

ИССЛЕДОВАНИЕ ВСПЫШЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ VL Lас В ПЕРИОД ИЮЛЬ–НОЯБРЬ 2021 г.

© 2023 г. Л. С. Уголькова^{1*}, М. С. Пширков^{1,2}, В. П. Горанский^{1,3}, Н. П. Иконникова¹,
Б. С. Сафонов¹, А. М. Татарников¹, Е. В. Шимановская¹, М. А. Бурлак¹, М. Д. Афонина¹

¹Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Пушчинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ
ФИАН, Пушино, Россия

³Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

Поступила в редакцию 15.11.2022 г.

После доработки 19.05.2023 г.; принята к публикации 02.06.2023 г.

Источник VL Lас демонстрировал повышенную активность с августа 2020 до июля 2022 г. Максимум этой активности пришелся на период июль–август 2021 г. В этот период источник достиг исторических максимумов яркости в различных энергетических диапазонах. Наблюдения этого нестандартного максимума проводились сотрудниками ГАИШ Крымской станции ГАИШ и на телескопах Кавказской горной обсерватории (КГО ГАИШ МГУ). Были получены данные фотометрических наблюдений в оптическом диапазоне и ближней инфракрасной области, а также поляризметрические данные в оптике. При исследовании корреляции оптического и гамма-излучения, оптического и ИК-излучения подтвердилась ее высокая степень с почти нулевым запаздыванием — это значит, что области излучения пространственно совпадают либо расположены очень близко друг от друга. Степень линейной поляризации в исследуемый период менялась в широких пределах, достигая значения 20%, причем наблюдалась антикорреляция степени линейной поляризации с яркостью объекта. Подобный характер изменения наблюдался и в предшествующие вспышки этого объекта. Изменения направления вектора напряженности электрического поля (ЕVPA) показывают зависимость от скорости изменения яркости объекта. Угол вектора напряженности электрического поля сильно менялся при вспышках, а в моменты медленного изменения интенсивности менялся медленно.

Ключевые слова: блазары, лацертиды, поляризация, джет, аккреция.

DOI: 10.31857/S0320010823050078, EDN: GNKVZV

ВВЕДЕНИЕ

VL Lас является объектом-прототипом для лацертид — одного из подклассов блазаров. Этот источник расположен сравнительно близко, $z = 0.069$, $D = 300$ Мпк, в его центре находится сверхмассивная черная дыра с массой около $10^8 M_{\odot}$. Во время вспышек полная светимость джета достигает 10^{46} эрг/с (Саакян, Джиомми, 2022). Блазары — это разновидность активных ядер галактик (АЯГ), характеризующаяся наличием релятивистского джета, ориентированного под малым углом к лучу зрения наблюдателя $< 20^{\circ}$ (Урри, Падовани, 1995). Считается, что релятивистские эффекты играют определяющую роль в наблюдаемых свойствах блазаров (Блэндфорд, Рис,

1978; Блэндфорд, Пэйн, 1982). В современных теоретических моделях предполагается, что джет образуется вблизи центральной черной дыры, за счет энергии ее вращения, или энергии, выделяющейся при аккреции вещества (Блэндфорд, Знайек, 1977). В обоих случаях подразумевается существование связи между светимостью джета и темпом аккреции вещества на черную дыру (ЧД). Распределение энергии в спектре лацертид имеет характерный двугорбый вид. Источником излучения лацертид от радио- до оптического диапазона (а в некоторых случаях и рентгеновского), соответствующего области первого максимума, является синхротронное излучение в джете блазара (Брегман и др., 1981; Урри, Мушоцкий, 1982). Наиболее популярна так называемая лептонная модель, где рентгеновское и гамма-излучение второго максимума вызваны обратным комптоновским рассеянием фотонов фона

*Электронный адрес: lsu1@mail.ru

на популяции электронов, задействованных в синхротронном излучении (см., например, Самбруна и др., 1996; Ботчер, 2007).

В альтернативной модели высокоэнергичные фотоны образуются при синхротронном излучении протонов. Это так называемая адронная модель, описанная, например, в работе (Мюке, Протеро, 2001).

Блазары образуют самый многочисленный класс объектов, отождествленных с источниками гамма излучения (Хартман и др., 1999; Абдо и др., 2010), их активно исследуют с высоким угловым разрешением с использованием методов радиоинтерферометрии на VLBA (Very Long Baseline Array) (см., например, Джорстед и др., 2017) и на космическом радиотелескопе Радиоастрон (Ковалев и др., 2020а).

Многочисленные наблюдения в радиодиапазоне показывают, что джет представляет собой узкоколлимированный выброс из центральной области АЯГ. Наиболее вероятная причина происхождения джета связана с вращением магнитных полей на больших масштабах (Сикора и др., 2005). Ударные волны в джете разгоняют электроны до энергий, достигающих 10^{12} эВ. Эти электроны излучают низкочастотное синхротронное излучение. Синхротронная компонента спектра приходится на область электромагнитного спектра от радио до мягкого рентгена, пиковая частота этого излучения может находиться в довольно широком диапазоне частот от 10^{12} до 10^{18} Гц (обычно в ИК/оптике). Многочисленные работы в оптике, используя многоволновые наблюдения лацертид, представляют их спектральное распределение энергии. Максимумы потоков низкочастотного и высокочастотного находятся на одном уровне.

Синхротронное происхождение оптического излучения объясняет наблюдаемую сравнительно высокую степень поляризации в оптическом излучении блазаров. Положение вектора напряженности электрического поля (EVP) и степень поляризации (p) нестабильны (см., например, Умура и др., 2010; Маршер и др., 2008; Гаген-Торн и др., 2002а; Раитери и др., 2013; Уивер и др., 2020; Джорстед и др., 2022). Часто наблюдается корреляция между потоком от блазара и степенью поляризации, которая, однако, может нарушаться. Одной из причин этого является присутствие других поляризованных компонент. Существуют и другие причины (см. раздел “Обсуждение”). Особенно важны поляриметрические измерения в разных областях спектра, которые позволяют детально изучить структуру джета и область, в которой он формируется.

В настоящей работе сделана попытка проанализировать данные по VL Lac в момент максимума его

активности и найти некоторые закономерности и особенности с использованием данных наблюдений в оптическом, ближнем ИК- и гамма-диапазонах излучения.

НАБЛЮДЕНИЯ

Оптический и ИК-диапазоны

Наблюдения в этот период активности VL Lac проводились с помощью 60-см телескопа Кавказской горной обсерватории Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова (КГО), оснащенного CCD-камерой Andor iKON-L (2048×2048 пикселей, размер пикселя 13.5 мкм, масштаб 0.67 угл. сек на пиксель, датчик с задней подсветкой) в фотометрических диапазонах BVR_cI системы Джонсона–Казинса. Поле зрения фотометрического телескопа с установленной камерой составляет 22×22 угл. мин (Бердников и др., 2020). Размер типичного FWHM изображений варьировался от ночи к ночи от 1.2 до 2.5 сек. дуги в зависимости от состояния атмосферы. Для одного измерения получалось по три кадра с экспозициями 60, 20, 10 и 10 с в B , V , R_c и I_c -полосах соответственно. В данной статье анализируются данные, полученные в R_c -полосе. Редукция кадров включала в себя исправление за нулевой уровень, темновой ток и плоское поле, снятое по сумеречному небу. Наблюдения и редукция проводились с помощью программы Maxim DL6. В качестве звезд сравнения использовались три объекта из архива Виртуальной обсерватории СПбГУ, участника международного проекта WEBT (Whole Earth Blazar Telescope). Небольшая часть данных получена на телескопе Цейсс-600 Крымской станции ГАИШ (диаметр зеркала 600 мм, фокусное расстояние 7.5 м, прибор — UBVR_I-фотометр на основе матрицы FLI PL 16803) и на телескопе Цейсс-1000 обсерватории САО РАН (диаметр зеркала 1016 мм, фокусное расстояние 13.3 м, приборами-CCD UBVR_I-фотометр с матрицей EEV 42-40) (см. табл. 1).

Наблюдения и их обработка проводились аналогично наблюдениям на телескопе КГО. Можно отметить очень хорошее совпадение (в пределах

Таблица 1. Инструменты, которые использовались в наблюдениях

Период наблюдений	Обсерватория	Инструмент
27.04.2021–30.12.2021	КГО ГАИШ МГУ	RC-600
02.08.2021–14.08.2021	КрСт ГАИШ	Цейсс-600
19.06.2021–07.11.2021	САО РАН	Цейсс-1000

ошибок) наших результатов и результатов группы СПбГУ в пересекающиеся эпохи наблюдений. Ошибка фотометрических наблюдений и обработки составляет 0.01–0.02 зв. величин для наших наблюдений на всех телескопах.

