

УДК 524.7-77

ВСПЫШЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ БЛАЗАРА АО 0235+164

© 2019 г. А. Е. Вольвач^{1, 2}, Л. Н. Вольвач^{1, *}, М. Г. Ларионов³, А. Лахтеенмаки^{4, 5}, М. Торникоски⁴, Дж. Тамми⁴, Е. Йярвела^{4, 5}, Р. Дж. С. Вера^{4, 5}, В. Чамани^{4, 5}, С. Енестам^{4, 5}

¹Отдел радиоастрономии и геодинамики Крымская астрофизическая обсерватория РАН, г. Ялта, Крым

²Институт прикладной астрономии РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

³Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия

⁴Радиообсерватория Аалто университета, г. Килмала, Финляндия

⁵Департамент электроники и наноинженеринга Аалто университета, Хельсинки, Эспоо, Финляндия
*volvach@bk.ru

Поступила в редакцию 31.07.2017 г.

После доработки 31.07.2018 г.

Принята к публикации 19.09.2018 г.

Приведены данные анализа длительного многочастотного мониторинга активного ядра галактики (АЯГ) АО 0235+164 в миллиметровом диапазоне длин волн. С помощью гармонического анализа данных наблюдений определено наличие орбитального и прецессионного периодов в двойной системе из сверхмассивных черных дыр (СМЧД): $T_{\text{орб}} \approx 2$ года, $T_{\text{пр}} \approx 8$ лет. Указанные периоды находятся в согласии с аналогичными периодами, найденными для других ярких АЯГ. В системе АО 0235+164 определены и другие комбинационные периодические составляющие, которые возможно связаны и с нутационным периодом. По данным наблюдений развития вспышечных явлений на разных частотах проведен кросс-корреляционный анализ и определены задержки смещения времени моментов вспышек, происходящих на разных длинах волн. Подтверждено по аналогии с другими АЯГ эмпирическое соотношение, которому подчиняются задержки изменений потоков с частотой, имеющее вид обратногологарифмической зависимости. Характер задержек может указывать на внутренний характер переменности потоков излучения АЯГ, полученный на частотах сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн. Подтверждается гипотеза джетовой активности АЯГ, при которой плазменное образование, перемещаясь от истоков выброса, становится оптически тонким последовательно на все более длинных волнах. Уменьшение задержек между частотами для вспышечного явления 2015 г. в сравнении с предшествующей вспышкой (2008–2009) гг. свидетельствует о возможном изменении конфигурации в АО 0235+164, связанной с уменьшением угла между выбросами и направлением на наблюдателя.

DOI: 10.1134/S0023420619020092

1. ВВЕДЕНИЕ

Активное ядро галактики АО 0235+164, обладающее характеристиками блазара, относится к классу ярчайших АЯГ, которые активно исследуются в широком диапазоне длин волн на многих обсерваториях мира. В объекте зафиксированы значительные изменения плотности потока излучения на различных временных масштабах от долей часов до десятков лет. Как и в других выдающихся АЯГ, в источнике АО 0235+164 наблюдаются сверхкомпактные структурные образования. Такие детали имеют высокую яркостную температуру и обладают сверхсветовыми движениями. В них отмечена высокая поляризация радио- и оптического излучения. Именно релятивистскими доплеровскими эффектами объясняются предельно высокие яркостные температуры, получаемые по

данным интерферометрических наблюдений и измерений на одиночных антеннах [1, 2].

В объекте обнаружены эмиссионные линии с красным смещением $z = 0.94$ [3, 4]. Исследования блазара были начаты даже раньше проведения его оптических отождествлений [5].

Исследования вариаций излучения АО 0235+164 в различных диапазонах длин волн выявили значительный уровень переменности потока излучения на различных временных интервалах от долей часов до десятков лет [6–12]. Диапазон изменения потоков увеличивается с ростом частоты наблюдений. Уже в оптическом диапазоне изменения плотности потока излучения на порядок превышают значения, зарегистрированные на миллиметровых и сантиметровых длинах волн [13, 14]. Данными интерферометрических наблюдений установлено наличие в АО 0235+164 очень компактных

Таблица 1

Частота, ГГц	Принятые значения потоков для калибровочных источников, Ян			
	DR 21	3C 274	NGC 7027	3C 286
36.8	18.3	14.3	5.1	1.56
22.2	19.5	21.5	5.4	2.37

структур на масштабах менее миллисекунды дуги. Такие угловые размеры деталей дают значения яркостной температуры, превышающие $T_{\text{я}} = 6 \cdot 10^{13}$ К [15, 16]. Как следствие видимых сверхсветовых движений компонент в источнике (до 30 с), получаются высокие значения доплера (D) и лоренц-фактора (γ) (более 15). Это приводит к небольшому углу ϑ между выбросами и направлением на наблюдателя. Полученные значения углов составляют величину около 3° [17, 18].

