Zhen. A Possible Periodicity in the Radio Light Curves of 3C 454.3 // *Chinese J. Astron. Astrophys.* – 2006. – Vol. 7, No. 3. – P. 364–374. DOI: 10.1088/1009-9271/7/3/05
 36. Kelly B. C., Hughes P. A., Aller H. D., and Aller M. F. The Cross-Wavelet Transform and Analysis of Quasi-Periodic Behavior in the Pearson-Readhead VLBI Survey Sources // *Astrophys. J.* – 2003. – Vol. 591, No. 2. – P. 695–714. DOI: 10.1086/375511
 37. Weizhao Shi, Xiang Liu, and Huagang Song. A new model for the periodic outbursts of the BL Lac object OJ287 // *Astrophys. Space Sci.* – 2007. – Vol. 310, Is. 1. – P. 59–63. DOI: 10.1007/s10509-007-9413-z
 38. Hughes P. A., Aller H. D., and Aller M. F. Extraordinary Activity in the BL Lacertae Object OJ 287 // *Astrophys. J.* – 1998. – Vol. 503, No. 2. – P. 662–673. DOI: 10.1086/306014
 39. Ishida T., Fujisawa K., Kino M., and Niinuma K. A short-term flare on a time scale of 20 days in the BL Lac object OT 081 // In: 11th European VLBI Network Symposium & Users Meeting, Bordeaux, France, October 9-12, 2012; *Proc. symp. – Proceedings of Science.* – 2012. – id. 101.
 40. Humrickhouse C. and Webb J. R. Wavelet Analysis of Microvariability in Blazars 0716+714, ON231 and BL Lac // *Journal of the Southeastern Association for Research in Astronomy.* – 2008. – Vol. 2. – P. 23–29.
 41. Guo Y. C., Hu S. M., Xu C., Liu C. Y., Chen X., Guo D. F., Meng F. Y., Xu M. T., and Xu J. Q. Long-term optical and radio variability of BL Lacertae // *New Astron.* – 2015. – Vol. 36. – P. 9–18. DOI: 10.1016/j.newast.2014.09.011
 42. Kudryavtseva N. A. and Pyatunina T. B. A search for periodicity in the light curves of selected blazars // *Astron. Rep.* – 2006. – Vol. 50, Is. 1. – P. 1–11. DOI: 10.1134/S106377290601001X
 43. Barbieri C., Vio R., Cappellaro E., and Turrano M. The optical variability of the quasar 3C 446 // *Astrophys. J.* – 1990. – Vol. 359. – P. 63–66. DOI: 10.1086/169033
 44. Lomb N. R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data // *Astrophys. Space Sci.* – 1976. – Vol. 39, Is. 2. – P. 447–462. DOI: 10.1007/BF00648343
 45. Scargle J. D. Studies in astronomical time series analysis. II - Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // *Astrophys. J.* – 1982. – Vol. 263. – P. 835–853. DOI: 10.1086/160554
 46. Hao Jing Zhang, Gang Zhao, and Xiong Zhang. The periodicity of 3C 273's radio light curve at 15 GHz found by the wavelet method // *Science China Physics, Mechanics and Astronomy.* – 2010. – Vol. 53, Is. 1. – P. 252–255.
 47. Huai-Zhen Li, Guang-Zhong Xie, Shu-Bai Zhou, Hong-Tao Liu, Guang-Wei Cha, Li Ma, and Li-Sheng Mao. Periodicity Analysis of the Light Curve of 3C 454.3 // *Chin. J. Astron. Astrophys.* – 2006. – Vol. 6, No. 4. – P. 421–430. DOI: 10.1088/1009-9271/6/4/04
 48. Xu Yun-bing, Zhang Hao-Jing, and Wang Li-heng. A Study of the Light Curve Period of BL Lac OJ 287 // *Journal of Yunnan Normal University (Natural Sciences Edition).* – 2010. – Vol. 4. – P. 1–4.
 49. Zhang X., Xie G. Z., and Bai J. M. A historical light curve of 3C 345 and its periodic analysis // *Astron. Astrophys.* – 1998. – Vol. 330. – P. 469–473.
 50. Zhang Hao-Jing and Zhang Xiong. A study of the light curve periodic behavior of BL Lac object S5 0716+714 // *Acta Physica Sinica.* – 2007. – Vol. 56, Is. 7. – P. 4305–4311.
 51. Mordvinov A. V. Prediction of monthly indices of solar activity F10.7 on the basis of a multiplicative autoregres-