ЖК-фотометрия VL Lас была выполнена с помощью инфракрасной камеры ASTRONIRCAM (Наджиб и др., 2017), установленной на 2.5-м телескопе КГО. Наблюдения проводились с использованием дизеринга — небольших смещений телескопа между отдельными короткими экспозициями (от 0.5 до 3 с в зависимости от блеска объекта и фотометрической полосы). Одно наблюдение включало в себя от 8 до 20 кадров в каждой полосе. Каждый кадр корректировался за нелинейность и плоское поле. Обработка производилась покадрово методом апертурной фотометрии со звездой 2MASS J22024541+4216354 в качестве стандарта. Звездные величины стандарта были взяты из каталога 2MASS (Скрутски и др., 2006) и преобразованы в систему МКО в соответствии с калибровкой (Леггет и др., 2006): $J(\text{МКО}) = 9.761$, $H(\text{МКО}) = 8.991$, $K(\text{МКО}) = 8.807$. Ошибка полученных результатов не превышает 0.02 зв. величины.

Поляриметрия

Спекл-поляриметр — это двухлучевой поляриметр, в котором используется ПЗС-матрица с электронным усилением Andor iXon 897 в качестве детектора. В качестве светоделителя используется призма Волластона, детектор получает изображения, соответствующие двум ортогональным направлениям поляризации одновременно. Модулятор — полуволновая пластина — устанавливается на входе прибора. Это позволяет получить полную информацию о линейной поляризации и применить метод двойной разности для устранения большинства нежелательных эффектов поляризации, возникающих в приборе. VL Lас наблюдался с использованием режима быстрой поляриметрии. В этом режиме детектор непрерывно получает серию кадров. В то же время полуволновая пластина вращается с постоянной скоростью. Для VL Lас продолжительность серии составляла 2000–3000 кадров, экспозиция одного кадра составляла 0.15 с. Промежутки между кадрами незначительны благодаря технологии кадрового переноса. Скорость вращения полуволновой пластины составляла 60 градусов в секунду. Поле зрения спекл-поляриметра составляет 5×10 угл. сек, следовательно, одна серия содержала данные только для VL Lас. Мы использовали стандартный фильтр R_c . Прибор установлен в фокусе Нэсмита

2.5-м телескопа КГО. Поправка за инструментальную поляризацию была применена путем умножения расчетного вектора Стокса на обратную матрицу Мюллера телескопа. Точность поляриметрии при наблюдениях в фокусе Нэсмита после коррекции за инструментальную поляризацию составляет 0.05% для звезд с собственной поляризацией $p < 1\%$. Для значительно поляризованных звезд погрешность возрастает: она составляет 0.046 от доли поляризации (см. Сафонов и др., 2017). Для более поляризованных объектов точность ограничивается эффектом двулучепреломления в призмах компенсатора атмосферной дисперсии, а также качеством коррекции за инструментальную поляризацию (в тех случаях, когда наблюдения выполняются в фокусе Нэсмита). Компенсатор дисперсии приводит к появлению дополнительной относительной погрешности определения доли поляризации в размере 0.057 и дополнительной абсолютной погрешности определения угла поляризации 0.79° . Атмосфера не обладает дихроизмом и двулучепреломлением и не деполяризует излучение, по крайней мере, до точностей 0.01% (см. раздел 7 в Кларк и др., 2010). Таким образом, ее влиянием в нашем случае можно пренебречь. Все наши наблюдения проводились только при высокой прозрачности атмосферы (Сафонов и др., 2017).

Гамма-излучение

Использовались данные гамма-телескопа Fermi LAT (Large Area Telescope) (Атвуд и др., 2009), усредненные за сутки в разные периоды наблюдений, в максимуме активности усреднение выполнялось в 6-ч интервалах. Для анализа мы выбрали фотоны класса SOURCE с направлениями прихода в радиусе 15° от блазара ($\alpha_{J2000} = 330^\circ.68$, $\delta_{J2000} = 42^\circ.28$) в диапазоне энергий 0.1–100 ГэВ. Из рассмотрения были исключены фотоны, у которых направление прихода имеет зенитный угол более 90° . Анализ проводился стандартными средствами, реализованными в пакете *fermitools*. Модели источников были взяты из каталога 4FGL (Абдоллахи и др., 2020). В качестве моделей для галактического и изотропного фона выбраны соответственно модели *gll_iem_v07.fits* и *iso_P8R3_SOURCE_V2_v1.txt* (<http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/BackgroundModels.html>). Все характеристики остальных объектов в области анализа, за исключением фонов, были зафиксированы на их значениях, взятых из каталога. Для источника VL Lас общая нормализация и спектральный индекс были оставлены свободными. Яркость вспышки была настолько велика, что поток выше 100 МэВ достиг значения $10^{-5} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, что позволило достичь значимого обнаружения.

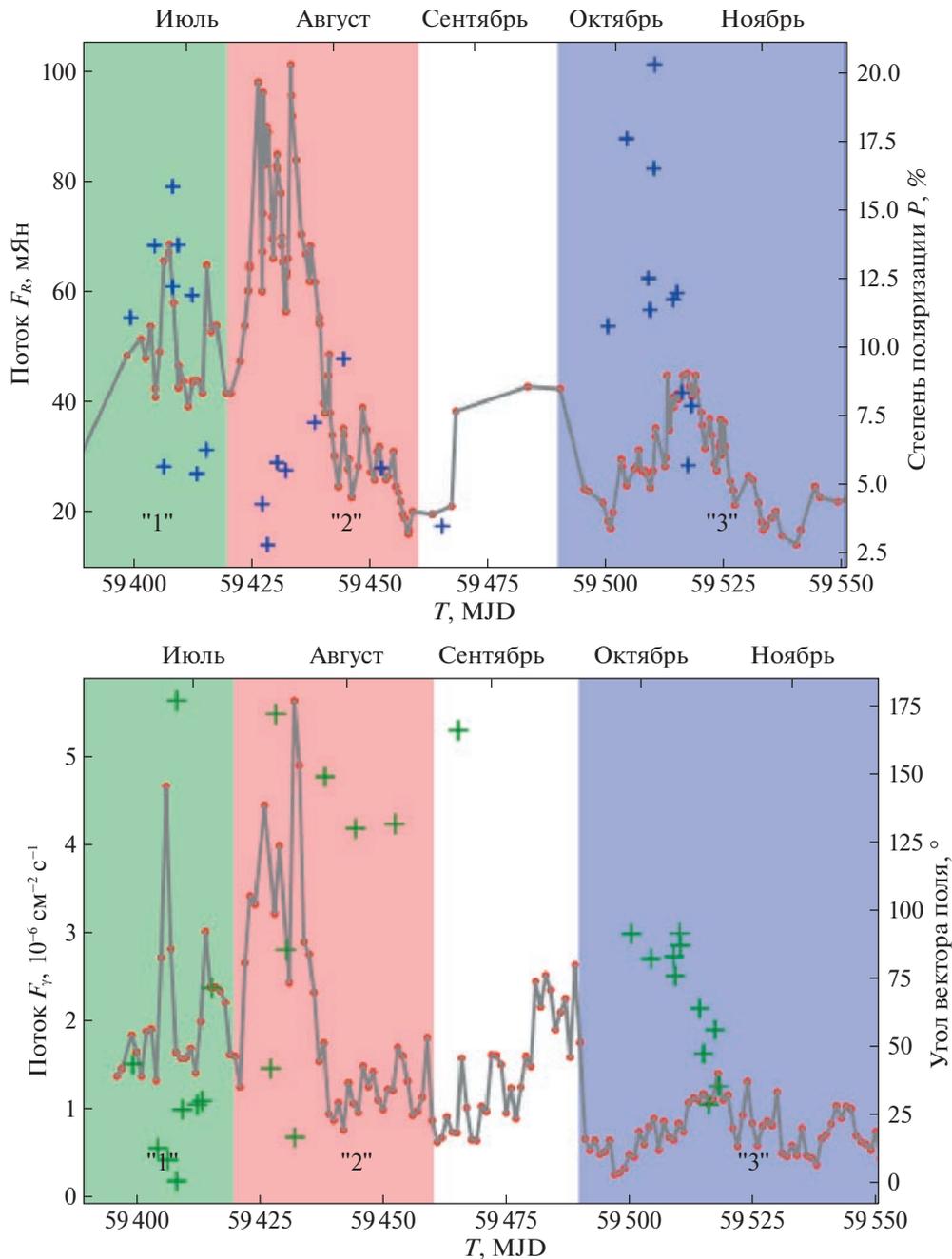


Рис. 1. Верхний график представляет оптические изменения интенсивности и степени поляризации за весь период наблюдения июль—ноябрь 2021 г. Красные точки и серые линии — это поток в фильтре R в мЯн, синие кресты — степень линейной оптической поляризации (шкала — справа от 0 до 20 %). Нижний график — гамма-излучение за тот же период, усредненное посуточно в единицах 10^{-6} фот $m^{-2} s^{-1}$, зеленые кресты — угол вектора напряженности электрического поля. Различные области активности ("1" — предмаксимум, "2" — максимум, "3" — спад) выделены цветом.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оптический и ИК-диапазоны