Долговременный мониторинг АО 0235+164 на одиночных антеннах начался в 1975 г. в Мичиганской радиоастрономической обсерватории (США). Многочисленные наблюдения источника в рентгеновском диапазоне выполнялись с 1990 г. [19–24], а в гамма-диапазоне регулярные данные предоставляет космический телескоп Fermi (LAT) [25]. Из оптических и радиокривых блеска обнаружен квази период 5.7 лет [9]. С тех пор этот объект стал хорошим кандидатом на двойную систему из сверхмассивных черных дыр (СЧД) [26, 27]. В дальнейшем нашими исследованиями было подтверждено такое утверждение и, более того, мы предположили существование тесных двойных систем из СЧД, которые интенсивно излучают только в том случае, когда компаньон центральной СЧДН проходит сквозь аккреционный диск (АД) центрального тела и возмущает его [28]. Из-за прецессии центрального тела орбитальный период может исчезать из-за изменения угла между выбросами и направлением на наблюдателя. В рассматриваемой модели в системе квази постоянно должны присутствовать прецессионный и орбитальный периоды ($T_{\text{пр}}$ и $T_{\text{орб}}$).

На основе долговременного многочастотного мониторинга в миллиметровом диапазоне длин волн и гамма-диапазоне получены параметры двойной системы из СЧД и определены задержки вспышечного явления 2015 г. между анализируемыми диапазонами длин волн, а также проведена физическая интерпретация полученных, на основе экспериментальных наблюдений, данных.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

2.1. Радиодиапазон длин волн. 22-метровый радиотелескоп Крымской астрофизической обсерватории использовался для проведения наблюдательной программы на частотах 22.2 и 36.8 ГГц [29]. На входе радиотелескопа стояли модуляцион-

ные радиометры, работающие в режиме диаграммной модуляции, при котором с частотой 1 кГц производилось переключение приемных рупоров, и осуществлялся разностный прием излучения с близких по положению точек небесной сферы [30]. Экспозиция на источнике изменялась в пределах (5–100) с в зависимости от спектральной плотности потока излучения исследуемого объекта. Затухание в атмосфере Земли измерялось с интервалами времени два–три часа с помощью метода “разреза атмосферы”. Процедура заключалась в определении значений антенной температуры на фиксированных углах места радиотелескопа, между которыми были известны отношения уровней поглощения. Последние выражались в единицах высоты однородной атмосферы. Температурная “привязка” наблюдательных данных производилась при помощи калиброванных шумовых сигналов (ГШ), которые подавались на входы приемников. Дополнительно они использовались для контроля усиления приемных трактов.

Антенные температуры от радиоисточников исправлялись за поглощение излучения в атмосфере Земли и пересчитывались в плотности потоков с использованием данных наблюдений калибровочных источников. Значения потоков калибровочных источников указаны в табл. 1. В первой колонке таблицы приведена частота, во второй – плотности потоков калибровочных источников.

Изменение эффективной площади антенны $A_{\text{эф}}$ с углом места учитывались вплоть до углов 60° . Дальнейшие изменения $A_{\text{эф}}$ были незначительными и не принимались в расчет. Зависимости $A_{\text{эф}}$ от угла места антенны находилась по калибровочным источникам для всех углов по азимуту.

Ошибка зависимости $A_{\text{эф}}$ от угла места антенны входила в среднеквадратичную ошибку плотности потока, куда добавлялись ошибки измерений антенной температуры ГШ источника. При таком учете ошибок исключались нестабильности коэффициентов усиления радиометров, шум аппаратуры и ошибки наведения телескопа.

