

УДК 524.883-75-56+524.883-77-56

ОПТИЧЕСКАЯ И РАДИОПЕРЕМЕННОСТЬ БЛАЗАРА S4 0954+658

© 2023 В. В. Власюк^{1*}, Ю. В. Сотникова^{1,2}, А. Е. Вольвач³, О. И. Спиридонова¹, В. А. Столяров^{1,4}, А. Г. Михайлов¹, Ю. А. Ковалев⁵, Ю. Ю. Ковалев^{6,5,7}, М. Л. Хабибуллина¹, М. А. Харинов⁸, Л. Янг⁹, М. Г. Мингалиев^{1,2,8}, Т. А. Семенова¹, П. Г. Жеканис¹, Т. В. Муфахаров^{1,2}, Р. Ю. Удовицкий¹, А. А. Кудряшова¹, Л. Н. Вольвач³, А. К. Эркенов¹, А. С. Москвитин¹, Е. В. Емельянов¹, Т. А. Фатхуллин¹, П. Г. Цыбулев¹, Н. А. Нижельский¹, Г. В. Жеканис¹, Е. В. Кравченко^{7,5}

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

³Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, 298409 Россия

⁴Кавендишская лаборатория, Кембриджский университет, Кембридж, СВ3 ONE Великобритания

⁵Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, 117997 Россия

⁶Радиоастрономический институт им. Макса Планка, Бонн, 53121 Германия

⁷Московский физико-технический институт, Долгопрудный, 141700 Россия

⁸Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, 191187 Россия

⁹Школа физики и астрономии, Университет им. Сунь Ятсена, Чжухай, 519082 Китай

Поступила в редакцию 8 августа 2023 года; после доработки 17 сентября 2023 года; принята к публикации 9 октября 2023 года

В работе представлено исследование оптической и радиоперемennости блазара S4 0954+658 в период 1998–2023 гг. Измерения получены на оптических телескопах САО РАН Цейсс-1000 и AS-500/2 в 2003–2023 гг. и на радиотелескопе РАТАН-600 на частотах 1.25 (0.96, 1.1), 2.3, 4.7 (3.7, 3.9), 8.2 (7.7), 11.2, 22.3 (21.7) ГГц в 1998–2023 гг., на радиотелескопах РТ-32 обсерваторий Зеленчукская и Бадары ИПА РАН на 5.05 и 8.63 ГГц в 2020–2023 гг., на радиотелескопе РТ-22 КрАО РАН на частоте 36.8 ГГц в 2009–2023 гг. В течение указанного периода блазар продемонстрировал экстремально высокую широкополосную активность с амплитудой переменности до 70–100%. В радиодиапазоне S4 0954+658 показал максимальную историческую активность с многочисленными вспышками различной амплитуды и продолжительности. Крупные вспышки длились в среднем от 0.3 до одного года на частотах 22–36.8 ГГц и немного дольше на 5–11.2 ГГц. Оптические вспышки у блазара намного короче и длятся от 7 до 50 дней. В эпоху наибольшей активности — в 2014–2023 гг. — характерный временной масштаб τ вариаций радиоизлучения на 5–22 ГГц составил около 100 дней, а в эпоху наименьшей активности — в 2003–2014 гг. — $\tau \sim 1000$ дней. Для всего периода измерений обнаружена корреляция излучения в оптическом, радио- и γ -диапазонах, означающая, что мы наблюдаем одну популяцию фотонов, испускаемых из разных излучающих областей. Линейные размеры области излучения оценены как 0.5–2 пк для разных условий. Широкодиапазонный радиоспектр S4 0954+658 с двумя спектральными компонентами был промоделирован с использованием и электронов, и протонов как излучающих частиц. Полученный результат показал, что синхротронное радиоизлучение в этом блазаре может генерироваться релятивистскими протонами.

Ключевые слова: галактики: активные — галактики: объекты типа BL Lacertae — квазары: общие — радиоконтинуум: галактики

1. ВВЕДЕНИЕ

Блазары — это класс активных ядер галактик (АЯГ), в которых релятивистские струи (джеты) направлены близко к лучу зрения наблюдателя

*E-mail: vvlas@sao.ru

(Urry and Padovani, 1995). Блазары включают в себя две категории: объекты типа BL Lacertae (BL Lac) и радиоквазары с плоским спектром (FSRQ). В оптических и ультрафиолетовых спектрах BL Lac наблюдается континуальный спектр либо лишенный спектральных деталей, либо только со слабыми узкими эмиссионными линиями с эквивалент-

ной шириной $EW \leq 5 \text{ \AA}$ (например, Stickel et al., 1991; Marcha et al., 1996), тогда как объекты типа FSRQ демонстрируют заметные широкие эмиссионные линии. Спектральная плотность потока и поляризация излучения блазаров отличаются переменностью по всему электромагнитному спектру: от радио- до γ -лучей (например, Gupta et al., 2017 и ссылки в ней). Блазары демонстрируют переменность на различных временных масштабах — от минут до десятилетий (Miller et al., 1989; Gopal-Krishna et al., 1993; Wagner and Witzel, 1995; Gupta et al., 2004).

В излучении блазаров, охватывающем весь электромагнитный спектр, в основном преобладает нетепловое излучение, исходящее из релятивистских струй, что предоставляет уникальную возможность исследовать их спектральное распределение энергии (SED — spectral energy distribution), которое отличается характерной структурой с двумя максимумами (von Montigny et al., 1995; Fossati et al., 1998) В диапазоне волн от радио- до мягкого рентгеновского излучения преобладающим механизмом является синхротронное излучение, тогда как на более высоких энергиях (жесткое рентгеновское и γ -излучение) основным процессом считается обратное комптоновское (IC — inverse Compton) рассеяние (Ulrich et al., 1997; Böttcher, 2007). Классификация, основанная на частоте синхротронного пика ν_{peak} , разделяет блазары на три подкласса: LSP (low synchrotron peaked) — с низкочастотным синхротронным пиком $\nu_{\text{peak}} \leq 10^{14}$ Гц; ISP (intermediate synchrotron peaked) — с промежуточным синхротронным пиком с 10^{14} Гц $< \nu_{\text{peak}} < 10^{15}$ Гц; HSP (high synchrotron peaked) — с высокочастотным синхротронным пиком с $\nu_{\text{peak}} \geq 10^{15}$ Гц (Abdo et al., 2010).

По сравнению с другими областями электромагнитного спектра оптический диапазон достаточно узок — занимая чуть больше октавы. Тем не менее он играет важную роль в получении информации о характеристиках синхротронного излучения и потенциальном тепловом излучении аккреционного диска. Как правило, на краткосрочных и долгосрочных временных шкалах переменности наблюдаются отчетливые спектральные тренды. Для объектов BL Lacertae характерен тренд «чем ярче, тем голубее» («bluer-when-brighter») (Massaro et al., 1998; Villata et al., 2002; Vagnetti et al., 2003; Guand Ai, 2011; Gaur et al., 2012), в то время как FSRQ имеют тенденцию быть «чем ярче, тем краснее» («redder-when-brighter») (Ramírez et al., 2004; Gu et al., 2006; Osterman Meyer et al., 2008, 2009). Однако стоит отметить, что в некоторых случаях у блазаров были обнаружены и противоположные тенденции (Gu et al., 2006; Gaur et al., 2012; Isler et al., 2017). В последних исследованиях активно

изучалась оптическая переменность блазаров на различных временных масштабах с использованием наблюдений как космических, так и наземных телескопов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что долговременная переменность в основном характеризуется значительными изменениями блеска, иногда сопровождающимися внезапными вспышками и квазипериодическими колебаниями (Bhatta et al., 2023).

Нестационарное излучение блазаров в оптическом диапазоне демонстрирует логарифмически нормальное распределение на длительных временных масштабах (Bhatta, 2021) и нормальное распределение на более коротких. В работе Pininti et al. (2023) на основе анализа многочисленных кривых блеска блазаров обзора телескопа TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) было показано, что большинство распределений блеска — бимодальное.

Для поиска связи между излучением блазаров в разных спектральных диапазонах Liodakis et al. (2018) изучали радио-, оптические и γ -кривые блеска 145 ярких блазаров в течение восьми лет с целью исследования вспышечной активности и корреляций между различными диапазонами. 26 объектов выборки показали корреляцию более 3σ хотя бы для одной пары диапазонов, измеренную дискретной корреляционной функцией. Наиболее распространенные и сильные корреляции наблюдаются между оптическим и γ -диапазонами, причем колебания происходят одновременно в пределах 30 дней. Радиоотклик обычно существенно запаздывает по отношению к другим длинам волн с медианной временной задержкой порядка 100–160 дней.

Блазар S4 0954+658 типа BL Lac — один из интригующих представителей семейства блазаров, характеризующийся уникальными свойствами и сложным поведением, что вызывало споры о его классификации (Stickel et al., 1991; Hervet et al., 2016). Он демонстрирует значительную переменность спектральной плотности потока и поляризации блеска как на внутрисуточных, так и на более длительных временных масштабах (Hagen-Thorn et al., 2015; Morozova et al., 2016; Volvach et al., 2016; Liu et al., 2018). Наблюдаемая временная задержка между вспышками в оптическом и радиодиапазонах может быть объяснена динамическим взаимодействием процессов, исходящих из различных областей в центральных частях родительской галактики. Кроме того, структура струйного выброса из активного ядра делает блазар еще более загадочным. Недавние исследования (Morozova et al., 2014; Jorstad et al., 2017; Wang et al., 2023) позволили получить дополнительные сведения, уточняющие геометрию джета блазара, включая выявление его компонент, демонстрирующих сверхсве-

товые движения. Объект S4 0954+658 продолжает привлекать внимание исследователей, являясь уникальным источником информации о сложных и динамических явлениях, происходящих в активных галактических ядрах.

В настоящей работе представлены результаты наблюдений блазара S4 0954+658 в оптической полосе R на рефлекторах Специальной астрофизической обсерватории РАН (САО РАН): 1-м Цейсс-1000 и 0.5-м AS-500/2, а также радионаблюдений на частотах 1–22 ГГц на РАТАН-600, на частотах 5.05 и 8.63 ГГц на РТ-32 (ИПА РАН¹⁾) и на частоте 36.8 ГГц на РТ-22 (КраО РАН²⁾). Основной целью исследования является выявление возможных корреляций между вариациями излучения в различных диапазонах на основе анализа долговременного ряда измерений. Представленные в работе оценки потоков дают возможность исследовать характеристики нетеплового излучения как на длинных, так и на коротких временных масштабах.

Статья построена следующим образом. В разделе 2 приводятся результаты предыдущих исследований S4 0954+658, в разделе 3 дается перечень радиокаталогов, которые использовались в качестве источников дополнительных данных. Фотометрические исследования на оптических телескопах САО РАН представлены в разделе 4. В разделе 5 описаны измерения на телескопах РАТАН-600, РТ-32 и РТ-22. В разделе 6 обсуждаются широкополосные радиоспектры и характеристики переменности радиоизлучения. Характеристики вспышек в оптическом и радиодиапазонах представлены в разделе 7. В разделе 8 обсуждаются свойства структурных функций кривых блеска блазара для выбранных эпох наблюдений. Корреляции между различными диапазонами обсуждаются в разделе 9. В разделе 10 обобщаются полученные результаты.

2. БЛАЗАР S4 0954+658

Объект S4 0954+658 на $z = 0.368$ (Lawrence et al., 1986), также известный как QSO B0954+65, был идентифицирован как радиисточник в обзоре Jodrell-Bank на частоте 996 МГц, а в оптическом диапазоне он был обнаружен в работе Cohen et al. (1977). На основании анализа спектра Walsh et al. (1984) классифицировали S4 0954+658 как блазар типа BL Lac, показавший гладкий континуум без заметных особенностей излучения или поглощения. В источнике обнаружен односторонний радиоджет с поляризованным радиопятном

(hotspot), а поляризация внутренней части джета указывает на наличие продольного магнитного поля (Kollgaard et al., 1992). Ghisellini et al. (2011) на основании SED отнесли этот объект к категории LBLs (low energy peaked BL Lacs, то же, что и LSPs). Но Hervet et al. (2016) классифицировали S4 0954+658 как FSRQ из-за кинематических особенностей джета. Тем не менее в литературе его чаще всего относят к объекту типа BL Lac из-за малой эквивалентной ширины эмиссионных линий в спектре (Stickel et al., 1991).

S4 0954+658 интенсивно изучался благодаря сложному характеру переменности блеска. Помимо оптического диапазона он изучался в рентгеновском диапазоне (Perlman et al., 2006; Resconi et al., 2009) и стал одним из первых обнаруженных внегалактических источников γ -излучения (Thompson et al., 1995; Acero et al., 2015).

На изображениях с радиointерферометра VLA (Very Large Array) у блазара S4 0954+658 наблюдается искривленный джет, простирающийся на юг на масштабах угловых секунд (Perley, 1982; Kollgaard et al., 1992). Карты, полученные методом радиointерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ), выявили ядро и компоненты джета с сильной поляризацией (около 11%) и необычно высоким сверхсветовым движением ($\beta_{\text{app}}h = 7.4 \pm 0.7$ и 4.4 ± 0.7 для компонент джета K2 и K3 соответственно (Gabuzda et al., 1992; 1994)). Их поляризация совпадает с осью РСДБ-структуры, как это обычно наблюдается у объектов BL Lacertae, что указывает на то, что джет на масштабах угловых миллисекунд также искривлен (см. работу Gabuzda and Cawthorne, 1996).

В работе Hagen-Thorn et al. (2015) проанализированы многоцветные фотометрические и поляризационные наблюдения S4 0954+658, выполненные в основном в Астрономическом институте СПбГУ и Главной астрономической обсерватории РАН в 2008–2012 гг. Авторы доказали существование отдельных переменных компонент, ответственных за активность; неравномерность спектра и высокая степень поляризации подтверждают, что эмиссия генерируется синхротронным излучением. Моделирование наблюдаемых зависимостей между величиной поляризации и интенсивностью было использовано для получения параметров как постоянной, так и переменной компоненты излучения.

Во время необыкновенно яркой оптической вспышки в начале 2015 года Mirozova et al. (2016) был обнаружен новый яркий поляризованный сверхсветовой выброс (knot) из компактного ядра блазара на частоте 43 ГГц во время максимума вспышки. Вспышка сопровождалась высокоэнергетичным (больше 150 ГэВ) и переменным γ -излучением (Mirzoyan, 2015; Ahnen

¹⁾Институт прикладной астрономии РАН.

²⁾Крымская астрофизическая обсерватория РАН.

et al., 2018). Всесторонний анализ наблюдений, от γ -диапазона до сантиметровых радиоволн, наряду с гармоническим и структурным анализом в работе Volvach et al. (2016) позволил авторам вывести орбитальный ($T_{\text{orb}} \approx 870$ лет) и прецессионный ($T_{\text{pr}} \approx 8700$ лет) периоды в системе отсчета источника для модели с наличием двойной сверхмассивной черной дыры в ядре.

Блазар S4 0954+658 имеет в радиодиапазоне небольшой угловой размер — размеры по большой и малой оси составляют 7.0×4.4 мсд (Cassaro et al., 2002). Gabuzda et al. (2000) выявили изогнутую струю на масштабах парсека и килопарсека. Их исследование также выявило значительную внутрисуточную поляризационную (30–40%) излучения радиоядра на частоте 5 ГГц. Кроме того, Kudryavtseva et al. (2010) провели ряд важных наблюдений нескольких движущихся компонент в джете на 22 ГГц со средней скоростью 4.9 ± 0.4 с.

При анализе данных VLBA на 43 ГГц за период с мая 2017 г. по май 2021 г. Wang et al. (2023) удалось выделить три заметные компоненты джета. Две из них демонстрировали явное сверхсветовое движение, а одна оставалась неподвижной в непосредственной близости от ядра. Углы между движущимися компонентами струи и лучом зрения составляли $5^\circ 5'$ и $6^\circ 9'$ с соответствующими углами раскрытия $1^\circ 8'$ и $2^\circ 4'$. Примечательно, что траектории всех компонент джета преимущественно выстраиваются по двум различным траекториям, что подтверждает результаты предыдущего исследования, проведенного в работе Mogofova et al. (2014).

Jorstad et al. (2017) оценили кривизну джета масштаба парсека этого объекта BL Lac: примерно 0.5 мсд от ядра, где движущиеся узлы, по-видимому, замедляются.

Обычно анализ данных, полученных в разных диапазонах волн за длительный период времени, сталкивается с недостаточным качеством выборки данных (Raiteri et al., 1999). S4 0954+658 является исключением из этого правила благодаря обширным программам его исследований.

В недавнем работе, выполненной в 2021 году, Vesega González et al. (2021) обнаружили в спектре S4 0954+658 эмиссионную линию Mg II на $z = 0.3694 \pm 0.0011$ с эквивалентной шириной, близкой к 5 \AA , что часто считается пределом для классификации блазаров как FSRQ. Поэтому представляется более разумным рассматривать этот объект, излучающий в γ -диапазоне, как переходный.

3. ЛИТЕРАТУРНЫЕ ДАННЫЕ В РАДИОДИАПАЗОНЕ

Для построения широкополосного радиоспектра блазара за весь исторический период наблюдений нами использовались радиоданные, полученные из системы поддержки астрофизических каталогов CATS³⁾ (Verkhodanov et al., 2005; 2009). Эти данные охватывают временной период около 40 лет на наиболее характерной частоте порядка 5 ГГц, включая измерения, представленные в данной работе.

Основная часть измерений представлена несколькими десятками радиокаталогов, которые сведены в таблицу 1, где указаны эпохи, частоты наблюдений и соответствующие литературные ссылки. Основные данные представлены обзорами: NRAO VLA Sky Survey (NVSS, Condon et al., 1998), Faint Images of the Radio Sky at Twenty-cm Survey (FIRST, Becker et al., 1994), Westerbork Northern Sky Survey (WENSS, Rengelink et al., 1997), Green Bank 6-cm Survey (GB6, Gregory et al., 1996), Australia Telescope 20 GHz Survey (ATCA20, Murphy et al., 2010), Giant Metrewave Radio Telescope Sky Survey (TGSS) на частоте 150 МГц (Intema et al., 2017), данными VLA (Healey et al., 2007) и другими. Значительный вклад внесли Multiyear Monitoring Program of Compact Radio Sources на частотах 2.5 и 8.2 ГГц (Lazio et al., 2001) и низкочастотный обзор Galactic and Extragalactic All-sky Murchison Widefield Array (GLEAM) на частотах 72–231 МГц (Hurley-Walker et al., 2017). Многочастотные одновременные наблюдения на радиотелескопе PATAH-600 представлены шестичастотным каталогом Mingaliev et al. (2017). Измерения блазара на PATAH-600 доступны в электронном онлайн-каталоге BLcat⁴⁾ (Mingaliev et al., 2014; Sotnikova et al., 2022b).

4. ФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НА ОПТИЧЕСКИХ ТЕЛЕСКОПАХ САО РАН

4.1. Оптические наблюдения

Оптическое исследование S4 0954+658 (преимущественно в полосе R с эпизодическим использованием полос B , V , и I) проводилось на 1-м (с 2003 года по июнь 2023 года) и 0.5-м (с 2021 года по июнь 2023 года) оптических рефлекторах Специальной астрофизической обсерватории РАН. Далее мы анализируем данные, полученные только в полосе R в указанные периоды времени.

³⁾<https://www.sao.ru/cats>

⁴⁾<https://www.sao.ru/blcat>

Таблица 1. Список каталогов с радиоданными

Каталог/Телескоп ^a	Эпоха	Частота, ГГц	Ссылки
UMRAO	1965–1984	4.8, 8, 14.5	[1]
S4	1972, 1974	2.7, 10.7, 4.9	[2]
TXS	1974–1983	0.365	[3]
6СН	1976	0.151	[4]
OPM78	1977	1.379, 4.585, 15.064, 22.185, 90	[5]
GBIMO	1979–1996	2.5, 8.2	[6]
OVRO	1979–1982, 2008–2009	10.8, 15	[7], [8]
SRCUI	1979	1.48, 4.9	[9]
RRF95	1979–1994	2.3, 8.4	[10]
VLA4	1980–1981	4.885, 1.465	[11]
7CJR	1984–1987	0.038, 0.151	[12]
MIYUN	1985–1993	0.232	[13]
GB6	1986–1987	4.85	[14]
87GB	1987	4.85	[15]
6CMN	1987	4.85	[16]
Mo30m	1990–1994	90, 150, 142, 230	[17], [18]
SRCT	1990–2000	22, 37, 87	[19]
WENSS	1991	0.325, 0.609	[20]
RGB1	1992, 1994, 1995	5	[21]
NVSS	1993–1996	1.4	[22],[23]
JVAS	1995–1997	8.4	[24]
JCMT	1997–2005	353	[25], [26]
RATAN-600	2005–2014	1.1, 2.3, 4.8, 7.7, 11.2, 21.7	[27]
Effelsberg	2006–2015	2.64–43	[28]
ATCA	2007	20	[29], [30]
PCCS2	2009–2013	30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545, 857	[31]
GMRT (TGSS)	2010–2012	0.15	[32]
GLEAM	2013–2015	0.072–0.231	[33]
VLASS	2016–2019	2–4	[34]

* Указаны идентификаторы по данным системы CATS. Ссылки: [1] — Aller et al. (1985); [2] — Pauliny-Toth et al. (1978); [3] — Douglas et al. (1996); [4] — Hales et al. (1990); [5] — Owen et al. (1978); [6] — Lazio et al. (2001); [7] — Seielstad et al. (1983); [8] — Richards et al. (2011); [9] — Ulvestad et al. (1981); [10] — Johnston et al. (1995); [11] — Perley (1982); [12] — Riley et al. (1999); [13] — Zhang et al. (1997); [14] — Gregory et al. (1996); [15] — Gregory and Condon (1991); [16] — Becker et al. (1991); [17] — Reuter et al. (1997); [18] — Steppe et al. (1993); [19] — Teraesranta et al. (1998); [20] — Rengelink et al. (1997); [21] — Laurent-Muehleisen et al. (1997); [22] — Condon et al. (1998); [23] — Condon and Yin (2001); [24] — Wrobel et al. (1998); [25] — Robson et al. (2001); [26] — Jenness et al. (2010); [27] — Mingaliev et al. (2017); [28] — Angelakis et al. (2019); [29] — Massardi et al. (2011); [30] — Massardi et al. (2008); [31] — Ade et al. (2016); [32] — Intema et al. (2017); [33] — Hurley-Walker et al. (2017); [34] — Lacy et al. (2020).

Оптический телескоп Цейсс-1000, оснащенный ПЗС-фотометром, установленным в кассегренновском фокусе, обеспечивает полное поле зрения около $7'$ с масштабом в $0''22/\text{элемент}$. ПЗС-камера была разработана и изготовлена в САО РАН в 2002 г. на базе детектора с обратной засветкой E2V CCD 42-40 формата 2048×2048 элементов (Markelov et al., 2000). Размер элемента этого популярного прибора равен 13.5 мкм .

Такая инструментальная конфигурация остава-

лась неизменной с момента начала наблюдений: ПЗС-камера демонстрировала очень стабильную работу с малым количеством незначительных поломок. Общий шум считывания сигнала составляет около $4 e^-$ при коэффициенте преобразования около $2 e^-/\text{отсчет}$, а темновой (термогенерационный) ток не превышает 0.01 отсчета за секунду при рабочей температуре детектора -130°C .

Регулярные наблюдения выборки активных галактических ядер на 0.5-м телескопе системы

Ричи-Кретъена (далее — AS-500/2), изготовленном предприятием Астросиб (г. Новосибирск), были начаты в январе 2021 года. Телескоп имеет гиперболическое главное зеркало и установлен на высокоточной экваториальной монтировке с быстрым наведением «10 Micron GM 4000». Сбор данных осуществлялся с помощью ПЗС-камеры с фронтальной засветкой FLI Proline PL16801 формата 4К×4К элементов 9 мкм размера. Камера FLI, обладающая термоэлектрическим охлаждением на Пельтье-эффекте, в сочетании с фокусирующим механизмом Atlas и пятипозиционной автоматической турелью для 50 мм светофильтров, управляется промышленным ПК, поддерживающим все функции удаленного контроля и сбора данных в среде операционной системы Linux (Valyavin et al., 2022).

Данные для блазара S4 0954+658 были получены на телескопе AS-500/2 в двух инструментальных конфигурациях: с января 2021 года по апрель 2022 года камера FLI была установлена в первичном фокусе (поле зрения прибора $1^{\circ}5 \times 1^{\circ}5$ с масштабом $1''35/\text{элемент}$), а с апреля 2022 года — в касегреновском фокусе (поле зрения $31' \times 31'$ с масштабом $0''46/\text{элемент}$). Последний вариант использовался с масштабом $0''92/\text{элемент}$ после попарного суммирования отсчетов по каждой координате для лучшего согласования с типичным качеством изображений на телескопе в $1''5-2''$.

Шум считывания сигнала и квант преобразования составляют около $15e^-$ и $7e^-/\text{отсчет}$ соответственно. Темновой ток для камеры FLI составляет около одного отсчета за секунду при рабочей температуре детектора -40°C и вычитается до проведения последующих этапов обработки. Оба используемых ПЗС-фотометра оснащены похожими наборами фильтров, полоса пропускания которых с учетом спектральной чувствительности ПЗС-детектора близка к стандартной системе Джонсона — Казинса. Типичные времена экспозиции при наблюдениях блазара составляли 300 с для Цейсс-1000 и 120 с для AS-500/2 соответственно. Во время периодов высокой активности объекта время накопления уменьшалось до 60 с для лучшего временного разрешения.

4.2. Обработка данных

Для определения значений блеска блазара и соседних с ним опорных звезд применялись стандартные процедуры обработки изображений и фотометрические методы: вычитание кадра темнового тока, коррекция поэлементной неоднородности чувствительности, интегрирование потока от каждого объекта в кольцах растущего размера и т.п.

Основные детали этапов обработки были описаны ранее (Vlasyuk, 1993).

Кадры «электронного нуля» и накопления темнового тока обычно снимались до и после каждой наблюдательной ночи вместе с кадрами равномерной засветки ярким предрассветным небом для предварительной редукции изображений.

Для калибровки блеска блазара мы использовали стандартные звезды из работы Raiteri et al. (1999) с номерами от 2 до 9.

Сравнение результатов, полученных в одни и те же ночи с нашими телескопами, показало хорошее согласие в пределах собственных ошибок измерений. Типичная фотометрическая точность наших измерений лучше $0^{\text{m}}01$ и между $0^{\text{m}}01$ и $0^{\text{m}}02$ для отдельных кадров, полученных на телескопах Цейсс-1000 и AS-500/2 соответственно. При посредственных погодных условиях эти величины могут быть в 2–3 раза хуже, как и в случае, когда объект находится в низком состоянии (R слабее 16^{m}).

Чтобы провести совместный анализ данных в оптическом и радиодиапазонах, мы усреднили независимые измерения внутри каждой ночи и преобразовали полученные значения в плотности потока согласно параметрам из работы Mead et al. (1990).

4.3. Долговременная кривая блеска в оптическом диапазоне

Долговременная кривая блеска в оптическом диапазоне для S4 0954+658 по данным для 670 ночей на протяжении более 20 лет — с февраля 2003 г. по июнь 2023 г. — представлена на рис. 1. Эти данные охватывают 423 ночи на телескопе Цейсс-1000 и 306 ночей на телескопе AS-500/2. Для 60 ночей данные были получены с помощью обоих телескопов, и мы усреднили полученные значения.

Даты наблюдений, их количество в каждую ночь, полученные потоки в полосе R с ошибками σ_R представлены в таблице 2. Далее в работе мы используем потоки в полосе R , не исправленные за галактическое поглощение.

Детальная проверка данных в таблице 2 указывает на наличие ряда эпох с значительными ошибками σ_R , превышающими 0.1 мЯн. Иногда σ_R может превышать значение в 1 мЯн и даже достигает 2.6 мЯн для эпохи $\text{MJD} = 59711$. В сочетании с значительным количеством индивидуальных измерений это может быть указателем на наличие значимой внутрисуточной переменности у блазара. Более детальный анализ этих явлений сейчас находится в подготовке. Отметим лишь, что полная база данных фотометрических наблюдений

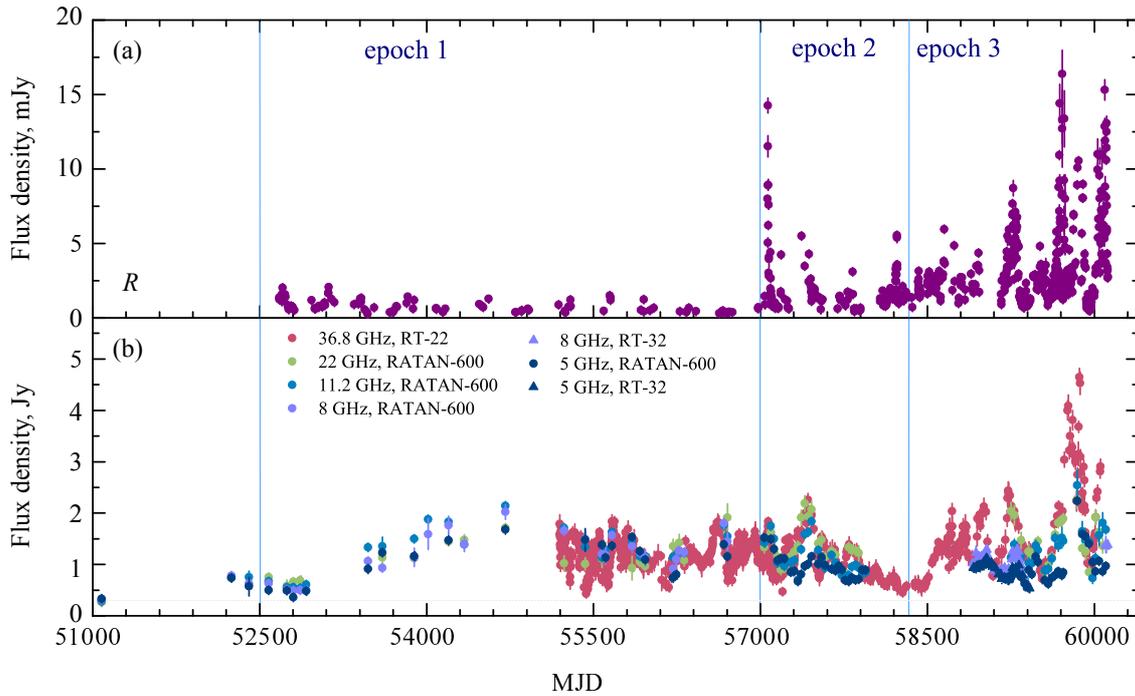


Рис. 1. Панель (а): оптическая кривая блеска S4 0954+658 в период с февраля 2003 до июня 2023. Панель (б): измерения телескопов РАТАН-600 (1998–2023) и РТ-32 (2021–2023) на 5, 8, 11 и 22 ГГц (темно-синий, лиловый, бирюзовый и зеленый соответственно); измерения на РТ-22 на 36.8 ГГц в 2009–2023 гг. (красный цвет). Вертикальные голубые линии показывают границы наблюдательных эпох 1, 2, и 3, обсуждаемых в работе, с разными состояниями активности в оптическом диапазоне. Серая горизонтальная линия соответствует минимальному уровню спектральной плотности потока 0.3 Ян на 5–22 ГГц в 1998 г.

Таблица 2. Данные наблюдений S4 0954+658 в R-полосе в 2003–2023 гг.: эпоха MJD, дата в формате YYYY/MM/DD, количество наблюдений в ночь N_{obs} , плотности потока в полосе R и их ошибки в мЯн (колонки 1–4 соответственно). Приведен фрагмент таблицы; полная версия доступна в Дополнительных материалах

Эпоха MJD	Дата	N_{obs}	$R_{\text{flux}} \pm \sigma_R$, мЯн
(1)	(2)	(3)	(4)
52678	2003/02/07	1	1.24 ± 0.02
52679	2003/02/08	3	1.39 ± 0.03
52699	2003/02/28	2	1.12 ± 0.01
52701	2003/03/02	4	1.56 ± 0.09
52702	2003/03/03	8	1.31 ± 0.03
52705	2003/03/06	10	2.02 ± 0.06
52727	2003/03/28	2	1.45 ± 0.01
52730	2003/03/31	1	1.58 ± 0.05
52731	2003/04/01	3	1.41 ± 0.02
52753	2003/04/23	2	0.86 ± 0.01

в полосе R включает около 2120 и 5200 независимых измерений, полученных с помощью телескопов Цейсс-1000 и AS-500/2 соответственно.

Полный набор наблюдательных данных может быть разделен на три временных интервала для последующего анализа.

Первый интервал перекрывает период с февраля 2003 г. по декабрь 2014 г. (MJD с 52600 по 57000), в течение которого блазар находился по оптическим данным в низком состоянии, когда, в соответствии с нашими оценками, его поток не превышал уровня 2 мЯн. Можно отметить наличие сезонных пропусков в наших данных, обусловленных в основном положением объекта на больших зенитных расстояниях в течение коротких летних ночей. Анализ литературных данных показал, что в действительности нами была пропущена только одна вспышка у S4 0954+658 с максимальным потоком около 4.5 мЯн в марте – апреле 2011 г., которая была обнаружена и изучена в работе (Morozova et al., 2014).

Второй цикл охватывает период с декабря 2014 г. по июнь 2018 г. (MJD с 57000 по 58300), когда S4 0954+658 продемонстрировал вспышку с R на уровне 14.4 мЯн в феврале 2015 г. (Morozova et al., 2016; Volvach et al., 2016) и менее интенсивные пост-вспышки с R порядка 4.2 мЯн (MJD = 57187), 5.5 мЯн (MJD = 57368), 3.1 мЯн (MJD = 57830) и 5.4 мЯн (MJD = 58227). В течение этого интервала времени слабейший

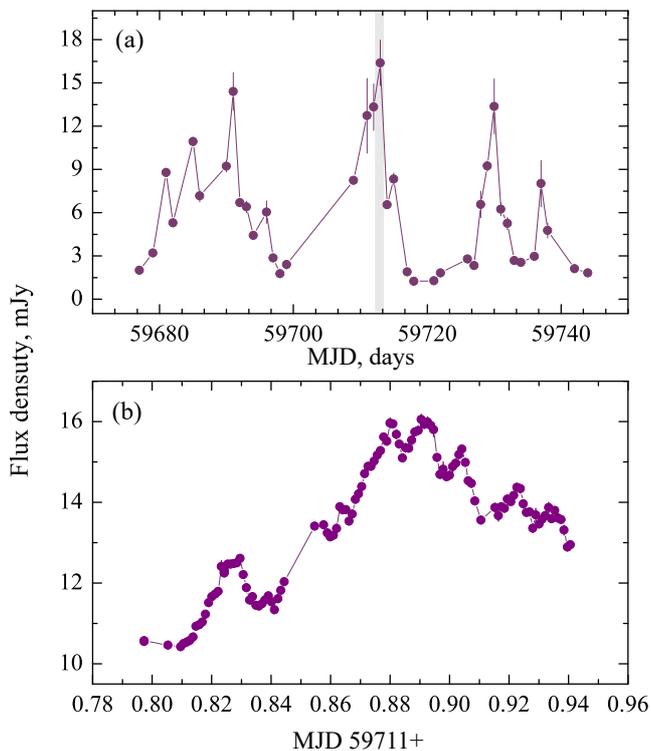


Рис. 2. Панель (а): фрагмент оптической кривой блеска S4 0954+658 в апреле–июне 2022 г. с наиболее яркими вспышками. Серой линией показана ночь с зарегистрированной максимальной вспышкой. Панель (б): пример внутрисуточной переменности (ночь с 12 на 13 мая 2022 г.).

поток блазара в полосе R составил 0.44 мЯн для MJD = 57844.

Третий интервал покрывает наблюдения между июлем 2018 г. и июнем 2023 г. Поток от S4 0954+658 в течение этого периода варьировался между 0.48 мЯн (MJD = 59955) и 16.4 мЯн (MJD = 59713). Тщательный анализ данных для этого интервала показывает наличие сложной структуры кривой блеска, которая может быть представлена суперпозицией двух процессов.

Первый процесс демонстрирует достаточно медленную вариацию блеска с характерным временем около 50 дней: можно насчитать пять эпизодов возрастания блеска блазара на протяжении 1000 дней.

Второй процесс представляется более быстрыми вспышками. Все эти эпизоды с различной интенсивностью разделены короткими интервалами слабого блеска и также состоят из групп быстрых событий: между 5 и 9 проявлениями с типичным временем повтора между 7 и 20 днями. Один эпизод с MJD = 59670–59750, включающий ярчайшее оптическое состояние в наших данных на MJD = 59711, выделен на верхней панели рис. 2 серой полоской.

Таблица 3. Параметры радиометров континуума РАТАН-600: центральная частота — f_0 , ширина полосы — Δf_0 , уровень обнаружения точечного источника на единицу углового разрешения — ΔF , $FWHM_{RA \times Dec}$ — угловое разрешение вдоль оси прямых восхождений RA и склонений Dec, рассчитанное для средних углов измерений

f_0 , ГГц	Δf_0 , ГГц	ΔF , мЯн/луч	$FWHM_{RA \times Dec}$
22.3	2.5	50	0'17 × 1'6
11.2	1.4	15	0'34 × 3'2
8.2	1.0	10	0'47 × 4'4
4.7	0.6	8	0'81 × 7'6
2.25	0.08	40	1'7 × 16'
1.25	0.08	200	3'1 × 27'

Чтобы проиллюстрировать быструю переменность блеска, отмеченную в нашем мониторинге, мы приводим на рис. 2а изменения потока S4 0954+658 для ночи с MJD = 59711. Данные были получены на телескопе AS-500/2 в течение четырехчасового интервала наблюдений с шагом 90 с. Блеск блазара изменялся от 10.5 мЯн до 16 мЯн в течение 100 минут и с 16 мЯн до 13 мЯн в течение 70 минут. Наиболее крутые фрагменты кривой блеска для эпох 0.81–0.83 и 0.84–0.88 показывают наклон около 6 и 4 мЯн/час соответственно. Последующая фаза падения блеска имеет наклон около 2 мЯн/час.

5. НАБЛЮДЕНИЯ В РАДИОДИАПАЗОНЕ

5.1. РАТАН-600

Оценки спектральной плотности потока S4 0954+658 получены на радиотелескопе РАТАН-600 с кольцевой многоэлементной антенной диаметром 600 м в транзитном режиме (Parijskij, 1993). В результате наблюдений измерены спектры блазара на частотах 1–22 ГГц одновременно, на масштабе времени 3–5 мин, при прохождении источника вдоль фокальной линии, на которой размещены входные тракты радиометров. Параметры используемых в исследованиях радиометров континуума приведены в таблице 3. Угловое разрешение, измеренное по ширине луча на половине максимума (full width at half maximum, $FWHM$) в этом режиме, зависит от угла установки антенны. Угловое разрешение вдоль оси склонений $FWHM_{Dec}$ в 3–5 раз хуже, чем вдоль оси прямых восхождений $FWHM_{RA}$. Угловое разрешение вдоль RA и Dec координат, рассчитанное для средних углов измерений, представлено в таблице 3 на шести частотах. Уровень детектирования при измерениях на одном секторе РАТАН-600 приблизительно 5 мЯн на 4.7 ГГц (время накопления

около 3 с) при оптимальных погодных условиях на средних углах антенны ($\text{Dec} \sim 0^\circ$).

Наблюдения проведены в период 1998–2023 гг. на Южном секторе и на трехзеркальной системе «Южный сектор + Плоский отражатель» с использованием двух радиометрических комплексов на частотах: 0.96/1.25/1.1, 2.25, 3.95/4.7, 7.7/8.2, 11.2 и 21.7/22.3 ГГц. Источник наблюдался 3–7 раз в каждую эпоху для увеличения отношения сигнал/шум. Измерения обработаны автоматической системой обработки измерений радиометров континуума РАТАН-600 (Kovalev et al., 1999; Tsybulev, 2011; Udovitskiy et al., 2016; Tsybulev et al., 2018) с использованием стандартных модулей Flexible Astronomical Data Processing System (FADPS) (Verkhodanov, 1997). Шкала спектральных плотностей потоков основана на измерениях в работах Vaars et al. (1977) и Perley and Butler (2013; 2017). Использовались следующие вторичные калибровочные стандарты: 3C 48, 3C 147, 3C 286, NGC 7027, DR 21, 3C 295 и 3C 309.1. Измерения калибраторов скорректированы с учетом их углового размера и линейной поляризации в соответствии с данными из Ott et al. (1994) и Tabara and Inoue (1980).

Полученные спектральные плотности потоков с их ошибками σ , наблюдательными эпохами, усредненными за N_{obs} дней, и числом измерений представлены в таблице 4. Поскольку частоты измерений на телескопах РТ-32 (5.05, 8.63 ГГц) и РАТАН-600 (4.7, 8.2/7.7 ГГц) близки, далее для анализа используются их округленные значения: 8 и 5 ГГц, а также округленные значения 22 и 1 ГГц для измерений РАТАН-600 в разные периоды.

Полная ошибка спектральной плотности потока включает неопределенность калибровочной кривой на заданной частоте и ошибку измерения антенной температуры (Udovitskiy et al., 2016) и рассчитывается по формуле:

$$\left(\frac{\sigma_S}{S_\nu}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_c}{g_\nu(h)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{T_{\text{ant},\nu}}\right)^2, \quad (1)$$

где σ_S — суммарная ошибка спектральной плотности потока; S_ν — значение спектральной плотности потока на частоте ν ; σ_c — стандартная ошибка калибровочной кривой, которая равна 1–2% и 2–5% на 4.7 и 8.2 ГГц соответственно; $g_\nu(h)$ — калибровочный коэффициент, зависящий от высоты установки антенны h ; σ_m — стандартная ошибка определения антенной температуры; $T_{\text{ant},\nu}$ — антенная температура на частоте ν . Систематическая ошибка неопределенности абсолютной калибровочной шкалы (3–10% на 1–22 ГГц) не включена в общую ошибку плотности потока. В настоящей работе средние ошибки спектральных плотностей

потоков блазара S4 0954+658 на частотах 22, 11, 8, 5, 2 и 1 ГГц составляют 10, 7, 7, 5, 17 и 22% соответственно.

Измерения РАТАН-600 в 1997–2023 гг. на частотах 22, 11, 8, и 5 ГГц показали непрерывные вариации спектральной плотности потока в диапазоне значений от 0.5 до 2.5 Ян.

5.2. РТ-32

Еженедельный мониторинг радиоизлучения от S4 0954+658 проводился на двух антеннах РТ-32 ИПА РАН в обсерваториях Зеленчукская и Бада-ры с 1 марта 2020 г. по 24 июля 2021 г. в радиометрическом режиме. Несколько дополнительных наблюдений было сделано в июне–июле 2023 года. Все измерения выполнены на частотах 5.05 и 8.63 ГГц с шириной полосы 900 МГц с охлаждением входных приемных устройств.

Наблюдения проводились методом скольжения по углу места, образуя ряд сканов. Один скан длился около 1 минуты на частоте 8.63 ГГц и около 1.5 минут на 5.05 ГГц, при постоянном времени регистрации в 1 с. Для накопления сигнала сканирование повторялось необходимое количество раз, формируя непрерывный ряд наблюдательных данных. По одному объекту наблюдения было сделано от 30 до 50 сканов.

В качестве опорных использовались источники 3C 48, 3C 147, 3C 295 и 3C 309.1. Шкала плотности потоков была рассчитана аналогично наблюдениям на РАТАН-600 (Vaars et al., 1977; Perley and Butler, 2013).

Данные наблюдений обрабатывались с помощью оригинального программного пакета CV (Kharinov and Yablokova, 2012) и процедурами Базы данных радиометрических наблюдений. Сканы скольжения отфильтровывались, исключались из обработки в случае значительного искажения погодными и/или промышленными помехами, усреднялись и описывались гауссовой кривой. Перед накоплением уровень нуля каждого скана аппроксимировался квадратичной зависимостью. Антенная температура и ее ошибка определялись из анализа гауссианы усредненного скана. Ошибка опорного сигнала генератора шума составляла менее 1% и учитывалась в конечном результате. Средние ошибки определения плотности потоков исследуемых объектов на частотах 8.63 и 5.05 ГГц составляли до 4%.

Полученные на РТ-32 плотности потоков с ошибками σ , средние эпохи наблюдения (MJD и дата) и количество сканов N_{obs} представлены в таблице 4.

Таблица 4. Измерения блазара на RATAN-600 в 1998–2023 гг. и на РТ-32 в 2020–2023 гг. В колонках: (1) и (2) — эпоха MJD и дата наблюдений в формате YYYY/MM/DD, (3) — число наблюдений N_{obs} , (4)–(9) — оценки спектральной плотности потока на 21.7/22.3, 11.2, 7.7/8.2/8.63 ГГц, 4.7/5.05, 2.3, и 0.96/1.1/1.2 ГГц и их ошибки в Ян, (10) — название инструмента. Число измерений N_{obs} указано при наличии информации; для РТ-32 число измерений приведено на двух частотах. Показан фрагмент таблицы; полная версия доступна в Дополнительных материалах

Эпоха MJD	Дата	N_{obs}	$S_{22} \pm \sigma$	$S_{11.2} \pm \sigma$	$S_8 \pm \sigma$	$S_5 \pm \sigma$	$S_{2.3} \pm \sigma$	$S_1 \pm \sigma$	Телескоп
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
57795	2017/02/10	5	1.33 ± 0.10	0.79 ± 0.07	—	0.67 ± 0.03	—	—	RATAN-600
57823	2017/03/10	6	1.28 ± 0.10	0.95 ± 0.03	—	0.74 ± 0.04	—	—	RATAN-600
57854	2017/04/10	5	1.27 ± 0.10	0.99 ± 0.06	—	0.70 ± 0.04	—	—	RATAN-600
57884	2017/05/10	5	1.22 ± 0.15	0.93 ± 0.06	—	0.71 ± 0.04	—	—	RATAN-600
58909	2020/03/01	43	—	—	1.02 ± 0.06	—	—	—	РТ-32
58916	2020/03/08	62/42	—	—	0.95 ± 0.04	0.93 ± 0.08	—	—	РТ-32
58923	2020/03/15	88	—	—	—	0.93 ± 0.04	—	—	РТ-32
58937	2020/03/29	67/86	—	—	1.22 ± 0.14	0.92 ± 0.03	—	—	РТ-32
58944	2020/04/05	61/60	—	—	1.02 ± 0.08	0.97 ± 0.03	—	—	РТ-32
58951	2020/04/12	63/82	—	—	1.01 ± 0.06	0.95 ± 0.02	—	—	РТ-32

Таблица 5. Измерения на РТ-22 в 2009–2023 гг.: эпоха MJD и дата наблюдений в формате YYYY/MM/DD, спектральная плотность потока на 36.8 ГГц и ее ошибка в Ян. Показан фрагмент таблицы; полная версия доступна в Дополнительных материалах

Эпоха MJD	Дата	$S_{36.8} \pm \sigma$
(1)	(2)	(3)
55196	2009/12/30	1.79 ± 0.18
55198	2010/01/01	1.59 ± 0.22
55199	2010/01/02	1.54 ± 0.23
55200	2010/01/03	1.39 ± 0.21
55202	2010/01/05	1.33 ± 0.12
55204	2010/01/07	0.99 ± 0.13
55205	2010/01/08	1.14 ± 0.12
55207	2010/01/10	1.74 ± 0.11
55208	2010/01/11	1.64 ± 0.10
55209	2010/01/12	1.49 ± 0.10

5.3. РТ-22

Наблюдения на частоте 36.8 ГГц проводились на радиотелескопе РТ-22 (КраО, Симеиз) с использованием модуляционных радиометров в режиме модуляции диаграммы направленности (Vol'vach et al., 2008; 2023). Перед измерением антенной температуры уточнялись координаты источника сканированием по прямому восхождению и склонению. Температура антенны источника определялась как разница между откликами радиометра в двух упомянутых положениях антенны, усреднен-

ная за 30 с. В зависимости от отношения сигнал/шум отклика радиометра проводилась серия из 30–60 измерений, после чего оценивалось среднее значение сигнала и его среднеквадратическая ошибка.

Поглощение излучения в атмосфере Земли учитывалось методом «атмосферных разрезов», при котором регистрировались различия антенных температур при фиксированных углах места. Антенная температура с поправкой на поглощение излучения в атмосфере Земли пересчитывалась в спектральную плотность потока по данным наблюдений калибровочных источников (Volvach et al., 2016; Sotnikova et al., 2023).

Среднее значение ошибки спектральной плотности потока на частоте 36.8 ГГц составляло 10%. Полученные значения плотностей потоков и их погрешности представлены в таблице 5.

6. РАДИОСВОЙСТВА

6.1. Кривые блеска

Кривые блеска спектральных плотностей потоков блазара демонстрируют непрерывные вариации радиоизлучения в 1998–2023 гг. (см. рис. 1). Самое спокойное состояние наблюдалось в 1998 г., в эту эпоху плотность потока составляла от 0.26 до 0.59 Ян на 0.96–22 ГГц (рис. 3). Временной период 2003–2023 гг., когда получены и оптические измерения, мы разделили на три эпохи (1, 2, и 3) с разными состояниями активности блазара (голубые линии на рис. 1). В течение эпохи 1 (февраль 2003 г. — декабрь 2014 г.) вариации спектральной плотности потока составили от

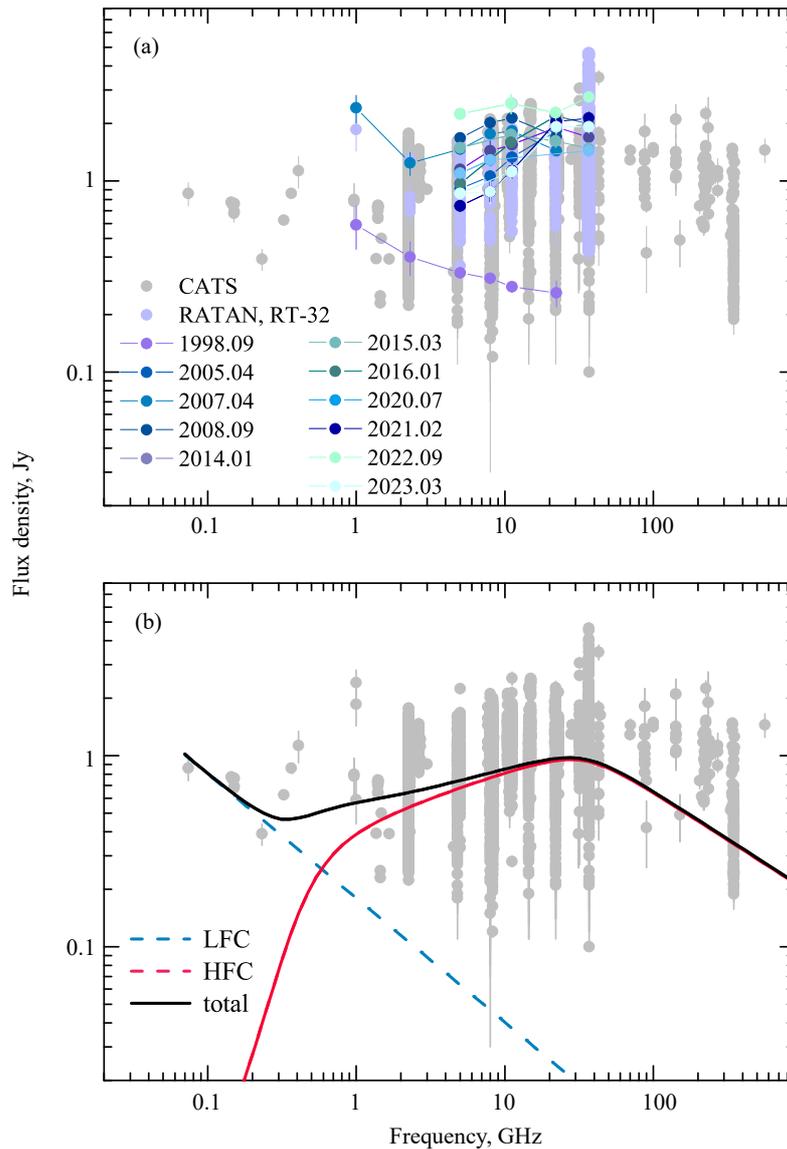


Рис. 3. Широкодиапазонный радиоспектр S4 0954+658. Панель (a): результаты измерений из базы данных CATS показаны серым цветом. Новые данные РАТАН-600, РТ-32 и РТ-22 на 1–36.8 ГГц отмечены сиреневым цветом. Спектры некоторых всплесков излучения выделены другим цветом. НЧ-радиоспектр (фиолетовый цвет) соответствует самому спокойному состоянию блазара в 1998 г. Панель (b): результат численного согласования среднего спектра («total»), состоящего из двух спектральных компонент в модели (НЧ и ВЧ, LFC и HFC), подобно спектрам для блазара PKS 1502+10 в работе *Sotnikova et al. (2022a)*.

0.55 до 2.1 Ян на 11.2 ГГц. В эпоху 2 (декабрь 2014 г. – июль 2018 г.) обнаружена радиовспышка с амплитудой радиопотока 2 Ян на 36.8 ГГц (январь 2016 г.), которая позже распространилась на 5–11 ГГц (март 2016 г.). Остальное время в эпоху 2 спектральная плотность потока медленно уменьшалась. В период эпохи 3 (июль 2018 г. – июнь 2023 г.) наблюдались пять крупных радиовспышек различной амплитуды (до 4.6 Ян на 36.8 ГГц) и длительности. В настоящем исследовании наблюдения в эпоху 3 завершены в момент начала шестой

вспышки, в то время как спектральная плотность оптического потока уже падает.

6.2. Широкодиапазонные радиоспектры

S4 0954+658 известен как один из наиболее переменных блазаров. Его широкодиапазонные радиоспектры (рис. 3) демонстрируют разнообразные формы: от крутого ($\alpha < -0.5$) до растущего ($\alpha > 0$). В течение 25 лет измерений на РАТАН-600 спектральный индекс α_{11-22} был круче чем -0.5 только в моменты трех наблюдательных эпох: февраль 2010 г., октябрь 2011 г. и январь 2023 г. Спек-

тральный индекс определяется из степенного закона $S_\nu \sim \nu^\alpha$. Суммарный радиоспектр S4 0954+658 имеет пик в мм-диапазоне волн в системе наблюдателя.

Согласно модели «Ёжик» (Kovalev et al., 2000), предложенной Кардашевым в 1969 г., продольное магнитное поле B радиоструи зависит от расстояния r как $B = B_0 (r/r_0)^{-2}$. На рис. 3 показаны результаты численного согласования двух компонент в этой модели с наблюдениями. Синяя пунктирная линия отображает согласование («подгонку») низкочастотной компоненты спектра (НЧ-компонент, LFC) в модели оптически тонкого синхротронного спектра радиоизлучения практически постоянных протяженных структур объекта на килопарсековых масштабах. Красная пунктирная линия отображает средний спектр в модели переменной струи второй, высокочастотной, компоненты спектра радиоизлучения объекта (ВЧ-компонента, HFC). Сплошная линия черного цвета представляет собой общий спектр (сумма красного и синего). Такой средний модельный спектр может наблюдаться, если полный непрерывный поток $dN(t)/dt$ излучающих частиц через основание струи постоянен в течение длительного времени (порядка 10–20 лет). Переменность $dN(t)/dt$ преобразуется в модели в переменность высокочастотной компоненты (HFC) и суммарного спектра радиоизлучения струи.

По результатам согласования с моделью мы получили такие значения физических параметров релятивистской струи: угол между направлением струи и лучом зрения $\vartheta \sim 1.5^\circ$, плотность потока S_m и частота ν_m в максимуме спектра струи $S_m \sim 0.70$ Ян, $\nu_m \sim 60$ ГГц, а также $\gamma \sim 2.0$, полагая $\gamma_E \sim 300$. Энергетический спектр частиц определяется как $N(E) = KE^{-\gamma}$. Используя их, можно оценить следующие физические параметры струи в максимуме спектра (Sotnikova et al., 2022a):

$$B_\perp/M_{2e} \sim 0.82 \times 10^{-6} \nu_m \gamma_E^{-2}, \quad (2)$$

$$T_b/M_{2e} \sim 1.5 \times 10^8 \gamma_E, \quad (3)$$

$$\Theta \sim \lambda_m \left(\frac{2S_m}{\pi k_B T_b} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

Здесь ν_m (Гц), λ_m (м), S_m (Вт/(м² Гц)) — частота, длина волны и плотность потока в максимуме спектра; гамма-фактор $\gamma_E = E/(Mc^2)$ излучающих частиц предполагается одинаковым для электронов и протонов; $B_\perp = B \sin \vartheta$ (Гс), $M_{2e} = 1$ для электронов, и $M_{2e} = 1836$ для протонов. Θ (рад), k_B и T_b (К) — угловой диаметр излучающей струи в картинной плоскости, постоянная Больцмана и яркостная температура. Значения оцененных параметров приведены в таблице 6.

Таблица 6. Основные физические параметры релятивистской струи, полученные по результатам согласования спектральных плотностей потоков на рис. 3, используя уравнения (2)–(4) для двух типов синхротронно излучающих частиц: магнитное поле струи B , яркостная температура T_b , угловой диаметр Θ и отношение плотностей энергии магнитного поля $W_H = B^2/8\pi$ к энергии излучающих частиц W_E

Частицы	B , G	T_b , K	Θ , mas	W_H/W_E
электроны	20	5×10^{10}	0.08	$\gg 1$
протоны	4×10^4	9×10^{13}	0.002	$\gg 1$

6.3. Переменность

Чтобы охарактеризовать переменность спектральной плотности потока, мы рассчитали индексы переменности и модуляции, а также фракционную переменность. Первая и третья величины учитывают погрешности измерений, при этом индекс модуляции и фракционная переменность менее чувствительны к выбросам. Индекс переменности V_S рассчитан согласно Aller et al. (1992):

$$V_S = \frac{(S_{\max} - \sigma_{S_{\max}}) - (S_{\min} + \sigma_{S_{\min}})}{(S_{\max} - \sigma_{S_{\max}}) + (S_{\min} + \sigma_{S_{\min}})}, \quad (5)$$

где S_{\max} и S_{\min} — максимальная и минимальная спектральная плотность потока за все эпохи наблюдений; $\sigma_{S_{\max}}$ и $\sigma_{S_{\min}}$ — ошибки их измерения. Эта формула позволяет избежать завышенного значения переменности в случае наблюдений с большими погрешностями в данных. Отрицательное значение V_S получается в случае, когда погрешность измерения потока превышает наблюдаемый разброс в данных.

Индекс модуляции, определяемый как стандартное отклонение спектральной плотности потока σ_S , деленное на среднее значение спектральной плотности потока \bar{S} , вычислен согласно Kraus et al. (2003):

$$M = \frac{\sigma_S}{\bar{S}}. \quad (6)$$

Фракционная переменность определена согласно Vaughan et al. (2003):

$$F_S = \sqrt{\frac{V^2 - \sigma_{\text{err}}^2}{\bar{S}^2}}, \quad (7)$$

где V^2 — дисперсия, \bar{S} — среднее значение спектральной плотности потока и σ_{err} — ее среднеквадратичная ошибка. Неопределенность F_S вычисляется следующим образом:

$$\Delta F_S = \sqrt{\left(\sqrt{\frac{1}{2N} \frac{\sigma_{\text{err}}^2}{\bar{S}^2}} \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{\sigma_{\text{err}}^2}{N} \frac{1}{\bar{S}^2}} \right)^2}. \quad (8)$$

Таблица 7. Значения V_S , M и F_S (в процентах) на радиочастотах 5, 8, 11.2, 22 и 36.8 ГГц и в оптическом диапазоне

Частота, ГГц	Все			Эпоха 1			Эпоха 2			Эпоха 3		
	V_S	M	F_S	V_S	M	F_S	V_S	M	F_S	V_S	M	F_S
5	73.1	30.5	29.8	61.4	36.8	35.1	35.0	23.4	22.5	58.1	28.2	27.6
8	70.1	30.6	29.1	53.5	35.7	33.4	—	—	—	35.9	20.5	19.0
11	77.1	33.0	31.9	56.0	33.6	32.6	40.7	28.0	26.8	46.9	30.2	27.6
22	74.9	31.8	30.1	40.2	31.3	28.2	37.4	28.1	26.2	37.5	27.0	24.8
36.8	80.6	38.3	37.0	56.2	21.3	18.6	64.0	33.9	32.0	73.3	49.1	48.2
Оптический диапазон	96.4	93.2	92.7	76.8	50.0	49.7	93.7	101.6	101.0	93.6	78.5	77.9

Значения V_S , M и F_S в оптическом диапазоне и на четырех радиочастотах приведены в таблице 7. Число наблюдательных эпох N и временная шкала t играют ключевую роль в поиске переменности АЯГ. Известно, что индекс переменности увеличивается с числом наблюдений. Это объясняется тем, что при редких измерениях высока вероятность пропустить вспышку (Tornikoski et al., 2000).

6.4. Вклад межзвездных мерцаний

Наблюдаемая переменность спектральной плотности потока может быть вызвана либо внутренними (связанными со свойствами источника), либо внешними причинами. Внешние обусловлены взаимодействием радиоизлучения источника с неоднородностями в среде распространения. Мерцания, вызванные рассеянием на неоднородностях межпланетной среды, имеют характерные временные масштабы порядка секунды или менее (Morgan et al., 2018), поэтому они сглаживаются во время наблюдений на РАТАН-600 из-за относительно большого времени сканирования (3–5 минут) во время прохождения источника. Аналогично для измерений на других радиотелескопах — межпланетные мерцания также несут существенный из-за типичного времени измерения спектральной плотности потока в континууме, большего одной секунды.

Мерцания, вызванные распространением радиоволн в межзвездной среде, могут иметь дифракционный или рефракционный характер. Для детектирования дифракционных мерцаний обычно необходим экстремально компактный источник и наблюдения должны проводиться в узком диапазоне частот, чтобы была возможность разрешить мелкомасштабные структуры, ответственные за дифракционные мерцания (Nagaun, 1992). Это связано с тем, что характер мерцаний может сильно зависеть от частоты. Радиоизмерения в континууме проводятся в широком диапазоне (от сотен МГц до

нескольких ГГц), поэтому этот тип мерцаний также не может быть обнаружен в данных РАТАН-600 и РТ-32.

Оценим вклад рефракционных межзвездных мерцаний (RISS) в уровень переменности S4 0954+658 на частотах РАТАН-600 (1.2, 2.3, 4.7, 8.2, 11.1 и 22.3 ГГц). Галактическое склонение этого источника около 43° . Согласно Walker (1998) переходная частота, определяющая границу между режимами сильного и слабого рассеяния, составляет около 8 ГГц для данного блазара. Мы примем это значение переходной частоты для оценки уровня модуляции спектральной плотности потока и его временного масштаба.

Мы оценили угловой размер следующим образом: $\theta_s = 5 \theta_{\min}$, где $\theta_{\min} = 0.6 \sqrt{S}/\nu$ — минимально возможный угловой размер для стационарного источника синхротронного излучения (Kellermann and Owen, 1988), S — спектральная плотность потока (в Ян) на частоте наблюдения. Мы приняли $S = 1$ Ян, учитывая форму среднего радиоспектра S4 0954+658.

Далее мы использовали формулы из Walker (1998) для расчета модуляций спектральной плотности потока и их характерных временных масштабов, результаты представлены в таблице 8. Видно, что уровень модуляции составляет около 1%, что существенно ниже средних значений найденного уровня переменности. Поэтому вклад рефракционных мерцаний в общую переменность незначителен.

7. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВСПЫШЕК

7.1. Оптические вспышки

Детальная проверка кривой блеска в полосе R показывает наличие множества вспышек с различной временной структурой. Прежде всего это относится к данным, полученным в эпохах 2 и 3.

Таблица 8. Оценки уровня модуляции m спектральной плотности потока рефракционными мерцаниями и его типичных временных масштабов t на частотах РАТАН-600 для переходной частоты 8 ГГц

Частота, ГГц	Размер источника, мсд	m , %	t , дни
1.2	2.50	2.4	52.1
2.3	1.30	1.4	27.2
4.7	0.64	0.8	13.3
8.2	0.37	0.5	7.6
11.2	0.27	0.4	5.6
22.3	0.13	0.2	2.8

Наблюдаемая кривая блеска для эпохи 3 может аппроксимироваться комбинацией медленных и быстрых вспышек. Первые обладают типичным временным масштабом переменности около 250 дней и амплитудами между 1 и 3 мЯн. Эпохи в MJD для максимумов медленных вспышек: 59250, 59510, 59710, 59870, и 60070. Их характерная шкала близка к 50 дням.

Критерий обнаружения вспышек по превышению потока над соседними участками в 4–5 раз позволил отождествить 44 быстрые вспышки в интервале с января 2021 г. по июнь 2023 г. Они имеют типичное время следования между 7 и 20 днями (рис. 4) с временной шкалой переменности в диапазоне 2–5 дней и амплитудой от 2 мЯн (слабейшая медленная вспышка с максимумом на MJD = 59510) до 15 мЯн (самая мощная вспышка с максимумом на MJD = 59710).

7.2. Радиовспышки

Кривая блеска на 36.8 ГГц демонстрирует около 20 вспышек в 2009–2023 гг. с максимальной спектральной плотностью потока выше 1.5 Ян. Это наиболее представительная кривая блеска в радиодиапазоне, что позволяет исследовать поведение радиовспышек. Кривая блеска заканчивается в апреле 2023 г. резким увеличением спектральной плотности потока и, по-видимому, соответствует последней оптической вспышке, начавшейся в феврале 2023 г.

Вариации полной спектральной плотности потока в АЯГ $\Delta S(t)$ могут быть хорошо смоделированы суперпозицией вспышечных компонент на высоких радиочастотах, более 10 ГГц (Valtaoja et al., 1999; Novatta et al., 2009). Увеличение,

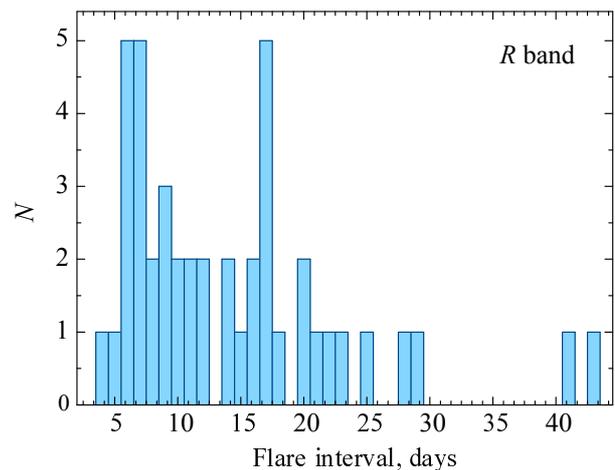


Рис. 4. Распределение интервалов следования вспышек в полосе R для эпохи 3.

уменьшение и затухание каждой вспышки моделируются следующими соотношениями:

$$\Delta S(t) = \begin{cases} \Delta S_{\max} \exp\left(\frac{t - t_{\max}}{\tau_1}\right), & t < t_{\max} \\ \Delta S_{\max} \exp\left(\frac{t_{\max} - t}{\tau_2}\right), & t > t_{\max}, \end{cases}$$

где ΔS_{\max} — максимальная амплитуда радиовспышки (в Ян), t_{\max} — эпоха максимума вспышки, τ_1 и τ_2 — время нарастания и спада (в днях). Мы использовали фактические значения τ_1 и τ_2 , вычисленные из кривой блеска (таблица 9), тогда как в оригинальной работе (Valtaoja et al., 1999) авторы нашли соотношение $\tau_2 = 1.3 \tau_1$. Мы выявили и аппроксимировали пять наиболее ярких вспышек на кривой блеска 36.8 ГГц с амплитудами около 2 Ян (рис. 5). Их характеристики представлены в таблице 9. Хорошо известно, что отдельные экспоненциальные вспышки соответствуют возникновению новых VLBA-компонент, что указывает на взаимосвязь вспышек с реальной физикой джета (Lähteenmäki and Valtaoja, 1999; Savolainen et al., 2002). Согласованность между возникновением VLBA-компонент и временным периодом радиовспышек довольно хорошая. Действительно, данные VLBA на 43 ГГц⁵⁾ показывают возникновение новой компактной и высокополяризованной (со степенью поляризации $p > 15\%$) структуры в апреле 2015, августе 2019, августе 2020 и августе 2022 гг.

Мы получили разные значения характеристик вспышки, а именно: продолжительность вспышки τ_1, τ_2 и отношение τ_2/τ_1 (таблица 9). Это ожидаемый результат, поскольку кривая

⁵⁾https://www.bu.edu/blazars/VLBA_GLAST/0954.html

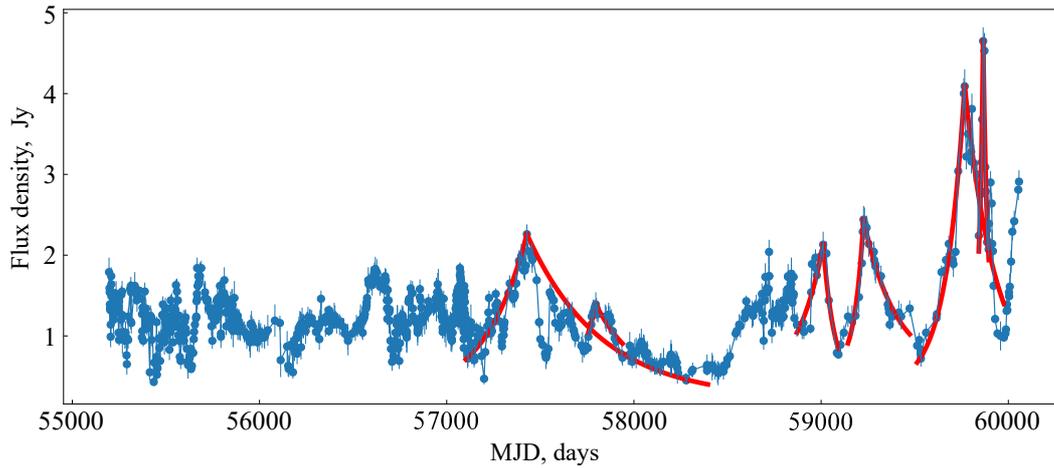


Рис. 5. Кривая блеска на 36.8 ГГц с пятью наиболее яркими радиовспышками с $S_{\max} > 2$ Ян, отмеченными красными линиями.

Таблица 9. Основные параметры крупных экспоненциальных вспышек на 36.8 ГГц

t_{\max} , MJD	ΔS_{\max} , Ян	τ_1 , дни	τ_2 , дни	τ_2/τ_1
57428.2	2.04	227 ± 10	394 ± 18	1.7
57796.4*	1.03	96 ± 10	223 ± 25	2.3
59010.9	1.75	143 ± 17	60 ± 9	0.4
59226.7	1.87	49 ± 7	173 ± 10	3.5
59766.9	3.73	102 ± 5	164 ± 13	1.6
59865.4	3.62	18 ± 2	22 ± 2	1.2

* всплеск на спаде крупной вспышки.

блеска на 36.8 ГГц имеет сложный характер с большим числом малых вспышек. Например, видна малая вспышка во время спада большой вспышки с $t_{\max} = 57428.19$ MJD (таблица 9). Большая вспышка с $t_{\max} = 59865.4$ MJD произошла во время спада самой яркой вспышки ($t_{\max} = 59766.85$ MJD). Эти вспышки имеют примерно одинаковую амплитуду ΔS_{\max} около 3.7 Ян, однако их временные масштабы отличаются в 5–8 раз. Таким образом, кривая блеска на высокой частоте 36.8 ГГц отражает признаки нестационарных процессов на временных масштабах от недель до месяцев.

8. АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ ФУНКЦИЙ

Структурная функция (СФ) — это метод поиска характерных временных масштабов и периодичностей в нестационарных процессах (Hughes et al., 1992; Simonetti et al., 1985). СФ-анализ дает возможность количественно оценить временную переменность и получить информацию о природе

процесса, вызвавшего вариации излучения. Характерный временной масштаб на кривой блеска, определяемый как интервал времени между максимумом и соседним минимумом или наоборот, характеризуется максимумом структурной функции, в то время как периодичность процесса определяется минимумом СФ (Heidt and Wagner, 1996).

Структурная функция первого порядка, нормированная на дисперсию сигнала σ^2 , обычно определяется как:

$$D_1(\tau) = \langle \{[f(t) - f(t + \tau)]\}^2 \rangle, \quad (9)$$

где $f(t)$ сигнал в момент времени t , а τ — временная задержка. Наклон функции оценивается как

$$b = d \lg D_1/d \lg \tau. \quad (10)$$

Идеальная СФ состоит из двух плато и прямой линии с наклоном b между ними. По оси X откладывается логарифм временной задержки τ , а по оси Y — логарифм $D(\tau)$. Одной из важных характеристик структурной функции является точка, в которой СФ достигает своего верхнего плато с амплитудой, равной $2\sigma^2$. Этот временной масштаб дает максимальный временной масштаб T_{\max} коррелированных сигналов или, что эквивалентно, минимальный временной масштаб некоррелированного поведения. Наклон между двумя плато определяет характер переменного процесса. Кривая блеска может быть смоделирована как комбинация белого (flicker) и красного (shot) шумов, и в этом случае наклон находится в пределах от 0 до 1 (Hughes et al., 1992). Для одного преобладающего всплеска на кривой блеска наклон обычно круче 1. Если наклон b равен 2, то имеет место сильный линейный тренд или сильное периодическое колебание (Hufnagel and Bregman, 1992).

В данной работе для неоднородного и конечного ряда данных $f(i)$ с $i = 1, 2, \dots, N$, полученного из исходного временного неоднородного наблюдаемого ряда путем разбиения на интервалы с усреднением значений по интервалу, вычисляется структурная функция первого порядка в виде:

$$D_1(k) = \frac{1}{N_1(k)} \sum_{i=1}^N w(i)w(i+k)[f(i+k) - f(i)]^2, \quad (11)$$

где $N_1(k) = \sum w(i)w(i+k)$ и весовой фактор $w(i)$ равен 1, если на интервале i наблюдения есть, и 0, если наблюдений нет. Для $k = 1, 2, \dots, L$ был построен собственный набор интервалов. Начальный временной интервал $k = 1$ выбирается таким образом, чтобы он был равен или немного больше среднего временного интервала между наблюдениями (без учета очень больших промежутков между ними). Для радиочастот в качестве начального временного интервала был взят интервал около 60 дней, на частоте 36.8 ГГц — 2 дня, а для оптических данных — 4 дня. Конечный интервал $k = L$ рассчитывался на основе длины временной шкалы исходной последовательности таким образом, чтобы все значения исходного ряда делились на два интервала.

Погрешность СФ вычисляется из процента погрешности исходной функции в интервале:

$$\sigma\% = \frac{1}{N - n - 1} \sqrt{\left(\frac{\sigma_t}{f(t)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{t+\tau}}{f(t+\tau)}\right)^2}. \quad (12)$$

Структурная функция была рассчитана для трех эпох (1, 2, и 3) в радио- и оптическом диапазонах (рис. 6). Для измерения наклона b были использованы все точки данных между нижним и верхним плато. Параметры СФ, b и $\lg(\tau_s)$, даны в таблице 10. Из-за малого количества данных СФ на частоте 8 ГГц построить не удалось. Также не удается определить второе плато для эпохи 2 на частоте 11.2 ГГц (большой разброс точек данных) и для эпохи 2 на 36.8 ГГц (оно не достигает значения дисперсии сигнала σ^2). Получены значения $b \approx 2-3$ для 5–22 ГГц для трех эпох и $b \approx 1.0$ для 36.8 ГГц и для полосы R . Характерный временной масштаб τ составляет около 100 суток для эпох 2 и 3. Для эпохи 1 $\lg(\tau) = 3$, что соответствует 1000 суткам на частоте 5–22 ГГц и в полосе R , на частоте 36.8 ГГц $\lg(\tau) = 2$ или $\tau = 100$ дней.

9. КОРРЕЛЯЦИЯ МЕЖДУ РАДИО- И ОПТИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНАМИ

Мы использовали метод кросс-корреляционной функции для анализа временных задержек в кривых блеска на разных частотах (Edelson and Krolik,

Таблица 10. Параметры СФ для диапазона R и на частотах 5, 11.2, 22, и 36.8 ГГц

Частота, ГГц	Эпоха 1		Эпоха 2		Эпоха 3	
	b	$\lg \tau$, дни	b	$\lg \tau$, дни	b	$\lg \tau$, дни
5	2.2	3.0	1.8	2.3	2.7	2.2
11.2	2.3	3.0	—	—	2.0	2.1
22	3.3	2.7	1.7	2.2	2.9	2.0
36.8	1.3	1.9	—	—	1.1	2.3
R -полоса	1.1	2.5	0.8	2.0	0.6	2.0

1988). Для расчета дискретной корреляционной функции (ДКФ) в случае нерегулярных временных рядов использовался программный пакет, описанный в работе Robertson et al. (2015), а для нахождения уровней статистической значимости использовалось моделирование по методу Монте-Карло (Emmanoulopoulos et al., 2013).

9.1. Кросс-корреляционная функция для неэквилидистантных временных рядов

Метод кросс-корреляционной функции (ККФ) является общепринятым для анализа многочастотных кривых блеска, наблюдавшихся в один и тот же период времени. Результатом таких наблюдений в большинстве случаев являются кривые блеска, представляющие собой нерегулярные (неэквилидистантные) выборки во времени. Для того чтобы определить задержки (временные «лаги») между частотами, была использована методика дискретной корреляционной функции (ДКФ) для нерегулярных временных рядов (Edelson and Krolik, 1988):

$$R_{12}(\tau) = \frac{1}{M} \sum_{ij} \frac{[f_1(i) - \mu_1][f_2(j) - \mu_2]}{\sqrt{(\sigma_1^2 - e_1^2)(\sigma_2^2 - e_2^2)}}, \quad (13)$$

где τ — это временная задержка («лаг»), $f_1(i)$ и $f_2(j)$ — исходные значения элементов выборок, для которых $\Delta t_{ij} = t_j - t_i$ удовлетворяют условию

$$\tau - \Delta\tau/2 \leq \Delta t_{ij} < \tau + \Delta\tau/2,$$

M — число пар элементов выборок, попадающих в интервал $\Delta\tau$, μ_1 и μ_2 — средние значения двух разных выборок, σ_1 и σ_2 их стандартные отклонения, e_1 и e_2 — ошибки измерений.

Ширина интервала по оси временных задержек $\Delta\tau$ фактически является элементом разрешения ДКФ. Его значение — это результат компромисса между требуемым разрешением по времени и стабильностью вычисления ДКФ. Для существенно

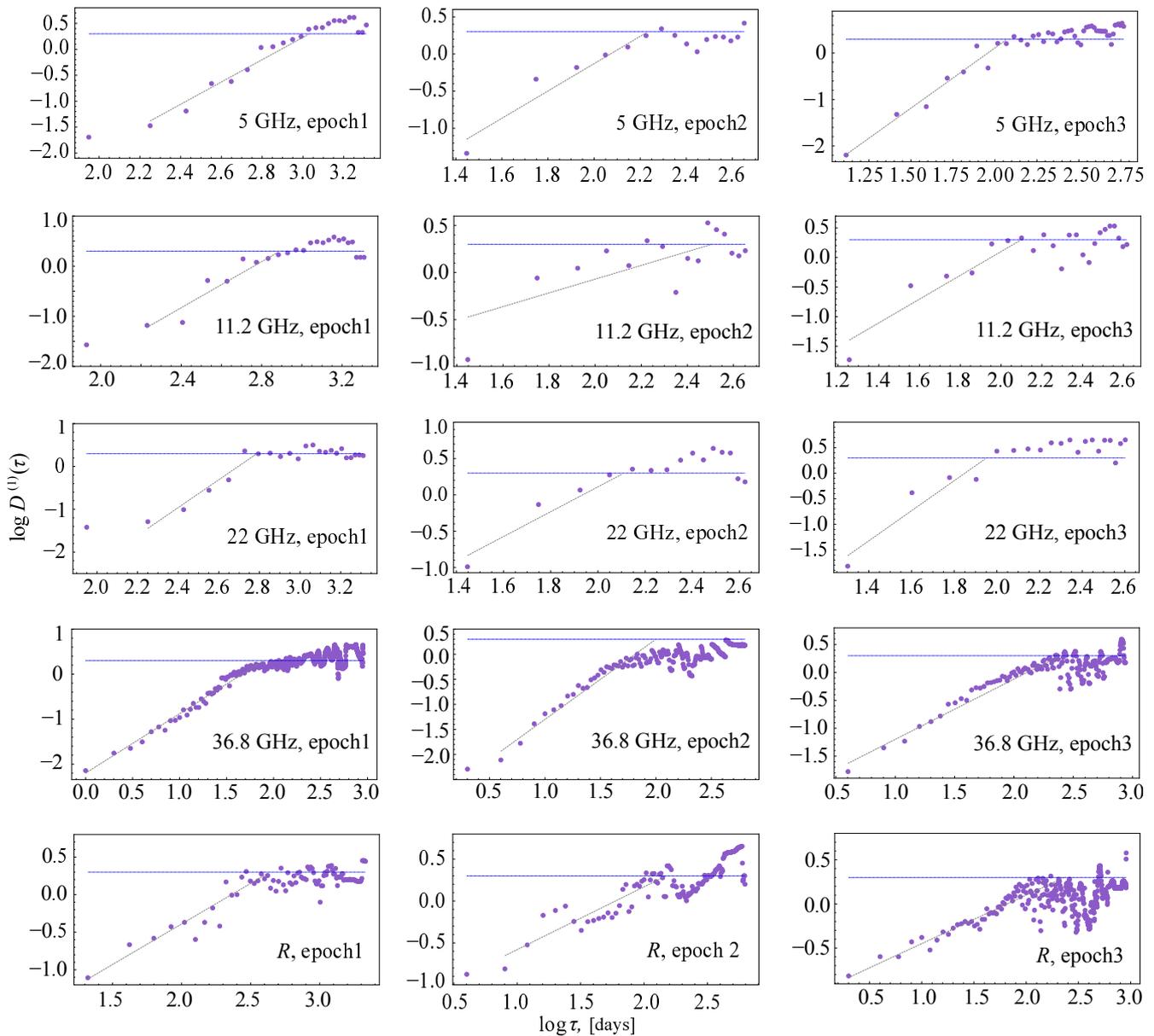


Рис. 6. СФ для вариаций спектральных плотностей потока в оптическом и радиодиапазонах для трех эпох: февраль 2003 г. – декабрь 2014 г., декабрь 2014 г. – июль 2018 г. и июль 2018 г. – июнь 2023 г. соответственно.

нерегулярных временных рядов с большими пропусками между наблюдениями, оптимальная ширина интервала составляет 30 дней.

Для расчета ДКФ в случае нерегулярных выборок мы использовали программный пакет `pydcf`⁶⁾ (Robertson et al., 2015). Он был сконвертирован в модуль `Python 3` и использовался в скрипте для расчета ДКФ по ансамблю пар модельных кривых блеска (см. раздел 9.2).

⁶⁾<https://github.com/astromerdamo/pydcf>

9.2. Оценка статистической значимости кросс-корреляционной функции

При расчетах ККФ/ДКФ оценка уровней статистической значимости обычно проводится путем моделирования методом Монте-Карло. При этом генерируется большое количество искусственных кривых блеска, имеющих такие же статистические свойства (спектральная плотность мощности, функция плотности вероятности), как и реальные наблюдательные данные. Распределение значений кросс-корреляционной функции для большого количества пар из ансамбля искусственных кривых

блеска для данной временной задержки будет характеризовать вероятность того, что наблюдаемое значение ККФ получено случайно.

В этой работе для моделирования искусственных кривых блеска мы использовали программный пакет `DELIGHTCURVESIMULATION`⁷⁾ (Emmanouilopoulos et al., 2013). Предварительная обработка многочастотных данных, полученных как на РАТАН-600, так и в других экспериментах, включала в себя сплайн-интерполяцию неэквидистантных кривых блеска с шагом в один день по методу Стеффена (Steffen, 1990). Для моделирования искусственных кривых блеска был написан скрипт и для вычисления ДКФ использовались только те модельные данные, которые совпадали по времени с датами наблюдений. Моделирование 5000–10 000 кривых блеска, содержащих до 10 000 значений, для каждого частотного диапазона может быть выполнено достаточно быстро на обычном персональном компьютере.

9.3. Кросс-корреляционный анализ кривых блеска S4 J0954+658

Для нахождения временных задержек между кривыми блеска в оптическом и радиодиапазонах были рассчитаны кросс-корреляционные функции для всего временного интервала 2003–2023 гг. и для эпох 1, 2, 3 с помощью подхода, описанного выше. Кросс-корреляционные функции между кривыми блеска с вычтенным средним значением на различных частотах (оптические, 5 ГГц и 36.8 ГГц) для эпох 1–3 и всего периода наблюдений 2003–2023 гг. показаны на рис. 7–10. Рассчитанные временные задержки и максимальные значения ДКФ для эпох 1–3 приведены в таблице 11. Мы рассматриваем случай с уровнем значимости 2σ и выше.

Сравнение различных кривых блеска осложняется разной скважностью данных в оптическом и радиодиапазонах и наличием пропусков в измерениях. Поэтому использовались тридцатидневные интервалы временных задержек для анализа кривых блеска за весь период наблюдений, а также для эпох 1–3 на 5 ГГц. Для оптических и данных на 36.8 ГГц в эпохи 1–3 более приемлемы десятидневные интервалы временных задержек поскольку данные эпохи обладают лучшей скважностью, вплоть до 3–5 дней.

Анализ кросс-корреляции на всем временном интервале позволяет сделать некоторые предварительные выводы. Наиболее очевидный результат получен для кросс-корреляции между кривыми блеска в радиодиапазоне (рис. 7а). Можно

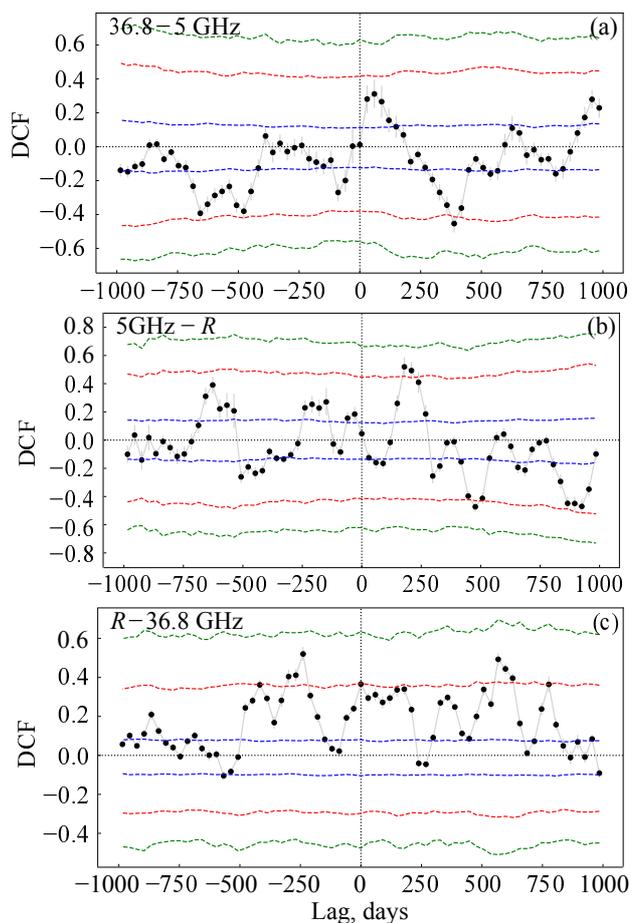


Рис. 7. Кросс-корреляционная функция для всего периода наблюдений с временным разрешением 30 дней. Панель (а): между кривыми блеска на 36.8 ГГц и 5 ГГц; панель (б): между кривыми блеска в оптике и 5 ГГц; панель (с): между данными в оптике и 36.8 ГГц. Уровни в 1, 2 и 3σ показаны прерывистыми линиями (синяя, красная и зеленые кривые соответственно).

видеть, что максимальный пик со значимостью около 1.75σ расположен на временном запаздывании $60^d \pm 5^d$. Кросс-корреляция для отдельных эпох (рис. 8) дает пики, близкие к тому же положению (конечно, следует исключить наивысший пик в эпоху 2 с запаздыванием -400^d , как не имеющий физического смысла). Для эпохи 3 с наилучшей скважностью данных значимость пика около 3σ . Таким образом, можно сделать вывод, что существует задержка около 60 дней между кривыми блеска на 5 ГГц и 36.8 ГГц, при этом рост спектральной плотности потока на высоких частотах предшествует ее увеличению на более низких частотах.

Анализ кросс-корреляции между оптическими и радиоданными более сложен из-за наличия множества быстрых оптических вспышек, как было отмечено ранее в разделе 7.1. Здесь принимаются

⁷⁾<https://github.com/samconnolly/DELIGHTCURVESIMULATION/>

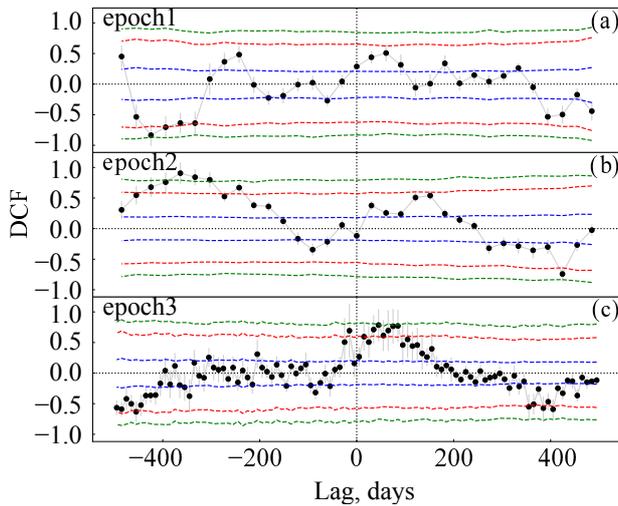


Рис. 8. Кросс-корреляционная функция между кривыми блеска в диапазонах 36.8 ГГц и 5 ГГц с временным разрешением 30 дней для эпох 1 (a) и 2 (b), и 10 дней для эпохи 3 (c). Уровни в 1, 2 и 3 σ показаны прерывистыми линиями, как на рис. 7.

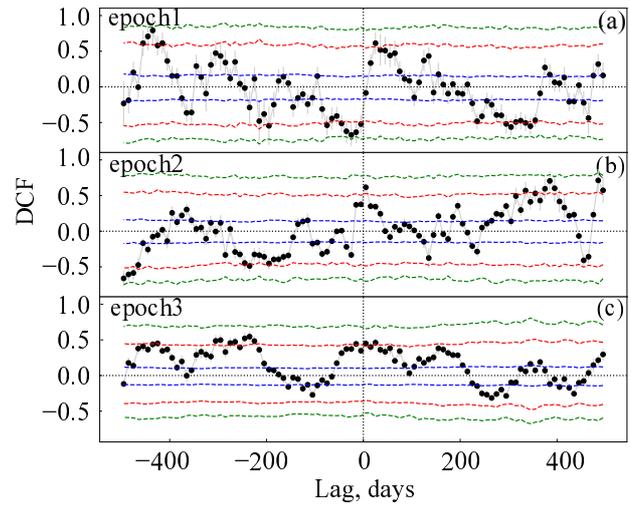


Рис. 10. Кросс-корреляционная функция между кривыми блеска в оптическом диапазоне R и радиодиапазоне 36.8 ГГц с временным разрешением 10 дней для эпох от 1 (a) до 3 (c). Уровни в 1, 2 и 3 σ показаны, как на рис. 7.

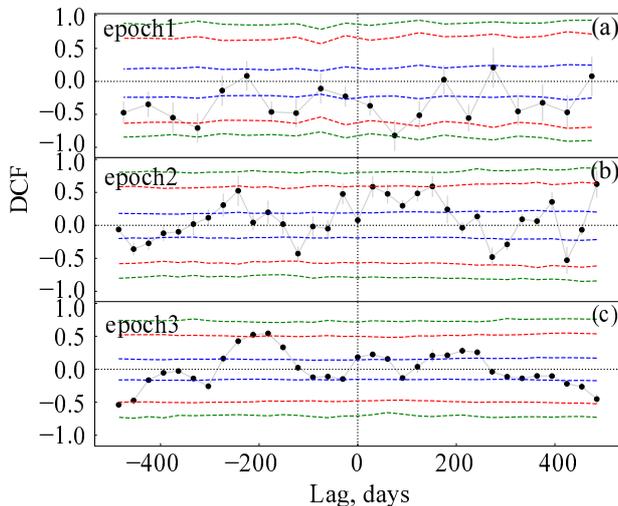


Рис. 9. Кросс-корреляционная функция между кривыми блеска в оптическом диапазоне R и радиодиапазоне 5 ГГц с временным разрешением 50 дней для эпохи 1 (a) и 30 дней для эпох 2 (b) и 3 (c). Уровни в 1, 2 и 3 σ показаны, как на рис. 7.

во внимание только предшествующие оптические вспышки, поэтому анализируются только правые части ККФ с положительными запаздываниями. Очевидно, локальные максимумы вблизи -200^d и -230^d (панели (b) и (c) на рис. 7, 5 ГГц и 36.8 ГГц) соответствуют корреляции радиовспышек с намного более ранними оптическими вспышками, не связанными непосредственно с ними. Таким образом, реальные корреляции между радио- и оптическими событиями, рассчитанные по всем диапазонам, могут быть представлены широкими горбами в диапа-

зоне между 0^d и 200^d со значениями ККФ около 0.4 для обоих диапазонов: 5 ГГц и 36.8 ГГц.

Можно ожидать, что корреляция между оптической и радио- кривыми блеска должна быть более очевидна для второй и третьей эпох, где наши данные представлены с наилучшей частотой и отсутствуют большие провалы. По этим причинам возможно увеличить S/N в результирующей ККФ (достоверность превышает 2σ при значениях ККФ около 0.5 и выше, см. рис. 9 и рис. 10, однако задержка между диапазонами по-прежнему может меняться от 0 до 200 дней. Из-за запутанности между соседними быстрыми вспышками сложно определить положение соответствующих друг другу вспышек в различных диапазонах спектра. Скорее можно идентифицировать медленные вспышки в радиодиапазоне с группами быстрых оптических вспышек общей продолжительностью около 200^d , как отмечено в разделе 7.1.

Мы предполагаем, что данные для эпохи 1 демонстрируют временное запаздывание между оптическим и 36.8 ГГц диапазонами около 70^d , а данные для эпохи 2 дают локальные максимумы при задержках 5^d , 200^d , и 400^d . Эпоха 3, включающая множество мощных коротких вспышек в полосе R, производит два широких горба: первый расположен вблизи нулевой временной задержки со значениями ККФ около 0.5 (среднее положение $30^d \pm 20^d$), а второй — вблизи временной задержки около $160^d \pm 30^d$.

Таблица 11. