

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra24.04.254>

УДК 524.7-7

А. Л. СУХАРЕВ^{1,2}, М. И. РЯБОВ¹, В. В. БЕЗРУКОВС²

PACS number: 98.54.Cm

¹ Обсерватория “УРАН-4”, Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Пушкинская 37, г. Одесса, 65011, Украина
E-mail: magister_phys@yahoo.com² Вентспилский международный радиоастрономический центр (VIRAC),
ул. Инженьеру, 101, г. Вентспилс, LV-3601, Латвия
E-mail: vladislavsb@venta.lv

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПЕРЕМЕННОСТИ ЛАЦЕРТИД OJ 287 И VL LAC В ОПТИЧЕСКОМ И РАДИОДИАПАЗОНЕ

Предмет и цель работы: *Исследуется взаимосвязь и различие в проявлении квазипериодической активности лацертид OJ 287 и VL Lac по данным оптических и радионаблюдений. Целью работы является определение и сравнение основных квазипериодов этих лацертид в разных светофильтрах оптического диапазона и в радиодиапазоне (на частотах 15 и 14.5 ГГц), а также краткий обзор результатов, полученных другими авторами. Опробован метод сравнения оптических и радиоданных в отдельных полосах близких периодов. Этот метод позволяет лучше определять задержки между оптическими и радиоданными в полосах основных квазипериодических колебаний, формирующих кривые блеска, и “отсеивать” шумы и нерегулярные вариации блеска и потока излучения источников.*

Методы и методология: *Использовались данные оптических наблюдений OJ 287 в 1978–2018 гг. и VL Lac в 1970–2018 гг. из каталога AAVSO (American Association of Variable Star Observers) и каталога долговременного (2008–2018 гг.) мониторинга радиоисточников на 40-метровом радиотелескопе обсерватории OVRO (Owens Valley Radio Observatory, USA) на частоте 15 ГГц, а также данные обсерватории UMRAO (Radio observatory of Michigan University), полученные на частоте 14.5 ГГц в 1974–2011 гг. Для вычисления периодограмм и вейвлет-спектров применялись “быстрая” модификация метода Ломба–Скаргла а также “быстрый” метод расчета вейвлет-спектров с помощью быстрого преобразования Фурье с анализирующей функцией Морле. Интерполяция данных выполнялась с помощью сглаживающих кубических сплайнов. Для выделения полос отдельных квазипериодов в оптических и радиоданных применялась фурье-фильтрация со спектральным окном Хэмминга, которая обеспечивает краевые эффекты около 1 % от длины временного ряда.*

Результаты: *У радиоисточника OJ 287 наблюдается хорошее соответствие между квазипериодами в оптическом и радиодиапазоне в полосе от 1.1 года до 2 лет. Однако долговременные периоды в оптическом диапазоне, близкие к 12 и 6 годам, упоминаемые во многих работах, в радиодиапазоне практически незаметны на фоне 25-летней трендовой волны. У радиоисточника VL Lac различий больше. В оптическом диапазоне квазипериод в 9 лет (в радиодиапазоне около 8 лет) наблюдается в визуальной кривой блеска. Длительная волна с возможным периодом около $12 \div 13$ лет в оптических данных в радиоданных незаметна, а наибольшее сходство между быстрой переменностью в оптическом и радиодиапазоне наблюдается в полосе периодов $0.6 \div 4$ года. Сравнение отдельных колебаний в близких полосах периодов для оптических и радиоданных, выделенных фурье-фильтрацией, показало их хорошее сходство и перспективность дальнейшего использования примененного метода при анализе временных задержек между этими диапазонами.*

Заключение: *Исследование свойств переменности лацертид OJ 287 и VL Lac по данным оптических и радионаблюдений показало сходство и различия в квазипериодах их активности, которые могут быть связаны с различием излучающих областей в оптическом и радиодиапазоне. В оптическом диапазоне, кроме излучения джета из-за обратного комптон-эффекта, наблюдается вклад излучения аккреционного диска, волновые процессы в котором могут давать другой набор квазипериодов, чем в радиодиапазоне. Поэтому качественные наблюдения этих радиоисточников (особенно оптические) очень важны для дальнейшего построения моделей, учитывающих различия в процессах формирующих переменность излучения в оптическом и радиодиапазоне.*

Ключевые слова: *лацертиды, полосовая фильтрация, фотометрия, периодограмма, вейвлет-анализ*

1. Введение

В настоящее время наблюдения переменности потоков излучения активных ядер галактик проводятся во всех диапазонах электромагнитного спектра. Основной целью этих исследований является сравнение свойств и взаимосвязи переменности излучения от радио- до гамма-диапазона.

Несмотря на многочисленные наблюдения переменности активных ядер галактик в ультрафиолетовом, рентгеновском, гамма- и инфракрасном диапазонах, выполненные на орбитальных телескопах, наиболее продолжительными являются ряды наземных наблюдений в радио- и оптическом диапазонах. В программах долговременного

мониторинга потоков внегалактических радиоисточников в различные годы участвовали радиотелескопы обсерваторий Algonquin, Канада; UMRAO, Мичиган, США; Metsahovi, Финляндия; Green Bank, Западная Вирджиния, США; OVRO, Калифорния, США; Kitt Peak, Аризона, США; CRAO, Украина, и др.

Настоящая работа основана на результатах наблюдений лацертид OJ 287 и BL Lac в радиодиапазоне из баз данных обсерваторий OVRO (Owens Valley Radio Observatory <<https://www.ovro.caltech.edu/index.php?page=home>>) и UMRAO (University of Michigan Radio Astronomy Observatory <<https://dept.astro.lsa.umich.edu/datasets/umrao.php>>) и на данных оптических наблюдений AAVSO (American Association of Variable Star Observers <<https://www.aavso.org/>>). Проведено сравнение свойств переменности блеска лацертид в радио- и оптическом диапазонах, а также сопоставление полученных результатов с работами других авторов.

Применение небольших и полностью автоматизированных оптических телескопов, оснащенных высококачественными цифровыми зеркальными фотоаппаратами или охлаждаемыми ПЗС матрицами, вывело многоцветную фотометрию, проводимую любителями астрономии, на профессиональный уровень. Это значительно увеличило объем доступных данных наблюдений активных ядер галактик.

Следует отметить различие характера данных наблюдений в радио- и оптическом диапазонах. Радиоастрономические наблюдения в сантиметровом диапазоне не имеют длительных временных разрывов. Они могут проводиться на одном радиотелескопе в любое время суток в малооблачную погоду. Оптические наблюдения ведутся только в ночное время при ясном небе, и поэтому для обеспечения их непрерывности применяется множество телескопов, разнесенных по всему земному шару.

2. Обзор исследований

Лацертиды OJ 287 и BL Lac ранее считались переменными звездами, а в настоящее время это одни из самых широко исследуемых активных ядер галактик. По этим причинам накоплено большое количество наблюдательных данных общей длительностью около 47 лет в радио- и 100 лет

в оптическом диапазонах. Например, в работе [1] исследуется кривая блеска OJ 287, полученная из фрагментов разных наблюдений в фильтре V с 1891 по 2010 гг. Проведенный разными методами авторами этой работы гармонический анализ показал наличие основного квазипериода ≈ 12 лет, а также двух квазипериодов ≈ 4 и ≈ 1.7 года.

Следует отметить, что двенадцатилетний квазипериод (предполагаемый период обращения черной дыры-спутника) применен для расчета модели двойной черной дыры, которая описывает многие наблюдательные особенности вариаций блеска OJ 287 и подробно рассмотрена, например, в работе [2]. В работе [3] исследуются UBVRI кривые блеска BL Lac. Самый длительный ряд наблюдательных данных получен в фильтре В в период с 1896 по 1996 гг. Анализ этих данных методом Юркевича показал наличие наиболее вероятного квазипериода ≈ 14 лет и слабого квазипериода ≈ 7.5 года, а также серии более коротких квазипериодов ≈ 0.6 , 0.9 , 2 , и 3 года.

Кроме долговременных вариаций блеска на временном масштабе в нескольких лет, у обоих радиоисточников в радио- и оптическом диапазонах наблюдается очень быстрая переменность на временных масштабах в несколько дней и даже несколько часов. Например, зарегистрированы изменения блеска BL Lac в оптическом диапазоне на 1.5^m за время наблюдения ≈ 20 ч [4], изменения блеска на 0.56^m на временной шкале ≈ 40 мин в фильтре В [5], слабые вариации с амплитудой 0.1^m на временной шкале ≈ 30 мин в фильтре V [6].

Внутрисуточная переменность в радиодиапазоне у OJ 287 зарегистрирована во многих работах разных авторов. Однако в связи со сложностью наблюдений и недостатком наблюдательного времени на радиотелескопах для регулярных наблюдений полученные значения квазипериодов не являются надежными. Например, в работе [7] временная шкала изменений плотности потока излучения OJ 287 в радиодиапазоне (на частоте 5 ГГц) оценивается значениями ≈ 0.4 сут и ≈ 2 сут, в оптическом диапазоне за то же время наблюдений получены значения квазипериодов ≈ 0.5 и ≈ 1.3 сут в фильтре R.

Что касается долговременной переменности исследуемых объектов с периодом более 6 лет (OJ 287) и 8 лет (BL Lac) в радиодиапазоне,

то имеющиеся ряды данных в этом диапазоне короче, чем в оптическом, и поэтому наличие в них долговременных изменений можно рассматривать как предположительное.

Структура переменности в радиодиапазоне также несколько отличается. Например, для OJ 287 преобладающими являются квазипериоды ≈ 1.1 и 1.6 года [8] и $\approx 0.5, 1.1, 2.5$ года [9] на частоте 14.5 ГГц. Более длительные вариации плотности потока у этого источника уже трудно различимы на фоне высокоамплитудной быстрой переменности. Сложность определения долговременных вариаций плотности потока связана также с разбросом значений вероятных квазипериодов при расчете разными методами. У радиоисточника BL Lac в радиодиапазоне найдены два основных квазипериода ≈ 7.5 и 3.5 года. Кроме них, проявляются еще два значимых квазипериода ≈ 1.6 и 0.7 года, соответствующие низкоамплитудным вариациям плотности потока излучения BL Lac [10, 11]. Работ, в которых подробно сравнивается квазигармоническая переменность в радио- и оптическом диапазонах по длительным рядам наблюдений, довольно мало, и поэтому развитие таких исследований – важная задача.

3. Физические модели радиоисточников

За длительное время исследования внегалактических радиоисточников сформировалась “унифицированная” модель, частично описывающая наблюдаемые эффекты их активности (см., например, [12]). Модель основана на аккреции вещества в центральной области галактики на сверхмассивную черную дыру массой $\approx 10^8 \div 10^{10} M_{\odot}$. При этом вокруг черной дыры формируется аккреционный диск. Электрические токи в аккреционном диске создают магнитные поля, пронизывающие диск и окружающую его “корону” высокотемпературного газа. Параллельно оси вращения диска выбрасываются сфокусированные и ускоренные магнитным полем струи релятивистской плазмы (джеты), в которых перемещаются яркие компоненты (сгустки или “узлы”), как правило, движущиеся с кажущимися сверхсветовыми скоростями. В радиодиапазоне переменность излучения в основном формируется процессами в джете, такими как квазипериодическая структура ярких компонентов [13], прецессия джета [14], проявление неустойчивостей Релея–Тейлора и Кельвина–Гельмгольца в неоднородном по плот-

ности или многослойном джете [15] и распространение прямых и обратных ударных волн в джете [16]. Оптическое излучение также частично является в джете благодаря обратному эффекту Комптона (увеличению энергии и частоты фотонов, рассеивающихся на релятивистских электронах джета, энергия которых выше энергии фотонов). Например, у квазара 3C 273 джет и его компоненты видны в оптическом и даже инфракрасном диапазонах. Однако значительный вклад в наблюдаемую переменность активных ядер галактик в оптическом диапазоне обеспечивают волновые процессы в аккреционном диске [17] и его “короне” [18].

4. Исходные данные и методы обработки

Наблюдательные данные в радиодиапазоне получены на 40-метровом радиотелескопе обсерватории OVRO на частоте 15 ГГц в период с 2008 по 2018 гг. и на 26-метровом радиотелескопе обсерватории UMRAO на частоте 14.5 ГГц в период с 1974 по 2011 гг. Результаты наблюдений в оптическом диапазоне из базы данных AAVSO получены по наблюдениям множества исследователей на разных интервалах времени в нескольких светофильтрах в периоды с 1978 по 2018 гг. (OJ 287) и с 1970 по 2018 гг. (BL Lac).

В табл. 1 перечислены светофильтры, в которых были проведены наблюдения исследуемых лацертид в оптическом диапазоне, с указанием центральной длины волны пропускания и полуширины кривой реакции светофильтра (фотометрическая полоса обычно определяется центральной длиной волны и полушириной функции пропускания светофильтра в зависимости от длины волны (кривая реакции)) [19]. (Более полное описание можно найти на странице <https://www.aavso.org/filters>.) Наблюдения в полосах TG и CV были выполнены с помощью разных моделей цифровых зеркальных фотоаппаратов. Кривые пропускания встроенных светофильтров и кривые чувствительности CCD или CMOS матриц разных моделей фотоаппаратов существенно различаются и были использованы только для приближенного сравнения результатов периодограммного анализа в разных полосах оптического диапазона.

Самые высококачественные и длительные ряды наблюдательных данных, в которых отме-

Таблица 1. Параметры светофильтров для наблюдения лацертид OJ 287 и BL Lac в оптическом диапазоне

Светофильтр	Индекс	Эффективная длина волны, нм	Полуширина кривой реакции, нм
Visual observations	VIS	≈ 5500	–
Johnson V	V	5448	840
Johnson B	B	4361	890
Cousins R	R	6407	1580
Cousins I	I	7980	1540
Sloan g	SG	4770	1490
Sloan i	SI	7625	1300
Sloan r	SR	6231	1400
DSLR Green	TG	отличается для разных фотокамер	–
Unfiltered, reduced to V sequence	CV	отличается для разных фотокамер	–

чаются незначительные временные разрывы, были получены в полосах V и VIS (глазомерные оценки блеска). Именно с этими данными будут сравниваться результаты радионаблюдений. Качество данных, полученных в остальных полосах, довольно низкое (разброс точек и разрывы в данных велики), и они могут использоваться только для приближенной оценки возможных квазипериодов.

Применяемые в работе методы непрерывного вейвлет-анализа [20] и полосовой фурье-фильтрации [21] для выделения отдельных компонентов данных, соответствующих участкам на фурье-спектрах, требуют равномерных отсчетов по оси времени. В связи с этим дополнительно проведена интерполяция оптических кривых блеска кубическими сплайнами.

При незначительных разрывах и “выбросах” в рядах исходных данных применялся сглаживающий кубический сплайн с кросс-проверкой, которая рассчитывается по методике, описываемой в работе [22].

При больших разрывах в рядах данных и наличии выпадающих групп точек и “выбросов” сглаживающий кубический сплайн часто формирует искажения в виде ложных всплесков и “шероховатостей”, и применять его становится затруднительно. В этом случае применялось построение неравномерного рационального B-сплайна (NURBS),

который в значительной мере лишен указанных выше недостатков. Подробное описание этого вида сплайнов рассмотрено в работе [23].

5. Радиисточник OJ 287

5.1. Наблюдения в оптическом диапазоне

На рис. 1 показаны исходные необработанные данные, полученные в результате наблюдений в оптическом диапазоне в полосах VIS, V, CV по программе наблюдений AAVSO. Вертикальные оси даны с обратным отсчетом, поскольку чем меньше звездная величина, тем ярче наблюдаемый объект.

Как видно из рисунка, в данных присутствует шум, поэтому при их обработке предварительно была выполнена интерполяция сглаживающим кубическим сплайном. Коэффициенты детерминации (R^2) и стандартные ошибки (SE) при этом достигали следующих значений: $R^2 = 0.854$ и $SE = 0.246$ для полосы VIS, $R^2 = 0.955$ и $SE = 0.108$ для полосы V, $R^2 = 0.98$ и $SE = 0.085$ для полосы CV.

На первом этапе анализа данных вычислялись периодограммы Ломба–Скаргла (со спектральным окном Бартлетта для уменьшения эффекта “растекания” спектра). Для неравномерных временных рядов данных получены значения нескольких наиболее вероятных квазипериодов для каждой полосы оптического диапазона. Для рядов данных в полосах B, R, I с плохим заполнением точками грубые оценки значений возможных квазипериодов получены путем аппроксимации оптических наблюдений синусоидой методом наименьших квадратов. Результаты показаны в табл. 2.

В табл. 2 приведены сведения о продолжительности наблюдений лацертиды OJ 287 в перечисленных полосах оптического диапазона, значения вероятных квазипериодов в данных и погрешности их вычисления. Высоты максимумов, периоды которых указаны в таблице, превышают доверительные уровни 99 % и 99.9 %.

Следует заметить, что, кроме приведенных в табл. 2 периодов, на периодограмме, представленной на рис. 2, в полосе VIS наблюдается малозначимый, но заметный пик (превышающий доверительный уровень 90 %, что показывает низкую значимость, но не отрицает полностью наличие в данных такого квазипериода), соответ-

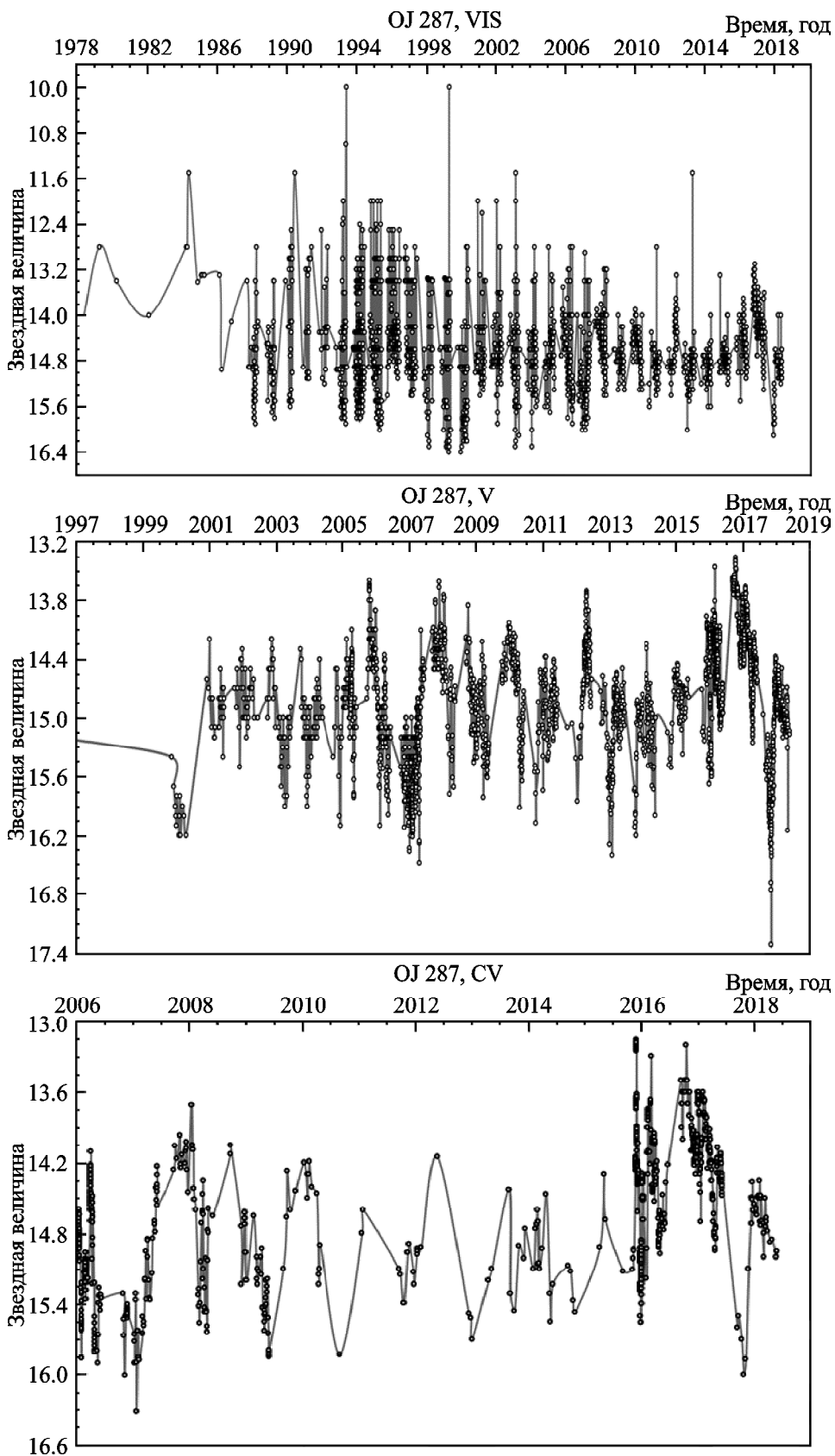


Рис. 1. Графики исходных данных в оптическом диапазоне для лацертиды OJ 287: верхняя панель – полоса VIS, средняя панель – полоса V, нижняя панель – полоса CV

Таблица 2. Оценки возможных квазипериодов в данных наблюдений лацертиды OJ 287 в полосах оптического диапазона

Полоса	Период наблюдений	Квазипериод, год	Погрешность вычисления, год
VIS	1978–2018 гг.	27.78	4.1
		6.42	0.35
		1.17	0.01
		0.91	0.012
V	1997–2018 гг.	3.48	0.31
		2.18	0.05
		1.16	0.014
		0.73	0.01
CV	2006–2018 гг.	5.47	0.76
		2.9	0.12
		1.17	0.023
		0.9	0.048
B	2006–2018 гг.	0.44	0.073
R	2003–2018 гг.	1.18	0.08
I	2003–2018 гг.	2.0	0.1

ствующий периоду ≈ 29 сут. Похожий период ≈ 30 сут упоминается в работе [24] и связывается с влиянием часто повторяющегося интервала между точками. Если в ряде данных есть повторяемые пропуски, то на периодограмме будет

значительный максимум, соответствующий периоду этих повторений. Это предположение подтверждается тем, что после интерполяции данный период заметно менее выражен, и, скорее всего, он связан со структурой данных, а не с реальным колебанием. В полосе VIS есть также малозначимый период ≈ 12 лет, который превышает доверительный уровень 99.9 %, но на графике виден как расщепление максимума квазипериода 27.7 года. Он хорошо проявляется на “исторической” кривой блеска OJ 287 на фоне вероятной шестилетней гармонике этого периода и долговременного периода более 27 лет. Пример периодограммы Ломба–Скаргла показан на рис. 2.