С августа 2020 и до июля 2022 г. наблюдалась исключительно высокая активность источника BL Lac. Она проявлялась в многочисленных вспышках на всех длинах волн на разных масштабах переменности — от месяца до внутрисуточ-

ной. По данным в оптическом и гамма-диапазоне повышенная активность лацертиды продолжалась на протяжении 2.5 лет. Максимальный поток вспышек этого периода в оптике был на 1.5–1.8 зв. величин ярче самых ярких вспышек с 2002 г. В гамма-диапазоне наблюдалась та же картина: поток BL Lac во время максимума активности 2021 г.

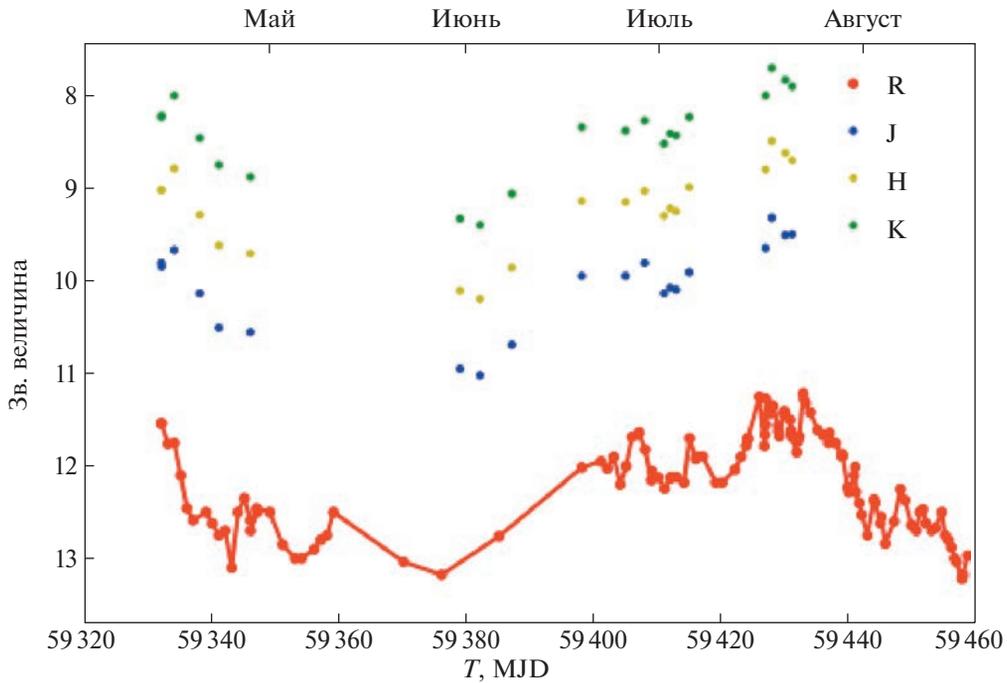


Рис. 2. Кривые блеска в оптическом и ближнем ИК-диапазонах.

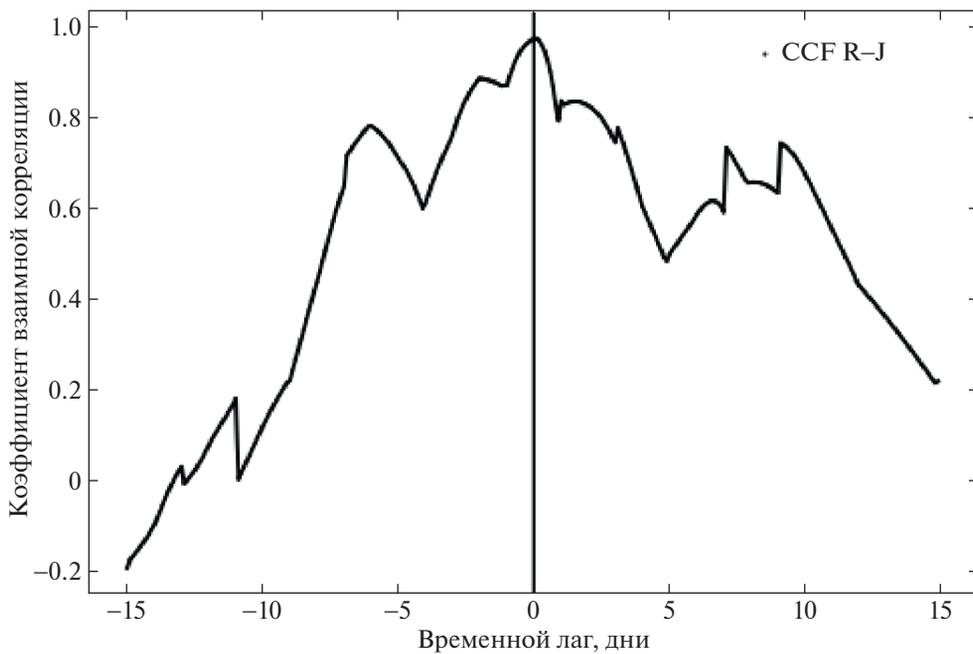


Рис. 3. Результаты взаимной корреляции между оптическим (фильтр R) и ИК-излучениями (фильтр J).

был почти на порядок выше, чем во время максимума вспышек прежних лет. Максимум вспышечной активности BL Lac пришелся на конец июля—начало августа 2021 г., в интервале 28.07.2021—11.08.2021 (MJD 59420—59438) яркость источника достигала 11.22 зв. величин в фильтре R . Этот максимум продолжался около 15 сут и представлял со-

бой серию более мелких и быстрых вспышек в оптическом и гамма-диапазоне с изменением яркости от 0.2 до 0.5 зв. величин за сутки в оптике и от 0.4×10^{-5} фот $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$ до 1.25×10^{-5} фот $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$ за сутки в диапазоне высоких энергий $E > 100$ МэВ. Как следует из рис. 1 и рис. 4, все вспышки в оптике и гамма-диапазонах практически совпадают

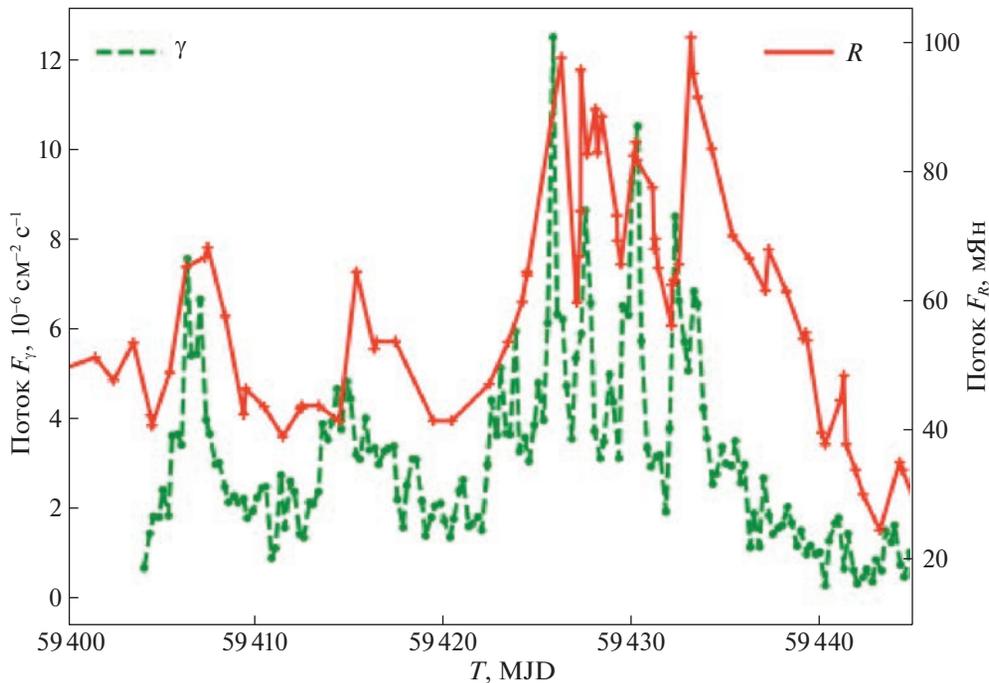


Рис. 4. Кривые блеска BL Lac в оптическом (R) и гамма-диапазонах в июле-августе 2021 г. Красные линии и точки — данные в фильтре R в мЯн, зеленая штрихованная линия — усредненное в интервалах 6 ч гамма-излучение в единицах 10^{-6} фот $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$.

