

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

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

Поступила 2 марта 2016

Принята к печати 23 марта 2016

На основе данных долговременного мониторинга, на 26-м радиотелескопе Мичиганского университета на частоте 14.5 ГГц (1974-2011 гг.) проведен прогноз изменений плотности потока радиоизлучения внегалактических источников 3C273, 3C120, 3C345, 3C446, 3C454.3, OJ287, OT081, BLLac. В основе прогнозирования использованы данные об основных периодах переменности и времени их существования, полученные методом вейвлет анализа. Для прогнозирования плотности потоков радиоисточников 3C345, 3C446, 3C454.3, обладающих сложным характером переменности, применен метод авторегрессионного линейного предсказания. В результате получен прогноз изменений плотности потока продолжительностью до 5 лет. Для другой группы источников, BLLac, OJ287, OT081, обладающих быстрой переменностью, применен метод гармонического прогнозирования. Этот подход позволил получить прогноз продолжительностью 4-9 лет. Для источников 3C273, 3C120, содержащих устойчивые длительные периоды, также использован гармонический метод и получен прогноз длительностью до 16 лет. Достоверность прогноза была подтверждена независимыми данными наблюдений программы MOJAVE за 2011-2015 годы.

Ключевые слова: *блазар; переменность радиоизлучения; прогноз; авторегрессия; вейвлет; Фурье анализ*

1. **Введение.** Изучение долговременной переменности потоков излучения внегалактических радиоисточников является эффективным инструментом для понимания их физической структуры и процессов, генерирующих эту переменность. Из обширной базы данных мониторинга потоков обсерватории UMRAO применялись данные о восьми наиболее исследуемых внегалактических объектах с незначительными разрывами в данных. Радиоисточники 3C345, 3C454.3 относятся к классу квазаров. 3C120, 3C273 - сейфертовские галактики первого типа. 3C446, BLLac, OJ287, OT081 - объекты типа BLLac (лацертиды), для которых характерны быстрые (от нескольких часов до нескольких лет) и значительные изменения плотности потока во всех диапазонах электромагнитного спектра [1]. В переменности исследуемых радиоисточников наблюдаются квазипериодические изменения (не строгие периодичности) с характерными временами от года и меньше до нескольких лет. В дальнейшем, для краткости будет использоваться термин "период". Задача прогноза плотности потоков на основе периодов их изменения изучалась в ряде работ. Для 3C273 попытка спрогнозировать изменение плотности потока на частоте 15 ГГц

описана в работе [2]. С использованием вейвлет анализа определен период 8.1 года и делается предположение о радиовспышке в октябре 2014г. По данным MOJAVE в 2014г. было слабое повышение потока до ≈ 13.5 Ян, гораздо меньшее, чем у предыдущих вспышек (по данным UMRAO) 1992г. (≈ 53 Ян), 1999г. (≈ 49 Ян) и 2008г. (≈ 32 Ян). В работе [3] у источника 3C454.3 определены периоды 6.1 и 1.5 года на частотах 22 и 37 ГГц. Делается предположение о радиовспышке в марте или апреле 2006г. У источника OJ287 в оптическом диапазоне найдены периоды 13.5 и 7 лет и на их основе делается предположение о следующем максимуме осенью 2020г. [4]. У источника 3C 345 в оптическом диапазоне найдены периоды 10.1 и 21.8 лет на основании чего делается прогноз следующей вспышки в январе 2002г. [5]. По другим источникам, рассматриваемым в данной работе, результаты по прогнозированию не публиковались.

Физические процессы, которые могут обеспечивать наблюдаемую переменность, довольно разнообразны. Из наиболее популярных моделей долговременной переменности это прецессия аккреционного диска и, соответственно, джета, что в свою очередь может быть вызвано наличием второй черной дыры - спутника [6]. Также долговременная переменность внегалактических радиоисточников часто объясняется нестабильностью аккреционного диска, а также его возможным частичным разрушением [7,8]. Быстрая переменность радиоизлучения может быть объяснена ударными волнами, распространяющимися в джете [9], вращением внутренних частей джета [10], а также процессом магнитного динамо и пульсациями в аккреционном диске [11,12].

2. Исходные данные и методика обработки. Исходные данные на частоте 14.5 ГГц получены на 26-м радиотелескопе Мичиганского университета [13]. Методика получения и обработки данных на RT-26 описана в работе [14]. Средний интервал времени между отсчетами ≈ 7 дней. При подготовке данных к анализу применялись стандартные процедуры сглаживания (скользящее среднее), вычитания трендов (полиномы 1-3 степени) и получения равномерных отсчетов по времени (Фурье интерполяция) с интервалом 0.02 года (по гистограмме распределения временных разностей точек данных) [15,16]. Сглаживание и вычитание тренда уменьшает частотное рассеяние в периодограмме и подавление значимых пиков, периодом, близким к длине исследуемого ряда. Методы исследования аperiodических и квазипериодических временных рядов подробно рассмотрены в обзоре [17]. Для поиска периодов в работе использовался метод периодограммы Ломба-Скаргла [18,19]. На периодограмму наносились уровни значимости пиков 50-99.9%. 99.9% уровень показывает, что только 1 из 1000 отдельных наборов случайного шума сможет создать спектральный максимум, достигающий этого уровня. Так как переменность радиоисточников представляет сложные, нестационарные

процессы, в работе использовался непрерывный вейвлет анализ на основе функции Морле, наиболее полным образом удовлетворяющей поставленной задаче. Это позволило выделить отдельные гармонические компоненты, проследить их изменение со временем и продолжительность существования [20]. Уровни значимости максимумов вейвлет спектра наносились в виде цветовых градиентов от 10-50% до 99-99.9%. Поскольку при вычислении непрерывного вейвлет спектра используется быстрое преобразование Фурье, на краях спектра могут появляться искажения. Для их учета на график наносились уровни конуса влияния, указывающие области спектра, где возможны краевые искажения (обычно на низких частотах) [21]. Подтверждение, что выделяемые фильтрацией короткопериодические колебания не являются шумовыми компонентами, выполнялось проверкой нормальности несколькими методами (модифицированные критерии Колмогорова и Смирнова, критерий Крамера-Мизеса) [15].