В работе [25] по наблюдениям с высокой плотностью отсчетов звездной величины в полосе R в 2004–2006 гг. получено значение устойчивого квазипериода 50 сут. Это значение предположительно соответствует полупериоду обращения вещества на самой внутренней устойчивой круговой орбите вокруг центральной черной дыры. Поэтому найденный в настоящей работе квазипериод ≈ 29 сут может относиться к 25-суточной гармонике 50-суточного периода. Для подтверждения этого предположения нужно получить на-

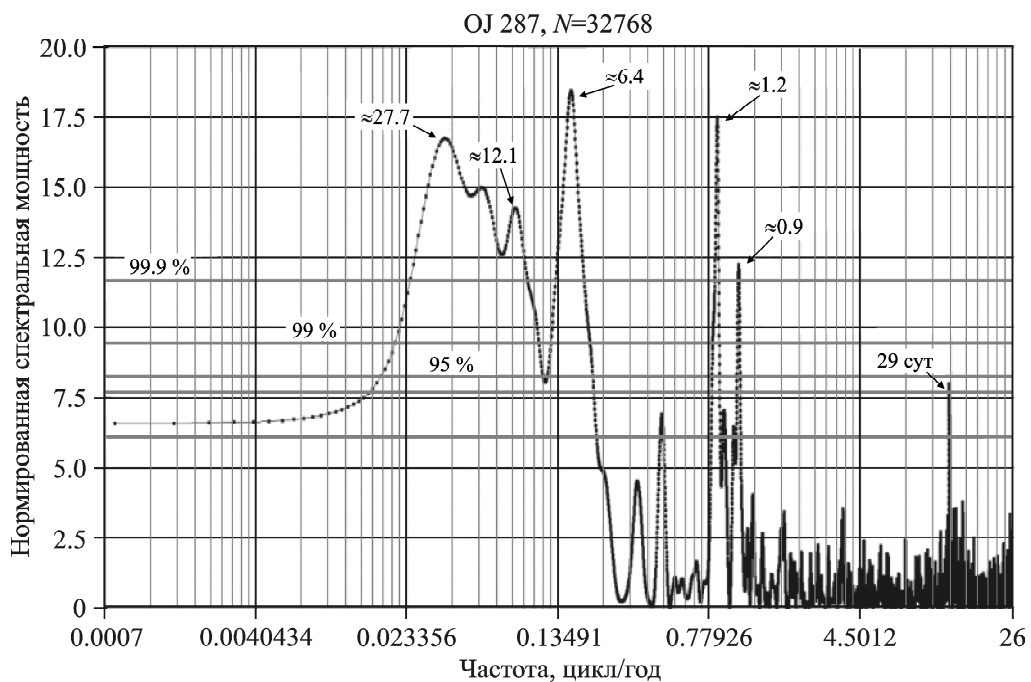


Рис. 2. Пример периодограммы, построенной по данным наблюдений OJ 287 в полосе VIS. Флажками указаны значения основных периодов. По оси ординат отложена нормированная спектральная мощность, равная $2A^2/N$ (A^2 – квадрат амплитуды, нормированный на размер спектра на данной частоте, N – размер ряда данных), по оси абсцисс – частота, определяемая, как количество циклов в год

блюдавательные данные с большим заполнением точками интервала наблюдений и минимальными разрывами, поскольку квазипериод ≈ 29 сут может быть связан со структурой ряда данных, а не с физическим процессом в радиоисточнике.

Шестилетний и двенадцатилетний периоды с почти одинаковыми высотами пиков на цифровом спектре также были найдены при анализе “исторической” кривой блеска OJ 287 (1891–1996 гг.) в полосе В [26]. Исследование кривой блеска OJ 287 по данным 2006–2016 гг. в полосе R с помощью периодограммного и вейвлет-анализа для неравномерных временных рядов показало наличие периодов со значениями 1.1 и 2.2 года [27]. Этот результат практически совпадает с нашей оценкой периода в полосе R (см. табл. 2).

5.2. Наблюдения в радиодиапазоне

Рассмотрим данные наблюдений лацертиды OJ 287 в радиодиапазоне на частоте 14.5 ГГц в течение 38-летнего периода (1974–2012 гг.) в радиоастрономической обсерватории UMRAO и, как продолжение этих наблюдений, данные 10-летнего периода наблюдений (2008–2018 гг.) на частоте 15 ГГц в обсерватории OVRO. На рис. 3 показаны исходные графики.

В радиодиапазоне данные не имеют значительных разрывов и ложных “выбросов”, поэтому интерполяция сплайнами дает очень хорошее приближение. Например, для данных OVRO коэффициенты $R^2 = 0.999$ и $SE = 0.035$. Значения основных периодов в данных OVRO, исходя из анализа быстрого преобразования Фурье спектра, составили 6.78, 2.53, 1.75 и 1.2 года. С учетом длины ряда наблюдений в 10 лет, наличие долговременного периода в 6.78 года может считаться только предположительным, поскольку это значение совпадает с интервалом времени между мощными вспышками радиоизлучения в 2010 и 2017 гг.

Вейвлет-спектр радиоисточника OJ 287, построенный по данным наблюдений в обсерватории OVRO на частоте 15 ГГц, показан на рис. 4 и дает очень схожие значения периодов: 1.16, 1.77 и 2.47 года. Видно, что эти три основных периода практически полностью формируют наблюдаемую кривую блеска.

Значительно более продолжительный ряд данных (37 лет), полученный в обсерватории UMRAO на частоте 14.5 ГГц, показывает наличие дли-

тельной и близкой к синусоидальной форме волны с характерным временем ≈ 25.5 года.

Этот результат получен вписыванием в ряд данных UMRAO, зарегистрированных на частоте 14.5 ГГц, синусоиды с последующей подгонкой методом наименьших квадратов, хотя полный ее цикл неизвестен из-за недостаточной продолжительности наблюдений. Интересно, что найденное значение весьма близко к характерному времени долгопериодической волны в 27.78 года, полученному в оптической полосе VIS. По данным 113-летних наблюдений в оптическом диапазоне у лацертиды OJ 287 предполагается длительный 50-летний цикл изменений блеска [28]. Вероятные долговременные циклы в анализируемых данных в радио- (25.5 года) и оптическом (27.78 года) диапазонах близки к полупериоду этой волны.

6. Радиоисточник BL Lac

6.1. Наблюдения в оптическом диапазоне

Примеры графиков кривых блеска радиоисточника BL Lac в оптическом диапазоне показаны на рис. 5.

Как и для источника OJ 287, была проведена интерполяция исходных данных сглаживающим кубическим сплайном. Значения коэффициента детерминации и стандартной ошибки при этом составили: $R^2 = 0.91$ и $SE = 0.16$ для полосы VIS, $R^2 = 0.97$ и $SE = 0.088$ для полосы V, $R^2 = 0.854$ и $SE = 0.176$ для полосы TG.

В оптическом диапазоне анализ самых длительных наблюдений (48 лет) в полосе VIS (глазомерные оценки блеска) показывает наличие основного приблизительно 13-летнего квазипериода. Присутствует также окологодовой период, расщепленный на три близкие гармоники, (1.2 ± 0.012) , (0.93 ± 0.01) и (0.78 ± 0.014) года, и два периода со значениями (2.4 ± 0.11) и (1.72 ± 0.16) года. Все максимумы периодограммы для неравномерных временных рядов, соответствующие этим периодам, превышают 99.9 %-ый доверительный уровень. Приблизительно такие же значения основных квазипериодов характерны и для данных наблюдений в полосе V: (2.4 ± 0.018) , (1.82 ± 0.11) , (1.1 ± 0.074) , (1.67 ± 0.083) года. Кривая блеска в этой полосе содержит значительно меньше шума и “выбросов”, чем глазомерная кривая блеска. Кроме