На радиотелескопе РТ-14 радиоастрономической обсерватории Метсахови Аалто университета проводились наблюдения на частоте 37 ГГц. Методика наблюдений и методика обработки принимаемой информации были аналогичны тем, которые использовались при проведении ра-

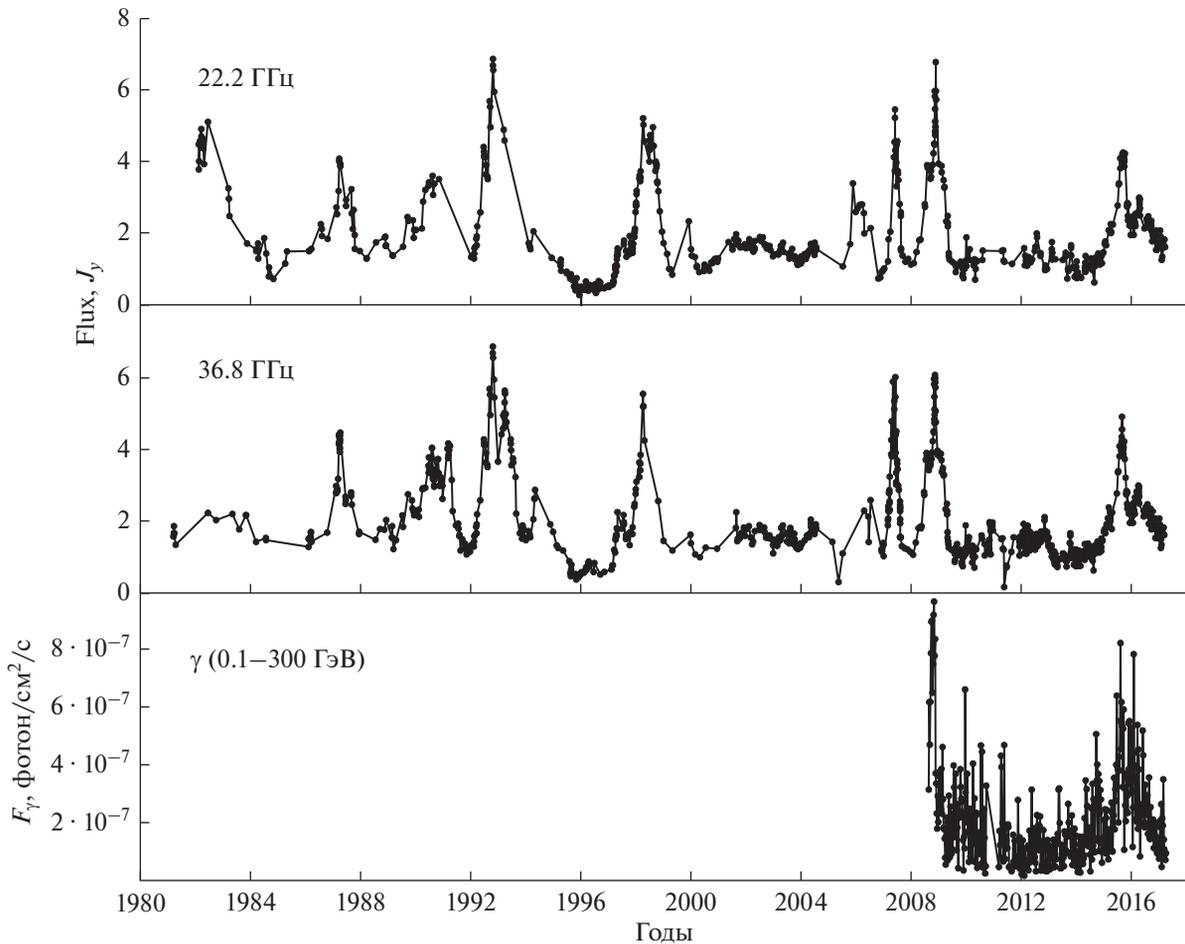


Рис. 1. Долговременный мониторинг АО 0235+164 в гамма и радиодиапазоне.

бот на РТ-22 КрАО. Полученные данные на РТ-14 Метсахови и РТ-22 КрАО объединялись в единый цифровой массив с учетом ошибок измерений и дополняли друг друга.

На рис. 1 приведены данные длительного многочастотного мониторинга АО 0235+164 на трех диапазонах длин волн: 22, 37 ГГц (с 1981 г.) и гамма диапазоне (с 2008 г.). Видна ярко выраженная вспышечная активность блазара.