- sion model // *Byulletin Solnechnye Dannye Akademii Nauk USSR*. – 1986. – No. 1985/12. – P. 67–73.
52. Liu Si-Qing, Zhong Qiu-Zhen, Wen Jing, and Dou Xian-Kang. Modeling Research of the 27-day Forecast of 10.7 cm Solar Radio Flux (I) // *Chin. Astron. Astrophys.* – 2010. – Vol. 34, Is. 3. – P. 305–315. DOI:10.1016/j.chinastron.2010.07.006
 53. Kane R. P. and Trivedi N. B. Periodicities in sunspot numbers // *J. Geomagn. Geoelectricity*. – 1985. – Vol. 37, No. 12. – P. 1071–1085.
 54. Vaseghi Saeed V. Advanced digital signal processing and noise reduction. – Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd., 2006. – 480 p.
 55. Marple S. L. Digital spectral analysis with applications. – Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 1987. – 512 p.
 56. Makhoul J. Linear prediction: A tutorial review // *Proc. IEEE*. – 1975. – Vol. 63, Is. 4. – P. 561–580. DOI: 10.1109/PROC.1975.9792
 57. Шахтарин Б. И., Ковригин В. А. Методы спектрального оценивания случайных процессов. – М.: Гелиос АРВ, 2005. – 248 с.
 58. Kay S. M. Modern spectral estimation: Theory and application. – Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 1988. – 543 p.
 59. Rissanen J. A Universal Prior for Integers and Estimation by Minimum Description Length // *Ann. Statist.* – 1983. – Vol. 11, No. 2. – P. 416–431. DOI: 10.1214/aos/1176346150
 60. Urych T. J. and Clayton R. W. Time series modelling and maximum entropy // *Phys. Earth Planet. Inter.* – 1976. – Vol. 12, Iss. 2–3. – P. 188–200. DOI: 10.1016/0031-9201(76)90047-9
 61. Tufts D. and Kumaresan R. Singular value decomposition and improved frequency estimation using linear prediction // *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.* – 1982. – Vol. 30, Is. 4. – P. 671–675. DOI: 10.1109/TASSP.1982.1163927
 62. Uike M., Uchiyama T., and Minamitani H. Comparison of linear prediction methods based on singular value decomposition // *J. Magn. Reson.* – 1992. – Vol. 99, Is. 2. – P. 363–371. DOI: 10.1016/0022-2364(92)90188-D
 63. Lister M. L., Cohen M. H., Homan D. C., Kadler M., Kellermann K. I., Kovalev Y. Y., Ros E., Savolainen T., and Zensus J. A. MOJAVE: Monitoring of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. VI. Kinematics Analysis of a Complete Sample of Blazar Jets // *Astron. J.* – 2009. – Vol. 138, Is. 6. – P. 1874–1892. DOI: 10.1088/0004-6256/138/6/1874
 64. Сухарев А. Л., Рябов М. И., Донских А. И. Прогнозирование изменений плотности потока радиоизлучения внегалактических источников // *Астрофизика*. – 2016. – Т. 59, № 2. – С. 245–259.
 65. Donskykh G. I., Ryabov M. I., Sukharev A. L., and Aller M. Using the methods of wavelet analysis and singular spectrum analysis in the study of radio source BL Lac // *Odesa Astronomical Publications*. – 2014. – Vol. 27, Is. 1. – P. 69–70.
 2000. The SIMBAD astronomical database. The CDS reference database for astronomical objects. *Astron. Astrophys. Suppl.* vol. 143, pp. 9–22. DOI: 10.1051/aas:2000332
