

УДК 524.7-56

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВСПЫШЕЧНОГО ЯВЛЕНИЯ В БЛАЗАРЕ АО 0235+164 В ГАММА, ОПТИЧЕСКОМ И РАДИОДИАПАЗОНАХ

© 2018 В. С. Бычкова¹, А. Е. Вольвач^{2,3*}, Л. Н. Вольвач², Н. С. Кардашев¹,
М. Г. Ларионов¹, В. В. Власюк⁴, О. И. Спиридонова⁴, А. Лахтеенмаки^{5,6}, М. Торникоски⁵,
Дж. Тамми⁵, Е. Йярвела^{5,6}, Р. Дж. К. Вера^{5,6}, В. Чамани^{5,6}, С. Енестам^{5,6}

¹Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, 117997 Россия

²Отдел радиоастрономии и геодинамики Крымской астрофизической обсерватории РАН,
Ялта, 298688 Россия

³Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, 191187 Россия

⁴Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

⁵Радиообсерватория Метсахови университета Аалто, Аалто, FI-00076 Финляндия

⁶Департамент электроники и наноинженеринга университета Аалто, Аалто, FI-00076 Финляндия

Поступила в редакцию 31 июня 2017 года; принята в печать 23 марта 2018 года

Представлены результаты мониторинга активного ядра галактики АО 0235+164 в оптическом и радиодиапазоне на миллиметровых длинах волн. На основе многочастотных данных, включая также гамма-диапазон, исследованы характеристики излучения блазара, в 2015–2016 гг. находившегося в активной фазе. Для определения задержек времени вспышки, произошедшей в АО 0235+164 в 2015 г., в разных диапазонах использовался кросс-корреляционный метод. Проведенный анализ позволил установить, что по сравнению с предыдущими вспышечными явлениями в АО 0235+164 произошли изменения в ориентации выбросов (джетов). Угол θ между джетом и направлением на наблюдателя уменьшился в $\sqrt{2}$ раз, что привело к увеличению γ -фактора вдвое. Полученное значение, $\gamma \approx 40$, является предельным, зафиксированным для АО 0235+164 за все время наблюдений.

Ключевые слова: Объекты типа *tuna VL Lacertae*: индивидуальные: АО 0235+164

1. ВВЕДЕНИЕ

Активные ядра галактик (АЯГ), характерной особенностью мощного электромагнитного излучения которых является высокоамплитудная быстрая переменность по всему диапазону длин волн, получили название блазаров. Блазар АО 0235+164 (объект типа VL Lac, $z = 0.94$) [1] — один из самых ярких и наиболее интересных представителей этого класса. За последние десятилетия в результате многочисленных исследований АО 0235+164 во всех наблюдаемых спектральных диапазонах была обнаружена высокая степень переменности потока его излучения [2, 3]. В оптической и инфракрасной областях оно характеризуется необычно высокой степенью поляризации: до 40% в *V*-фильтре и до 36.4% в ИК-полосе [4–7].

Вспышечная активность блазаров регистрируется в широком диапазоне длин волн. По результатам многочастотных наблюдений этих объектов

можно сделать вывод о том, что вспышки происходят во всех спектральных областях, от радио до гамма. Кривые блеска в разных диапазонах коррелируют между собой с задержкой на интервалах времени месяц и более. Однако надежных оценок величин задержек проявлений вспышек на различных частотах до сих пор нет, несмотря на проведенные многочисленные наблюдения [7–9], в том числе и объекта АО 0235+164.

Одновременные наблюдения АЯГ в радио- и оптическом диапазонах и поиск корреляции излучения проводились неоднократно (см. [8, 10–14]). При анализе наблюдений блазара АО 0235+164 с 1975 г. по 2000 г. было высказано предположение о существовании квазипериодичности излучения с характерным временем 5.7 года [8]. По другим оценкам период переменности составляет 8 лет [9].