2.2. Гамма-диапазон длин волн. Космический гамма-телескоп Ферми LAT (Large Area Telescope) предоставляет данные в диапазоне энергий от 20 МэВ до 300 ГэВ [25]. Обсерватория работает с 4.VIII.2008 г. Используется режим повторных обзоров небесной сферы. Поле зрения телескопа имеет – 2.4 ср. Обзор всего неба осуществляется за 3 ч, что позволяет исследовать переменность плотности потока обнаруженных объектов на всем небе с высоким временным разрешением.

Наблюдения в гамма-диапазоне АЯГ АО 0235+164 начались, когда источник находился в состоянии вспышки (рис. 1).

3. ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА АО 0235+164

Гармонический анализ вариаций потоков АО 0235+164 на различных длинах волн был выполнен методом Шустера и изложен в работе [31]. Результаты анализа приведены в табл. 2.

Максимальный период длительностью 8.5 лет ярко выражен на частотах 8, 14.5 и 22.2 ГГц. Этот период может быть прецессионным, как и в случае других ярких АЯГ [32]. Разброс в значениях периода не выходит за пределы статистических погрешностей. Кроме того, могут различаться физические условия возникновения излучения в объекте на разных частотах.

Короткий период (около двух лет) можно связать с орбитальным периодом движения компаньона вокруг общего центра тяжести в системе, состоящей из двух СЧД.

Из табл. 2 видно, что существует набор промежуточных комбинационных периодов от 3 лет до 5.5 лет, которые могут объясняться вариациями в

Таблица 2

Частота, ГГц	Период T , годы				
4.8	10.0 (0.7)	5.5 (0.5)	3.9 (0.4)	2.1 (0.3)	1.8 (0.2)
8.0	8.1 (0.7)	5.7 (0.5)	3.8 (0.4)	2.8 (0.3)	1.8 (0.2)
14.5	8.4 (1.2)	5.7 (0.8)	3.8 (0.6)	2.8 (0.5)	1.9 (0.3)
22.2	8.4 (1.3)	5.6 (0.9)	4.0 (0.7)	3.2 (0.6)	1.9 (0.4)
36.8	7.0 (1.5)	4.8 (1.0)	3.5 (0.8)	2.8 (0.6)	1.8 (0.4)
$T_{\text{ср}}$	8.5 (0.5)	5.46 (0.4)	3.8 (0.3)	2.74 (0.2)	1.94 (0.2)

движениях к системе, состоящей более, чем из двух тел. Такая система включает в себя две СМЧД, АД, погруженные в неоднородную плотную аккрецирующую среду. Схожая картина наблюдается во многих ярких АЯГ, исследуемых нами. Так, в источнике S0528+134 (Nimfa) присутствуют периодические составляющие от 1.6 лет до 10 лет [33]. Период в 5.5 лет уже был обнаружен ранее другими исследователями [34].

Наличие дополнительных, кроме орбитального и прецессионного, периодов можно естественно объяснить присутствием возможного нутационного периода — $T_{\text{нут}} \approx 2.74$ г. (см. табл. 1). Периоды 3.8 г. и 5.46 лет являются двойными орбитальными и нутационными. Прецессионный период в пределах ошибок кратен орбитальному. Такой набор гармоник в системе представляется естественным с физической точки зрения.

Нами уже отмечалось, что ограниченный диапазон в наборе периодических компонент, связываемый с орбитальным и прецессионным периодами, объясняется близкими физическими условиями в мощных представителях АЯГ. Определяющими моментами являются близость компаньона к центральной СМЧД (существование тесной двойной системы из СЧД), размеры АД, соизмеримые с орбитой компаньона, близкие соотношения между массами компаньонов. Такие условия выполняются для части двойных систем, находящихся на поздней стадии эволюции.

В работе [35] получены значения масс центральной СЧД и ее компаньона в двойной системе АО 0235+164 ($M \approx 1.5 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ и $m \approx 7 \cdot 10^9 M_{\odot}$). Это самая массивная двойная система с минимальным отношением между массами центрального тела и сопровождающего его СЧД. Ранее отмечалось, что отношения между массами двойных СЧД находятся в пределах десяти [28, 32, 35]. Именно массивный компаньон инициирует мощное первичное энерговыделение и вспышки в ярких АЯГ за счет пересечения АД и движения со сверхзвуковой скоростью в плотной аккрецирующей среде.

Размеры орбит тесных двойных систем из СЧД менее парсека, но более сотой доли парсека. Последнее условие связано с тем, что при значениях

орбиты менее сотой парсека, потери из-за гравитационного излучения слишком велики и это делает орбиту системы неустойчивой с точки зрения времени ее существования.