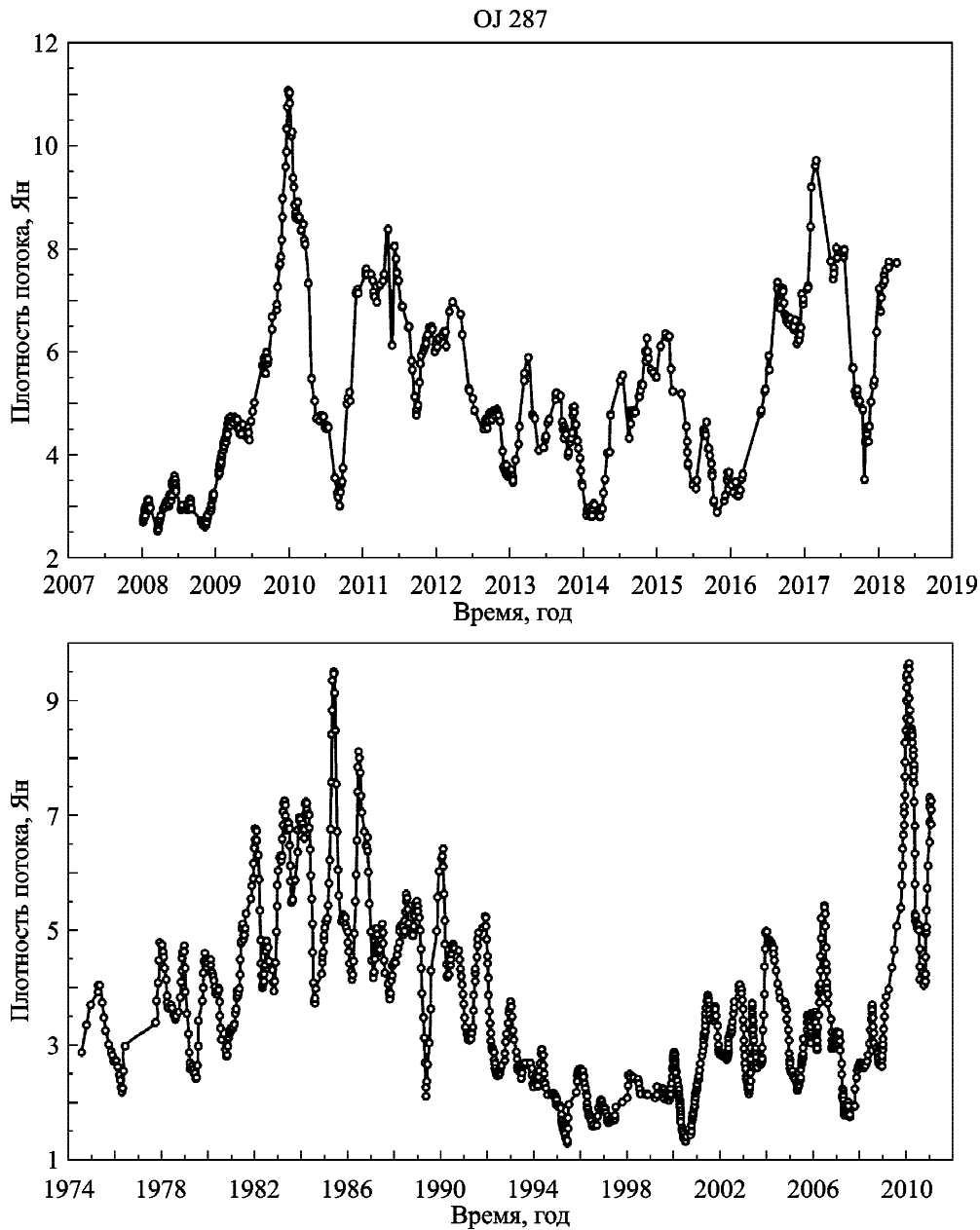


Рис. 3. Графики изменения плотности потока излучения OJ 287 на частоте 15 ГГц по данным обсерватории OVRO (верхняя панель) и на частоте 14.5 ГГц по данным обсерватории UMRAO (нижняя панель)

коротких периодов, в полосе V проявляется более длительный квазипериод $\approx (5.8 \pm 0.22)$ года. Как будет показано ниже, похожие значения периодов проявляются в полосе CV, подтверждая правильность полученных результатов. Самый длительный квазипериод в полосе V на периодограмме составляет приблизительно 16 лет. Однако при длине исследуемого ряда ≈ 21 год указанный период укладывается на эту длину ≈ 1.3 раза. Отсюда следует, что подтвердить суще-

ствование этого периода возможно при более длительных наблюдениях. Наличие максимумов периодограммы с близкими значениями периодов может указывать на их возможное изменение со временем. Ряды данных в остальных полосах оптического диапазона, как уже упоминалось ранее, имеют сравнительно низкое заполнение точками. Для приблизительной оценки временного масштаба вариаций блеска применялась аппроксимация одной или несколькими синусоидами

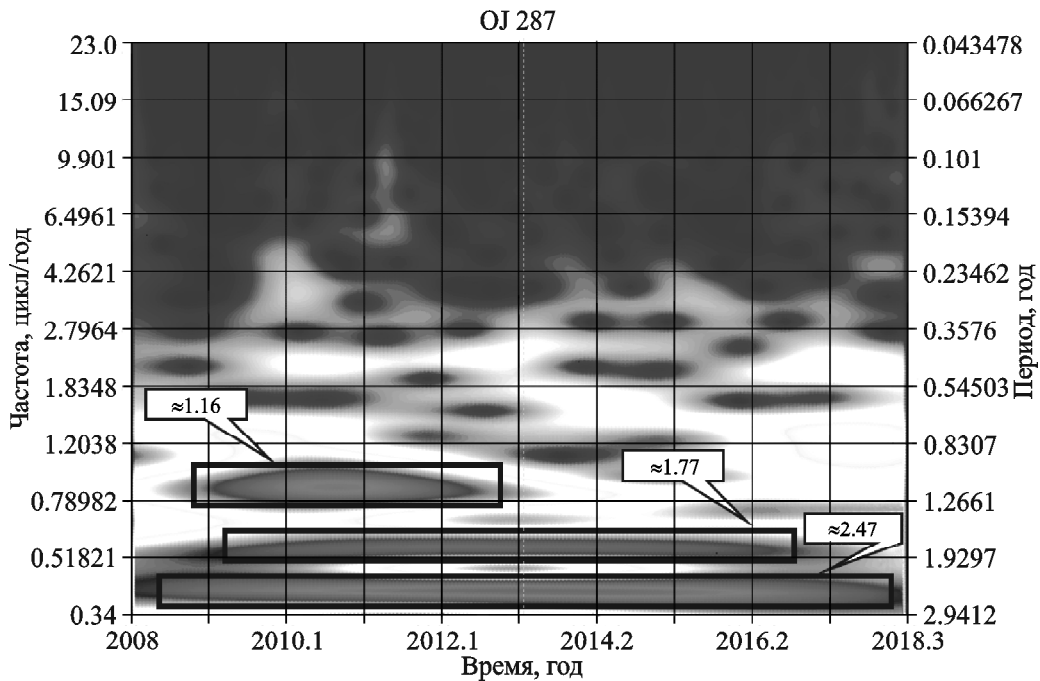


Рис. 4. Вейвлет-спектр, построенный по данным наблюдений в обсерватории OVRO на частоте 15 ГГц. Контурами показано изменение амплитуды вейвлет-спектра в виде $\sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2}$, Re и Im – вещественная и мнимая часть вейвлет-преобразования для каждого отсчета времени и частоты. Флажками отмечены основные квазипериоды, выраженные в годах

методом наименьших квадратов. Список возможных квазипериодов приведен в табл. 3.

6.2. Наблюдения в радиодиапазоне

После завершения программы мониторинга потоков излучения внегалактических радиоисточников на 26-метровом телескопе обсерватории UMRAO в 2012 г. наблюдения BL Lac продолжились на 14-метровом телескопе обсерватории Metsahovi (университет Аалто, Финляндия). Пример исходных данных, зарегистрированных в UMRAO на частоте 8 ГГц, и полученный на их основе вейвлет-спектр показаны на рис. 6. Результаты предыдущих исследований изменений плотности потока BL Lac по наблюдениям в UMRAO на частотах 14.5, 8, 4.8 ГГц, полученные авторами настоящей статьи, показали, что квазипериоды вариаций, почти полностью описывающие быструю переменность радиоисточника, лежат в интервале $\approx 4 \div 0.5$ года. Подобно вариациям в оптическом диапазоне, характер переменности соответствует промежуткам времени между множественными резкими всплесками и падениями плотности потока излучения. Следует отметить, что амплитуда их увеличивается на максимумах долговременной активности.

Эта интересная особенность радиоисточника BL Lac дополняется наличием основного долговременного квазипериода, который медленно увеличивается в интервале $\approx 7 \div 8$ лет, что делает этот радиоисточник популярным среди исследователей, проводящих тестирование и отладку численных моделей построения прогнозов изменения плотности потока излучения в будущем в связи с квазигармонической переменностью (подробнее в статьях [29, 30]). Переменность в радиодиапазоне исследовалась многими авторами с применением множества математических методов определения квазипериодов. Все методы показали довольно близкие результаты.

7. Сравнение отдельных колебаний в близких полосах периодов в радио- и оптическом диапазонах

Особенностью радиоисточников OJ 287 и BL Lac является наличие высокоамплитудной долговременной переменности. На нее накладываются быстрые вариации, увеличение амплитуды которых приходится на максимумы долговременной волны.

В настоящей работе авторы применили методику, позволяющую сравнивать между собой

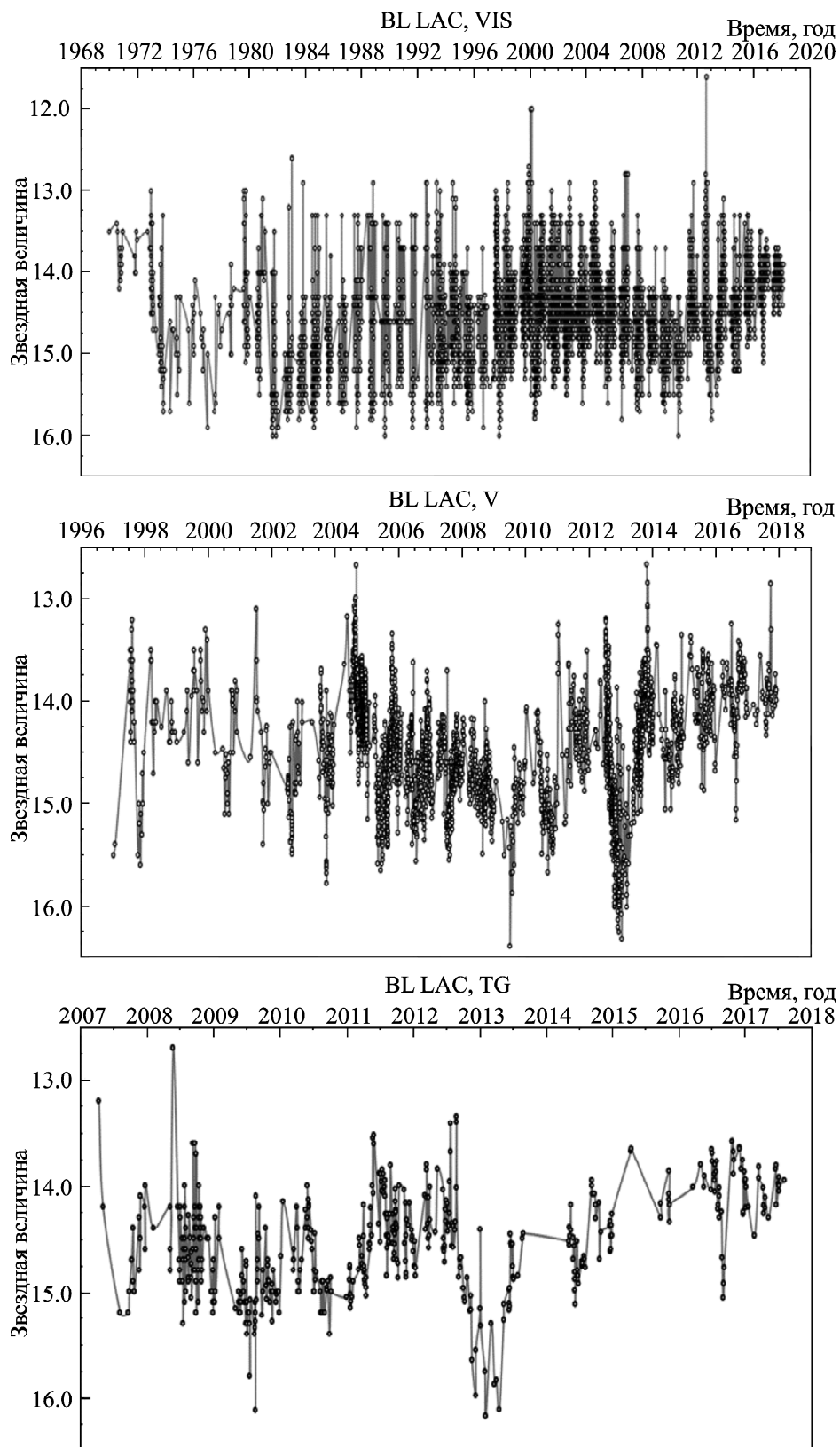


Рис. 5. Графики кривых блеска BL Lac в оптическом диапазоне: верхняя панель – полоса VIS, средняя панель – полоса V, нижняя панель – полоса TG

Таблица 3. Оценки возможных квазипериодов в данных наблюдений лацертиды BL Lac в полосах оптического диапазона

Полоса	Период наблюдений	Квазипериод, год	Погрешность вычисления, год
B	2004–2017 гг.	2.0	0.22
TG	2007–2017 гг.	4.7	0.25
		2.71	0.18
		1.17	0.1
CV	2005–2017 гг.	5.4	0.33
		0.8	0.16
R	2001–2016 гг.	1.1	0.087
I	2003–2015 гг.	12.0	0.3
		1.1	0.12

наиболее мощные колебания с квазипериодами, значения которых близки в радио- и оптическом диапазонах. Эта методика дает возможность исследовать процессы, формирующие различные фазы активности радиоисточников.