В конце 2014–начале 2015 гг. мы наблюдали необычно мощные вспышки блазара АО 0235+164 в оптическом и радиодиапазонах. Его блеск в *R*-фильтре возрос на 4^m за пять дней [15, 16]. В работе [17] представлены результаты мониторинга

*E-mail: volvach@bk.ru

блазаров S5 0716+714 и АО 0235+164 по нашим данным с 1981 г. по 2014 г. в радиодиапазоне и с 2002 г. по 2014 г. — в оптическом. Вспышки были зафиксированы на этапе возрастания блеска до достижения максимума, что позволяет уточнить периодичность излучения на длинных шкалах переменности (в пределах более десяти лет), а также корреляцию между радио- и оптическим излучением.

По результатам многочастотных наблюдений блазаров, включая АО 0235+164, можно заключить, что увеличение вспышечной активности имеет место на всех длинах волн, от радио до гамма. Кривые блеска в разных спектральных областях коррелируют между собой с задержкой на месяц и более. В частности, в работе [18] сообщается о наблюдавшемся месячном интервале в вариациях гамма- и радиоизлучения. Такой сдвиг может объясняться синхротронной непрозрачностью на радиочастотах и указывать на то, что гамма-излучение образуется ближе к центральной сверхмассивной черной дыре (СЧД). Излучение гамма-квантов ассоциируется со специфическим местоположением диссипации энергии в джете [19].

В настоящей работе представлены результаты анализа долговременной переменности блазара АО 0235+164 в радио- и оптическом диапазоне с целью поиска корреляции излучения на разных частотах и определения времени задержки в проявлениях вспышечной активности в этих областях спектра.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ В РАДИОДИАПАЗОНЕ

На частоте 36.8 ГГц наблюдательные данные получены на радиотелескопе РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории (КраО) в Симеизе с использованием модуляционного радиометра. Двухрупорный метод приема при диаграммной модуляции позволял регистрировать излучение как от радиоисточника, так и от соседней с ним области сравнения на небесной сфере. Применялась дифференциальная методика «ON-ON» измерений антенной температуры. Радиоисточник наблюдался поочередно в максимумах сначала одной, а затем другой диаграммой направленности радиотелескопа с частотой переключения 1 кГц. Это позволяло значительно снизить влияние флуктуаций коэффициента усиления составляющих радиометра и уменьшить вклад атмосферных неоднородностей на выходе приемника. Антенные температуры корректировались за поглощение излучения в атмосфере Земли и пересчитывались в плотности потоков на основе данных наблюдений калибровочных источников. Зависимость эффективной площади от угла места радиотелескопа

учитывалась при получении данных по потокам источников.

Поправки наведения радиотелескопа на источник определялись методом сканирования антенны по прямому восхождению α и склонению δ . Обработка поступающей информации осуществлялась в режиме «on-line» с использованием пакета программ, разработанного в обсерватории.

На частоте 37 ГГц наблюдения также проводились на 14-м радиотелескопе радиоастрономической обсерватории Метсахови университета Аалто. Методики наблюдений и обработка данных аналогичны тем, которые были на РТ-22 КраО.

В радиодиапазоне наблюдения АО 0235+164 в Крымской обсерватории были начаты в 1981 г. и продолжаются по настоящее время. За этот период источник проявлял значительную активность, амплитуда переменности потока излучения менялась от долей Ян до 8 Ян на масштабах времени менее года (рис. 1). Ошибки измерений в радиодиапазоне соизмеримы с толщиной точек на графике (данные усреднялись на масштабах времени наблюдений 5–7 дней).

3. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

В оптическом диапазоне наблюдения проводились с помощью автоматического *UBVRI*-фотометра, установленного в кассегреновском фокусе телескопа Цейсс-1000 Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН) на Северном Кавказе. В качестве светоприемника использовалась ПЗС-камера производства компании E2V (Великобритания) с 2048×2048 пикселями. Система регистрации разработана и реализована специалистами САО РАН [20]. Масштаб изображения составлял $0''.43/\text{элемент}$ при попарном сложении сигнала в соседних элементах по каждой координате (binning 2×2), с общим полем зрения $7' \times 7'$.