по времени. На рис. 1 представлены оптические данные и данные наблюдений степени линейной оптической поляризации за период июль–ноябрь 2021 г. (верхний график), гамма-наблюдения и наблюдения угла положения плоскости поляризации за тот же период (нижний график).

На протяжении почти всего периода повышенной активности проводились наблюдения в ИК-диапазоне. На рис. 2 представлены кривые блеска в фильтрах JHK в области, где наблюдения были максимально частыми, и оптические наблюдения в фильтре R . Этот временной участок охватывает период, когда активность источника была максимальной, и непосредственно предшествующий ему. По этим данным были построены кросс-корреляционные функции (рис. 3). Используя метод Гаскела–Петерсона–Спарка (Гаскел и др., 1986; Гаскел и др., 1987), вычислены функции взаимной корреляции (CCF). Этот метод был модифицирован в работе (Окнянский, 1993) и опробован в работах (Шимановская и др., 2015; Уголькова и др., 2017). С его помощью можно рассчитать коэффициент корреляции K и задержку D оптического потока относительно потока в J -фильтре. Для фильтров R и J максимум функции взаимной корреляции достигает высокого значения ($K = 0.98$) при нулевом запаздывании, $D = 0$. Для других фильтров H и K картина корреляции аналогична.

При использовании статистического метода Монте-Карло для расчета ошибок в определении величины запаздывания ИК-излучения относительно оптического была получена погрешность в ~ 2 сут, так как не было возможности использовать более плотный ряд значений и больший интервал наблюдений. Анализ публикаций, посвященных поиску запаздывания между переменностью блеска в разных диапазонах, показывает, что, когда данные в принципе позволяют оценить запаздывание двух кривых блеска, времена запаздывания, вычисленные разными методами (DCF — Discrete Correlation Function, MCCF — Modified Cross-Correlation Function, ICCF — Interpolated Cross-Correlation Function, ZDCF — Z-transformed Discrete Correlation Function), в пределах ошибок совпадают (МакХарди и др., 2014; Окнянский и др., 2017; Ковачевич и др., 2014). Используемый нами метод MCCF (Окнянский, 1993) является промежуточным между ICCF и DCF, его преимуществом является ограничение интервала интерполяции кривых блеска.

Гамма-излучение

Полученные кривые блеска в период максимальной активности (июль–август 2021 г.) и результаты взаимной корреляции между оптическим и гамма-излучением в этот период представлены на

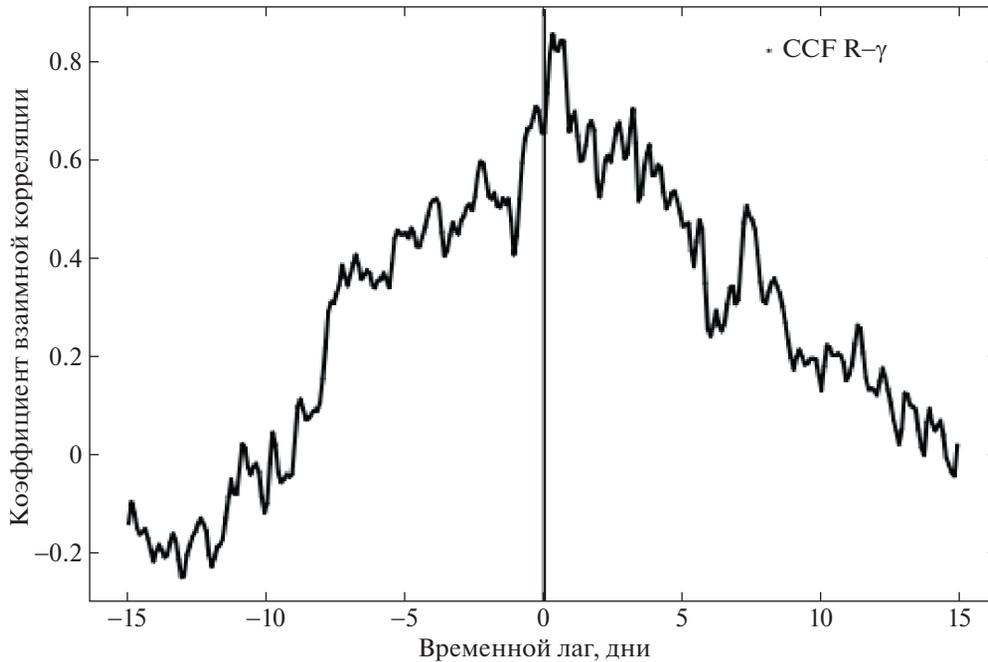


Рис. 5. Результаты взаимной корреляции между оптическим (фильтр R) и гамма-излучением в период июль–август 2021 г.

рис. 4 и 5. Для этой области максимальной активности максимальное значение функции взаимной корреляции оптического и гамма-излучения также достаточно велико ($K = 0.86$) при запаздывании излучения в оптическом диапазоне относительно гамма-излучения $D = 0.5$ сут. Несмотря на исключительную яркость источника по меркам гамма-астрономии, количество наблюдаемых фотонов не слишком велико, поэтому кривая блеска получается с использованием потока, усредненного в различных интервалах. В нашем случае мы провели сравнение при использовании разбиения на интервалы в 6 ч. Кривые блеска в обоих диапазонах (рис. 4) повторяют друг друга — так, в самом максимуме пяти сильных всплесков интенсивности в диапазоне высоких энергий отражены и в оптическом диапазоне, с возможным некоторым запаздыванием последнего. Выбор сравнительно мелкого шага усреднения данных наблюдений в области высоких энергий дал возможность более точно изучить корреляцию между кривыми блеска (рис. 5). Мы нашли общую корреляцию с запаздыванием 0.5 ± 1 сут. Высокая степень корреляции (0.86 для гамма и 0.98 для ИК-диапазона) говорит об одинаковом механизме, ответственном за вспышки. Также запаздывание, совместное с нулевым, свидетельствует о том, что оптическое, ИК- и гамма-излучения формируются в очень компактной области, линейные размеры которой меньше, чем наблюдаемая задержка.

Поляризация в оптике

В результате наблюдений линейной поляризации оптического излучения (фильтр R) были определены степень поляризации (P) и положение вектора напряженности электрического поля, которые представлены на графиках рис. 1 и в табл. 2. Поляриметрические наблюдения на 2.5-м телескопе КГО проводились только в фильтре R_c , который имеет наилучшее отношение сигнал-шум. Представляет интерес рассмотреть три области, для которых получена линейная поляризация в фильтре R : “1” — область перед основным максимумом активности, MJD 59397–59420 (01.07.2021–23.07.2021) “2” — область с максимумом активности, MJD 59420–59465 (24.07.2021–07.09.2021) и “3” — более слабая вспышка в области спада активности, MJD 59490–59550 (02.10.2021–30.11.2021).