Двойная система АО 0235+164 является экстремальной и с точки зрения скорости движения компаньонов по орбите. При полученных значениях размеров орбиты ($2 \cdot 10^{18}$ см) и величины орбитального периода в системе отсчета, связанной с источником (400 лет), скорости движения компаньонов по орбите равны соответственно $v_1 \approx 10^4$ км/с и $v_2 \approx 5 \cdot 10^3$ км/с соответственно. Такие скорости движения сверхмассивных тел больших размеров соизмеримы со скоростями движения вещества при взрывах сверхновых звезд. Движение в плотной аккрецирующей среде АД создает мощнейшие ударные волны, которые распространяются по АД. За фронтами ударных волн, за счет эффекта изотропизации, газовая среда превращается в плазму с температурой в миллиарды градусов Кельвина [28, 35]. При таких температурах происходит рождение электронно-позитронных пар из физического вакуума. Поэтому неудивительно, что выбросы в мощных АЯГ могут иметь электронно-позитронную природу.

4. СДВИГИ ПО ВРЕМЕНИ МЕЖДУ ВСПЫШЕЧНЫМИ ЯВЛЕНИЯМИ НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ

Вспышечные явления в АЯГ являются следствием активности в их внутренних областях. Как уже было сказано, такая активность в АЯГ может быть связана с пересечением компаньона центральной СЧД ее АД. Передача активности в “джеты” может происходить посредством ударных волн методами интерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) и наблюдениями на одиночных антеннах. Мы такую активность наблюдаем в АЯГ. Наблюдаемые сверхсветовые движения компонент в выбросах происходят с задержками по времени между различными частотными диапазонами. Это естественно принять, если допустить, что в процессе распространения облако плазмы расширяется и становится наблюдаемым на более низких частотах. Характер за-

держек вспышек дает информацию о характеристиках среды “джетов” (их магнитном поле) и о динамике системы из двойных СЧД.

Зависимость задержек вспышек на разных частотах в работе [35] была аппроксимирована орбитно-логарифмической зависимостью:

$$\Delta T = 0.25/\lg v, \quad (1)$$

где ΔT – задержка, выраженная в годах от начала вспышки в гамма-диапазоне, v – частота наблюдений в ГГц.

Для вспышечных явлений 2008–2009 гг. сдвиги по времени были определены кросс-корреляционным методом.

Такой характер изменения задержек в зависимости от частоты указывает скорее на внутренние причины, вызывающие изменения плотности потока в АЯГ. Зависимость задержек явлений от частоты в случае сцинтилляций в межгалактической среде другая.

Для вспышки 2015 г. (рис. 1) кросс-корреляционным методом определены задержки между гамма-диапазоном и миллиметровыми волнами (37 и 22 ГГц). Они оказались равными 21 день и 8.2 дня соответственно. Это позволило определить коэффициент в формуле (1). Полученное значение коэффициента $k = 0.10$ и выражение для задержек примет вид: $\Delta T = 0.10/\lg v$.

Таким образом, задержки между частотами уменьшились в 2.5 раза по сравнению со вспышкой (2008–2009) гг. Что это означает?

В работе [33] из анализа наблюдательных данных высказано предположение о том, что величина задержек вспышечных явлений на разных частотах находится в квадратичной зависимости от углов между направлением выбросов и лучом зрения наблюдателя. Согласно наблюдательным данным эти углы в АО 0235+164 должны находиться в пределах (2° – 3°). По данным работ [22] этот угол равен 2.9° , что соответствует лоренц-фактору $\gamma = 20$.

Для вспышки 2015 г. мы получили задержку между частотами в 2.5 раза меньше, чем в работе [33] для вспышки (2008–2009) гг. Это означает, что угол между выбросами и направлением на наблюдателя ϑ уменьшился в 1.6 раза до значения $\vartheta \approx 1.6^\circ$.

Для малых значений ϑ существует соотношение, связывающее этот угол с лоренц-фактором: $\gamma = 1/\vartheta$, что соответствует для $\vartheta \approx 1.6^\circ$ значению $\gamma = 35$. Столь высокая величина γ в блазаре АО 0235+164 ранее никогда не отмечалась.

Таким образом, за время прошедшее от вспышки (2008–2009) гг. до вспышки 2015 г., конфигурация выбросов в источнике, возможно за счет прецессии изменилась, в результате уменьшился угол между выбросом и направлением на

наблюдателя и, как следствие, увеличился лоренц-фактор γ .