3. *Методы построения прогнозов.* Поскольку в кривых изменения плотности потока радиоисточников наблюдаются различные проявления переменности, подобрать единый, универсальный метод для прогноза не удастся. Если 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, периодограмма Ломба-Скаргла используется для оценки значений частоты и количества синусоидальных 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 [22].

В случае сложной переменности, более эффективным является метод линейного предсказания на основе авторегрессионной модели временного ряда (подробное изложение в [23]). Для определения коэффициентов модели производится минимизация ошибки линейного предсказания временного ряда. Пусть сигнал $\{x(k)\}$ пропускается через нерекурсивный фильтр с коэффициентами $\{1, -b_1, -b_2, \dots, -b_N\}$. Взвешенная сумма предыдущих отсчетов входного сигнала называется линейным предсказанием следующего входного отсчета. Выходной сигнал фильтра (разность между реальным и предсказанным значением отсчета) будет ошибкой предсказания. Коэффициенты фильтра, который минимизирует дисперсию ошибки предсказания, совпадают с коэффициентами авторегрессионной модели сигнала. Ошибка предсказания записывается в виде $y(k) = x(k) - \sum_{m=1}^N b_m x(k-m)$. Нужно найти коэффициенты b_m , которые дадут минимальное среднеквадратическое значение $y(k)$. Для этого надо решить систему линейных уравнений $\sum_{m=1}^N b_m R_x(m-k) = R_x(k)$, $k = 1, 2, \dots, N$. В матричном виде эта

формула запишется как $R_x b = p$, где R_x - корреляционная матрица сигнала $\{x(k)\}$, b - столбец коэффициентов b_m , p - столбец значений корреляционной функции $R_x(k)$ для k от 1 до N . Тогда искомое решение $b = R_x^{-1} p$. Минимально возможное значение среднего квадрата ошибки предсказания: $(\sigma_y^2)_{\min} = \sigma_x^2 - p^T R_x^{-1} p$, где $\sigma_x^2 = R_x(0)$, верхний символ T - операция транспонирования. В приведенных формулах предполагается, что исходный сигнал вещественный [24]. На практике вместо реальной корреляционной функции, для минимизации ошибки предсказания, используются ее оценки, полученные с помощью временного усреднения. В работе использовался модифицированный ковариационный метод [25]. Он обеспечивает отсутствие расщепления пиков на авторегрессионном (АР) спектре, и их смещения при анализе набора зашумленных синусоид (в отличие от популярных АР методов Юла-Уолкера и Берга). Этот метод дает хорошие результаты, когда на АР спектре сигнала есть четкие максимумы. Модификация для разделения сигнальных и шумовых компонентов временного ряда алгоритмом сингулярного разложения SVD (Singular Value Decomposition) обеспечивает хорошие результаты, когда кроме шума в наборе синусоид присутствуют нерегулярные компоненты.

Существуют методы автоматического выбора порядка модели. Самый широко применяемый - информационный критерий Акаике (ИКА) [26] и его модифицированный вариант - длина минимального описания (ДМО) [27], которые записываются в виде: $\text{ИКА} = N \log(\text{SSE}) + 2p$; $\text{ДМО} = N \log(\text{SSE}) + p \log(N)$, где N - длина ряда данных, p - порядок модели, SSE - нормализованная ошибка модели. Обычно эти критерии дают близкие результаты. Однако для реальных квазигармонических зашумленных процессов критерии выбора порядка АР модели являются первым приближением [28]. Далее порядок модели уточняется по виду АР спектров нескольких моделей (при подходящем значении спектральные пики имеют большую высоту). В работе [29] показано, что при использовании модифицированного ковариационного метода для коротких рядов хорошие результаты дает выбор порядка модели в интервале $N/3 - N/2$.

Для расчета прогнозов использовались сглаженные и интерполированные данные. По результатам исследования периодичности выборку радиоисточников можно разделить на три группы. Радиоисточники 3С345, 3С446, 3С454.3 имеют особенности, которые усложняют прогнозирование гармоническим методом. У источника 3С345 сильное изменение амплитуды колебаний, а также периодов быстропеременной составляющей. Главный период источника 3С446 значительно изменяется со временем. У источника 3С454.3 наблюдается смена режима переменности после 1996г., с переходом в фазу минимума плотности потока и быстрыми его изменениями. Поэтому в таких условиях для прогнозирования использовался только авторегрес-

сионный метод. У источников BLLac, OJ287, OT081 отличительной особенностью является быстрая переменность плотности потока. К ним применялись как гармонический, так и авторегрессионный методы прогноза. Колебания плотности потоков у источников 3C273, 3C120 содержат устойчивые длительные периоды и хорошо описываются суммой синусоид. Для них гармонический метод прогноза показал наилучшие результаты. Прогноз сравнивался с независимыми данными изменения плотности потока на частоте 15.4 ГГц из каталога MOJAVE (Monitoring Of Jets in Active galactic nuclei with VLBA Experiments) [30] за 2011-2015 гг.