 2. KOMBERG, B. V. and REPIN, S. V., 2014. Universe star islands with relativistic “geysers” in the centers (Galaxy on “desktop”). Moscow: Yanus-K Publ. (in Russian).
 3. RIEGER F. M., 2005. Periodic variability and binary black hole systems in blazars. *AIP Conf. Proc.* vol. 745, pp. 487–492. DOI: 10.1063/1.1878450
 4. DE VRIES, W. H., BECKER, R. H., WHITE R. L. and LOOMIS, C., 2005. Structure Function Analysis of Long-Term Quasar Variability. *Astron. J.* vol. 129, no. 2, pp. 615–629.
 5. COWPERTHWAIT, P. S. and REYNOLDS, C. S., 2012. The Central Engine Structure of 3C120: Evidence for a Retrograde Black Hole or a Refilling Accretion Disk. *Astrophys. J. Lett.* vol. 752, no. 2, id. L21. DOI: 10.1088/2041-8205/752/2/L21
 6. MARSCHER, A. P., 2006. Relativistic Jets in Active Galactic Nuclei. *AIP Conf. Proc.* vol. 856, pp. 1–22. DOI: 10.1063/1.2356381
 7. MIZUNO, Y., LYUBARSKY, Yu., NISHIKAWA, K.-I. and HARDEE, P. E., 2012. Three-Dimensional Relativistic Magnetohydrodynamic Simulations of Current-Driven Instability. III. Rotating Relativistic Jets. *Astrophys. J.* vol. 757, no. 1, id. 16. DOI: 10.1088/0004-637X/757/1/16
 8. KING, A. R., PRINGLE, J. E., WEST, R. G. and LIVIO M., 2004. Variability in black hole accretion discs. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 348, is. 1, pp. 111–122. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2004.07322.x
 9. MATSUMOTO, R., KATO, S., and HONMA, F., 1989. Chapter 16. Nonlinear Pulsation in the Transonic Region of Geometrically Thin Accretion Disks. In: F. MEYER, W. J. DUSCHL, J. FRANK, and E. MEYER-HOFMEISTER, eds. *Theory of Accretion Disks*. Netherlands: Springer, pp. 167–172. DOI: 10.1007/978-94-009-1037-9_16
 10. FAN, J. H., LIU, Y., YUAN, Y. H., WANG, H. G., WANG, Y. X., GUPTA, A. C., YANG, J. H., LI, J., ZHOU, J. L., XU, S. X., CHEN, J. L., LIU, F. and LI, Y. Z., 2006. Radio variability properties of a sample of 168 radio sources: Periodicity analysis. *Chin. J. Astron. Astrophys.* vol. 6, suppl. 2, pp. 333–336.
 11. HOVATTA, T., LEHTO, H. J. and TORNIKOSKI, M., 2008. Wavelet analysis of a large sample of AGN at high radio frequencies. *Astron. Astrophys.* vol. 488, no. 3, pp. 897–903. DOI: 10.1051/0004-6361:200810200
 12. HUGHES, P. A., ALLER, H. D. and ALLER, M. F., 1992. The University of Michigan radio astronomy data base. I - Structure function analysis and the relation between BL Lacertae objects and quasi-stellar objects. *Astrophys. J.* vol. 396, No. 2, pp. 469–486. DOI: 10.1086/171734
 13. ALLER, H. D., ALLER, M. F., LATIMER, G. E. and HODGE, P. E., 1985. Spectra and Linear Polarizations of Extragalactic Variable Sources at Centimeter Wavelengths. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* vol. 59, pp. 513–768. DOI: 10.1086/191083
 14. GAYDYSHEV, I., 2001. *Data processing and analysis: Special handbook*. St. Petersburg: Piter Publ. (in Russian).
 15. DAVYDOV, A. V., 2007-2010. *Digital Signal Processing: Thematic lectures*. Yekaterinburg: Ural State Mining University, Department of Geoinformatics (in Russian).