Сравнение наблюдений внегалактических радиоисточников в радио- и оптическом диапазонах часто представляет собой довольно сложную задачу. Оптические наблюдательные данные часто содержат множество разрывов и бывают сильно зашумленными. Поэтому прямая кросс-корреляция рядов данных часто дает не слишком надежные результаты. Для проверки этого предположения в данных, полученных в радио- (данные UMRAO на частоте 14.5 ГГц) и оптическом диапазонах, с помощью фурье-фильтрации были выделены колебания с максимальной амплитудой на периодограммах. Примеры графиков, построенных по данным наблюдений лацертиды OJ 287, показаны на рис. 7 и рис. 8.

На графиках кривых блеска лацертиды OJ 287 в радиодиапазоне (14.5 ГГц) и в оптическом диапазоне (полоса VIS) со значениями периодов ≈ 6 лет (см. рис. 7) задержка между фазами активности меняется со временем от ≈ 36 сут до ≈ 2 лет. Со временем максимумы активности в оптическом диапазоне “опережают” максимумы в радиодиапазоне.

На кривых блеска OJ 287 в радиодиапазоне (14.5 ГГц) и в оптическом диапазоне (полоса V) с одинаковым диапазоном периодов ($1 \div 2.5$ года) временной сдвиг между данными становится меньше (см. рис. 8). Интересно, что он изменяется со временем от ≈ 30 до ≈ 190 сут. Если

наложить на данные, полученные в радиодиапазоне, данные, полученные в оптической полосе CV (без светофильтра, но обработанные со звездными величинами звезд сравнения в V фильтре), задержка перестает значительно меняться со временем, оставаясь на уровне ≈ 47 сут. Интервал времени, в котором были получены данные в оптической полосе CV, приходится на конец времени наблюдений на 26-метровом радиотелескопе UMRAO. Поэтому в дальнейшем планируется взять для сравнения последние данные, полученные на 40-метровом радиотелескопе обсерватории OVRO.

Несколько иная картина наблюдается при совмещении кривых блеска BL Lac в радиодиапазоне (14.5 ГГц) и в оптическом диапазоне (полоса V). Например, в полосе периодов $\approx 1.5 \div 2$ года временная задержка плавно увеличивается от ≈ 124 сут (1998 г.) до ≈ 1.2 года (2006–2007 гг.). В полосе периодов $1.5 \div 4$ года задержка изменяется без выраженного тренда со временем в диапазоне $\approx 0.5 \div 0.9$ года. В рассмотренных примерах вариации в оптическом диапазоне опережают вариации в радиодиапазоне.

Однако приведенные примеры являются иллюстративными, показывающими применимость такого подхода к сравнению данных в этих двух диапазонах, и требуют дальнейшего углубленного анализа. Для точного сравнения амплитуд отдельных колебаний и построения графиков в одном формате необходимо перевести звездные величины в единицы плотности потока излучения (янские). Поскольку этот метод требует равномерного шага по времени, он напрямую зависит от возможности выполнить интерполяцию без искажений и ложных выбросов в местах разрывов кривой блеска. Такая процедура интерполяции применима к временным рядам наблюдений с достаточным заполнением точками и не критически большими разрывами, которые делают невозможной интерполяцию приемлемого качества.

8. Обсуждение полученных результатов

В результате применения вейвлет-анализа были выявлены основные периоды переменности лацертид OJ 287 и BL Lac в радио- и оптическом диапазонах. Важным итогом стало проведенное впервые сравнение динамики изменения амплитуд основных периодов, выявленных этим методом.

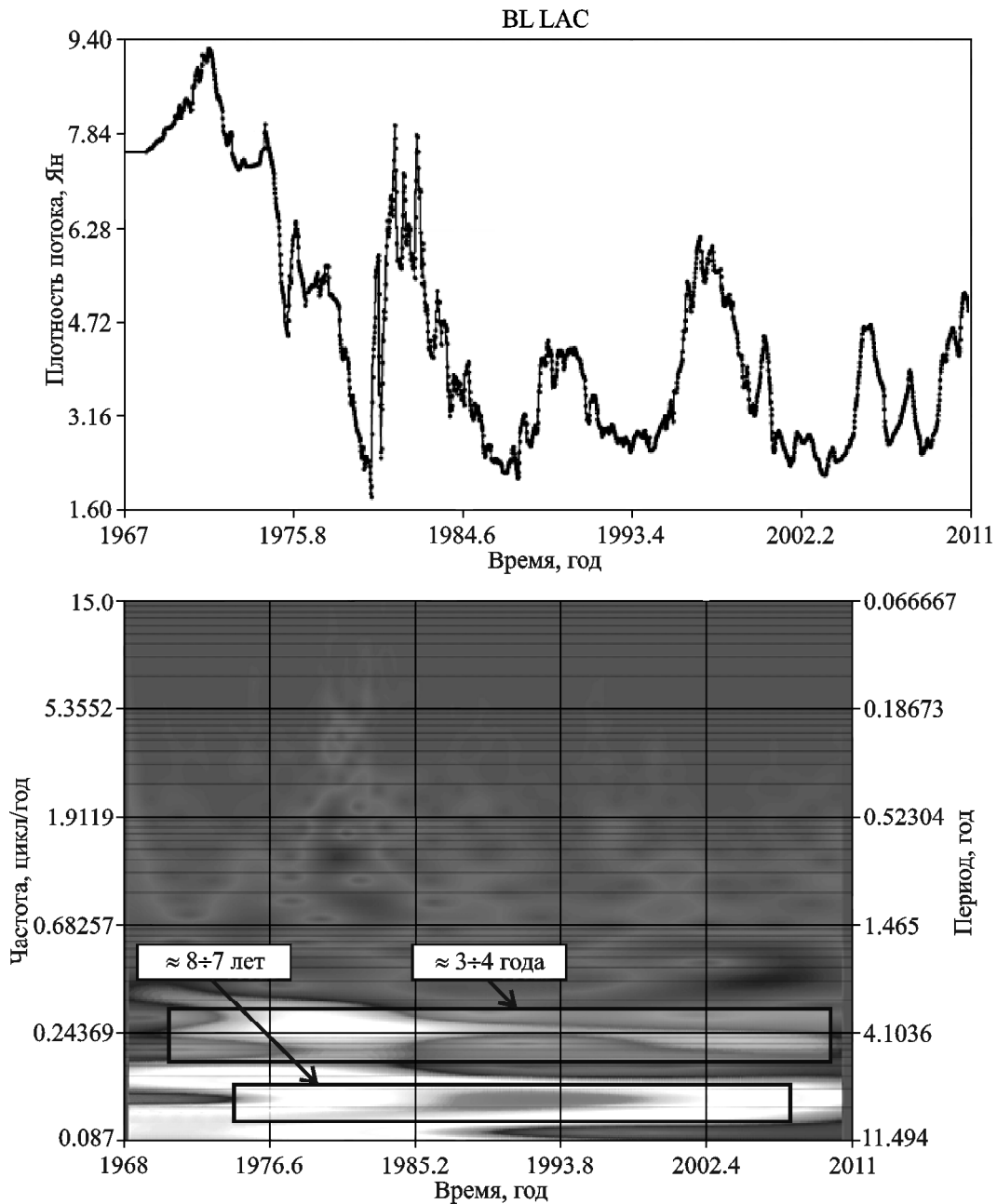


Рис. 6. График изменения плотности потока излучения радиосточника BL Lac на частоте 8 ГГц (верхняя панель) и его вейвлет-спектр (нижняя панель). Флажками отмечены основные квазипериоды, выраженные в годах

Самое большое сходство между квазипериодами в радио- и оптическом диапазонах было обнаружено в данных наблюдений лацертиды OJ 287. Оно выявлено как в архивных данных обсерватории UMRAO, так и в текущих наблюдениях в обсерватории OVRO. Вероятно, этот результат – следствие того, что оптическое излучение, так же как и радиоизлучение, преимущественно генерируется в джете радиосточника вследствие обратного компто-

новского рассеяния [31]. Совпадение данных в радио- и оптическом диапазонах заметнее всего проявляется в полосе периодов $\approx 1.1 \div 2$ года. Долговременные квазипериоды, более 6 лет, заметно отличаются в этих диапазонах.

Долговременная волна в радиодиапазоне с предполагаемой 25-летней цикличностью и волна с близким периодом ≈ 28 лет (неуверенно выделяемая в зашумленных визуальных данных)

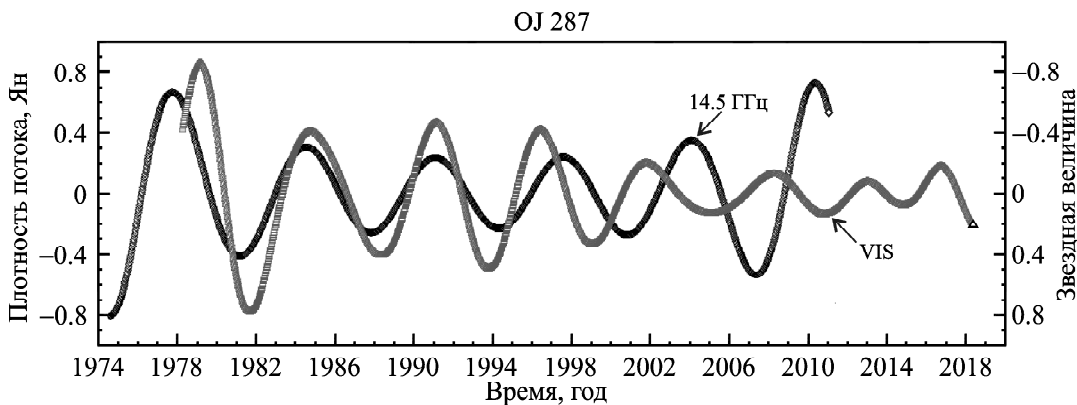


Рис. 7. Совмещенные графики колебаний плотности потока излучения лацертиды OJ 287 в радиодиапазоне (14.5 ГГц) с периодом 6.5 года и в оптическом диапазоне (полоса VIS) с периодом, близким к 5.7 года. Плотность потока излучения (шкала слева) и звездная величина (шкала справа) указаны с учетом вычитенных средних значений