4. *Определение периодов переменности плотности потока радиоисточников.* Для реализации описанных выше методик прогноза,

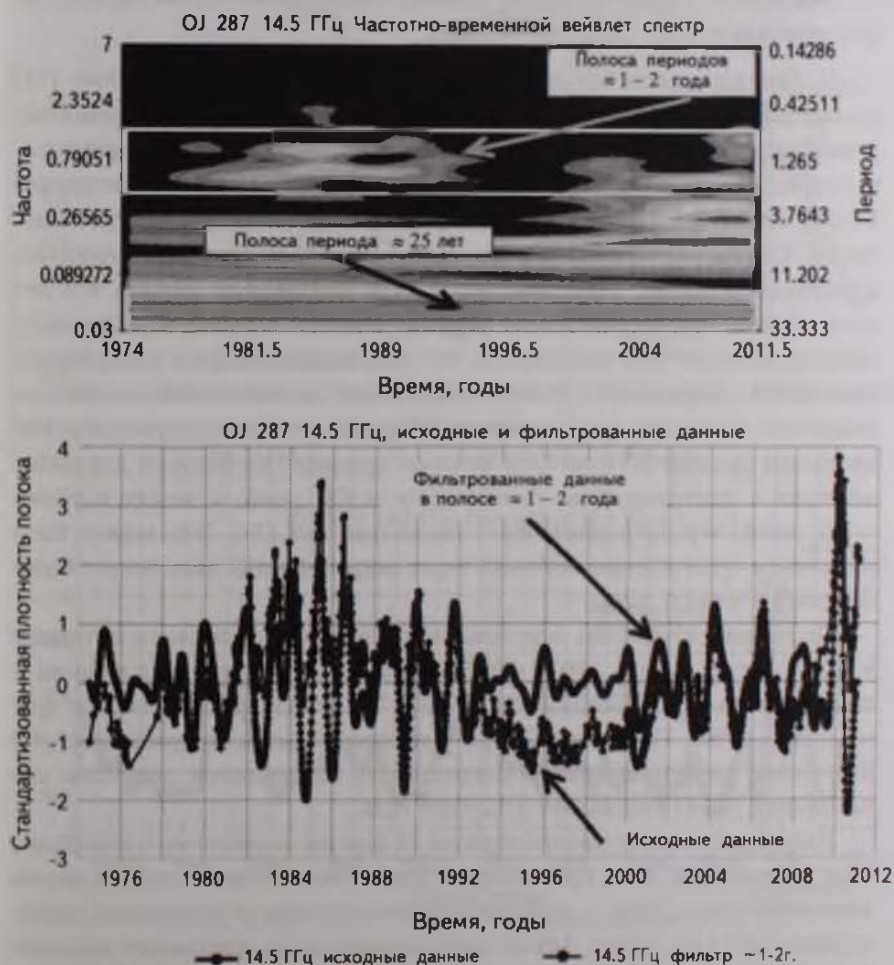


Рис.1. Верхний график - вейвлет спектр OJ287, 14.5 ГГц. Нижний график показывает исходные данные и выделенные вейвлет фильтром колебания в полосе периодов $\approx 1-2$ года.

необходимы сведения о основных периодах переменности плотности потока и времени их существования. Наиболее эффективным методом для решения этой задачи является вейвлет анализ. В результате вейвлет анализа построены частотно-временные спектры (отдельно для трендовых и быстропеременных составляющих рядов данных) и выделены колебания в полосах наибольшей спектральной мощности. Этот подход позволяет лучше проследить изменения квазипериодов со временем. На рис.1 изображен пример вейвлет спектра (верхний график) для источника OJ287 на котором отмечена полоса длительного периода ≈ 25 лет, и выделенные вейвлет фильтром колебания в полосе периодов $\approx 1-2$ года, которые вносят основной вклад в быструю переменность этого источника (нижний график).

Аналогично рассмотренному примеру были произведены расчеты по исследуемым восьми радиоисточникам.

5. *Группа источников 3C345, 3C446, 3C454.3.* В работе [31] рассматривается оптическая переменность источника 3C345. С помощью вейвлет анализа, обнаружено значительное изменение периодов со временем, в оптическом диапазоне. Найденные периоды изменяются в интервале 1.7-2.6, 4.5-5.2, 9.6-11.5 лет. В работе [32] приводятся результаты исследования 3C345 в радиодиапазоне по VLBI данным спирального движения компонент в джете. Предполагается, что найденный период 6.9 лет соответствует прецессии джета радиоисточника. Однако в работе [33] также по данным VLBI указывается, что направление выброса компонентов изменяется с периодом 8-10 лет. Многолетние наблюдения в оптическом диапазоне показали, что на кривых блеска есть долгопериодические колебания (десятки лет), на фоне которых проявляются быстрые двугорбые всплески с длительностью у основания ≈ 400 дней, а между горбами ≈ 150 дней, чередующиеся через несколько лет [34]. Это может быть следствием прохождения спутника через аккреционный диск вокруг более массивной черной дыры.

По нашим результатам долговременный период изменяется в интервале 9.1-10.5 лет за время 1980.2-1998.0. Два более коротких колебания с изменяющимися периодами (4.4-4.8 и 2.7-3.2 года) накладываются друг на друга с 1990г. Периоды 1.2 и 1.7 года проявляются в первой и второй половинах временного ряда. Погрешность определения периодов для источника 3C345 составляет $\pm 0.2-0.03$ года.

Авторегрессионная модель порядка 16 хорошо соответствует исходному ряду источника 3C345 и прогнозирует резкое увеличение плотности потока излучения после 2009г. с дальнейшим его падением и некоторым замедлением с 2012 по 2014гг. Авторегрессионный метод показывает хорошие результаты при краткосрочном прогнозе, в среднем на 4-5 лет.