Использовались *B*, *V* и *R*-фильтры, близкие к системе Джонсона–Казинса. Время экспозиции при наблюдении источников составляло 30–300 с в зависимости от яркости объекта в выбранном фильтре, погодных условий и требуемого временного разрешения. Качество изображения *FWHM* (ширина профиля объекта на половине интенсивности) варьировалось от $0''.9$ до $3''.5$. Процедура редукции была стандартной, принятой при обработке наблюдений с ПЗС-системами. Из каждого результата накопления вычитался усредненный темновой кадр, характеризующий аддитивную добавку к сигналу, формируемую системой регистрации независимо от уровня регистрируемого излучения. Для ПЗС-детекторов, охлажденных до 120–130 К, уровень темнового тока в отдельной

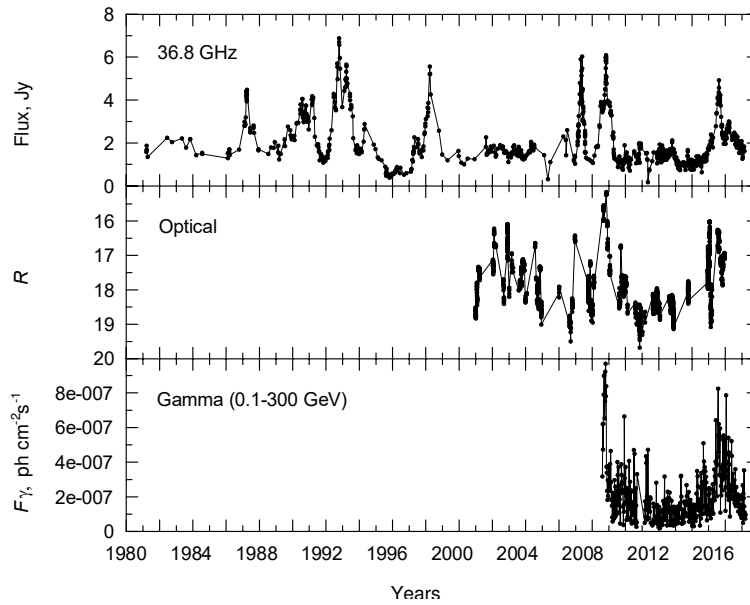


Рис. 1. Вспышечные явления в АО 0235+164 в гамма-, оптическом и радиодиапазонах.

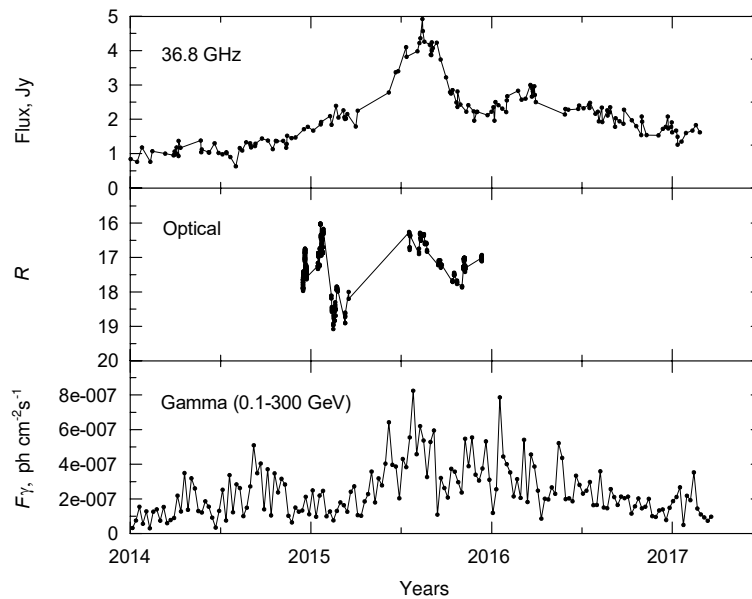


Рис. 2. Вспышка в АО 0235+164 в 2015–2016 гг.

экспозиции не превышал $2\text{--}3\text{e}^-$ при минимальном уровне накопления фона неба в $50\text{--}100\text{e}^-$. В качестве опорного изображения для устранения мелкомасштабных неоднородностей чувствительности приемника и коррекции виньетирования по полю зрения использовались экспозиции яркого вечернего и утреннего неба.

Оценка блеска опорных и исследуемых источников производилась модифицированным методом интегрирования сигнала в кольцевых апертурах.

