

Результаты наблюдений блазаров на радиотелескопе РТ-32 в обсерватории «Светлое» ИПА РАН

© А. А. Архаров¹, И. А. Рахимов², Д. В. Иванов²,
А. В. Ипатов², В. М. Ларионов^{1,3}, Т. С. Андреева²

¹ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

²ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

³СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

В статье представлены первые результаты наблюдений, полученные в обсерватории ИПА РАН «Светлое» по проекту WEBT (Всемирный блазарный телескоп) [1–2].

Этот международный проект, возглавляемый итальянскими астрономами, объединяет усилия обсерваторий всего мира и нацелен на комплексное исследование активных ядер галактик во всем диапазоне электромагнитного спектра, от радиоволн до гамма-излучения. Обсерватория «Светлое» присоединилась к проекту в марте 2018 г. и с этого времени ведет регулярные наблюдения в рамках программы «Шкала» на телескопе РТ-32 на частотах 4.8 и 8.5 ГГц. Получены первые результаты измерения плотности потока на указанных частотах для нескольких объектов, наиболее подробно обсуждены результаты мониторинга плотности потока радиоизлучения блазара 3С 279, который является одним из самых активных источников этого типа. Эти данные переданы в Туринскую обсерваторию для дальнейшего использования в проекте WEBT.

Ключевые слова: блазары, активные ядра галактик, плотность потока, радиотелескоп, спектр.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.51.13-19>

Введение

Активные ядра галактик — ядра, в которых происходят процессы, сопровождающиеся выделением большого количества энергии в центральной части, где находится сверхмассивная черная дыра. Согласно современным представлениям активные ядра галактик (АЯГ) являются самыми долгоживущими энергетическими явлениями во Вселенной. Предполагается, что огромная энергия, излучаемая АЯГ, рождается в результате аккреции вещества из окружающего диска на сверхмассивные черные дыры с массой порядка $M=10^5-10^{10}M_{\odot}$, находящиеся в центрах галактик. В этих объектах потоки намагниченной плазмы выбрасываются со скоростью, близкой к скорости света, вдоль оси вращения диска. Магнитные поля, окутывающие аккреционный диск, выталкивают поток энергетических частиц, который фокусируется, ускоряясь вдоль полюсов сверхмассивной черной дыры, формируя джеты, наблюдаемые на парсековых и килопарсековых расстояниях от центральной машины. Ударные волны и турбулентность плазмы ускоряют отдель-

ные электроны до ультрарелятивистских энергий. Эти электроны, двигаясь в магнитных полях, производят синхротронное излучение в радио-, инфракрасном, оптическом и — в некоторых объектах — в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах. Они также рассеивают фотоны, рождающиеся внутри и вне джета, до энергий в рентгеновском и гамма-диапазонах. В областях, близких к основанию джета, образуются довольно плотные облака газа, дающие широкие эмиссионные линии в спектрах АЯГ, в то время как более узкие линии образуются в более разреженных облаках, находящихся на килопарсековых расстояниях от черной дыры.

Вышеуказанный механизм формирования джета и ускорения частиц должен рассматриваться как предварительная модель до тех пор, пока она не будет подтверждена наблюдениями.

Галактики с активными ядрами подразделяются на сейфертовские, радиогалактики, лацертиды (объекты типа BL Lac) и квазары. В спектрах лацертид (по названию прототипа этого класса BL Lacertae), в отличие от спектров квазаров, отсутствуют яркие эмиссионные линии. Как квазары, так и лацертиды являются мощными источниками радиоизлучения.

Объект классифицируется как блазар (к ним относятся радиояркие квазары с плоским спектром в радиодиапазоне и объекты типа BL Lac), если он имеет джет, который направлен под углом менее 15° к лучу зрения наблюдателя. Блазары образуют особый класс АЯГ, который характеризуется сильной и быстрой переменностью яркости на временной шкале до нескольких часов или меньше.

Одним из ведущих проектов по исследованию блазаров является международная кооперация, возглавляемая астрономами обсерватории Турина в Италии, под названием Всемирный блазарный телескоп — WEBT (Whole Earth Blazar Telescope) [1].

Цель проекта — понять физические механизмы, которые управляют переменным излучением блазаров. Поскольку в основном излучение исходит от джета, проектом предусматривается всестороннее исследование основных характеристик джета.

Проект представляет собой сеть наземных телескопов, распределенных по всей планете, работающих в оптическом, ближнем инфракрасном и радиодиапазонах, с помощью которых есть возможность совместно получать непрерывные ряды наблюдений блазаров высокой временной плотности. Благодаря различному географическому расположению по всему миру, вариации излучения исследуемого источника можно отслеживать 24 ч в сутки.

Наблюдения WEBT часто проводятся в рамках объявленных кампаний, то есть в сочетании с наблюдениями в более высокочастотных диапазонах, от ультрафиолетового до гамма-излучения, которые выполняются как космическими, так и наземными телескопами. Таким образом, может быть получена информация об излучении блазара практически по всему электромагнитному спектру. 4 сентября 2007 года WEBT запустил новый космический гамма-проект GASP. Это долгосрочный мониторинг выбранных целей для обеспечения поддержки итальянского космического гамма-телескопа Аджиле и международного гамма-спутника Ферми. Список блазаров, контролируемых новым проектом, включает в себя 28 ярких объектов и он является рабочим для всех участников проекта WEBT.

Наблюдения в обсерватории «Светлое»

В марте 2018 г. в обсерватории «Светлое» в рамках программы «Шкала» начались целенаправленные наблюдения избранных объектов из полного списка блазаров, включенных в проект WEBT-GASP. Они являются программными объектами и перечислены в таблице. На рис. 1. изображены графики положений объектов над горизонтом, в том числе и стандартных, по которым осуществляется калибровка наблюдаемых потоков.

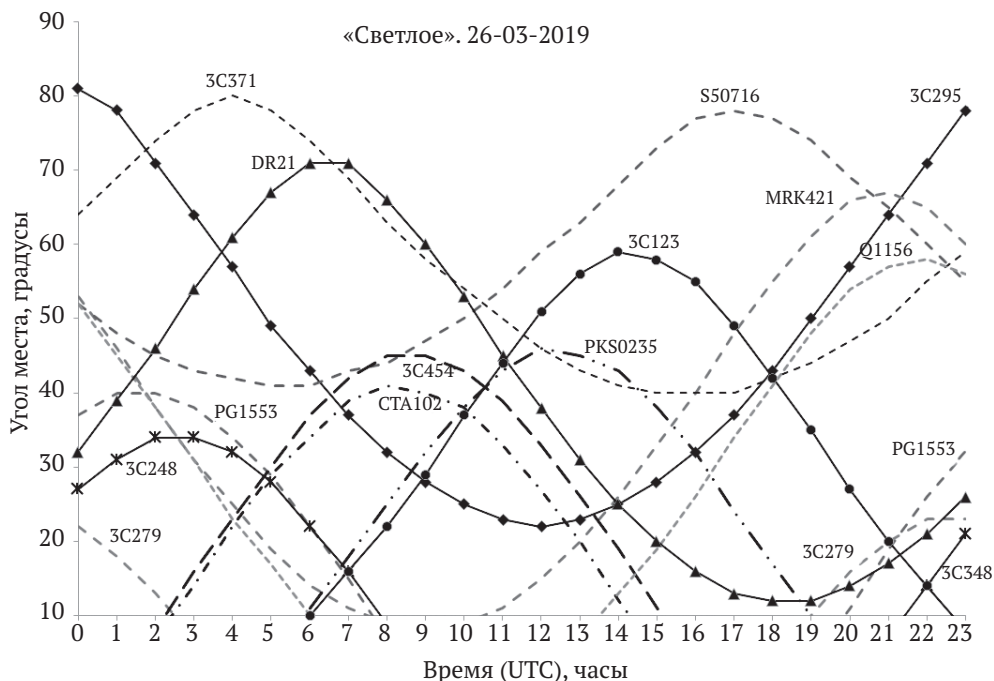


Рис. 1. Положение над горизонтом программных (пунктирные линии) и стандартных (сплошные линии) объектов в зависимости от всемирного времени

Т а б л и ц а

Наблюдаемые объекты

№	Источник	Прямое восхождение, h m s	Склонение, ° ' "	Зенитное расстояние	Кол-во наблюдений	
					4.8 ГГц	8.5 ГГц
1	3C 279	12:56:11.1	-05:47:22	0.5362	61	23
2	3C 454	22:53:57.7	+16:08:54	0.859	64	25
3	Q1156	11:59:31.8	+29:14:44	0.729	53	7
4	PKS 0235	02:38:38.9	+16:36:59	0.94	17	6
5	S5 0716	07:21:53.4	+71:20:36	0.3	42	18
6	CTA 102	22:32:36.4	+11:43:51	1.037	3	2
7	Mrk 421	11:04:27.3	+38:12:32	0.030021	1	2
8	3c371	18:06:50.7	+69:49:28	0.051	32	12

Наблюдения ведутся на радиотелескопе РТ-32 в двух диапазонах: 4.8 и 8.5 ГГц., 6.2 и 3.5 см соответственно [3]. Подробно методика наблюдения описана в работе [4]. Получены первые результаты измерений плотности потока на указанных частотах для восьми объектов. На рис. 2 представлены кривые блеска нескольких блазаров на частотах 4.8 и 8.5 ГГц по результатам наблюдений на РТ-32. На всех графиках плотность потока излучения представлена в янских F, Jy в зависимости от даты наблюдений, выраженной в юлианских днях (JD).

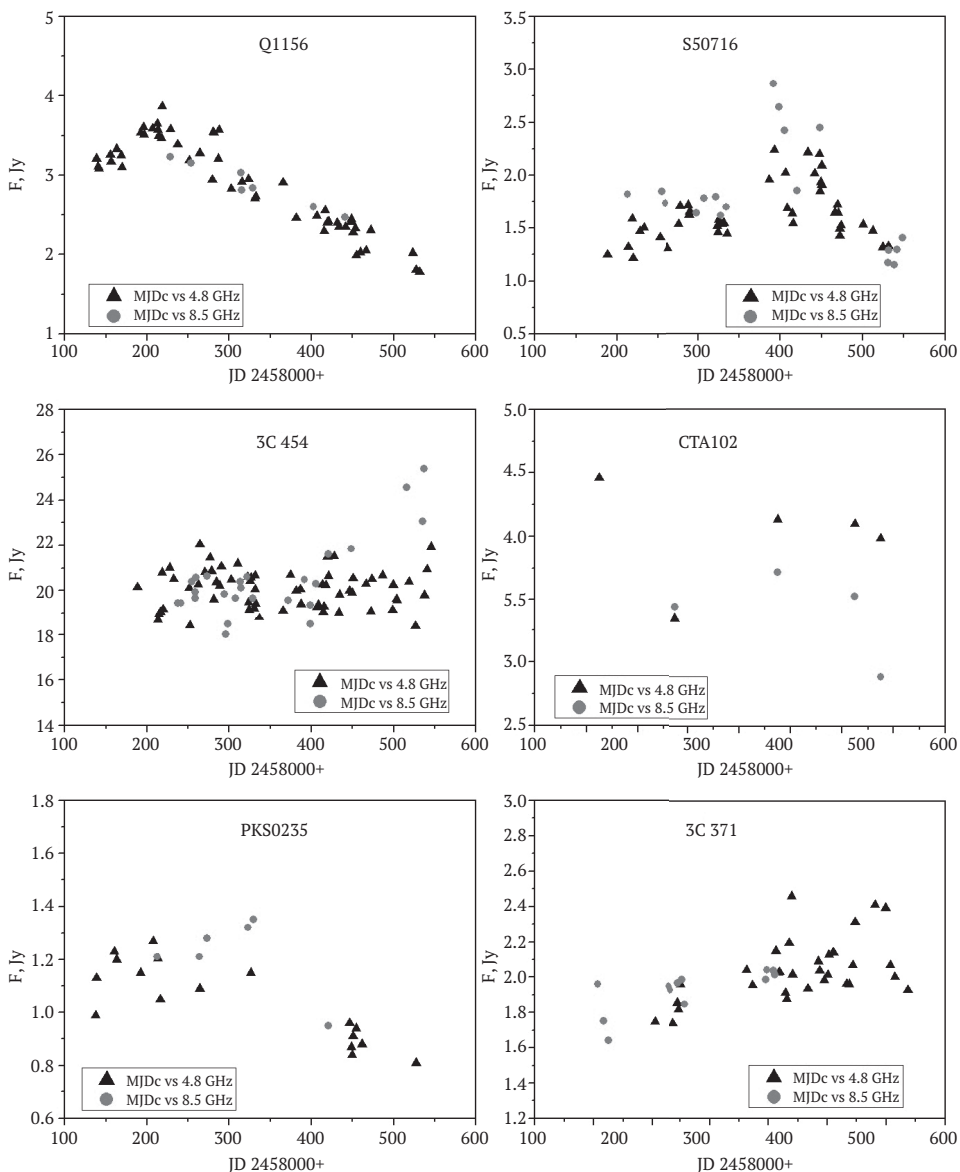


Рис. 2. Кривые блеска источников (см. таблицу) на частотах 4.8 и 8.5 ГГц за период с марта 2018 г. по март 2019 г.

Обсуждение результатов и выводы

Из рассмотрения рис. 2 видно, что кривые блеска, полученные за относительно короткий промежуток времени (1 год), характеризуются незначительными изменениями плотности потока излучения, в пределах одного или нескольких янских. При этом лишь один объект, Q1156, демонстрирует явный тренд. Результаты наблюдений всех объектов, перечисленных в таблице, содержатся в базе данных обсерватории и в случае объявления кампании по какому-либо из этих объектов, они могут быть использованы. Как показывает практика, только на основе длительных многоволновых наблюдений блазаров можно показать поведение основных характеристик излучения объекта.

Укажем на некоторые из них. В статье Ларионова и др. [5], выполнен анализ кривых блеска квазара 3C 279 на различных радиочастотах и в оптической полосе R. На временном интервале около 1.5 лет отчетливо просматривается запаздывание максимума относительно полосы R, которое оценивается от 20 до 140 дней на частотах 230 и 5 ГГц соответственно, при этом явно прослеживается тренд увеличения задержки с длиной волны.

Другая важная характеристика излучения блазаров — это спектральное распределение энергии излучения (SED), которое невозможно получить без систематических наблюдений в радиодиапазоне. В той же статье сделан анализ спектральных распределений энергии (SED) блазара 3C 279 в четырех различных эпохах [5]. Общее увеличение потока по всему диапазону частот явно предполагает, что нетепловое излучение от радио- до рентгена имеет общее происхождение, а именно из джета, в результате появления новых сверхсветовых узлов, связанных с каждым из двух мощных всплесков в потоке. Другая особенность SED — это снижение уровня потока в рентгеновском диапазоне. Показательно, что самый высокий спектральный индекс в рентгене (1.6) совпадает с индексом переменной оптической компоненты, в то время как самый плоский рентгеновский спектр имеет индекс ниже 0.5.

В качестве еще одного примера высокой эффективности многоволнового мониторинга можно привести результаты исследования недавней беспрецедентной вспышки блазара 3C 102 [6]. Вспышка произошла в конце декабря 2016 г. и длилась до середины 2017 г. Во-первых, она оказалась ярчайшей за всю историю наблюдений блазаров и, во-вторых, установлен факт корреляции SED и угла, под которым излучающие области джета направлены к наблюдателю (угол видности). Оказалось, что чем выше уровень SED, тем ниже значение угла видности. На этом основании делается вывод: наблюдения в оптическом, инфракрасном и радиодиапазоне позволили построить картину неоднородного извилистого джета, в котором фотоны разных частот приходят от различных областей с различными и переменными углами между вектором скорости и лучом зрения.

Стратификация областей, излучающих в различных частях электромагнитного спектра, приводит к различию Доплер-факторов, характерных для каждой из этих областей и, как следствие, к переменности наблюдаемых спектральных распределений энергии. Это означает также, что, по крайней мере у части блазаров, основным фактором, определяющим вспышечное поведение, являются изменения геометрических характеристик, а не физических параметров излучающих областей [6].

Заключение

Результаты наблюдений, выполненных на радиотелескопе RT-32 в обсерватории «Светлое», являются начальным этапом в проведении систематического мониторинга блазаров в рамках проекта WEBT-GASP, но уже можно судить о возможностях инструмента и о качестве данных. Точность измерений позволяет уверенно фиксировать изменения плотности потока на уровне единиц mJy с высоким временным разрешением. Особый интерес представляет объект Q1156, который обнаружил заметный пик на обеих частотах. Поскольку этот объект наблюдался в рамках кампании 2018–2019 гг. то наши данные могут быть использованы для интерпретации наблюдаемого явления.

Выводы, сделанные в цитируемых работах, подтверждают значимость радионаблюдений, в т. ч. в сантиметровом диапазоне, для более глубокого понимания физических процессов и геометрических факторов, влияющих на вспышечную активность блазаров.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП/УНУ «Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО».

Литература

1. *Mattox J. R.* 192nd AAS Meeting // Bulletin of the American Astronomical Society. — 1998. — Vol. 30. — P. 859.
2. WEBT [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.oato.inaf.it/blazars/webt/> (дата обращения 10.09.2019).
3. *Пятунина Т. Б., Рахимов И. А., Зборовский А. А.* Результаты мониторинга компактных внегалактических радиоисточников на частотах 4.8 и 8.6 ГГц с помощью радиотелескопа РФ-32 радиоастрономической обсерватории «Светлое» // Астрон. журн. — 2004. — Т. 81, № 6. — С. 483–494.
4. *Иванов В. П., Ипатов А. В., Рахимов И. А., Смоленцев С. Г., Станкевич К. С., Финкельштейн А. М.* Определение шкалы потоков НИРФИ на современную эпоху // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2005. — Вып. 12. — С. 12–17.
5. *Larionov V. M., Jorstad S. G., Marscher A. P. et al.* Results of WEBT, VLBA and RXTE monitoring of 3C 279 during 2006–2007 // A&A. — 2008. — Vol. 492 — P. 389–400.
6. *Raiteri C. M., Villata M., Acosta-Pulido J. A. et al.* Blazar spectral variability as explained by a twisted inhomogeneous jet // Nature. — 2017. — Vol. 552 — P. 374–377.

Blazar Observations at the RT-32 Radio Telescope of the IAA RAS Svetloe Observatory

**A. A. Arkharov, I. A. Rakhimov, D. V. Ivanov, A. V. Ipatov,
V. M. Larionov, T. S. Andreeva**

The first observational results obtained at the Svetloe Observatory of the IAA RAS under the WEBT — World Blazar Telescope project [1-2] are presented.

This international project, led by Italian astronomers, combines the efforts of observatories around the world and is aimed at a comprehensive study of the active nuclei of galaxies in the entire range of the electromagnetic spectrum, from

radio waves to gamma radiation. The Svetloe Observatory joined the project in March 2018 and since then has been conducting regular observations as the part of the “Scale” program on the RT-32 telescope at frequencies of 4.8 and 8.5 GHz. The first results of measuring the flux density at the frequencies given above were obtained for several objects. The results of monitoring the radio flux density of the blazar 3C 279, being one of the most active sources of this type, are discussed. These data were transmitted to the Torino Observatory and will be used within the WEBT project.

Keywords: blazars, active galactic nuclei, flux density, radio telescope, spectrum.