ВЫВОДЫ

1. Проанализированы данные длительных многочастотных наблюдений блазара АО 0235+164, выполненных во многих РТ-22 КрАО, обсерватории Метсахови и в гамма-диапазоне (космическая обсерватория Ферми).

2. Подтверждены аргументы в пользу двойственности системы АО 0235+164, состоящей из двух СЧД. Гармоническим анализом установлены возможные значения орбитального и прецессионного периодов, аналогичные тем, которые выявлены в других ярких представителях АЯГ. Дополнительные комбинационные частоты могут быть следствием присутствия возможного нутационного периода и удвоенным значений периодов.

3. Задержки появления вспышечных явлений на разных частотах соответствуют гипотезе перемещающегося по джету плазменного облака, просветляющегося последовательно на все более низких частотах. Полученный вид задержек скорее указывает на внутренний характер переменности плотностей потоков в АЯГ.

4. Анализ развития вспышечного явления 2015 г. в АО 0235+164 свидетельствует об изменении со временем конфигурации выбросов из источника, возникающее за счет прецессионных движений в системе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Raiteri C.M., Villata M., Ibrahimov M.A. et al.* The WEBT campaign to observe AO 0235+16 in the 2003–2004 observing season. Results from radio-to-optical monitoring and XMM-Newton observations // *Astronomy and Astrophysics*. 2005. V. 438. P. 39–53.
2. *Blandford R.D., Königl A.* Relativistic jets as compact radio sources // *ApJ*. 1979. V. 232. P. 34–48.
3. *Rieke G.H., Grasdalen G.L., Kinman T.D. et al.* Photometric and spectroscopic observations of the BL Lacertae object AO 0235+164 // *Nature*. 1976. V. 260. P. 754–759.
4. *Cohen R.D., Smith H.E., Junkarinen V.T. et al.* The nature of the BL Lacertae object AO 0235+164 // *Astrophysical J*. 1987. V. 318. P. 577–584.
5. *Spinrad H., Smith H.* AO 0235+164 a red BL Lacertae object // *Astrophysical J*. 1975. V. 201. P. 275–276.
6. *Raiteri C.M., Villata M., Aller H.D. et al.* Optical and radio variability of the BL Lacertae object AO 0235+16: A possible 5–6 year periodicity // *Astronomy and Astrophysics*. 2001. V. 377. P. 396–412.
7. *Raiteri C.M., Villata M., Kadler M. et al.* Multifrequency variability of the blazar AO 0235+164. The WEBT campaign in 2004–2005 and long-term SED analysis // *Astronomy and Astrophysics*. 2006. V. 459. P. 731–743.
8. *Tornikoski M., Valtaoja E., Terasranta H. et al.* Correlated radio and optical variations in a sample of active ga-

- lactic nuclei // *Astron. And Astrophys.* 1994. V. 289. P. 673–681.
9. *Clements S.D., Smith A.G., Aller H.D., Aller M.F.* Correlation Analysis of Optical and Radio Light Curves for a Large Sample of Active Galactic Nuclei // *Astron. J.* 1995. V. 110. P. 529–537.
 10. *Quirrenbach A., Witzel A., Wagner S. et al.* Correlated radio and optical variability in the BL Lacertae object 0716 + 714 // *Astrophys. J. (Letters)*. 1991. V. 372. L71–79.
 11. *Wagner S.J., Witzel A., Heidt J.* Rapid Variability in S5 0716+714 Across the Electromagnetic Spectrum // *Astron. J.* 1996. V. 111. P. 2187–2195.
 12. *Kraus A., Quirrenbach A., Lobanov A.P.* // *Astron. and Astrophys.* 1999. V. 344. P. 807–814.
 13. *Вольвач А.Е., Ларионов М.Г., Вольвач Л.Н. и др.* Физические характеристики блазара 0235+164 // *Астрономический журн.* 2014. Т. 91. № 12. С. 1–12.
 14. *Ackermann M., Ajello M., Ballet J. et al.* (Swift-XRT) Multi-wavelength Observations of Blazar AO 0235+164 in the 2008–2009 Flaring State // *Astrophysical J.* 2012. V. 751. P. 1–20.
 15. *Chen Y.J., Zhang F.Y., Sjouwermen L.O.* Bi-periodic variation in the BL Lac AO 0235+164 // *Astrophysics and Space Science*. 1999. V. 266. P. 495–505.
 16. *Frey S., Gurvits L.I., Altschuller R.D. et al.* Dual-Frequency VSOP Observations of AO 0235+164 // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. 2000. V. 52. P. 975–982.
 17. *Fujisawa K., Kobayashi H., Wajima K. et al.* Discovery of Large Doppler Factors in Radio-Loud Active Galactic Nuclei // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. 1999. V. 51. P. 537–545.
 18. *Бычкова В.С., Вольвач А.Е., Кардашев Н.С. и др.* Многолетний мониторинг блазаров AO 0235+164 и S5 0716+714 в оптическом и радиодиапазоне // *Астрономический журн.* 2015. Т. 92. № 9. С. 728–741.
 19. *Worrall D.M., Wilkes B.J.* X-ray spectra of compact extragalactic radio sources // *Astrophysical J.* 1990. V. 360. P. 396–407.
 20. *Ghosh K.K., Soundararajaperumal S.* Multifrequency Spectra of EXOSAT Blazars // *Astrophysical J. Supplement*. 1995. V. 100. P. 37–68.
 21. *Comastri A., Fossati G., Ghisellini G. et al.* On the Soft X-Ray Spectra of gamma-Loud Blazars // *Astrophysical J.* 1997. V. 480. P. 534–546.
 22. *Padovani P., Costamante L., Giommi P. et al.* ВерроSAX observations of 1-Jy BL Lacertae objects – II // *MNRAS*. V. 347. P. 1282–1293.
 23. *Webb J.R., Howard E., Benitez E. et al.* The 1997 Outburst of AO 0235+164: Evidence for a Microlensing Event? // *Astronomical J.* 2000. V. 120. P. 41–46.
 24. *Raiteri C.M., Villata V.M., Larionov et al.* Radio-to-UV monitoring of AO 0235+164 by the WEBT and Swift during the 2006–2007 outburst // *Astronomy and Astrophysics*. 2008. V. 480. P. 339–347.
 25. http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/scitools/extract_latdata.html.
 26. *Romero G.E., Sellone S.A., Combi J.A.* Extreme intranight variability in the BL Lacertae object AO 0235+164 // *Astronomy and Astrophysics*. 2000. V. 360. P. 47–50.
 27. *Ostorero L., Vilatta M., Raiteri C.M.* Helical jets in blazars. Interpretation of the multifrequency long-term variability of AO 0235+16 // *Astronomy and Astrophysics*. 2004. V. 419. P. 913–925.
 28. *Вольвач А.Е., Вольвач Л.Н., Ларионов М.Г. и др.* Переменность излучения блазара 3C 454.3 за период 40 лет // *Астрономический журн.* 2007. Т. 84. № 6. С. 503–513.
 29. *Volvach A.E.* RT-22 CrAO Long-Term Monitoring of Extragalactic Radio Sources at 22 and 37 GHz // *The Astronomical Society of the Pacific Conf. Series*. 2006. V. 360. P. 133.
 30. *Nesterov N.S., Volvach A.E., Strepka I.D.* Observations of Extragalactic Radio Sources at 36 GHz // *Astronomy Letters*. 2000. V. 26. P. 204–207.
 31. *Вольвач А.Е., Кутькин А.М., Вольвач Л.Н. и др.* Результаты долговременного мониторинга 3C 273 в широком диапазоне длин волн // *Астрономический журнал*. 2013. Т. 90. № 1. С. 40–52.
 32. *Volvach A.E., Volvach L.N., Bychkova V.S. et al.* Long-term optical and radio monitoring of the quasars S5 0716+714 and 4C 38.41 on various time scales // *Astronomy Reports*. 2012. V. 56. P. 275–280.
 33. *Вольвач А.Е., Кутькин А.М., Ларионов М.Г. и др.* Долговременный многочастотный мониторинг блазара Nimfa (S0528+134) // *Астрономический журн.* 2014. Т. 91. № 2. С. 122–129.
 34. *Massaro Nesci E., Rossi C., Sclavi S.* The Long-Term Optical Variability of the BL Lacertae Object S5 0716+714: Evidence for a Precessing Jet // *AJ*. 2005. V. 130. P. 1466–1471.
 35. *Вольвач А.Е., Ларионов М.Г., Вольвач Л.Н. и др.* Физические характеристики блазара 0235+164 // *Астрономический журн.* 2015. Т. 92. № 2. С. 168–179.