У источника 3C446 на частотах 37, 22, 14.5, 8, 4.8 ГГц период колебаний

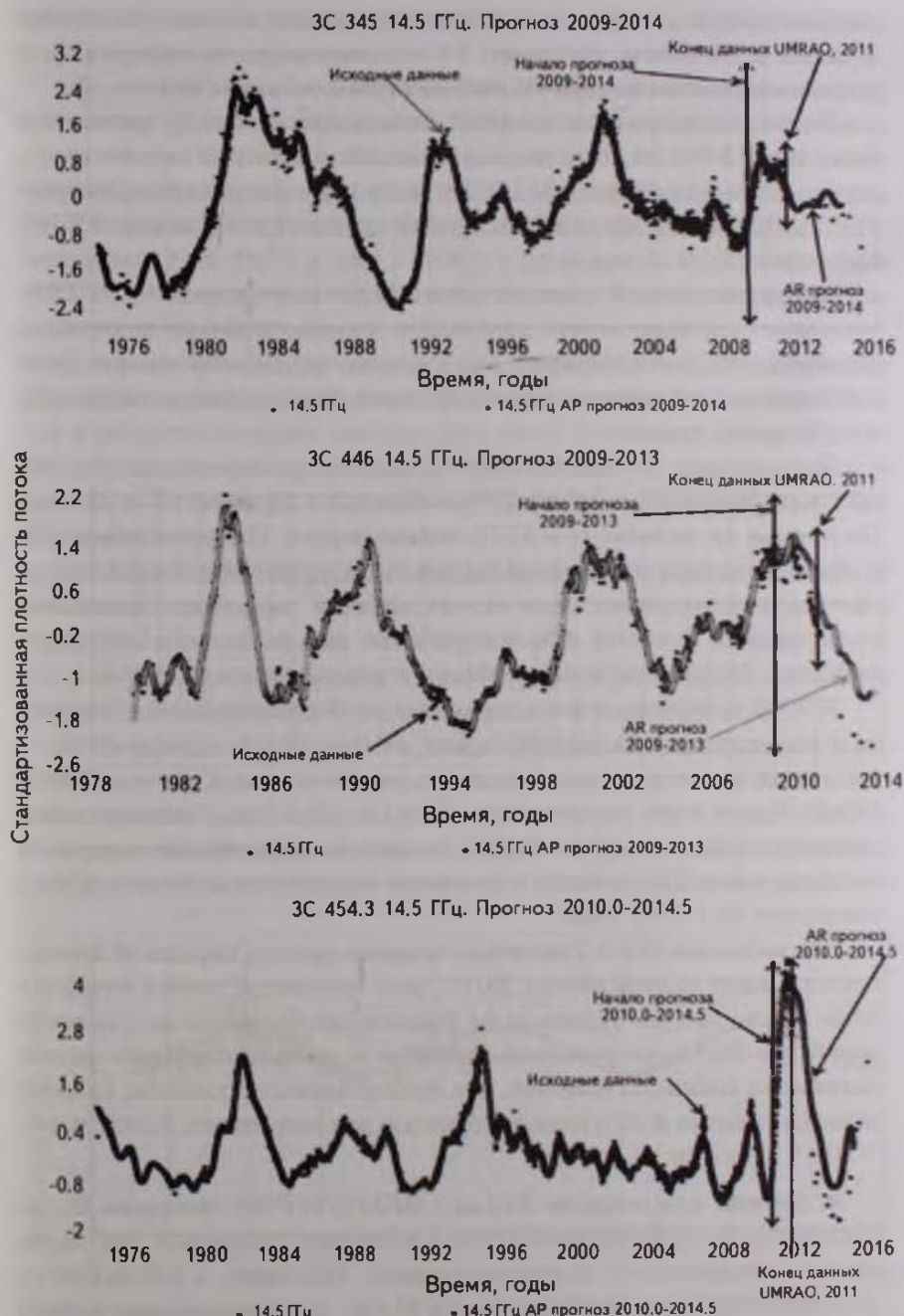


Рис.2. Графики исходных данных и авторегрессионного прогноза для источников 3C345 (2009-2014), 3C446 (2009-2013), 3C454.3 (2010-2014.5). После линии "конец данных" следуют точки из каталога MOJAVE.

плотности потока, полученный методами дискретной автокорреляционной функции и Юркевича, составляет 5.8 лет по результатам работы [35]. В оптическом диапазоне у 3C446 найден период 4.2 года [36].

По нашим результатам главный период изменяется со временем в интервале 5.8-8.8 лет. Быстрая переменность источника состоит из 3-х летнего периода (интервал 1981-1997), а также периода 1.3-2.1 года (интервал 1988.5-2010.3). Погрешность определения периодов для источника 3C446 составляет $\pm 0.1-0.01$ года.

Авторегрессионный прогноз порядка 22 для источника 3C446, с 2009г. показывает кратковременное увеличение плотности потока на вершине радиовспышки и последующее его падение, что хорошо соответствует наблюдениям, но в действительности плотность потока уменьшается сильнее, чем указывает прогноз.

Переменность источника 3C454.3 широко исследовалась многими авторами. Например, в работе [37] сообщается о периодах 1.5 и 13.5 лет. По данным на частотах 15 и 8 ГГц найден период 12.8 лет в работе [38] и объясняется моделью двойной черной дыры, периодическое изменение плотности потока происходит за счет эффекта "маяка" или изменения доплеровского усиления прецессирующего джетов из-за орбитального движения. Также возможны колебания темпа аккреции вещества.

3C454.3 интересен резким переходом от долговременной к быстрой фазе переменности. Основной период ≈ 6 лет, исчезает после 1996г., а расстояние между вершинами сильных радиовспышек 13.1 года (1981.7, 1994.8). Кроме этого, короткие периоды (1.0, 1.7, 2.7 года) незначительно меняются со временем (0.2-0.4 года), проявляясь на различных интервалах временного ряда. Погрешность определения периодов для источника 3C454.3 составляет $\pm 0.1-0.003$ года.

Для источника 3C454.3 авторегрессионный прогноз порядка 40 хорошо предсказывает радиовспышку 2011г., рост плотности потока начался в 2010г. Также прогноз указывает на возрастание плотности потока после минимума 2013.5, но реальный минимум и последующий рост потока оказывается больше по величине, чем предсказывается прогнозом. Графики исходных данных и полученных прогнозов для источников 3C345, 3C446, 3C454.3 показаны на рис.2.

