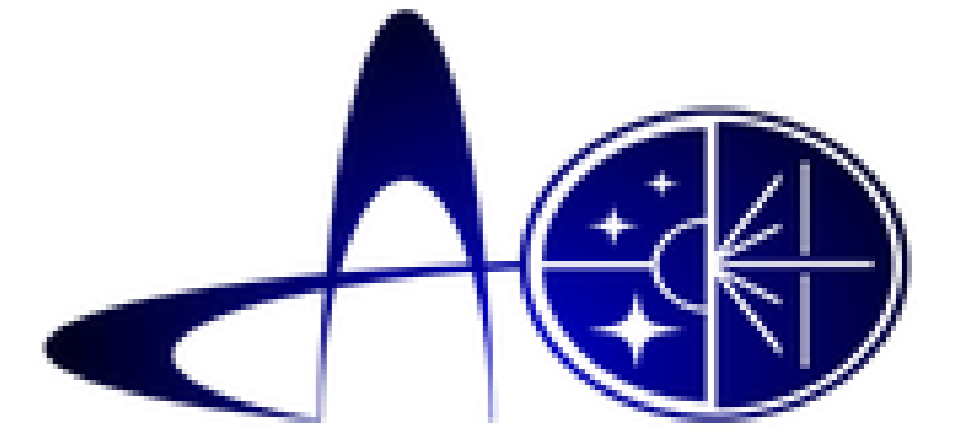


Михайлов А.<sup>1,\*</sup>, Сотникова Ю.<sup>1,2</sup>, Хабибуллина М.<sup>1</sup>, Кудрявцев Д.<sup>1</sup>, Власюк В.<sup>1</sup>, Вольвач А.<sup>3</sup>, Муфахаров Т.<sup>1,2</sup>, Ковалев Ю.А.<sup>4</sup>, Ковалев Ю.Ю.<sup>5</sup>, Попков А.<sup>4,6</sup>, Столяров В.<sup>1,7</sup>, Мингалиев М.<sup>1,2,8</sup>, Семенова Т.<sup>1</sup>, Харинов М.<sup>8</sup>, Андреева Т.<sup>8</sup>, Рахимов И.<sup>8</sup>, Удовицкий Р.<sup>1</sup>, Морозова Д.<sup>9</sup>



<sup>1</sup>САО РАН, Нижний Архыз, 369167, Россия

<sup>2</sup>КФУ, Казань, Респ. Татарстан, Россия, 420008

<sup>3</sup>КрАО РАН, Научный, 298409, Россия

<sup>4</sup>АКЦ ФИАН, Москва, 117997, Россия

<sup>5</sup>радиоастрономический институт Макса Планка, Бонн, 53121, Германия

<sup>6</sup>МФТИ, Долгопрудный, 141700, Россия

<sup>7</sup>Кавендишская лаборатория, Кембриджский университет, Кембридж, СВ3 0НЕ, Великобритания

<sup>8</sup>ИПА РАН, Санкт-Петербург, 191187, Россия

<sup>9</sup>СПбГУ, Санкт-Петербург, 199034, Россия

\*mag10629@yandex.ru

## Введение

Яркий блазар Топ 599 на красном смещении  $z = 0.725$  (Hewett and Wild, 2010) классифицируется как радиокварзар с плоским спектром (flat-spectrum radio quasar, FSRQ). Блазар относится к семейству источников, детектированных наземными черенковскими телескопами в ТэВ-ном диапазоне (Mukherjee and VERITAS Collaboration, 2017). Топ 599 демонстрирует вспышечную активность со сложной структурой вспышек в гамма-, оптическом и высокочастотных радиодиапазонах. Этот источник подвергся сильнейшим вспышкам в 2017 и 2021–2023 гг. (см., напр., Prince 2019; Patel and Chitnis 2020; Manzoog et al. 2024). О квазипериодическом поведении кривых блеска в сантиметровом диапазоне сообщалось ранее (Wang et al., 2014; Liu and Liu, 2014). Исследование долговременных кривых блеска дает возможность наложить ограничения на структуру и физические условия в центральной машине активных ядер галактик (АЯГ); характеристики вспышек позволяют отследить динамические процессы в центральных частях АЯГ. Для достижения этой цели мы построили и исследовали ряд многоволновых, от гамма- до радиодиапазона, долговременных кривых блеска Топ 599, охватывающих несколько десятилетий.