REFERENCES

1. WENGER, M., OCHSENBEIN, F., EGRE, D., DUBOIS, P., BONNAREL, F., BORDE, S., GENOVA, F., JASNIEWICZ, G., LALOË, S., LESTEVEN, S. and MONIER, R.,

16. SMOLENTSEV, N. K., 2008. *Wavelet Theory Fundamentals. Wavelets in Matlab*. Moscow: DMK Press Publ. (in Russian).
17. BOZHOKIN, S. V., 2012. Continuous wavelet transform and exactly solvable model of nonstationary signals. *Tech. Phys.* vol. 57, is. 7, pp. 900–906.
18. MALLAT, S. A., 1998. *Wavelet Tour of Signal Processing*. San Diego, CA: Academic Press.
19. TORRENCE, C. and COMPO, G. P., 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bul. Amer. Met. Soc.* vol. 79, no. 1, pp. 61–78. DOI: 10.1175/1520-0477(1998)07960;0061:apgtwa62;2.0.co;2
20. ASTAFIEVA, N. M., 1996. Wavelet analysis: basic theory and some applications. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk.* vol. 166, no. 11, pp. 1145–1170 (in Russian).
21. ALEXANDROV, F. I. and GOLYANDINA, N. E., 2004. The automatic extraction of time series trend and periodical components with the help of the “Caterpillar”-SSA approach. *Exponenta Pro. Mathematics in applications.* no. 3–4, pp. 54–61 (in Russian).
22. GOLYANDINA, N. E., 2004. *The “Caterpillar”-SSA method: time series analysis (User manual)*. St. Petersburg: St. Petersburg University Publ. (in Russian).
23. CHISTYAKOVA, A. A. and SHAMSHA, B. V., 2011. Identification of the structure of nonstationary time series with the singular spectrum analysis method. *Radioelektronik and computer systems.* vol. 4 (52), pp. 105–111. (in Russian).
24. SHIMANOV, S. N., TSYMBAL, V. A., PRASOLOV, V. A. and FRANKOV, S. V., 2015. Adaptive digital filtering of signals against white Gaussian noise based on singular expansion in linear manifolds. In: *Izvestija Tuls'kogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. Tula, Russia: Publishing house of TULGU. vol. 11, pp. 128–136 (in Russian).
25. ABRAHAM, Z. and ROMERO, G. E., 1999. Beaming and precession in the inner jet of 3C 273. *Astron. Astrophys.* vol. 344, no. 1, pp. 61–67.
26. BI XIONGWEI, HE WANQUAN, TIAN JIAJIN, ZHANG QINGYOU and CAI QUN, 2012. Analysis of Multi-Wavelength Variation Periods of the Quasar 3C 273. *Astron. Res. Technol.* vol. 9, no. 4, pp. 339–347.
27. MAO LI-SHENG, 2007. A Possible Periodicity in the Radio Light Curves of 3C 120. *Astron. Res. Technol.* vol. 4, no. 4, pp. 307–312.
28. BELOKON', E. T., 1987. 3C 120: Connection between the optical variability and superluminal components of the millisecond radio structure. *Astrophysics.* vol. 27, no. 3, pp. 588–598. DOI: 10.1007/BF01012448
29. VOL'VACH, A. E., KUTKIN, A. M., VOL'VACH, L. N., LARIONOV, M. G., LAKHTEENMAKI, A., TORNIKOSKI, M., NIEPPOLA, E., TAMMI, J., SAVOLAINEN, P., LEON-TAVARES, J., ALLER, M. F. and ALLER, H. D., 2013. Results of long-term monitoring of 3C 273 over a wide range of wavelengths. *Astron. Rep.* vol. 57, no. 1, pp. 34–45. DOI: 10.1134/S1063772912050083
30. DONG FUTONG, ZHANG ZUOJING, MAO LISHENG, ZHANG XIONG, ZHENG YONGGANG and TANG LING, 2010. Wavelet Analysis of the Variability Periodicity Data of Quasar 3C 345. *Acta Astronomica Sinica.* vol. 51, no. 2, pp. 117–126.
31. QIAN SHAN-JIE, WITZEL, A., ZENSUS, J. A., KRICHBAUM, T. P., BRITZEN, S. and ZHANG XI-ZHEN, 2009. Periodicity of the ejection of superluminal components in 3C 345. *Res. Astron. Astrophys.* vol. 9, is. 2, pp. 137–150. DOI: 10.1088/1674-4527/9/2/003
32. KLARE, J., ZENSUS, J. A., LOBANOV, A. P., ROS, E., KRICHBAUM, T. P. and WITZEL, A., 2005. Quasi-Periodic Changes in the Parsec-Scale Jet of 3C 345. In: *J. ROMNEY and M. REID, eds. Future Directions in High Resolution Astronomy: The 10th Anniversary of the VLBA, ASP: Conf. Proc.* San Francisco, USA: Astronomical Society of the Pacific. vol. 340. pp. 40.
33. BABADZHANYANTS, M. K. and BELOKON', E. T., 1984. Properties of optical variability of the quasar 3C 345. *Astrophysics.* vol. 21, is. 2, pp. 461–469. DOI: 10.1007/BF01813647.
34. VOLVACH, A. E., VOLVACH, L. N., LARIONOV, M. G., ALLER, H. D., ALLER, M. F., YUROVSKIY, Yu. Yu. and RYABOV, M. I., 2006. Flux density evolution of the sources 3C 273, 3C 279 and 3C 454.3 at the frequencies 102 MHz – 36.8 GHz. *Astron. Astrophys. Trans.* vol. 25, no. 5–6, pp. 385–391. DOI: 10.1080/10556790601135059
35. QIAN SHAN-JIE, KUDRYAVTSEVA, N. A., BRITZEN, S., KRICHBAUM, T. P., GAO LONG, WITZEL, A., ZENSUS, J. A., ALLER, M. F., ALLER H. D. and ZHANG XI-ZHEN, 2006. A Possible Periodicity in the Radio Light Curves of 3C 454.3. *Chinese J. Astron. Astrophys.* vol. 7, no. 3, pp. 364–374. DOI: 10.1088/1009-9271/7/3/05
36. KELLY, B. C., HUGHES, P. A., ALLER, H. D. and ALLER, M. F., 2003. The Cross-Wavelet Transform and Analysis of Quasi-periodic Behavior in the Pearson-Readhead VLBI Survey Sources. *Astrophys. J.* vol. 591, no. 2, pp. 695–714. DOI: 10.1086/375511
37. WEIZHAO SHI, XIANG LIU and HUAGANG SONG, 2007. A new model for the periodic outbursts of the BL Lac object OJ287. *Astrophys. Space Sci.* vol. 310, is. 1, pp. 59–63. DOI: 10.1007/s10509-007-9413-z
38. HUGHES, P. A., ALLER, H. D. and ALLER, M. F., 1998. Extraordinary Activity in the BL Lacertae Object OJ 287. *Astrophys. J.* vol. 503, no. 2, pp. 662–673. DOI: 10.1086/306014
39. ISHIDA, T., FUJISAWA, K., KINO, M. and NIINUMA, K., 2012. A short-term flare on a time scale of 20 days in the BL Lac object OT 081. In: *11th European VLBI Network Symposium & Users Meeting, Bordeaux, France, October 9-12: Symp. Proc.* id. 101.
40. HUMRICKHOUSE, C. and WEBB, J. R., 2008. Wavelet Analysis of Microvariability in Blazars 0716+714, ON231 and BL Lac. *Journal of the Southeastern Association for Research in Astronomy.* vol. 2, pp. 23–29.
41. GUO, Y. C., HU, S. M., XU, C., LIU, C. Y., CHEN, X., GUO, D. F., MENG, F. Y., XU, M. T. and XU, J. Q., 2015. Long-term optical and radio variability of BL Lacertae. *New Astron.* vol. 36, pp. 9–18. DOI: 10.1016/j.newast.2014.09.011
42. KUDRYAVTSEVA, N. A. and PYATUNINA, T. B., 2006. A search for periodicity in the light curves of selected blazars. *Astron. Rep.* vol. 50, is. 1, pp. 1–11. DOI: 10.1134/S106377290601001X
43. BARBIERI, C., VIO, R., CAPPELLARO, E. and TURRANO, M., 1990. The optical variability of the quasar 3C 446. *Astrophys. J.* vol. 359. pp. 63–66. DOI: 10.1086/169033

44. LOMB, N. R., 1976. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophys. Space Sci.* vol. 39, is. 2, pp. 447–462. DOI: 10.1007/BF00648343
45. SCARGLE, J. D., 1982. Studies in astronomical time series analysis. II - Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *Astrophys. J.* vol. 263, pp. 835–853. DOI: 10.1086/160554
46. HAO JING ZHANG, GANG ZHAO and XIONG ZHANG, 2010. The periodicity of 3C 273's radio light curve at 15 GHz found by the wavelet method. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy.* vol. 53, is. 1, pp. 252–255.
47. HUAI-ZHEN LI, GUANG-ZHONG XIE, SHU-BAI ZHOU, HONG-TAO LIU, GUANG-WEI CHA, LI MA and LI-SHENG MAO, 2006. Periodicity Analysis of the Light Curve of 3C 454.3. *Chin. J. Astron. Astrophys.* vol. 6, no. 4, pp. 421–430. DOI: 10.1088/1009-9271/6/4/04
48. XU YUN-BING, ZHANG HAO-JING and WANG LI-HENG, 2010. A Study of the Light Curve Period of BL Lac OJ 287. *Journal of Yunnan Normal University (Natural Sciences Edition).* vol. 4, pp. 1–4.
49. ZHANG, X., XIE, G. Z. and BAI, J. M., 1998. A historical light curve of 3C 345 and its periodic analysis. *Astron. Astrophys.* vol. 330, pp. 469–473.
50. ZHANG HAO-JING and ZHANG XIONG, 2007. A study of the light curve periodic behavior of BL Lac object S5 0716+714. *Acta Physica Sinica.* vol. 56, is. 7, pp. 4305–4311.
51. MORDVINOV, A. V., 1986. Prediction of monthly indices of solar activity F10.7 on the basis of a multiplicative autoregression model. *Byulletin Solnechnye Dannye Akademii Nauk USSR.* no. 1985/12, pp. 67–73.
52. LIU SI-QING, ZHONG QIU-ZHEN, WEN JING and DOU XIAN-KANG, 2010. Modeling Research of the 27-day Forecast of 10.7 cm Solar Radio Flux (I). *Chin. Astron. Astrophys.* vol. 34, is. 3, pp. 305–315. DOI:10.1016/j.chinastron.2010.07.006
53. KANE, R. P. and TRIVEDI, N. B., 1985. Periodicities in sunspot numbers. *J. Geomagn. Geoelectricity.* vol. 37, no. 12, pp. 1071–1085.
54. VASEGHI SAEED, V., 2006. *Advanced digital signal processing and noise reduction.* Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd.
55. MARPLE, S. L., 1987. *Digital spectral analysis with applications.* Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc.
56. MAKHOUL, J., 1975. Linear prediction: A tutorial review. *Proc. IEEE.* vol. 63, is. 4, pp. 561–580. DOI: 10.1109/PROC.1975.9792
57. SHAKHTARIN, B. I. and KOVRIGIN, V. A., 2005. *Methods of spectral estimation of random processes.* Moscow: Gelios ARV. (in Russian).
58. KAY, S. M., 1988. *Modern spectral estimation: Theory and application.* Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc.
59. RISSANEN, J., 1983. A Universal Prior for Integers and Estimation by Minimum Description Length. *Ann. Statist.* vol. 11, no. 2, pp. 416–431. DOI: 10.1214/aos/1176346150
60. ULRYCH, T. J. and CLAYTON, R. W., 1976. Time series modelling and maximum entropy. *Phys. Earth Planet. Inter.* vol. 12, iss. 2–3, pp. 188–200. DOI: 10.1016/0031-9201(76)90047-9
61. TUFTS, D. and KUMARESAN, R., 1982. Singular value decomposition and improved frequency estimation using linear prediction. *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.* vol. 30, is. 4, pp. 671–675. DOI: 10.1109/TASSP.1982.1163927
62. UIKE, M., UCHIYAMA, T. and MINAMITANI, H., 1992. Comparison of linear prediction methods based on singular value decomposition. *J. Magn. Reson.* vol. 99, is. 2, pp. 363–371. DOI: 10.1016/0022-2364(92)90188-D
63. LISTER, M. L., COHEN, M. H., HOMAN, D. C., KADLER, M., KELLERMANN, K. I., KOVALEV, Y. Y., ROS, E., SAVOLAINEN, T. and ZENSUS, J. A., 2009. MOJAVE: Monitoring of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. VI. Kinematics Analysis of a Complete Sample of Blazar Jets. *Astron. J.* vol. 138, is. 6, pp. 1874–1892. DOI: 10.1088/0004-6256/138/6/1874
64. SUKHAREV, A. L., RYABOV, M. I. and DONSKIKH, G. I., 2016. Predicting Changes in the Radio Emission Fluxes of Extragalactic Sources. *Astrophysics.* vol. 59, no. 2, pp. 213–226. DOI: 10.1007/s10511-016-9428-7
65. DONSKYKH, G. I., RYABOV, M. I., SUKHAREV, A. L. and ALLER, M., 2014. Using the methods of wavelet analysis and singular spectrum analysis in the study of radio source BL Lac. *Odesa Astronomical Publications.* vol. 27, is. 1, pp. 69–70.

M. I. Ryabov¹, A. L. Sukharev¹, and H. I. Donskykh²

¹Observatory “URAN-4”, Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, Pushkinska St., 37, Odesa, 65011, Ukraine

²Astronomical Observatory, Odesa I. I. Mechnikov National University, Marazlievska St., 1 v, (Shevchenko Park), Odesa, 65014, Ukraine

CATALOG OF VARIABILITY PERIODS OF EXTRAGALACTIC RADIO SOURCES AT CENTIMETER WAVELENGTHS

Purpose: Study of the variability of flux density of extragalactic radio sources (3C 273, 3C 120, 3C 345, 3C 446, 3C 454.3, OJ 287, OT 081, BL Lac, DA 55, CTA 102) according to a long-term (1965–2011) monitoring at 14.5, 8, 4.8 GHz made with a 26-m telescope of the University of Michigan. Making up a catalog of quasi-periods values and their properties, as well as using this latter to predict the flux changes after 2011 at 14.5 GHz.

Design/methodology/approach: Using wavelet analysis, band-pass filtering and singular spectrum analysis (Caterpillar-SSA) the information is obtained on the values and properties of quasi-periods of radio flux density change, separately for the long-term and short-term variability components. Using these values, for the first time the forecasting with the two methods – harmonic and autoregressive linear prediction, has been made.

Findings: The catalog of quasi-periodic components of flux density variability is compiled for 10 radio sources, forming dynamics of their activity. The variability of extragalactic radio sources is shown to be formed by adding the quasi-periodic components on different time scales. The results of forecasts showed good compliance with real observations from MOJAVE database. Autoregression method is preferred for a short-term forecasting of flux density changes for radio sources with complex processes of variability.

Conclusions: Presented values and properties of quasi-periods are designed to build theoretical models of short-term and long-term variabilities of extragalactic radio sources. The ability to predict changes in flux density of extragalactic radio sources using their variability data enables efficient planning of observation programs.

Key words: extragalactic radio sources, quasi-period, variability of radio emission, wavelet analysis, Caterpillar-SSA, forecast

М. І. Рябов¹, А. Л. Сухарев¹, Г. І. Донських²

¹ Обсерваторія “УРАН-4”, Радіоастрономічний інститут НАН України,
вул. Пушкінська, 37, м. Одеса, 65011, Україна

² Астрономічна обсерваторія, Одеський національний університет ім. І. І. Мечникова,
вул. Маразлієвська, 1 в, (парк Т. Г. Шевченка),
м. Одеса, 65014, Україна

КАТАЛОГ ПЕРІОДІВ ЗМІННОСТІ ПОЗАГАЛАКТИЧНИХ РАДІОДЖЕРЕЛ У САНТИМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ ДОВЖИН ХВИЛЬ

Предмет і мета роботи: Досліджується змінність щільностей потоків випромінювання позагалактичних радіоджерел (3С 273, 3С 120, 3С 345, 3С 446, 3С 454.3, ОJ 287, OT 081, BL Lac, DA 55, СТА 102) за даними багаторічного (1965–2011 рр.) моніторингу на частотах 14.5, 8, 4.8 ГГц, виконаного на 26-метровому телескопі Мічиганського університету (UMRAO). Метою роботи є складання каталогу значень і властивостей квазіперіодів зміни щільностей потоків радіовипромінювання досліджуваних радіоджерел,

а також прогнозування на його основі змін щільності потоку досліджуваних радіоджерел після 2011 року на частоті 14.5 ГГц.

Методи і методологія: З застосуванням вейвлет-аналізу, смугової фільтрації та аналізу сингулярного спектру (“Тусениця”-SSA) отримано інформацію про значення та властивості квазіперіодів зміни щільностей потоків радіовипромінювання окремо для довготривалої та швидкої складових змінності. З використанням цих значень вперше виконано прогнозування двома методами: гармонійним методом та методом авторегресійного лінійного передбачення.

Результати: Побудовано каталог квазіперіодичних складових змінностей щільності потоків 10 радіоджерел, які віддзеркалюють динаміку їх активності. Показано, що змінність позагалактичних радіоджерел формується за рахунок додавання квазіперіодичних складових на різних часових масштабах. Отримані результати прогнозів показали добру відповідність реальним спостереженням з бази даних MOJAVE. Авторегресійний метод є кращим для короткострокового прогнозування зміни щільностей потоків у радіоджерел зі складним характером змінності.

Висновок: Надані значення і властивості квазіперіодів призначені для побудови теоретичних моделей швидкої та довготривалої змінності позагалактичних радіоджерел. Можливість прогнозування щільності потоків позагалактичних радіоджерел на основі даних щодо їх змінності дозволяє здійснювати ефективне планування програм спостережень.

Ключові слова: позагалактичні радіоджерела, квазіперіод, змінність радіовипромінювання, вейвлет-аналіз, “Тусениця”-SSA, прогноз

Статья поступила в редакцию 12.07.2016