6. *Группа источников BLLac, OJ287, OT081.* Источник BLLac выделяется быстрой переменностью в различных диапазонах длин волн, которая накладывается на долговременную. Например, в работе [39] по исследованию быстрой переменности BLLac, с использованием вейвлет анализа найдены периоды 1.5, 3.5 часа в оптическом диапазоне. А в работе [40] с помощью методов Юркевича и структурных функций показано, что в радиодиапазоне период 7.5 лет, а в оптике - 1.2 года. Приводятся модели

прецессии по спиральным движениям в джете и периодического распространения ударных волн.

По данным используемого нами вейвлет анализа есть незначительные изменения (0.3 года) периода $\approx 7.2 - 7.5$ лет. Быстропеременная часть представлена большим набором периодов (от 4.1 до 0.4 года), часто проявляющихся на коротких временных интервалах. Для примера периоды 2.3-2.6 года и 1.1-1.3 года проявляются на интервалах, времени, соответственно 1999-2007.7 и 2002.3-2006.5, а период ≈ 0.4 года на интервале 1987-1992. Погрешность определения периодов для источника BL Lac составляет $\pm 0.2-0.002$ года.

Для радиоисточников, которые удовлетворительно поддаются прогнозу с помощью гармонического метода, результаты прогноза как гармоническим, так и авторегрессионным методом дают очень близкие результаты. С 2011г. оба метода уверенно предсказывают радиовспышку и падение плотности потока до минимума. С 2016г. оба метода указывают на возможный рост плотности потока.

Источник OJ287 подробно исследовался во многих работах и различных диапазонах излучения. Характерная его особенность - это всплывающая структура, которая в оптике имеет период $\approx 11 - 12$ лет по оценкам разных авторов [41]. В радиодиапазоне во многих работах рассматривается быстрая переменность этого объекта с периодами ≈ 1.1 и 1.6 года [42].

В результате проведенного нами вейвлет анализа получено, что распределение периодов во временном ряду таково, что к началу и концу ряда периоды увеличиваются до ≈ 1.7 , 2.6 лет, а 1.1, 1.6 лет периоды проявляются с наибольшей амплитудой на максимумах долговременного изменения плотности потока с периодом ≈ 25.5 года (условным, поскольку

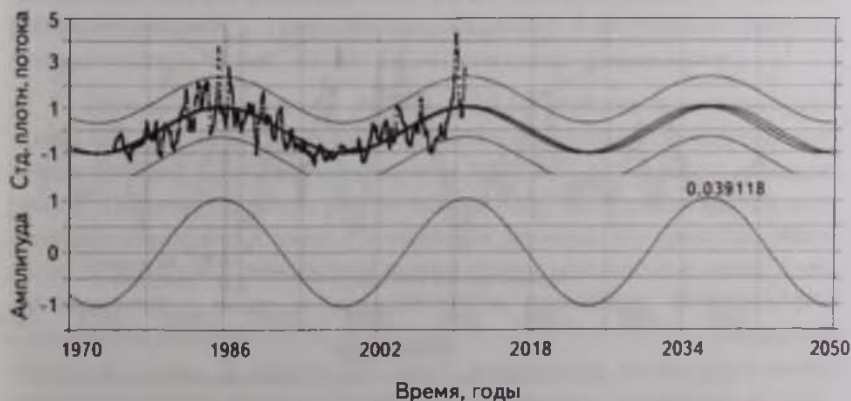


Рис.3. OJ 287 14.5 ГГц. Синусоида с долговременным периодом ≈ 25.5 лет. Параметрическая аппроксимация (1 синусоида). $r^2 = 0.513289$, $SE = 0.69803$, $F = 961.274$.

BL LAC 14.5 ГГц. Прогноз 2011-2020



OJ 287 14.5 ГГц. Прогноз 2009-2017



OT 081 14.5 ГГц. Прогноз 2010.7-2015.3



Рис.4. Графики исходных данных и прогнозов гармоническим и авторегрессионным методами для источников BL Lac (2011-2020), OJ287 (2009-2017), OT081 (2010.7-2015.5). После линии "конец данных" следуют точки из каталога MOJAVE.

ряд представляет неполную волну). Погрешность определения периодов для источника OJ287 составляет $\pm 0.4-0.002$ года.

Гармоническая и авторегрессионная модели (порядок 34) временного ряда дают близкие результаты прогноза с 2009 по 2017гг. хорошо предсказывая радиовспышку и последующее падение плотности потока. Двойная вспышечная структура OJ287 хорошо описывается одной синусоидой. Если предположить, что этот долговременный период устойчив со временем, то следующий максимум плотности потока может быть приблизительно в 2036-2037гг. (рис.3).

Источник OT081 также примечателен быстрой и регулярной переменностью. В работе [43] исследуется вспышечная активность этого объекта на частоте 8.4 ГГц в 2010г. В результате обнаружена радиовспышка длительностью 19.3 дня, которая накладывается на более длительное изменение плотности потока за время ≈ 200 дней. Резкие и сильные изменения плотности потока излучения также наблюдаются в данных UMRAO.

Определенная нами переменность OT081 состоит из двух гармонических компонент, более длительной ≈ 2.6 года с изменением периода на ≈ 0.3 года и 1.2 года, которая накладывается на основное колебание с середины 2006г. Также отмечены расщепления вершин вспышек, интервалы которых уменьшаются со временем от 0.9 до 0.5 года. Погрешность определения периодов для источника OT081 составляет $\pm 0.02-0.005$ года.