## Данные

Многоволновые кривые блеска (Рис. 1) построены по данным Fermi-LAT в гамма-диапазоне (Abdollahi et al., 2023) за период 2008–2024 гг., оптических измерений в R-диапазоне на телескопах Цейсс-1000, AS 500/2 (оба – САО РАН), LX-200 (СПбГУ), АЗТ-8 (КрАО РАН) в 2005–2024 гг. и измерений SMA<sup>1</sup> в миллиметровом диапазоне на 230 ГГц в 2002–2024 гг. (Gurwell et al., 2007). Кривые блеска в радиодиапазоне построены на основе мониторинговых данных 1997–2024 гг.: измерений на 37 ГГц с помощью радиотелескопа РТ-22 (КрАО РАН), измерений РАТАН-600 (САО РАН) на 1–22 ГГц и данных РТ-32 (ИПА РАН) на 5 ГГц и 8 ГГц. Для анализа крупнейших вспышечных событий мы выделили на кривых блеска 4 эпохи, как показано на Рис. 1.

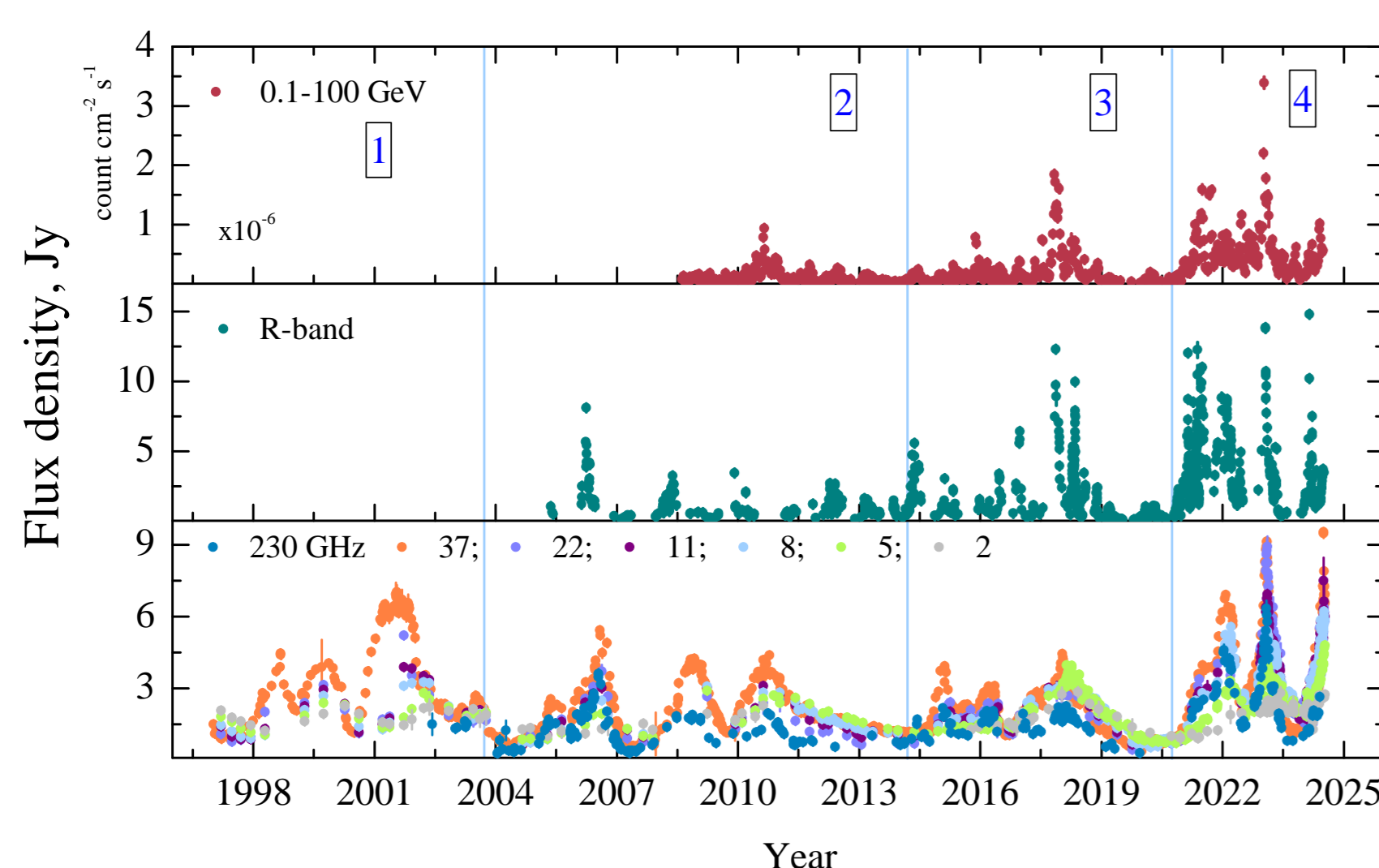


Figure 1: Многоволновые кривые блеска Топ 599 в 1997–2024 гг. Вертикальными линиями отмечены четыре эпохи, выбранные для анализа.

## Свойства многоволновой переменности

Топ 599 показывает сильную переменность излучения в широком диапазоне волн, индекс переменности  $V_S$  (Aller et al., 1992) варьируется в пределах от 0.47 до 0.98 на масштабе 27 лет; на 37 ГГц, например, спектральная плотность потока изменяется от 0.4 до 9.5 