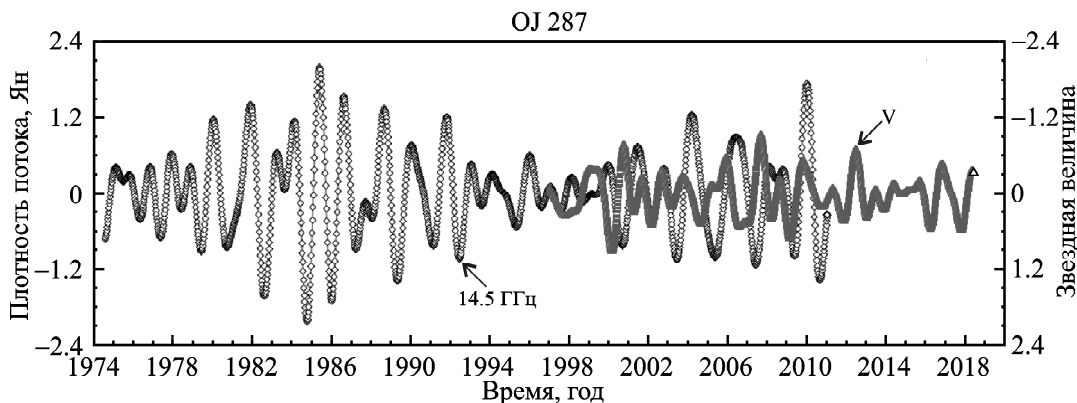


Рис. 8. Совмещенные графики колебаний плотности потока излучения лацертиды OJ 287 в диапазоне периодов 1 ÷ 2.5 года в радио- (14.5 ГГц) и оптическом (полоса V) диапазонах. Плотность потока излучения (шкала слева) и звездная величина (шкала справа) указаны с учетом вычитенных средних значений

могут быть связаны с прецессией джета радиоисточника. При этом хорошо заметная 12-летняя волна близка к полупериоду этих более длительных вариаций плотности потока и блеска радиоисточника OJ 287. Это предположение подтверждается в работе [32], в которой проведено моделирование движения и прецессии джета OJ 287 с использованием высокоточных наблюдений на радиотелескопе VLBA (Very Long Baseline Array) в период с 1995 по 2017 гг.

При сравнении данных наблюдений радиоисточника BL Lac в радио- и оптическом диапазонах проявляется схожая ситуация. Основной долговременный квазипериод около 7 ÷ 8 лет, четко проявившийся в радиодиапазоне, в проанализированных данных в оптическом диапазоне почти отсутствует (заметен только в визуальной

кривой блеска). Вероятно, по причине низкого качества и зашумленности данных наблюдений значение этого долговременного цикла в визуальной кривой блеска находится в интервале 7 ÷ 9 лет (по результатам БПФ-метода и вейвлет-метода).

Как показано в работе [33], корреляция между данными наблюдений BL Lac в радио- и оптическом диапазонах довольно слабая. Вспышки в оптическом диапазоне обычно соответствовали слабому увеличению потока излучения в радиодиапазоне либо вовсе не имели радио-отклика. Только наиболее мощные вспышки были заметны и в радиодиапазоне. Это может быть следствием того, что наблюдаемое оптическое излучение слабо связано с процессами в джете. В этом случае, возможно, преобладающим является вклад излучения аккреционного диска и ок-

ружающей его области, включая участок джета вблизи аккреционного диска. Описание нестабильных процессов в аккреционном диске, проявляющихся в оптических и рентгеновских кривых блеска, подробно дается в работе [34]. Самая лучшая (но тем не менее слабая) корреляция найдена между данными в оптической полосе V и в радиодиапазоне. Квазипериод со значением около $7 \div 8$ лет, ранее обнаруженный в данных многочастотных наблюдений в радиодиапазоне, очень неуверенно выделяется в оптическом диапазоне. Этот квазипериод считается прецессионным в радиодиапазоне. Однако квазипериод ≈ 13 лет в визуальной (глазомерной) полосе очень близок к удвоенному значению основного квазипериода в радиодиапазоне.

9. Выводы

1. Анализ и сравнение данных наблюдений в радио- и оптическом диапазонах лацертиды OJ 287 показали хорошее сходство значений основных долговременных квазипериодов ≈ 25 лет (радиодиапазон) и ≈ 28 лет (оптический диапазон). В обоих диапазонах активность источника OJ 287 проявляется во множестве вспышек продолжительностью от ≈ 1 года до ≈ 1.5 и 2 лет, которые накладываются на медленные долговременные колебания ($\approx 6, 12, 28$ лет (оптический диапазон) и ≈ 25 лет (радиодиапазон)). Значения периодов повторения быстрых вариаций потока излучения и звездной величины OJ 287 лежат в пределах $\approx 1.1 \div 2$ года. Выделенные цифровой фильтрацией фрагменты кривых блеска в этих границах хорошо описывают быстропеременную составляющую рядов наблюдений.

2. В то же время периоды ≈ 12 лет и ≈ 6 лет, известные по “историческим” рядам данных наблюдений OJ 287 в оптическом диапазоне и выявленные в кривых блеска в базе данных AAVSO, в радиодиапазоне почти незаметны. Это означает, что по данным UMRAO (1974–2012 гг.) максимум 6-летнего периода находится ниже доверительного уровня периодограммы 99.9, а по данным OVRO (2008–2018 гг.) этот период приблизительно соответствует расстоянию между двумя вспышками с плотностью потока излучения более 9 Ян. Наблюдаемый в радиодиапазоне приблизительно 25-летний цикл является фрагментом синусоидального тренда и отмечается у лацертид довольно редко.

3. Переменность BL Lac более сложная, она состоит из множества колебаний, повторяющихся с квазипериодами от 1 года до $2 \div 3$ лет. В оптическом диапазоне, как и в радиодиапазоне, возможно изменение периодов и амплитуд колебаний во времени, и значения периодов несколько отличаются даже в близких оптических полосах. В оптическом диапазоне, в отличие от радиодиапазона, близкое к 8 годам значение периода (9 лет) наблюдается только в визуальной кривой блеска.

4. Наибольшее сходство значений периодов переменности BL Lac в радио- и оптическом диапазонах наблюдается в интервале $\approx 0.6 \div 4$ года. Период со значением, близким к $5 \div 6$ годам, наблюдаемый в оптическом диапазоне в фильтрах V, CV и TG (данные из каталога AAVSO) не подтверждается имеющимися результатами наблюдений в радиодиапазоне. Не подтверждается наблюдениями в радиодиапазоне и долговременный цикл со значением $12 \div 13$ лет, а возможно и более длительный, присутствующий в оптическом диапазоне.

5. Важным результатом работы стало обнаружение монотонных изменений временных сдвигов основных периодов переменности исследуемых объектов, наблюдаемой в радио- и оптическом диапазонах. Этот результат позволит в дальнейшем выявить физические процессы, приводящие к изменению задержек между кривыми блеска в полосах основных периодов в радио- и оптическом диапазонах.

6. Проведение сравнительного анализа наблюдений быстропеременных объектов в радио- и оптическом диапазонах с применением современных методов сплайн-аппроксимации данных, полосовой фильтрации и непрерывного вейвлет-анализа позволит определять причинно-следственные связи в развитии активности ядер галактик в самых различных их проявлениях.

Вклад в работу А. Л. Сухарева был профинансирован грантом на проведение постдокторских исследований ЕФРР № 1.1.1.2/VIAA/2/18/363 “Исследование внутрисуточной и межсуточной переменности различных типов внегалактических радиисточников на телескопах Вентспилсского международного радиоастрономического центра (VIRAC)”. Проект выполняется в Вентспилском университете прикладных наук.