При этом удалялись отсчеты, превышающие заданный статистический уровень [20, 21]. Используемый алгоритм позволил полностью устранить влияние следов космических частиц, искажающих статистику накопленного сигнала.

Для фотометрической привязки использовались вторичные стандарты, которые были выбраны в поле объекта по наблюдениям в лучшие фотометрические ночи.

На рис. 1–3 мы приводим кривую блеска в

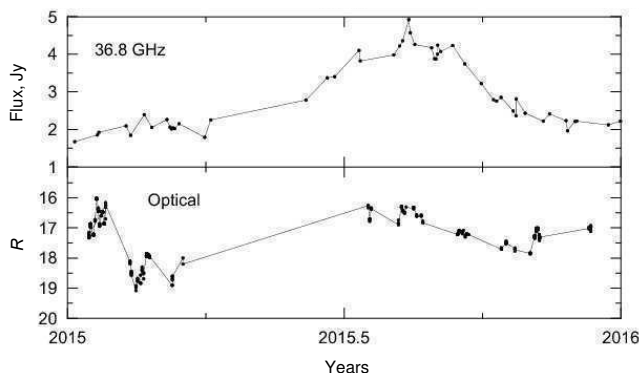


Рис. 3. Вспышка в АО 0235+164 в 2015–2016 гг.

R -фильтре по данным наблюдений АО 0235+164 с 2001 г. по 2016 г. и ее отдельные фрагменты. Ошибки измерений потока излучения не превышают $0^{\text{m}}01$ – $0^{\text{m}}03$.

4. КОРРЕЛЯЦИЯ ВСПЫШЕЧНЫХ ЯВЛЕНИЙ В РАЗНЫХ ДИАПАЗОНАХ ДЛИН ВОЛН

Переменное излучение, связанное со вспышечными явлениями в блазарах, является следствием взрывной активности в их внутренних областях. Для ярчайших представителей АЯГ эту активность можно связать с аккреционным диском (АД) центральной СЧД, который пересекает массивный компаньон в процессе своего орбитального движения. При этом есть основания считать, что двойные СЧД являются тесными системами. В процессе эволюции размеры орбиты становятся меньше величины АД [22].

Излучение движущихся с видимой сверхсветовой скоростью компонентов в выбросах в сторону наблюдателя происходит с задержками по времени в различных диапазонах длин волн. При перемещении плазменное облако расширяется и становится доступным для наблюдений на все более низких частотах. По виду задержек вспышек на разных частотах можно судить, в том числе, об углах между выбросами и направлением на наблюдателя, а также о магнитном поле в джетах.

На основе данных длительного многочастотного мониторинга АО 0235+164 была получена эмпирическая зависимость временных задержек появления вспышечных явлений на разных частотах относительно оптического и гамма-диапазонов длин волн [23]. Соотношение для задержек между частотами было аппроксимировано обратной логарифмической зависимостью:

$$\Delta T = \frac{k}{\log \nu}, \quad (1)$$

где ΔT — задержка, выраженная в годах от начала вспышки в высокочастотном диапазоне, ν — частота наблюдений в ГГц, k — константа, характеризующая крутизну наклона зависимости. Задержки явлений между гамма- и оптическим диапазонами находились в пределах ошибок измерений, составлявших несколько дней.

Для вспышек, рассмотренных в работе [23], было получено значение $k = 0.25$, что соответствовало задержке между оптическим и радиодиапазонами около двух месяцев.

Временные сдвиги между вспышечными явлениями на разных частотах определялись кросс-корреляционным методом. Детали метода изложены в работе [24].

Используя выражение (1), мы получили для вспышечного явления 2015–2016 гг. значение коэффициента $k = 0.12$, что соответствует задержке между оптическим и радио-диапазонами $(37 \text{ ГГц}) 28 \pm 2$ дня.

Столь высокая точность определения задержки обусловлена использованием дополнительного метода — корреляции тонкоструктурных деталей вспышек, наблюдаемых в оптическом и радиодиапазонах (рис. 2).

На максимуме вспышки 2015 г. в оптическом диапазоне длин волн заметны два дополнительных тонкоструктурных подъема плотности потока излучения, которые коррелируют с соответствующими деталями изменения плотности потока в радиодиапазоне. Эти особенности изменения плотности потока зафиксированы во второй половине 2015 г. На склоне этой же вспышки есть еще один всплеск излучения, который виден в обоих диапазонах длин волн. В дополнение к этому есть совпадающая деталь на предварительном максимуме вспышки в начале 2015 г. (рис. 2). Как и в случае других ярких АЯГ, нами было отмечено, что вспышки имеют двугорбую форму, связанную с прохождением компаньона центральной СЧД через АД, который изогнут из-за прецессии. Все перечисленные детали вспышки имеют сдвиги между частотами в узком диапазоне около 28 дней с очень небольшим разбросом. Этим объясняется полученная высокая точность определения сдвигов между рассматриваемыми частотными диапазонами длин волн.

Наблюдательные данные по мониторингу АЯГ свидетельствуют о том, что задержки вспышечных явлений на разных частотах находятся в квадратичной зависимости от величин углов между направлением выбросов и лучом зрения наблюдателя — θ [25]. Мы получили для блазара АО 0235+164 соотношения задержек вспышечных явлений между различными диапазонами длин волн. Были привлечены дополнительные данные для углов θ и задержек, полученных для других ярких представителей АЯГ. Это дало возможность

определить, что угол θ в АО 0235+164 должен находиться в пределах $2^\circ-3^\circ$. Такие результаты находятся в хорошем согласии с данными работы [26], где было получено значение для угла $\theta = 2^\circ.9$, что соответствует $\gamma \approx 20$.

Для вспышки 2015 г. соответствующие задержки оказались вдвое меньше. Так, задержка между оптическим и радиодиапазонами (37 ГГц) составила 28 дней (рис. 3). Это означает, что угол θ между выбросом из АО 0235+164 и направлением на наблюдателя стал в $\sqrt{2}$ раз меньше, то есть $\theta = 1^\circ.4-1^\circ.7$.

Одновременно с изменением угла выбросов из джета произошло изменение γ -фактора, который вырос вдвое и достиг величины $\gamma \approx 40$. Такие значения γ -фактора приближаются к предельным, наблюдающимся у ярчайших представителей активных ядер галактик.

5. ВЫВОДЫ

Перечисленные выводы были сделаны с учетом того, что переменность потока излучения вызвана внутренними причинами в источнике и не связана с прохождением сигналов через межзвездную и межгалактическую среду.

1. Получены новые данные по мониторингу активного ядра галактики АО 0235+164 в оптическом и радиодиапазоне на миллиметровых длинах волн.
2. При анализе результатов многоволновых наблюдений вспышки 2015 г., произошедшей в АО 0235+164, с помощью кросс-корреляционного метода были определены задержки, которые позволили установить, что со времени предыдущих вспышечных явлений в объекте произошли изменения в ориентации выбросов, в результате чего γ -фактор увеличился вдвое.
3. Полученное значение $\gamma \approx 40$ является предельным, отмеченным для АО 0235+164.
4. Изменения, зафиксированные в АО 0235+164, являются следствием уменьшения угла θ между выбросами из блазара и направлением на наблюдателя. Угол уменьшился в $\sqrt{2}$ раз. Меньшее значение угла θ зафиксировано только в одном экстремальном АЯГ — S50716+714.

БЛАГОДАРНОСТИ

В. Власюк и О. Спиридонова благодарят за финансовую поддержку грант No. 14-50-0043 Российского научного фонда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. Spinrad and H. E. Smith, *Astrophys. J.* **201**, 275 (1975).
2. S. P. Gupta, U. S. Pandey, K. Singh, et al., *New Astronomy* **17**, 8 (2012).
3. K. K. Ghosh and S. Soundararajaperumal, *Astrophys. J. Suppl.* **100**, 37 (1995).
4. C. D. Impey, P. W. J. L. Brand, and S. Tapia, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **198**, 1 (1982).
5. M. Stickel, J. W. Fried, and H. Kuehr, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **98**, 393 (1993).
6. J. H. Fan and R. G. Lin, *Astrophys. J. Suppl.* **121**, 131 (1999).
7. A. C. Gupta, J. H. Fan, J. M. Bai, and S. J. Wagner, *Astron. J.* **135**, 1384 (2008).
8. C. M. Raiteri, M. Villata, H. D. Aller, et al., *Astron. and Astrophys.* **377**, 396 (2001).
9. C. M. Raiteri, M. Villata, M. Kadler, et al., *Astron. and Astrophys.* **459**, 731 (2006).
10. M. Tornikoski, E. Valtaoja, H. Terasranta, et al., *Astron. and Astrophys.* **289**, 673 (1994).
11. S. D. Clements, A. G. Smith, H. D. Aller, and M. F. Aller, *Astron. J.* **110**, 529 (1995).
12. A. Quirrenbach, A. Witzel, S. Wagner, et al., *Astrophys. J.* **372**, L71 (1991).
13. S. J. Wagner, A. Witzel, J. Heidt, et al., *Astron. J.* **111**, 2187 (1996).
14. A. Kraus, A. Quirrenbach, A. P. Lobanov, et al., *Astron. and Astrophys.* **344**, 807 (1999).
15. V. V. Vlasjuk, O. I. Spiridonova, A. S. Moskvitin, and V. S. Bychkova, *Astronomer's Telegram*, No. 6970 (2015).
16. O. I. Spiridonova, V. V. Vlasjuk, A. S. Moskvitin, and V. S. Bychkova, *Astronomer's Telegram*, No. 7004 (2015).
17. V. S. Bychkova, A. E. Vol'vach, N. S. Kardashev, et al., *Astronomy Reports* **59**, 851 (2015).
18. A. B. Pushkarev, Y. Y. Kovalev, and M. L. Lister, *Astrophys. J.* **722**, L7 (2010).
19. M. Ackermann, M. Ajello, J. Ballet, et al., *Astrophys. J.* **751**, 159 (2012).
20. S. V. Markelov, V. A. Murzin, A. N. Borisenko, et al., *Astron. Astrophys. Transactions* **19**, 579 (2000).
21. V. V. Vlasjuk, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **36**, 118 (1993).
22. A. E. Volvach, L. N. Volvach, M. G. Larionov, et al., *Astronomy Reports* **51**, 450 (2007).
23. A. E. Vol'vach, M. G. Larionov, L. N. Vol'vach, et al., *Astronomy Reports* **59**, 145 (2015).
24. A. E. Вольвач, Ю. Ю. Юровский, Л. Н. Вольвач, И. Д. Стрепка, in *Тр. 17 Международ. конф. по СВЧ-технике и телекоммуникационным технологиям, Севастополь, Крым, 2007*, С. 824–825.
25. A. E. Vol'vach, A. M. Kutkin, M. G. Larionov, et al., *Astronomy Reports* **58**, 71 (2014).
26. K. Fujisawa, H. Kobayashi, K. Wajima, et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **51**, 537 (1999).

Characteristics of the Flare Phenomenon in Blazar AO 0235+164 in Gamma, Optical and Radio Bands

V. S. Bychkova, A. E. Volvach, L. N. Volvach, N. S. Kardashev, M. G. Larionov, V. V. Vlasyuk, O. I. Spiridonova, A. Lahteenmaki, M. Tornikoski, J. Tammi, E. Jarvela, R. J. C. Vera, W. Chamani, and S. Enestam

The active core of the galaxy AO 0235+164 is monitored in the optical and radio bands at millimeter wavelengths. Using the multifrequency data obtained in gamma, optical and radio bands, the characteristics of its radiation in the active phase of 2015–2016 are studied. The crosscorrelation method was used to determine the delays between the 2015 flare bands in AO 0235+164 in 2015. The analysis made it possible to establish that, in comparison with previous flare phenomena, changes in the orientation of emissions occurred in the facility. The angle between the emissions from the blazar and the direction toward the observer θ decreased by $\sqrt{2}$ times, as a result of which the γ -factor changed twice in the direction of increase. The obtained value $\gamma \approx 40$ is the limiting value for AO 0235+164, fixed in the object for the whole time of observations.

Keywords: *BL Lacertae objects: individual: AO 0235+164*