Ян. Интересной особенностью кривых блеска Топ 599 является наличие двойных и тройных вспышек с отличными спектральными свойствами (Рис. 1), а также вероятная периодичность спектральной плотности потока на радиочастотах 22–230 ГГц. Более того, на 37 ГГц тройная структура активных состояний ясно видна во всех четырех эпохах: 1997–2004, 2004–2013, 2013–2020 и 2020–2024 (по настоящее время). Периоды тройных вспышек на 37 ГГц составляют 7–9 лет.

Свойства переменности проанализированы следующими методами: 1) методом структурных функций, позволяющим оценить временную шкалу вариаций потока; 2) методом дискретной корреляционной функции для поиска корреляций и временных задержек между вспышками на разных длинах

волн; 3) методом периодограмм Ломба-Скаргла для поиска периодичности в кривых блеска. Анализ структурных функций выявляет в четырех эпохах активности временные шкалы переменности  $t_{var} = 100 - 1000$  дней (см. пример структурной функции на Рис. 2). На основе этих значений оценены верхние пределы размеров излучающих областей  $R = 1.2 - 12.3$  пк из соотношения  $R \leq c \cdot t_{var} \cdot \delta / (1 + z)$ , где  $c$  – скорость света, а  $\delta = 25$  (Kang et al., 2021) – Допплер-фактор.

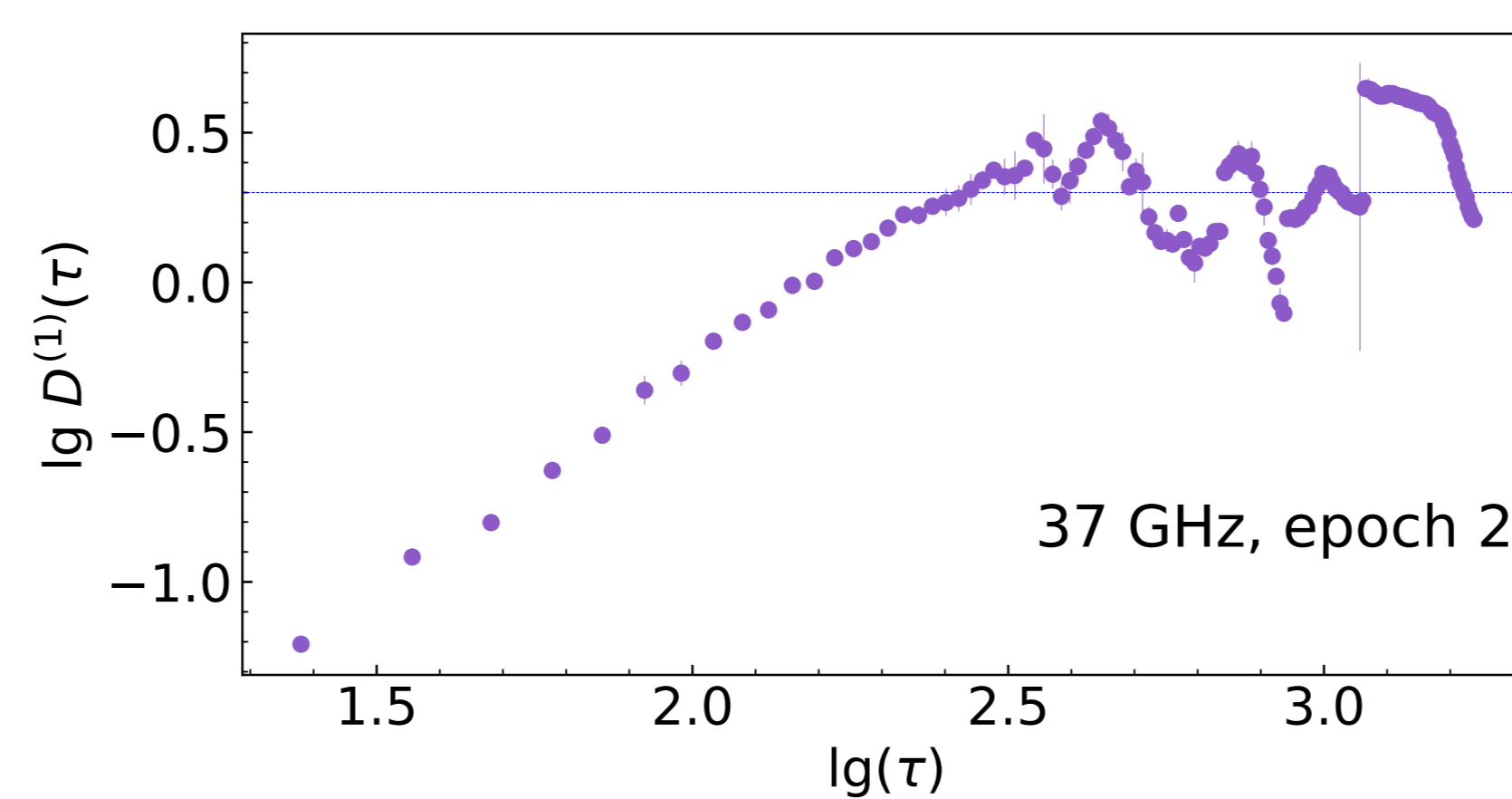


Figure 2: Структурная функция на 37 ГГц для эпохи 2.

Кросс-корреляционный анализ многоволновых кривых блеска показывает, что вспышкам на низких частотах предшествуют вспышки на более высоких частотах с различными временами задержек в течение отдельных эпох (см. пример на Рис. 3). Временные задержки уменьшаются по мере роста частоты в диапазоне от 0 до 120 дней для эпохи 2; от 0 до 145 дней для эпохи 3; от 0 до 60 дней для эпохи 4. В эпоху 1 временные задержки варьируются от 0 до 365 дней для пар частот в диапазоне 2–37 ГГц. На основе полученных временных задержек  $t_{lag}$  можно оценить расстояние  $D$  между излучающими областями, исходя из соотношения  $D = \beta \cdot c \cdot t_{lag} / [(1 + z) \cdot \sin \theta]$ , где  $\beta \approx 7.4$  кажущаяся скорость джета,  $\theta = 4.2^\circ$  угол наклона системы к лучу зрения (Ramakrishnan et al., 2014). Мы получили значения  $D \leq 5$  пк для эпохи 2,  $D \leq 6$  пк для эпохи 3 и  $D \leq 2.5$  пк для эпохи 4.

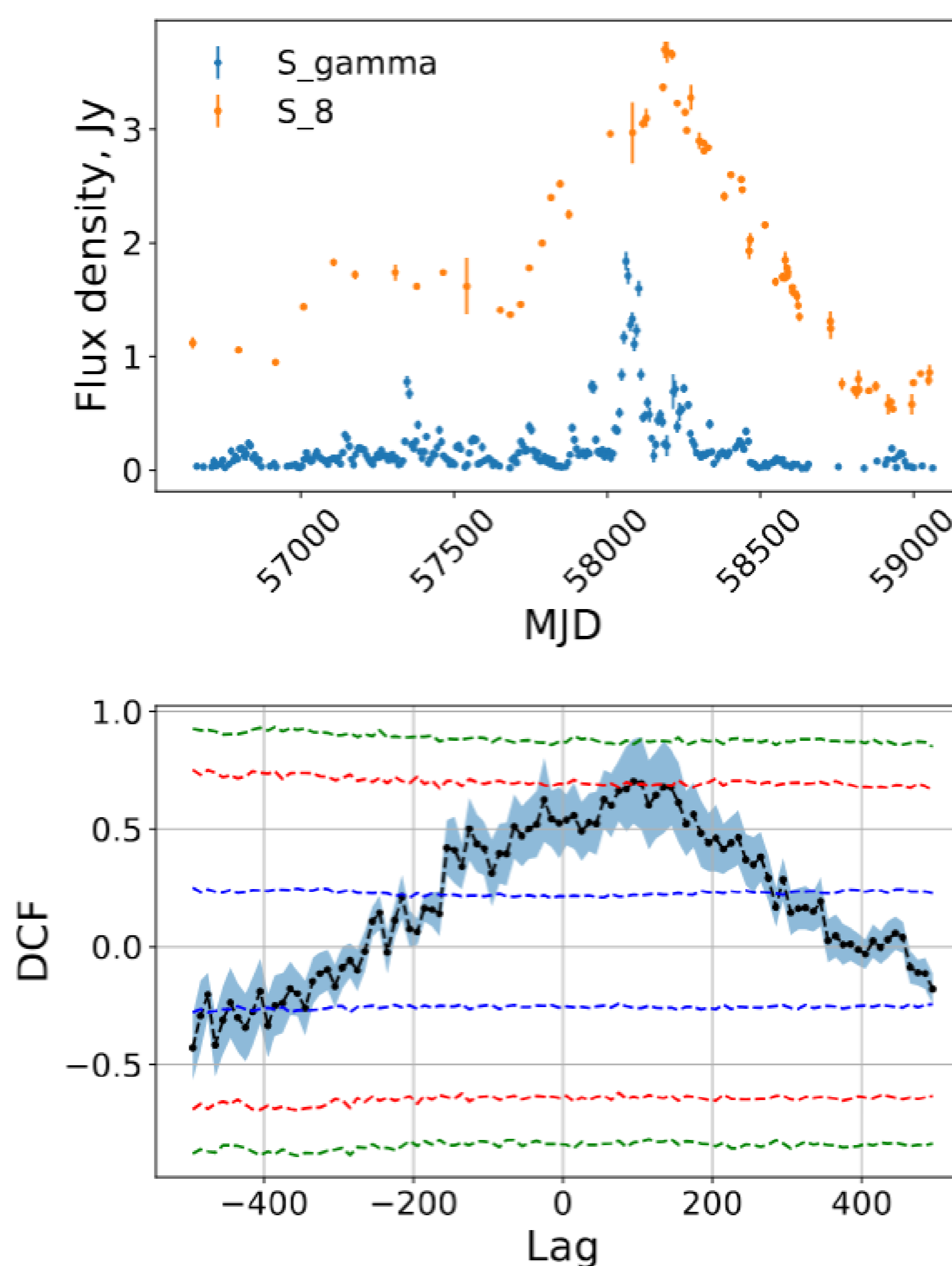


Figure 3: ДКФ между гамма-диапазоном и 8 ГГц для эпохи 3.

Для поиска долговременной периодичности мы использовали периодограммы Ломба-Скаргла (Lomb, 1976; Scargle, 1982), широко применяемые в астрономии для неравномерных временных рядов. Периодограммы Ломба-Скаргла для Топ 599 во всех волновых диапазонах показывают значимые пики, на уровне более  $3\sigma$ , связанные с периодами 2.4 – 3.9 лет (см. пример на Рис. 4), что совпадает со значениями второй и третьей гармоник (2.4 и 3.9 года), найденными Wang et al. 2014 на 4.8, 8 и 14.5 ГГц для временного

ряда 1987–2010 гг. Найденные периоды можно отнести к среднему интервалу между отдельными пиками в тройных вспышках, видимыми на кривых блеска в радиодиапазоне, особенно на частотах 22 и 37 ГГц. Применение метода Ломба-Скаргла для поиска периодичностей в более широком временном диапазоне обнаруживает периоды от 5.6 до 8.3 лет, отражающие промежуток времени между тройными вспышками.

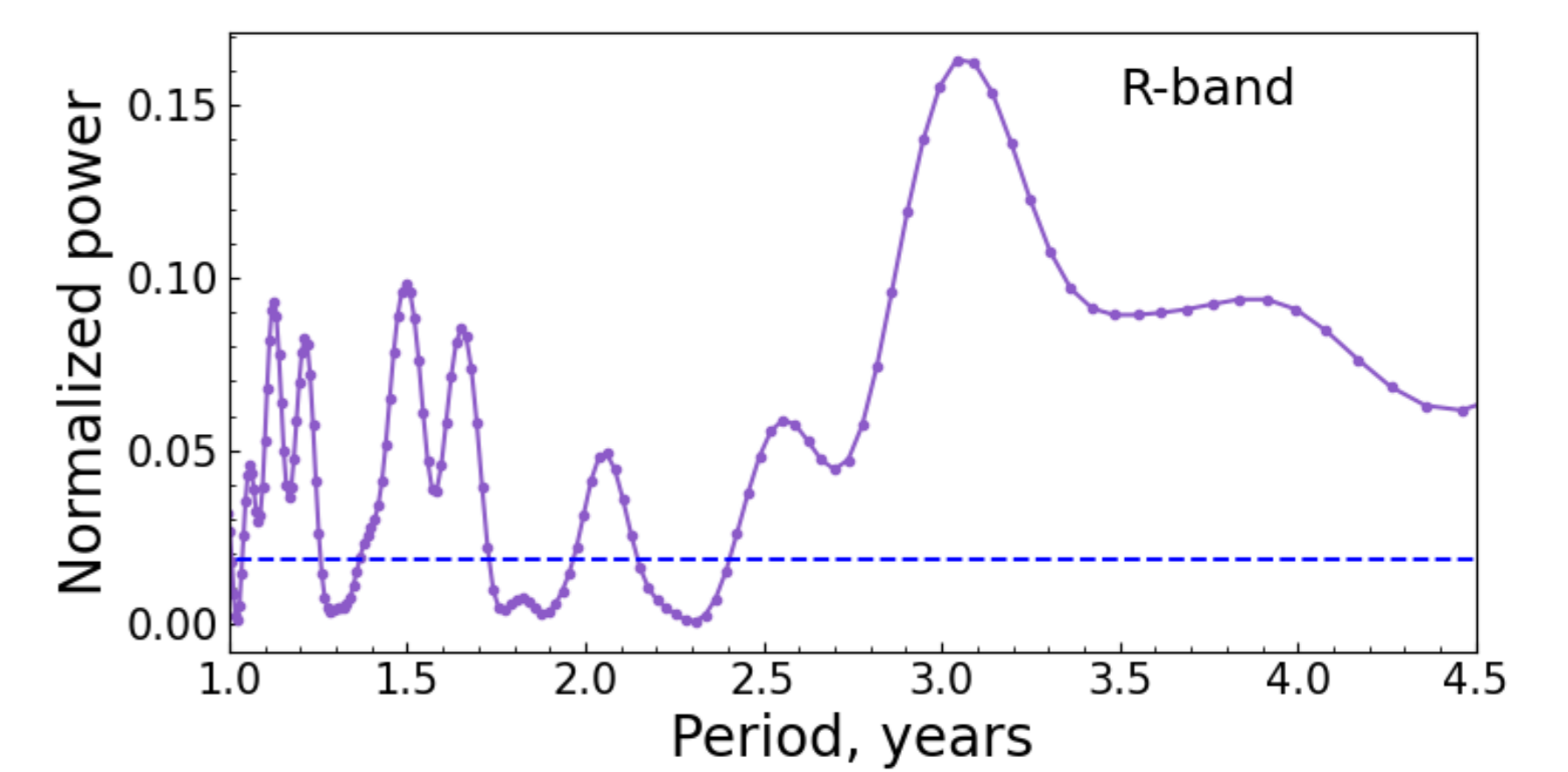


Figure 4: Периодограмма Ломба-Скаргла для R-диапазона.

## Заключение

Выполнено изучение свойств многоволновой переменности блазара Топ 599 на основе многолетних кривых блеска от гамма- до радиодиапазона, охватывающих период 1997–2024 гг. Индекс переменности варьируется от 0.47 до 0.98. Характерной чертой кривых блеска являются двойные и тройные вспышки, отличающиеся своими спектральными свойствами. Найденны значимые ( $\geq 2\sigma$ ) корреляции между радио, оптическим и гамма-диапазонами с временными задержками между ними от 0 до 365 дней. Периодограммы Ломба-Скаргла показывают значимые ( $> 3\sigma$ ) пики, связанные с периодами 2.4–3.9 года, что согласуется со значениями, полученными ранее другими авторами на основе данных 1987–2010 гг.

## Финансирование

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, контракт № 075-15-2022-1227.

## References

- Abdollahi S., Ajello M., Baldini L., et al., 2023, *Astrophysical Journal Supplement Series*, Volume 265, Issue 2, id.31, 11 pp.
- Aller M. F., Aller H. D., and Pearson-Readhead P. A., *Astrophys. J.* 1992, 399, 16–28.
- Gurwell M. A., Peck A. B., Hostler S. R., et al, 2007, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol. 375, From Z-Machines to ALMA: (Sub)Millimeter Spectroscopy of Galaxies*. p. 234.
- Hewett P. C. and Wild V. 2010, *MNRAS*, Volume 405, pp. 2302–2316.
- Kang S., Lee S.-S., Hodgson J., et al., 2021, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 651, Issue 2, id. A74.
- Liu B. and Liu X. 2014, *Astrophysics and Space Science*, Volume 352, Issue 1, pp. 215–220.
- Lomb N. R. 1976, *Astrophysics and Space Science*, Volume 39, Issue 2, pp. 447–462.
- Manzoog A., Shah Z., Sahayanathan S., et al. 2024, *MNRAS*, Volume 529, Issue 2, pp. 1356–1364.
- Mukherjee R. and VERITAS Collaboration, 2017, *The Astronomer's Telegram*, No., 11075.
- Patel S. R. and Chitnis V. R. 2020, *MNRAS*, Volume 492, Issue 1, pp. 72–78.
- Prince R. 2019, *ApJ*, Volume 871, Issue 1, id. 101.
- Ramakrishnan V., Leon-Tavares J., Rastorgueva-Foi E., et al., 2014, *MNRAS*, Volume 445, Issue 2, pp. 1636–1646.
- Scargle J. D. 1982, *ApJ*, Volume 263, pp. 835–853.
- Wang J. Y., An T., Baan W. A. and Lu X.-L. 2014, *MNRAS*, Volume 443, Issue 1, pp. 58–66.

<sup>1</sup><http://sma1.sma.hawaii.edu/callist/callist.html>