Acknowledgements

The contribution of Artem Sukharev has been funded by ERDF postdoctoral grant No. 1.1.1.2/VIAA/2/18/363 “Investigation of intra-day and inter-day variability of various types of extragalactic radio sources using telescopes of the Ventspils International Radio Astronomy Centre (VIRAC)”. Project is being implemented in Ventspils University of Applied Sciences.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tang J., Zhang H.-J., and Pang Q. Long term periodicity analysis of OJ 287 at optical V waveband. *J. Astrophys. Astron.* 2014. Vol. 35, Is. 3. P. 301–305. DOI: 10.1007/s12036-014-9218-8
2. Valtonen M. and Ciprini S. OJ 287 binary black hole system. *Mem. S. A. It.* 2012. Vol. 83. P. 219.
3. Fan J. H., Xie G. Z., Pecontal E., Pecontal A., and Copin Y. Historic light curve and long-term optical variation of BL Lacertae 2200+420. *Astrophys. J.* 1998. Vol. 507, No. 1. P. 173–178. DOI: 10.1086/306301
4. Weistrop D. BL Lac: strong short-term variability. *Nature Phys. Sci.* 1973. Vol. 241, Is. 113. P. 157–158. DOI: 10.1038/physci241157a0
5. Xie G. Z., Li K. H., Cheng F. Z., Hao P. J., Li Z. L., Lu R. W., and Li G. H. Search for short variability timescales of BL Lacertae objects. *Astron. Astrophys.* 1990. Vol. 229, No. 2. P. 329–339.
6. Corbett E. A., Robinson A., Axon D. J., Hough J. H., Jeffries R. D., Thurston M. R., and Young S. The appearance of broad H alpha in BL Lacertae. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1996. Vol. 281, Is. 3. P. 737–749. DOI: 10.1093/mnras/281.3.737
7. Liu X., Yang P. P., Liu J., Liu B. R., Hu S. M., Kurtanidze O. M., Zola S., Kraus A., Krichbaum T. P., Su R. Z., Gazeas K., Sadakane K., Nilson K., Reichart D. E., Kidger M., Matsumoto K., Okano S., Siwak M., Webb J. R., Pursimo T., Garcia F., Naves Nogueis R., Erdem A., Alicavus F., Balonek T., and Jorstad S. G. Radio and optical intra-day variability observations of five blazars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2017. Vol. 469, Is. 2. P. 2457–2463. DOI: 10.1093/mnras/stx1062
8. 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.
9. Tang J. Cross-wavelet analysis of the radio flux of BL Lac object OJ 287. *Scientia Sinica Phys. Mech. Astron.* 2014. Vol. 44, Is. 8. P. 865–871. DOI: 10.1360/SSPMA2013-00068
10. 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
11. 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, Is. 2. P. 695–713. DOI: 10.1086/375511
12. Netzer H. Revisiting the Unified Model of Active Galactic Nuclei. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 2015. Vol. 53. P. 365–408. DOI: 10.1146/annurev-astro-082214-122302
13. Godfrey L. E. H., Lovell J. E. J., Burke-Spolaor S. D., Ekers R., Bicknell G. V., Birkinshaw M., Worrall D. M., Jauncey D. L., Schwartz D. A., Marshall H. L., Gelbord J., Perlman E. S., and Georganopoulos M. Periodic structure in the Mpc-scale jet of PKS 0637-752. *Astrophys. J. Lett.* 2012. Vol. 758, Is. 2. id. L27. DOI: 10.1088/2041-8205/758/2/L27
14. Kudryavtseva N. A., Britzen S., Witzel A., Ros E., Karouzos M., Aller M. F., Aller H. D., Teräsraanta H., Eckart A., and Zensus A. J. A possible jet precession in the periodic quasar B0605-085. *Astron. Astrophys.* 2010. Vol. 526. id. A51. DOI: 10.1051/0004-6361/201014968
15. Meliani Z. and Keppens R. Transverse stability of relativistic two-component jets. *Astron. Astrophys.* 2007. Vol. 475, No. 3. P. 785–789. DOI: 10.1051/0004-6361:20078563
16. Bicknell G. V. and Wagner S. J. The Evolution of Shocks in Blazar Jets. *Publ. Astron. Soc. Aust.* 2002. Vol. 19, Is. 1. P. 129–137. DOI: 10.1071/AS02009
17. Tremaine S. and Davis S. W. Dynamics of warped accretion discs. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2014. Vol. 441, Is. 2. P. 1408–1434. DOI: 10.1093/mnras/stu663
18. Arevalo P. Probing the Accretion Disc-Corona Connection in AGN through X-ray and Optical Variability. The Starburst-AGN Connection. In: *ASP Conference Series*. Vol. 408. W. Wang, Z. Yang, Z. Luo, and Z. Chen, eds. (October 27–31, 2008, Shanghai Normal University, Shanghai, China). San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2009. P. 296.
19. Миронов А. В. *Основы астрофотометрии. Практические основы фотометрии и спектрофотометрии звезд*. Москва: Физматлит, 2008. 260 с.
20. Borisov A. A., Bruevich E. A., Bruevich V. V., Rozgacheva I. K., and Shimanovskaya E. V. Wavelet-analysis of series of observations of relative sunspot numbers. The dependence of the periods of cyclic activity on the time at different time scales. *arXiv:1512.04098v1 [astro-ph.SR]* 2015. URL: <https://arxiv.org/abs/1512.04098> (дата обращения: 12.04.2019)
21. Hinich M. J., Foster J., and Wild P. Discrete Fourier transform filters: cycle extraction and Gibbs effect considerations. *Macroecon. Dyn.* 2009. Vol. 13, Is. 4. P. 523–534. DOI: 10.1017/S1365100509080237
22. Breaz N. The cross-validation method in the smoothing spline regression. *Acta Univ. Apulensis Math. Inform.* 2004. Vol. 7. P. 77–84.
23. Piegl L. and Tiller W. Curve and Surface Fitting. In: *The NURBS Book. Monographs in Visual Communications*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1997. P. 361–453. DOI: 10.1007/978-3-642-97385-7_9
24. Guo Q., Xiong D.-R., Bai J.-M., Fan X.-L., and Yi W.-M. Optical multi-color monitoring of OJ 287 from 2006 to 2012. *Res. Astron. Astrophys.* 2017. Vol. 17, No. 8. id. 82. DOI: 10.1088/1674-4527/17/8/82
25. Pihajoki P., Valtonen M., and Ciprini S. Short time-scale periodicity in OJ 287. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2013. Vol. 434, Is. 4. P. 3122–3129. DOI: 10.1093/mnras/stt1233

26. Stothers R. B. and Sillanpää A. Test of Periodicity in the Quasar OJ 287. *Astrophys. J. Lett.* 1997. Vol. 475, No. 1. id. L13. DOI: 10.1086/310465
27. Bhatta G., Zola S., Stawarz Ł., Ostrowski M., Winiarski M., Ogłóza W., Drózdź M., Siwak M., Liakos A., Koziel-Wierzbowska D., Gazeas K., Debski B., Kundera T., Stachowski G., and Paliya V. S. Detection of possible quasi-periodic oscillations in the long-term optical light curve of the BL Lac object OJ 287. *Astrophys. J.* 2016. Vol. 832, No. 1. id. 47. DOI: 10.3847/0004-637X/832/1/47
28. Fan J.-H., Liu Y., Qian B.-C., Tao J., Shen Z.-Q., Zhang J.-S., Huang Y., and Wang J. Long-term variation time scales in OJ 287. *Res. Astron. Astrophys.* 2010. Vol. 10, No. 11. P. 1100–1108. DOI: 10.1088/1674-4527/10/11/002
29. Рябов М. И., Сухарев А. Л., Донских А. И. Каталог периодов переменности внегалактических радиоисточников в сантиметровом диапазоне длин волн. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2016. Т. 21, № 3. С. 161–188. DOI: 10.15407/rpra21.03.161
30. Сухарев А. Л., Рябов М. И., Донских А. И. Прогнозирование изменений плотности потока радиоизлучения внегалактических источников. *Астрофизика.* 2016. Т. 59, № 2. С. 245–261.
31. Potter W. J. and Cotter G. Synchrotron and inverse-Compton emission from blazar jets - IV. BL Lac type blazars and the physical basis for the blazar sequence. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2013. Vol. 436, Is. 1. P. 304–314. DOI: 10.1093/mnras/stt1569
32. Britzen S., Fendt C., Witzel G., Qian S.-J., Pashchenko I. N., Kurtanidze O., Zajacek M., Martinez G., Karas V., Aller M., Aller H., Eckart A., Nilsson K., Arévalo P., Cuadra J., Subroweit M., and Witzel A. OJ287: deciphering the “Rosetta stone of blazars”. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2018. Vol. 478, Is. 3. P. 3199–3219. DOI: 10.1093/mnras/sty1026
33. 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
34. Wiita P. J. Accretion Disk Models for Rapid Variability. Blazar continuum variability. In: *ASP Conference Series.* Vol. 110. H. R. Miller, J. R. Webb, and J. C. Noble, eds. (February 4–7, 1996, Florida International University, Miami, Florida, USA). San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 1996. P. 42.
5. XIE, G. Z., LI, K. H., CHENG, F. Z., HAO, P. J., LI, Z. L., LU, R. W. and LI, G. H., 1990. Search for short variability time-scales of BL Lacertae objects. *Astron. Astrophys.* vol. 229, no. 2, pp. 329–339.
6. CORBETT, E. A., ROBINSON, A., AXON, D. J., HOUGH, J. H., JEFFRIES, R. D., THURSTON, M. R. and YOUNG, S., 1996. The appearance of broad H alpha in BL Lacertae. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 281, is. 3, pp. 737–749. DOI: 10.1093/mnras/281.3.737
7. LIU, X., YANG, P. P., LIU, J., LIU, B. R., HU, S. M., KURTANIDZE, O. M., ZOLA, S., KRAUS, A., KRICHBAUM, T. P., SU, R. Z., GAZEAS, K., SADAKANE, K., NILSON, K., REICHART, D. E., KIDGER, M., MATSUMOTO, K., OKANO, S., SIWAK, M., WEBB, J. R., PURSIMO, T., GARCIA, F., NAVES NOGUES, R., ERDEM, A., ALICAVUS, F., BALONEK, T. and JORSTAD, S. G., 2017. Radio and optical intra-day variability observations of five blazars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 469, is. 2, pp. 2457–2463. DOI: 10.1093/mnras/stx1062
8. 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.
9. TANG, J., 2014. Cross-wavelet analysis of the radio flux of BL Lac object OJ 287. *Scientia Sinica Phys. Mech. Astron.* vol. 44, is. 8, pp. 865–871. DOI: 10.1360/SSPMA2013-00068
10. 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
11. 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, is. 2, pp. 695–713. DOI: 10.1086/375511
12. NETZER, H., 2015. Revisiting the Unified Model of Active Galactic Nuclei. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* vol. 53, pp. 365–408. DOI: 10.1146/annurev-astro-082214-122302
13. GODFREY, L. E. H., LOVELL, J. E. J., BURKE-SPLAOR, S. D., EKERS, R., BICKNELL, G. V., BIRKINSHAW, M., WORRALL, D. M., JAUNCEY, D. L., SCHWARTZ, D. A., MARSHALL, H. L., GELBORD, J., PERLMAN, E. S. and GEORGANOPOULOS, M., 2012. Periodic structure in the Mpc-scale jet of PKS 0637-752. *Astrophys. J. Lett.* vol. 758, is. 2, id. L27. DOI: 10.1088/2041-8205/758/2/L27
14. KUDRYAVTSEVA, N. A., BRITZEN, S., WITZEL, A., ROS, E., KAROUZOS, M., ALLER, M. F., ALLER, H. D., TERÄSRANTA, H., ECKART, A. and ZENSUS, A. J., 2010. A possible jet precession in the periodic quasar B0605-085. *Astron. Astrophys.* vol. 526, id. A51. DOI: 10.1051/0004-6361/201014968
15. MELIANI, Z. and KEPPENS, R., 2007. Transverse stability of relativistic two-component jets. *Astron. Astrophys.* vol. 475, no. 3, pp. 785–789. DOI: 10.1051/0004-6361:20078563
16. BICKNELL, G. V. and WAGNER, S. J., 2002. The Evolution of Shocks in Blazar Jets. *Publ. Astron. Soc. Aust.* vol. 19, is. 1, pp. 129–137. DOI: 10.1071/AS02009

REFERENCES

17. TREMAINE, S. and DAVIS, S. W., 2014. Dynamics of warped accretion discs. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 441, is. 2, pp. 1408–1434. DOI: 10.1093/mnras/stu663
18. AREVALO, P., 2009. Probing the Accretion Disc-Corona Connection in AGN through X-ray and Optical Variability. The Starburst-AGN Connection. In: W. WANG, Z. YANG, Z. LUO, and ZHU CHEN, eds. *ASP Conference Series*. vol. 408. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, p. 296.
19. MIRONOV, A. V., 2008. *Fundamentals of Astrophotometry: Practical Basics of Stellar Photometry and Spectrophotometry*. Moscow, Russia: Fizmatlit Publ. (in Russian).
20. BORISOV, A. A., BRUEVICH, E. A., BRUEVICH, V. V., ROZGACHEVA, I. K. and SHIMANOVSKAYA, E. V., 2015. Wavelet-analysis of series of observations of relative sunspot numbers. The dependence of the periods of cyclic activity on the time at different time scales. *arXiv:1512.04098v1[astro-ph.SR]*. [online]. [viewed 12 April 2019]. Available from: <https://arxiv.org/abs/1512.04098>
21. HINICH, M. J., FOSTER, J. and WILD, P., 2009. Discrete Fourier transform filters: cycle extraction and Gibbs effect considerations. *Macroecon. Dyn.* vol. 13, is. 4, pp. 523–534. DOI: 10.1017/S1365100509080237
22. BREAZ, N., 2004. The cross-validation method in the smoothing spline regression. *Acta Univ. Apulensis Math. Inform.* vol. 7, pp. 77–84.
23. PIEGL, L. and TILLER, W., 1997. Curve and Surface Fitting. In: *The NURBS Book. Monographs in Visual Communications*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 361–453. DOI: 10.1007/978-3-642-97385-7_9
24. GUO, Q., XIONG, D.-R., BAI, J.-M., FAN, X.-L. and YI, W.-M., 2017. Optical multi-color monitoring of OJ 287 from 2006 to 2012. *Res. Astron. Astrophys.* vol. 17, no. 8, id. 82. DOI: 10.1088/1674-4527/17/8/82
25. PIHAJOKI, P., VALTONEN, M. and CIPRINI, S., 2013. Short time-scale periodicity in OJ 287. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 434, is. 4, pp. 3122–3129. DOI: 10.1093/mnras/stt1233
26. STOTHERS, R. B. and SILLANPÄÄ, A., 1997. Test of Periodicity in the Quasar OJ 287. *Astrophys. J. Lett.* vol. 475, no. 1, id. L13. DOI: 10.1086/310465
27. BHATTA, G., ZOLA, S., STAWARZ, Ł., OSTROWSKI, M., WINIARSKI, M., OGŁOZA, W., DRÓZDŹ, M., SIWAK, M., LIAKOS, A., KOZIEL - WIERZBOWSKA, D., GAZEAS, K., DEBSKI, B., KUNDERA, T., STACHOWSKI, G. and PALIYA, V. S., 2016. Detection of possible quasi-periodic oscillations in the long-term optical light curve of the BL Lac object OJ 287. *Astrophys. J.* vol. 832, no. 1, id. 47. DOI: 10.3847/0004-637X/832/1/47
28. FAN, J.-H., LIU, Y., QIAN, B.-C., TAO, J., SHEN, Z.-Q., ZHANG, J.-S., HUANG, Y. and WANG, J., 2010. Long-term variation time scales in OJ 287. *Res. Astron. Astrophys.* vol. 10, no. 11, pp. 1100–1108. DOI: 10.1088/1674-4527/10/11/002
29. RYABOV, M. I., SUKHAREV, A. L. and DONS-KYKH, H. I., 2016. Catalog of Variability Periods of Extragalactic Radio Sources at Centimeter Wavelengths. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 21, no. 3, pp. 161–188. (in Russian). DOI: 10.15407/rpra21.03.161
30. SUKHAREV, A. L., RYABOV, M. I. and DONS-KYKH, G. I., 2016. Predicting Flux Density Changes of Extragalactic Radio Sources. *Astrofizika*. vol. 59, no. 2, pp. 245–261. (in Russian).
31. POTTER, W. J. and COTTER, G., 2013. Synchrotron and inverse-Compton emission from blazar jets - IV. BL Lac type blazars and the physical basis for the blazar sequence. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 436, is. 1, pp. 304–314. DOI: 10.1093/mnras/stt1569
32. BRITZEN, S., FENDT, C., WITZEL, G., QIAN, S.-J., PASHCHENKO, I. N., KURTANIDZE, O., ZAJACEK, M., MARTINEZ, G., KARAS, V., ALLER, M., ALLER, H., ECKART, A., NILSSON, K., ARÉVALO, P., CUADRA, J., SUBROWEIT, M. and WITZEL, A., 2018. OJ287: deciphering the ‘Rosetta stone of blazars’. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 478, is. 3, pp. 3199–3219. DOI: 10.1093/mnras/sty1026
33. 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
34. WIITA, P. J., 1996. Accretion Disk Models for Rapid Variability. Blazar continuum variability. In: H. R. MILLER, J. R. WEBB, and J. C. NOBLE, eds. *ASP Conference Series*. vol. 110. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, p. 42.

A. L. Sukharev^{1,2}, M. I. Ryabov¹, and V. V. Bezrukovs²

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

²Ventspils International Radio Astronomy Center (VIRAC), 101, Inženieru St., Ventspils, LV-3601, Latvia

PROPERTY STUDY OF OJ 287 AND BL LAC VARIABILITY IN OPTICAL AND RADIO RANGES

Purpose: Interrelation and difference in the appearance of quasi-periodic activity of BL-Lac objects OJ 287 and BL Lac is investigated according to optical and radio observations. The aim of the work is to determine and compare the basic quasi-periods of these BL-Lac objects in different light filters of optical range and in radio frequency range (at 15 and 14.5 GHz), as well as brief overview of the results obtained by other authors. Also, the method of comparing optical and radio data in separate bands of close periods was tested. This method will make it possible to better determine the delays between optical and radio data only in the bands of the main quasiperiodic oscillations, which form light curves and screen out noises and irregular variations in the source magnitude and flux.

Design/methodology/approach: The authors used the data of optical observations of OJ 287 in 1978–2018 and of BL Lac in 1970–2018 from the AAVSO (American Association of Variable Star Observers) catalog and from the catalog of a long-term (2008–2018) radio source monitoring at the 40-meter radio telescope, OVRO observatory (Owens Valley Radio Observatory, USA) at 15 GHz, as well as the data from UMRAO observatory (Radio observatory of Michigan University) obtained at 14.5 GHz within 1974–2011. To calculate periodograms and wavelet spectra, a “fast” modification of the Lomb-Scargle me-

thod was used, as well as a “fast” method of calculating wavelet spectra via fast Fourier transform with the Morlet analyzing function. Data interpolation has been made by using smoothing cubic splines. To isolate the bands of individual quasi-periods in optical and radio data, Fourier filtering with a Hamming spectral window is used providing the edge effects of about 1 % of time series length.

Findings: Radio source OJ 287 shows good accordance between quasi-periods in optics and radio within 1.1 to 2 years. However, long-term periods in the optical range, close to 12 and 6 years, mentioned in many works, are practically imperceptible in the radio range, against the background of 25-year trend wave. The BL Lac radio source has more differences. In the optical range, a quasi-period of 9 years (about 8 years in the radio one) is observed in the visual light curve. A long wave with the possible period of about 12–13 years, in the optical and radio data is unnoticeable, and the greatest similarity between rapid variability in optical and radio ranges is observed within the periods of 0.6–4 years. Comparison of individual oscillations in close periods for optical and radio data allocated by the Fourier filtering showed their good similarity and perspective in further use of this method in analyzing time delays between these frequency ranges.

Conclusions: Study of variability properties of OJ 287 and BL Lac according to the data of optical and radio observations showed similarities and differences in quasi-periods of their activity, which can be due to the difference of emitting regions in optical and radio ranges. In the optical range, in addition to the jet radiation due to the inverse Compton effect, there exists a contribution from the accretion radiation disk, whose wave processes can give different set of quasi-periods than those observed in the radio range. Therefore, qualitative observations of these radio sources (especially optical) are very important for further construction of models capable of taking into account differences in the processes which form radiation variability in optical and radio ranges.

Key words: BL-Lac objects, bandpass filtering, photometry, periodogram, wavelet analysis

A. Л. Сухарев^{1,2}, *М. І. Рябов*¹, *В. В. Безруковс*²

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

² Вентспілський міжнародний радіоастрономічний центр
(VIRAC),
вул. Інженієру, 101, м. Вентспілс, LV-3601, Латвія

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗМІННОСТІ ЛАЦЕРТИД OJ 287 І BL LAC В ОПТИЧНОМУ ТА РАДІОДІАПАЗОНІ

Предмет і мета роботи: Досліджується взаємозв’язок і відмінність у прояві квазіперіодичної активності лацертид OJ 287 і BL Lac за даними оптичних і радіоспостережень. Метою роботи є визначення та порівняння основних квазіперіодів цих лацертид в різних світлофільтрах оптичного діапазону і в радіодіапазоні (на частотах 15 та 14.5 ГГц), а також короткий огляд результатів, отриманих іншими ав-

торами. Випробувано також метод порівняння оптичних і радіоданих в окремих смугах близьких періодів. Цей метод дозволяє краще визначати затримки між оптичними та радіоданими в смугах основних квазіперіодичних коливань, що формують криві блиску, і “відсівають” шуми і нерегулярні варіації блиску та потоку випромінювання джерел.

Методи і методологія: Використовувалися дані оптичних спостережень OJ 287 у 1978–2018 рр. і BL Lac у 1970–2018 рр. з каталога AAVSO (American Association of Variable Star Observers) та каталога довготермінового (2008–2018 рр.) моніторингу радіоджерел на 40-метровому радіотелескопі обсерваторії OVRO (Owens Valley Radio Observatory, USA) на частоті 15 ГГц, а також дані обсерваторії UMRAO (Radio observatory of Michigan University) отримані на частоті 14.5 ГГц у 1974–2011 рр. Для обчислення періодограм та вейвлет-спектрів використовувалися “швидка” модифікація метода Ломба–Скаргла, а також “швидкий” метод розрахунку вейвлет-спектрів за допомогою швидкого перетворення Фур’є з аналізуючою функцією Морле. Інтерполяція даних виконувалася за допомогою згладжуючих кубічних сплайнів. Для виділення смуг окремих квазіперіодів у оптичних та радіоданих використовувалася фур’є-фільтрація зі спектральним вікном Хеммінга, яка забезпечує крайові ефекти близько 1 % від довжини часового ряду.

Результати: У радіоджерела OJ 287 спостерігається добра відповідність між квазіперіодами в оптичному і радіодіапазоні у смузі від 1.1 року до 2 років. Однак довготривалі періоди в оптичному діапазоні, близькі до 12 та 6 років, згадувані в багатьох працях, в радіодіапазоні є практично непомітними на тлі 25-річної трендової хвилі. У радіоджерела BL Lac відмінностей більше. У оптичному діапазоні квазіперіод у 9 років (в радіодіапазоні близько 8 років) спостерігається у візуальній кривій блиску. Тривала хвиля з можливим періодом близько 12 ÷ 13 років у оптичних даних в радіоданих непомітна, а найбільшу схожість між швидкою перемінністю в оптичному і радіодіапазоні спостерігається у смузі періодів 0.6 ÷ 4 роки. Порівняння окремих коливань у близьких смугах періодів для оптичних і радіоданих, виділених фур’є-фільтрацією, показало їх добру схожість та перспективність подальшого використання цього методу у аналізі часових затримок між цими діапазонами.

Висновок: Дослідження властивостей змінності лацертид OJ 287 і BL Lac за даними оптичних і радіоспостережень показало схожість та відмінності в квазіперіодах їх активності, що можуть бути пов’язані з відмінністю випромінюючих областей у оптичному та радіодіапазоні. У оптичному діапазоні, окрім випромінювання джета через дію зворотного комптон-ефекту, спостерігається внесок випромінювання аккреційного диску, хвильові процеси в якому можуть давати інший набір квазіперіодів, ніж в радіодіапазоні. Тому якісні спостереження цих радіоджерел (особливо оптичні) є дуже важливими для подальшої побудови моделей, що враховують відмінності в процесах, що формують змінність випромінювання у оптичному і радіодіапазоні.

Ключові слова: лацертиди, смугова фільтрація, фотометрія, періодограма, вейвлет-аналіз

Статья поступила в редакцию 10.05.2019