Из рис. 1 следует, что в самом максимуме интенсивности (область “2”) плотность потока F_R менялась от 30 до 105 мЯн и наблюдались наименьшие значения степени поляризации $2.5\% < p < 10\%$, причем минимальная степень поляризации совпала с моментом сильнейшей вспышки. Область “1” представляет две более слабые вспышки, поток F_R в среднем меньше, значения меняются от ~ 40 мЯн до $F_R \sim 65$ мЯн, и наблюдается увеличение степени поляризации в интервале от $5\% < p < 15.7\%$. Область “3” представляет еще более слабую вспышку с $F_R < 40$ мЯн, и в максимуме ей соответствует

Таблица 2. Данные по поляризации в отдельных сеансах

JD	Месяц	Число	P , %	EVPA, град.	№
2459338.412	05	04	1.78	72.0	1
2459354.408	05	20	9.58	76.5	2
2459399.261	07	03	11.05	43.9	3
2459404.359	07	08	13.65	13.2	4
2459406.325	07	10	5.65	8.9	5
2459408.175	07	12	12.16	176.7	6
2459408.321	07	12	15.78	1.2	7
2459409.323	07	13	13.67	27.3	8
2459412.317	07	16	11.85	29.1	9
2459413.304	07	17	5.39	30.5	10
2459415.295	07	19	6.26	71.8	11
2459427.204	07	31	4.30	42.3	12
2459428.262	08	01	2.82	171.8	13
2459430.328	08	03	5.80	85.7	14
2459432.153	08	05	5.51	17.2	15
2459438.247	08	11	7.25	148.9	16
2459444.424	08	18	9.56	130.0	17
2459452.409	08	26	5.60	131.7	18
2459465.277	09	07	3.49	165.8	19
2459500.443	10	12	10.75	91.6	20
2459504.385	10	16	17.52	82.4	21
2459509.039	10	21	12.46	83.2	22
2459509.331	10	21	11.32	76.2	23
2459510.161	10	22	16.45	91.8	24
2459510.326	10	22	20.21	87.4	25
2459514.286	10	26	11.69	64.3	26
2459515.060	10	27	11.94	47.8	27
2459516.100	10	28	8.34	29.2	28
2459517.400	10	29	5.70	56.5	29
2459518.100	10	30	7.86	35.9	30

еще большая степень поляризации $p = 20\%$. Минимальная степень поляризации совпала с моментом максимума сильнейшей вспышки “2”, а максимальная пришлась на самую слабую вспышку области “3”, т.е. проявилась обратная зависимость — чем сильнее излучение, тем меньше степень поляризации и наоборот. Эта закономерность представлена на графике рис. 6.

Вспышки этого объекта до 2000, 2005 и 2011–2012 гг. также показывают эту закономерность, что отражено в работах (Гаген-Торн и др., 2002б; Маршер и др., 2008; Раитери и др., 2013). Для других блазаров наблюдалась как прямая, так и обратная зависимость поток — степень поляризации.

Наши данные по наблюдению положения вектора напряженности электрического поля, представленные на рис. 1, показывают, что положение вектора сильно меняется при быстром изменении интенсивности оптического и гамма-излучений. В моменты сильных вспышек угол меняется на величину, превышающую 90° . При медленном же изменении потока угол также меняется медленно. Это наблюдается в области “3” слабой вспышки на спаде активности. Таким образом, можно утверждать, что скорость изменения угла зависит от скорости изменения потока. Такой же эффект наблюдается и в других блазарах, например, в 3C 279 (Кельман и др., 2021). Более наглядно представлены изменения параметров оптической линейной поляризации на рис. 7 и 8. На рис. 7 представлена зависимость угла вектора напряженности электрического поля (EVPA) от степени поляризации по трем выделенным временным интервалам (“1”, “2”, “3”). Видно, что значения параметров поляризации группируются по каждому интервалу. Синие звездочки — это область “1” (точки 3–11 в табл. 2) — соответствуют средней области значений степени поляризации p : от 5 до 15 %, при этом угол меняется в пределах от 0° до 40° , кроме одной точки 6. Это тот самый уникальный случай, когда за 3.5 ч значение угла могло измениться от 176.7° до 1.2° . Мы не можем подтвердить эту интерпретацию непосредственно из-за имеющейся врожденной неопределенности поляриметрических измерений $\pm 180^\circ$, т.е. мы не можем различить положение вектора 0° и 180° , но косвенным указанием в ее пользу может служить совпадение с пиком активности в оптике и в гамма в это же время (см. рис. 1 и 4). Увеличение значение угла при росте активности часто наблюдалось в источнике, например, во время вспышки 2005 г., когда за 4 ч произошел поворот почти на 190° . Аналогично в области, содержащей максимум вспышки (точки 12–19), сконцентрированы степени поляризации от 6.26 до 7.25%, изменение угла представляет пять больших, разделенных меньшими значениями

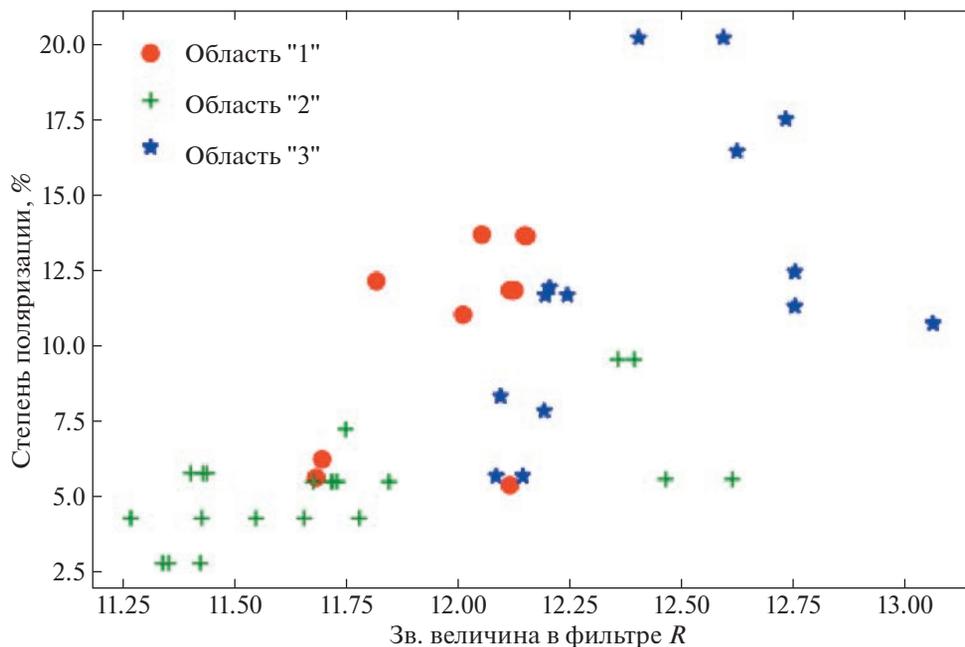


Рис. 6. Зависимость степени поляризации от зв. величины (фильтр R). Зеленые крестики относятся к самой яркой области (максимум вспышечной активности “2”), красные кружки соответствуют более слабому предмаксимуму (область “1”), синие звездочки показывают наибольшее значение степени поляризации при слабой вспышке (область “3”).

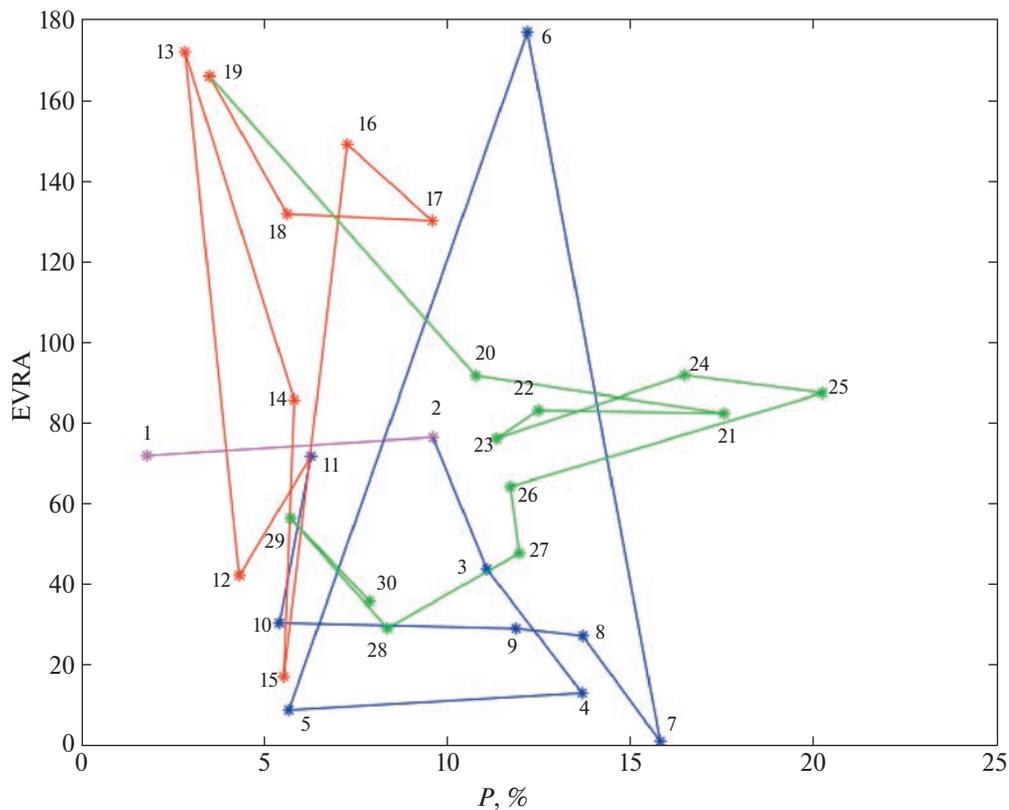


Рис. 7. Зависимость угла вектора напряженности электрического поля от степени поляризации. Синие звездочки — это область “1”, красные — это область “2” и зеленые — это область “3”. Цифры — номер измерения из табл. 2. Точки 1 и 2 относятся к эпохе, непосредственно предшествовавшей “1”.

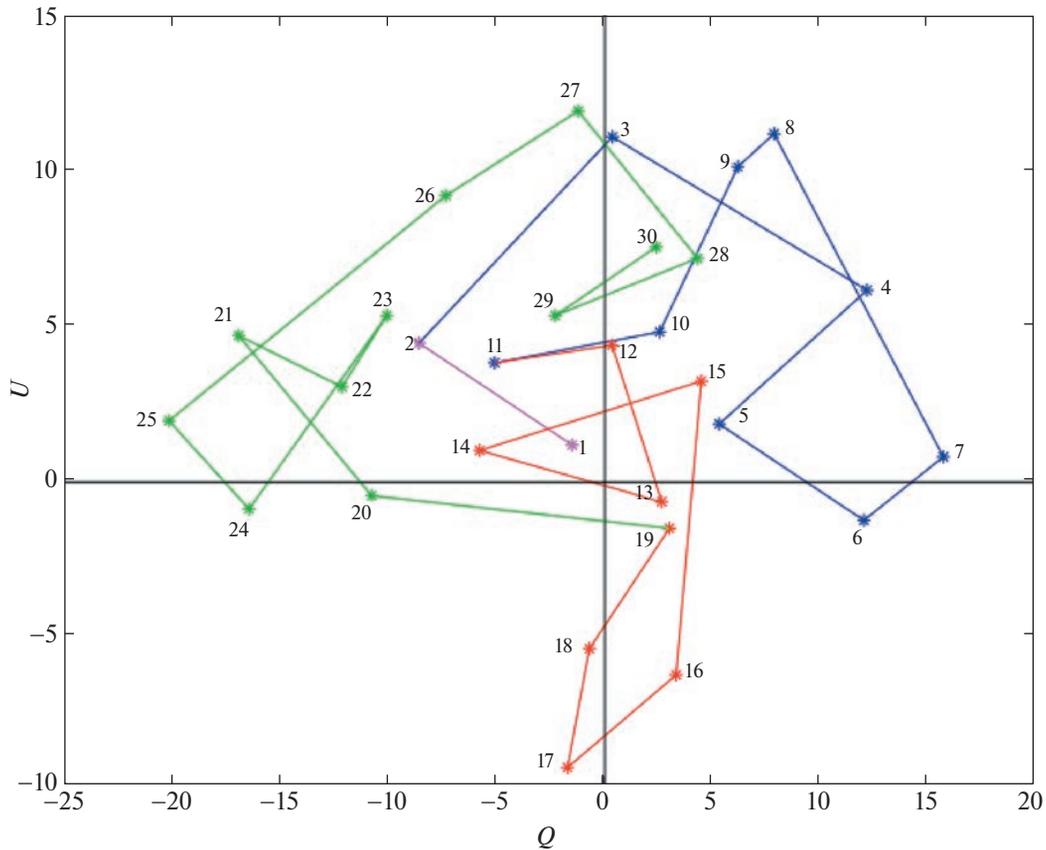


Рис. 8. Параметры Стокса U и Q для различных сеансов наблюдений (см. табл. 2). Цвета и нумерация аналогичны рис. 7. Все значения в правой нижней части соответствуют изменению угла $>90^\circ$. Они совпадают с резкими изменениями яркости источника как в оптическом, так и в гамма-диапазонах и находятся в “1” и “2” областях, т.е. в период предмаксимума вспышки и в самом ее максимуме. Область “3” — вспышка на нисходящей активности представляет плавное изменение параметров поляризации, где представлен ряд более плотных по времени данных.

угла, совпадающих с нестандартной переменностью в максимуме, которая продолжается 15 сут и представляет такую же переменность в оптике и гамма из пяти мелких вспышек. Таким образом, изменение угла поляризации повторяет изменение активности источника в оптике и гамма. В области “3” вспышка на спаде активности (точки 20–30) группируется в области степени поляризации до 20% с уменьшением угла от 91° до 29° . К сожалению, не вся вспышка охвачена наблюдениями поляризации, но даже сейчас можно видеть особенности изменения параметров, т.е. в случае “3” наблюдается медленное изменение угла. Подтверждается, что на спаде активности наблюдается самая большая степень поляризации, самая маленькая — в области “2” с наибольшей яркостью излучения, область “1” является промежуточной. Таким образом, по рис. 7 также можно увидеть отмеченную выше антикорреляцию.

На рис. 8 представлено поведение параметров Стокса U и Q , значение параметров связано со степенью поляризации p и положением вектора поляризации ϕ обычным образом: $U = p \cos 2\phi$, $Q =$

$= p \sin 2\phi$. Все значения в правой нижней части соответствуют изменению угла $>90^\circ$. Они совпадают с резкими изменениями яркости источника как в оптическом, так и в гамма-диапазонах и находятся в “1” и “2” областях, т.е. в период предмаксимума вспышки и в самом ее максимуме. Область “3” — вспышка на нисходящей активности представляет плавное изменение параметров поляризации, где представлен ряд более плотных по времени данных. По длительным мониторингам угол поляризации оптического электрического вектора показывает предпочтительную ориентацию около 15° – 22° (Гаген-Торн и др., 2002б), почти выровненную с углом поляризации в радио и среднем направлением струи. Колебания угла относительно этого значения усиливаются в течение максимума активности.

Представленные на рис. 1 значения были получены с использованием условий минимизации изменений положения вектора между соседними измерениями, т.е. описанная выше переменность положения вектора является нижней оценкой.

ОБСУЖДЕНИЕ

Количество поляриметрических наблюдений лацертид значительно увеличилось с 2013 г. с начала работы проекта RoboPol. Оптические поляриметрические наблюдения помогают изучать именно малоизученную область джета, которая не доступна для исследований в радиодиапазоне. Плоскость оптической поляризации некоторых блазаров иногда демонстрирует повороты в сто и больше градусов, при этом они могут происходить за короткое время, порядка суток. Существует несколько теоретических моделей, предложенных для объяснения этих вращений (см., например, Блинов, Павлиду, 2019). Большинство из этих моделей успешно воспроизводят общие свойства вращений вектора напряженности электрического поля, такие как продолжительность и амплитуду (Кельман и др., 2017; Пирсон, Романи, 2019; Коэн, Саволайнен, 2020). В случае вспышки BL Lac наблюдаются некоторые закономерности.

Степень поляризации в данной области увеличивается с уменьшением интенсивности излучения и, наоборот, уменьшается с его увеличением. Аналогично многие вспышки BL Lac — вспышки до 2000, 2005, 2011–2012 гг. показывают такого рода антикорреляцию (Гаген-Торн и др., 2002б; Маршер и др., 2008; Райтери и др., 2013). Надо отметить, что для различных блазаров наблюдается как прямая корреляция между яркостью и коэффициентом поляризации, так и обратная в разные периоды активности, причина этого различия пока не объяснена.

Одной из причин возникновения этой антикорреляции может быть суперпозиция излучения от двух областей — сравнительно постоянного джета и переменного распространяющегося возмущения в нем (Маршер и др., 2008; Уемура и др., 2010). Существование двух таких регионов поляризованного излучения не противоречит последним многочисленным работам по выявлению сложной структуры джета. Например, в (Имазава и др., 2023) была исследована микропеременность лацертиды во временных масштабах от нескольких минут до нескольких часов, что предполагает компактную область выброса, и представляет трудность для объяснения в рамках однозонной модели ударной волны в струе. Наблюдаемые временные масштабы и зависимость степени поляризации от длины волны и угла поляризации предполагают существование сложных областей множественного излучения. Существуют и альтернативные объяснения этого явления. В (Донг и др., 2020) при моделировании излучения, возникающего в результате нестабильности излома джета, был обнаружен аналогичный эффект — степень поляризации антикоррелирует с плотностью потока во время вспышек.

Наши наблюдения согласуются с интерпретацией работ (Гаген-торн и др., 2002б; Блинов, Гаген-Торн, 2009), что в BL Lac имеется постоянный источник поляризованного излучения, на который накладываются источники со случайно распределенными направлениями.

Положение вектора напряженности электрического поля сильно меняется при быстром изменении интенсивности оптического и гамма-излучения — это видно из поворотов на углы, которые достигают значений, превышающих 90° в областях “1” и “2”, совпадая с периодами повышенной яркости в оптике и гамма, и уменьшаются при быстром падении, повторяя их переменность.

Наблюдения проекта RoboPol большой выборки блазаров показали, что по крайней мере ежедневные наблюдения необходимы для правильного измерения $>96\%$ оптической переменности положения вектора напряженности, а для измерения самых быстрых вращений необходимы внутрисуточные наблюдения Angelakis2016, Blinov2016.

В работе (Маршер и др., 2008) на основании исследования радиоизображений высокого разрешения и измерений оптической поляризации BL Lac была построена модель, объясняющая его вспышечную активность 2005 г. Возмущение зарождается вблизи ЧД в области ускорения и коллимации джета еще до радиоядра — области постоянного яркого радиоизлучения. Излучающее возмущение движется по спиральным линиям магнитного поля, что вызывает наблюдаемое вращение вектора напряженности поля, самая мощная вспышка происходит на последнем витке, когда узел возмущения достигает максимальной скорости и направление его движения максимально близко к лучу зрения, что усиливает наблюдаемую яркость из-за релятивистских эффектов. Такой сценарий согласуется с предсказаниями магнитогидродинамических моделей формирования, ускорения и коллимации сильнорелятивистских струй (см., например, Лобанов, 1998; Ковалев и др., 2002б; Агиляр-Руис и др., 2022).

Необходимо отметить, что в нашем случае скважность наблюдений недостаточна, чтобы детектировать изменения угла на величину, близкую к 180° за столь короткое время, поэтому нельзя исключать, что переменность положения угла в эпоху наибольшей активности в июле–августе 2021 г. была еще более сильная, чем представленная на рис. 1. Модель (Маршер и др., 2008) может удовлетворительно описать поведение угла и в предмаксимуме активности (вспышка июля 2021 г., область “1” — 12.07.2021, MJD=59408, когда произошло резкое изменение угла с 176.7° до 1.2° за 3.5 ч. Аналогичная ситуация наблюдалась во время вспышки 2005 г., только мониторинг на протяжении трех часов был практически

непрерывным, и итоговая непрерывная кривая из 18 точек продемонстрировала изменение угла на 190° (Маршер и др., 2008). Предложена модель внутренней струи VL Lac, обнаруженной при вспышке радио- и рентгеновского излучения, где ударная волна распространяется по джете по спиральной траектории.

В максимуме активности (август 2021 г.) наблюдается сложная картина поведения угла. Быстрые изменения угла на протяжении 15 сут, совпадающие с областью также очень сильных (рис. 1) вспышек в оптике и гамма-диапазоне требуют дальнейшего изучения. Плавное изменение положения вектора к значению, которое наблюдается в период “3” активности, может быть объяснено постепенным спадом излучения от дополнительной компоненты из-за потери энергии при распространении — остается вклад только от постоянной компоненты джета (Коэн, Саволайнен, 2020).

ВЫВОДЫ

1. Были проведены наблюдения в оптическом и гамма-диапазонах за исследуемый период исторического максимума активности VL Lac. Этот период делится на область предмаксимума “1”, область “2”, содержащую максимум активности и, для сравнения, область “3” — вспышки на спаде активности.

2. Высокая временная корреляция излучения в гамма-, ИК- и оптическом диапазонах в исследуемом временном интервале с практически нулевым запаздыванием говорит о единой области излучения и популяции электронов, синхротронное излучение от которых наблюдается в оптике и ИК, а обратное комптоновское — в гамма.

3. Длительный максимум в оптическом диапазоне 28.07.2021–11.08.2021 (MJD 59420–59438) обладает структурой на меньших масштабах и состоит из пяти вспышек с изменением зв. величины в пределах $11 < m < 12$, совпадающих с выбросами в гамма-диапазоне.

4. В периодах “1” и “2” наблюдались быстрые изменения значения угла напряженности электрического поля в моменты резкого изменения интенсивности излучения в оптике и гамма, повторяя их переменность. В период “3”, на спаде активности лацертиды, положение этого угла плавно уменьшалось (см. рис. 7 и 8).

5. Подтвердилось существование обратной зависимости степени поляризации от величины потока излучения VL Lac, которая наблюдалась также в предыдущих вспышках VL Lac до 2000, 2005, 2011–2012 гг. Это можно объяснить существованием двух и более различных областей — источников поляризованного излучения (Ковалев и др., 2020б).

Таким образом, многочастотные и долговременные наблюдения блазаров являются важной и неотъемлемой составляющей в изучении феномена АЯГ. Особенно важны многоволновые поляриметрические измерения, которые позволяют детально изучить область, в которой запускается джет, и физику его поведения, структуру и особенности переменности блазаров.

Настоящее исследование было проведено с использованием приобретенного и сконструированного сотрудниками ГАИШ оборудования за счет средств Программы развития Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Ведущая научная школа “Физика звезд, релятивистских объектов и галактик”, а также авторы благодарят Междисциплинарную научно-образовательную школу МГУ “Фундаментальные и прикладные космические исследования” за поддержку. Работа МП была поддержана Минобрнауки РФ в рамках программы финансирования крупных научных проектов национального проекта “Наука” (грант 075-15-2020-778).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдо и др. (A.A. Abdo, M. Ackermann, I. Agudo, M. Ajello, H.D. Aller, M. Aller, E. Angelakis, A. Arkharov, et al.), *Astrophys. J.* **716**, 30 (2010).
2. Абдоллахи и др. (S. Abdollahi, F. Acero, M. Ackermann, M. Ajello, W.B. Atwood, M. Axelsson, L. Baldini, J. Ballet, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **247**, 33 (2020).
3. Агиляр-Руиз и др. (E. Aguilar-Ruiz, N. Fraija, A. Galvan-Gamez, and E. Benitez), *MNRAS* **512**, 1557A (2022).
4. Ангелакис и др. (E. Angelakis, T. Hovatta, D. Blinov, V. Pavlidou, S. Kiehlmann, I. Myserlis, M. Bottcher, P. Mao, et al.), *MNRAS* **463**, 3365 (2016).
5. Атвуд и др. (W.B. Atwood, A.A. Abdo, M. Ackermann, W. Althouse, B. Anderson, M. Axelsson, L. Baldini, J. Ballet, et al.), *Astrophys. J.* **697**, 1071 (2009).
6. Бердников Л.Н., Белинский А.А., Шатский Н.И. и др., *Астрон. журн.* **97**, 284 (2020).
7. Блинов, Геген-Торн (D.A. Blinov and V.A. Hagen-Thorn), *Astron. Astrophys.* **503**, 103 (2009).
8. Блинов, Павлиду (D. Blinov and V. Pavlidou), *Galaxies* **7**, 46 (2019).
9. Блинов и др. (D. Blinov, V. Pavlidou, I. Papadakis, S. Kiehlmann, I. Liodakis, G.V. Panopoulou, T.J. Pearson, E. Angelakis, et al.), *MNRAS* **462**, 1775 (2016).
10. Блинов и др. (D. Blinov, G. Jorstad, V.M. Larionov, N.R. MacDonald, T. Grishina, E. Kopatskaya, E. Larionova, L. Larionova, et al.), *MNRAS* **505**, 4616 (2021).
11. Блэндфорд, Знаек (R.D. Blandford and R.L. Znajek), *MNRAS* **179**, 433 (1977).

12. Блэндфорд, Пэйн (R.D. Blandford and D.G. Payne), *MNRAS* **199**, 883 (1982).
13. Блэндфорд, Рис (R.D. Blandford and M.J. Rees), in A.M. Wolfe (ed.), *BL Lac Objects*, p. 328 (1978).
14. Ботчер (M. Bottcher), *Astrophys. Space Sci.* **309**, 95 (2007).
15. Брегман (J.N. Bregman, M.J. Lebofsky, and M. Aller), *Nature* **293**, 714 (1981).
16. Вейве и др. (Z.R. Weaver, K.E. Williamson, S.G. Jorstad, A.P. Marscher, V.M. Larionov, C.M. Raiteri, M. Villata, J.A. Acosta-Pulido, et al.), *Astrophys. J.* **900**, 137W (2020).
17. Гаген-Торн и др. (V.A. Hagen-Thorn, V.M. Larionov, S.G. Jorstad, and E.G. Larionova), *Astron. J.* **124**, 3031 (2002a).
18. Гаген-Торн и др. (V.A. Hagen-Thorn, E.G. Larionova, S.G. Jorstad, C.-I. Bjornsson, and V.M. Larionov), *Astron. Astrophys.* **385**, 55 (2002b).
19. Гаскел и др. (C.M. Gaskell and L.S. Sparke), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **305**, 175 (1986).
20. Гаскел и др. (C.M. Gaskell, B.M. Peterson, and M. Bradley), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **65**, 1 (1987).
21. Джорстед и др. (S.G. Jorstad, A.P. Marscher, D.A. Morozova, I.S. Troitsky, I. Agudo, C. Casadio, A. Foord, J.L. Gomes, et al.), *Astrophys. J.* **846**, 98 (2017).
22. Джорстед и др. (S.G. Jorstad, A.P. Marscher, C.M. Raiteri, M. Villata, Z.R. Weaver, H. Zhang, et al.), *Nature* **609**, 265 (2022).
23. Донг и др. (L. Dong, H. Zhang, and D. Giannios), *MNRAS* **494**, 1817 (2020).
24. Зенсус и др. (J.A. Zensus, G.B. Taylor, and J.M. Wrobel) *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. **144**, p. 25 (1998).
25. Имазава и др. (R. Imazawa, M. Sasada, N. Hazama, Y. Fukazawa, K.S. Kawabata, T. Nakaoka, et al.), *Publ. Astron. Soc. Japan* **75(1)**, 1 (2023).
26. Кельман и др. (S. Kiehlmann, D. Blinov, I. Liodakis, V. Pavlidou, A.C.S. Readhead, E. Angelakis, C. Casadio, T. Hovatta, et al.), *MNRAS* **507**, 225 (2021).
27. Кельман и др. (S. Kiehlmann, D. Blinov, T.J. Pearson, and I. Liodakis), *MNRAS* **472**, 3589 (2017).
28. Кларк (D. Clarke), *Stellar Polarimetry*, Wiley-VCH (2010).
29. Ковалев и др. (Y.Y. Kovalev, N.S. Kardashev, K.V. Sokolovsky, P.A. Voitsik, T. An, J.M. Anderson, A.S. Andrianov, V.Yu. Avdeev, et al.), *Adv. Space Res.* **65**, 705 (2020a).
30. Ковалев и др. (Y.Y. Kovalev, A.B. Pushkarev, E.E. Nokhrina, A.V. Plavin, V.S. Beskin, A.V. Chernoglazov, M.V. Lister, and T. Savolainen), *MNRAS* **495**, 3576 (2020b).
31. Ковачевич и др. (A. Kovacevic, L.C. Popovic, A.I. Sharovalova, D. Ilic, A.N. Burenkov, and V.H. Chavushyan), *Adv. Space Res.* **54**, 1414 (2014).
32. Коэн, Саволайнен (M.H. Cohen and T. Savolainen), *Astron. Astrophys.* **636**, A79 (2020).
33. Леггетт и др. (S.K. Leggett, M.J. Currie, W.P. Varicatt, T.G. Hawarden, A.J. Adamson, J. Buckle, T. Carroll, J.K. Davies, et al.), *MNRAS* **373**, 781 (2006).
34. Лиодакис и др. (I. Liodakis, D. Blinov, S.G. Jorstad, A.A. Arkharov, A. Di Paola, N.V. Efimova, T.S. Grishina, S. Kiehlmann, et al.), *Astrophys. J.* **902**, 61 (2020).
35. Лобанов (A.P. Lobanov), *Astron. Astrophys.* **330**, 79 (1998).
36. МакХарди и др. (I.M. McHardy, D.T. Cameron, T. Dwelly, S. Connolly, P. Lira, D. Emmanoulopoulos, J. Gelbord, E. Breedt, P. Arevalo, and P. Uttley), *MNRAS* **444**, 1469 (2014).
37. Маршер и др. (A.P. Marscher, S.G. Jorstad, F.D. D'Arcangelo, P.S. Smith, G.G. Williams, V.M. Larionov, H. Oh, A.R. Olmstead, et al.), *Nature* **452**, 966 (2008).
38. Маршер, Джорстед (A.P. Marscher and S.G. Jorstad), *Galaxies* **9**, 27 (2021).
39. Наджип А.Э., Татарников А.М., Туми Д. и др., *Астрофиз. бюлл.* **72**, 382 (2017) [A.M. Nadjip, D.W. Tatarnikov, D. Toomey, et al., *Astrophys. Bull.* **72**, 349 (2017)].
40. Окнянский и др. (V.L. Oknyansky, C.M. Gaskell, N.A. Huseynov, V.M. Lipunov, et al.), *MNRAS* **467**, 1496 (2017).
41. Окнянский В.Л., *Письма в Астрон. журн.* **19**, 1021 (1993) [V.L. Oknyanskii, *Astron. Lett.* **19**, 416 (1993)].
42. Пирсон, Романи (A.L. Peirson and R.W. Romani), *Astrophys. J.* **885**, 76 (2019).
43. Райтери и др. (C.M. Raiteri, M. Villata, L. Bruschini, A. Capetti, O.M. Kurtanidze, V.M. Larionov, P. Romano, S. Vercellone, et al.), *Astron. Astrophys.* **524**, A43 (2010).
44. Райтери и др. (C.M. Raiteri, M. Villata, F. D'Ammando, V.M. Larionov, M.A. Gurwell, D.O. Mirzaqulov, P.S. Smith, J.A. Acosta-Pulido, et al.), *MNRAS* **436**, 1530 (2013).
45. Саакян, Джиомми (N. Sahakyan and P. Giommi), *MNRAS* **513**, 4645 (2022).
46. Самбуна и др. (R.M. Sambruna, L. Maraschi, and C. M. Urry), *Astrophys. J.* **463**, 444 (1996).
47. Сафонов Б.С., Лысенко П.А., Додин А.В., *Письма в Астрон. журн.* **43**, 383 (2017) [B.S. Safonov, P.A. Lysenko, and A.V. Dodin, *Astron. Lett.* **43**, 344 (2017)].
48. Сикора и др. (M.C. Sikora, M.C. Begelman, G.M. Madejski, and J.-P. Lacosta), *Astrophys. J.* **625**, 72 (2005).

49. Скрутски и др. (M.F. Skrutskie, R.M. Cutri, R. Stiening, M.D. Weinberg, S. Schneider, J.M. Carpenter, C. Beichman, et al.), *Astron. J.* **131**, 1163 (2006).
50. Уголькова Л.С., Артамонов Б.П., Шимановская Е.В. и др., *Письма в Астрон. журн.* **43**, 269 (2017) [L.S. Ugol'kova, B.P. Artamonov, E.V. Shimanovskaya, V.V. Bruevich, O. Burkhonov, Sh. A. Egamberdiev, and N.V. Metlova, *Astron. Lett.* **43**, 233 (2017)].
51. Уемура и др. (M. Uemura, M. Sasada, R. Itoh, et al.), in *The First Year of MAXI: Monitoring Variable X-ray Sources*, p. 45 (2010).
52. Урри, Мушоцкий (C.M. Urry and R.F. Mushotzky), *Astrophys. J.* **253**, 38 (1982).
53. Урри, Падовани (C.M. Urry and P. Padovani), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **107**, 803 (1995).
54. Хартман и др. (R.C. Hartman, D.L. Bertsch, S.D. Bloom, A.W. Chen, P. Deines-Jones, J.A. Esposito, C.E. Fichtel, D.P. Friedlander, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **123**, 79 (1999).
55. Шимановская и др. (E.V. Shimanovskaya, V.L. Oknyanskii, and B.P. Artamonov), *Astron. Rep.* **59**, 12 (2015).