Гармонический и авторегрессионный (порядок 20) методы прогнозов показывают близкие результаты, но гармонический прогноз показывает более высокую амплитуду предполагаемых колебаний. Оба метода показали начавшееся увеличение плотности потока с минимума 2010.7 года и предположительное его дальнейшее изменение с максимумом в 2012.5 и ростом потока к 2015г. Графики исходных данных и полученных прогнозов для источников BLLac, OJ287, OT081 показаны на рис.4.

7. Группа источников 3C273, 3C120. Эти два источника отличаются большой амплитудой квазипериодических колебаний плотности потока радиоизлучения. Свойства переменности 3C273 и 3C120 описаны во многих работах. Например, в работе [44] по данным VLBI исследовалось спиральное движение компонент в джете с возможным периодом его прецессии около 16 лет. В работе [45] обсуждается период продолжительностью около 8 лет, наблюдаемый в радио и миллиметровом диапазонах. В работе [46] исследовался источник 3C120 на частотах 37, 22, 14.5, 8, 4.8 ГГц и обнаружен период 4.2 года. В работе [47] была установлена взаимосвязь между свойствами радио джета и оптическим излучением у источника 3C 120.

Для источника 3C273 по данным проведенного нами вейвлет анализа, главные периоды 8.0 и 5.3 года со временем не изменяются. В коротко-

периодической части спектра период 1.0-1.4 года изменяется на широком интервале времени. Периоды 2.4 и 3.4 года, соответственно, проявляются приблизительно до и после 1995г. Погрешность определения периодов для источника 3C273 составляет $\pm 0.07-0.005$ года.

Выявленные у источника 3C120 два основных периода ≈ 4.3 и 6.4 года изменяются со временем на ≈ 0.8 и 0.4 года, соответственно. Также существует несколько коротких периодов (от 0.8 до 2.1 года), которые проявляются на разных интервалах временного ряда. Погрешность

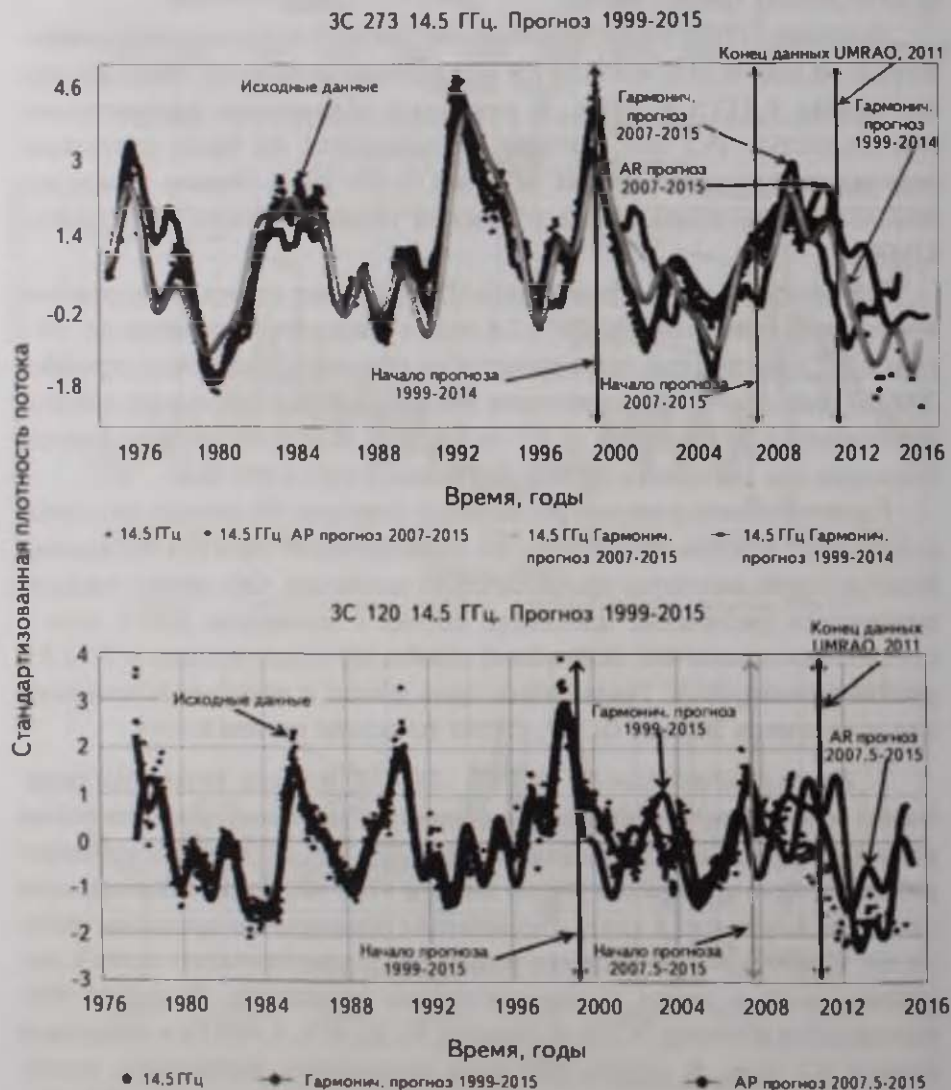


Рис.5. Графики исходных данных и прогнозов гармоническим и авторегрессионным методами для источников 3C273, 3C120 (1999-2015). После линии "конец данных" следуют точки из каталога MOJAVE.

определения периодов для источника 3C120 составляет $\pm 0.08-0.004$ года. Характер изменения плотности потока, также как у источника 3C273, хорошо описывается набором синусоид.

Для источников 3C273 и 3C120 была сделана попытка длительного прогноза гармоническим методом с 1999г. (после сильных радиовсплесков). На рис.5 (верхний график) показаны два графика прогнозов потока 3C273 гармоническим методом (1999-2014, 2007-2015) в сравнении с AP прогнозом порядка 22 (2007-2015). Видно, что во всех случаях получены близкие результаты. Длительный прогноз, верно, показывает направление изменения плотности потока, что указывает на устойчивость главного квазипериода ≈ 8 лет и короткопериодических колебаний. Вместе с тем, реальные данные показывают, что снижение плотности потока больше прогнозируемого.

Долговременный прогноз по источнику 3C120 с 1999 по 2015гг. (рис.5 нижний график) показывает верное направление изменения плотности потока, однако проявляются различия в амплитудах. Авторегрессионный прогноз 12 порядка с 2007.5 по 2015гг. показывает кратковременное снижение и возрастание плотности потока с последующим переходом к минимуму, что хорошо соответствует наблюдениям.

Выполнено сравнение периодограмм для рядов с вычтенным полиномиальным трендом 1-3 степени и без него. Разница в значениях составляет от 0.65 года (3C 120) до 0.1 года (BLLac) для спектральных пиков в интервале $\approx 11-8$ лет. Для спектральных пиков с меньшими значениями периодов разница очень мала $\approx 0.02-0.05$ года. В периодограммах с неучтенным трендом могут быть расщепленные спектральные пики и мощные периоды, близкие или превышающие длину ряда. В автокорреляционных методах, даже вычитание среднего приводит к появлению ложной волны [48], а вычитание трендов первого, а тем более, высоких степеней полиномов, может привести к появлению еще более коротких волн и ложных пиков, особенно в низкочастотной области периодограммы, подробнее в работе [49].

8. *Выводы.* Для решения задачи прогнозирования изменений плотности потоков радиоисточников, был осуществлен следующий порядок действий.

С применением вейвлет анализа определены периоды переменности на частоте 14.5 ГГц. Используя вейвлет фильтрацию, были выделены компоненты временных рядов в полосах периодов с наибольшей спектральной мощностью, т.е. дающие наибольший вклад в переменность. Наличие квазипериодических изменений плотности потока дает возможность прогноза этих изменений после окончания рядов наблюдений UMRAO в 2011г. В работе использованы методы гармонического и авторегрессионного прогнозирования (модифицированный ковариационный метод). Для гармонического прогноза, в качестве начальных, использовались значения квазипериодов

из периодограмм Ломба-Скаргла для неравномерных временных рядов с последующей оптимизацией тригонометрического полинома методом наименьших квадратов.

Сравнение двух методов прогнозирования показало, что авторегрессионный метод часто дает хорошие результаты, близкие к реальным наблюдениям, но на коротком временном интервале, обычно 4-8 лет. Гармонический метод при наличии устойчивых колебаний позволяет строить прогноз на более длительные интервалы времени, но чувствителен к сильным изменениям амплитуды и периода колебаний, несинусоидальности кривых изменений потоков, а также к смене режима переменности (переходам от фазы медленной переменности к фазе быстрой, или наоборот, с изменением амплитуды колебаний), что ухудшает прогноз, вызывая расхождения с реальными данными. В качестве независимых данных для проверки качества прогнозов использованы наблюдения из каталога MOJAVE за 2011-2015 гг.

Для прогнозирования плотности потоков радиоисточников 3C345, 3C446, 3C454.3, обладающих сложным характером переменности, применен метод авторегрессионного линейного предсказания. Наличие значительного изменения амплитуды (3C345), изменение главного периода (3C446) и двух фаз активности с медленной и быстрой переменностью (3C454.3) усложняет применение гармонического метода прогнозирования. С учетом того, что переменность этих источников представляет сумму различных колебаний, периоды которых могут изменяться со временем, прогноз получается на интервале до $\approx 4-5$ лет.

Для источников BLLac, OJ287, OT081, обладающих быстрой переменностью, кривые изменения плотности потока хорошо описываются суммой нескольких незатухающих синусоид. Здесь наиболее эффективно применение метода гармонического прогнозирования. Такой подход позволил получить прогноз продолжительностью 4-9 лет. У источника OJ287 долговременное изменение плотности потока хорошо описывается синусоидой с периодом ≈ 25.5 лет и дальнейший максимум может быть в 2036-2037 гг., если этот период стабильный.

Для источников 3C273, 3C120, содержащих устойчивые длительные периоды, также использован гармонический метод и получен прогноз длительностью до 16 лет. Достоверность прогноза была подтверждена независимыми данными наблюдений программы MOJAVE за 2011-2015 гг.

¹ Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины, Обсерватория "УРАН-4"

² Астрономическая обсерватория, Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова, e-mail: magister_phys@yahoo.com

PREDICTING FLUX DENSITY CHANGES OF
EXTRAGALACTIC RADIO SOURCESA.L.SUKHAREV¹, M.I.RYABOV¹, G.I.DONSKYKH²

On basis of long-term monitoring data from 26-m radio telescope of the University of Michigan at a frequency 14.5 GHz (1974-2011) made a forecast of changes radio flux density of extragalactic sources 3C273, 3C120, 3C345, 3C446, 3C454.3, OJ287, OT081, BLLac. For prediction was used information about main periods of variability and time of their existence, obtained by wavelet analysis. To predict radio flux densities changes for sources 3C345, 3C446, 3C454.3 having complicated form of variability used method of autoregressive linear prediction. In result forecast of flux density changes duration is to 5 years. For another sources group BLLac, OJ287, OT081 with fast variables applied method of harmonic prediction. This approach give a forecast duration of 4-9 years. For 3C273 and 3C120 sources containing stable long periods, also used the harmonic method and obtained a forecast duration to 16 years. Prediction reliability was confirmed by independent data of MOJAVE program observing in 2011-2015 years.

Key words: *blazar: radio variability: forecast: autoregression: wavelet: Fourier analysis*

ЛИТЕРАТУРА

1. SIMBAD Astronomical Database (<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>).
2. HaoJing Zhang, Gang Zhao, Xiong Zhang, Science China Physics, Mechanics and Astronomy, **53**, 252, 2010.
3. Huai-Zhen Li, Guang-ZhongXie, Shu-Bai Zhou, Chin. Astron. Astrophys., **6**, 421, 2006.
4. XU Yun-bing, Zhang Hao-Jing, Wang Li-Heng, J. Yunnan Normal University (Natural Sciences Edition), **4**, 2010.
5. X.Zhang, G.Z.Xie, J.M.Bai, Astron. Astrophys., **330**, 469, 1998.
6. Frank M. Rieger, AIP Conf. Proc. **745**:487, 2005.
7. W.H. de Vries, R.H.Becker, R.L.White, C.Loomis, Astron. J., **129**, 615, 2005.
8. P.S.Cowperthwaite, C.S.Reynolds, Astron. J. Letters, **752**, 21, 2012.
9. A.P.Marscher, AIP Conference Proceedings, **856**, 1, 2006.
10. Y.Mizuno, Y.Lyubarsky, Ken-Ichi Nishikawa, P.E.Hardee, Astrophys. J., **757**, 16, 2012.
11. A.R.King, J.E.Pringle, R.G.West, M.Livio, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., **348**, 111, 2004.

12. *R.Matsumoto, S.Kato, F.Honma*, 290, Nato ASI Series, 290, 167, 1989.
13. *P.A.Hughes, H.D.Aller, M.F.Aller*, Astrophys. J., 396, 469, 1992.
14. *D.A.Hugh, F.A.Margo*, Astrophys. J. Suppl. Ser., 59, 513, 1985.
15. *И.Гайдышев*, Анализ и обработка данных (специальный справочник), Издательский дом "Питер" 2001.
16. *А.Б.Шитов*, Разработка численных методов и программ, связанных с применением вейвлет-анализа для моделирования и обработки экспериментальных данных. Ивановский государственный университет, 2001, с.44-53.
17. *I.L.Andronov, V.I.Marsakova*, Astrophysics, 49, 370, 2006.
18. *N.R.Lomb*, Astrophys. Space Sci., 39, 447, 1976.
19. *J.D.Scargle*, Astrophys. J., 263, 835, 1982.
20. *Н.Смоленцев*, Вейвлет-анализ в MATLAB, ДМК-Пресс, 2010.
21. *C.Torrence, G.P.Compo*, Bulletin of the American Meteor. Soc., 79, 61, 1998.
22. *S.V.Vaseghi*, John Wiley & Sons Ltd., The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, England, 2006.
23. *С.П.Марпл-мл*, Цифровой спектральный анализ и его приложения, МИР, 1990.
24. *А.Б.Сергиенко*, Цифровая обработка сигналов, СПб., из-во "Питер", 2003.
25. *S.M.Kay, S.L.Marple*, Proc. IEEE, 69, 1380, 1981.
26. *S.M.Kay*, Modern spectral estimation, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs., N.J., 1987.
27. *J.Rissanen*, Ann. Stat., 11, 417, 1983.
28. *T.J.Ulrych, R.W.Clayton*, Phys. Earth planet Inter., 12, 188, 1976.
29. *T.J.Ulrich, M.Ooe*, Chap.3 in Nonlinear methods of spectral analysis, Springer-Verlag, NY, 1983.
30. *M.L.Lister, M.H.Cohen, D.C.Homan*, Astron. J., 138, 1874, 2009.
31. *Dong Fu-Tong, Zhang Hao-jing, MAO Li-Sheng*, Acta Astronomica Sinica, 51, 117, 2010.
32. *Shan-Jie Qian, A.Witzel, J.A.Zensus*, Research in Astron. Astrophys., 9, 137, 2009.
33. *J.Klare, J.A.Zensus, A.P.Lobanov*, ASP Conference Proceedings, 340, 40, 2005.
34. *М.К.Бабаджанянц, Е.Т.Белоконь*, Астрофизика, 21, 217, 1984, (Astrophysics, 21, 461, 1984).
35. *N.A.Kudryavtseva, T.B.Pyatunina*, Astron. Rep., 50, 1, 2006.
36. *C.Barbieri, R.Vio, E.Cappellaro*, Astrophys. J., 359, 63, 1990.
37. *A.E.Volvach, L.N.Volvach, M.G.Larionov et al.*, Astron. Astrophys. Trans., 25, 385, 2006.
38. *Shan-Jie Qian, N.A.Kudryavtseva, S.Britzen*, Chin. Astron. Astrophys. J., 7, 364, 2006.
39. *C.Humrickhouse*, J. South East. Assoc. for Research in Astron., 2, 23, 2008.
40. *Y.C.Guo*, New Astronomy, 36, 9, 2015.
41. *Shi Weizhao, Liu Xiang, Song Huagang*, Astrophys. Space Sci., 310, 59, 2007.
42. *P.A.Hughes, H.D.Aller, M.F.Aller*, Astrophys. J., 503, 662, 1998.

43. *T.Ishida, K.Fujisawa, M.Kino, K.Niinuma*, Proc. of science, 11th European VLBI Network Symposium & Users Meeting, October 9-12, 2012.
44. *Abraham. Z, Romero G.*, Astron. Astrophys., **344**, 61, 1999.
45. *Bi Xiongwei, He Wanquan, Tian Jiajin, Zhang Qingyou, Cai Qun*, Astronomical Research & Technology, **9**, No.4, 2012.
46. *Mao Li-Sheng*, Astronomical Research & Technology, **4**, No.4, 2007.
47. *Е.Т.Белокопъ*, Астрофизика, **27**, 429, 1987, (Astrophysics, **27**, 588, 1987).
48. *P.G.Sutherland, M.C.Weisskopf, S.M.Kahn*, Astrophys. J., **219**, 1029, 1978.
49. *I.L.Andronov*, Astron. Nachr., **315**, 353, 1994.

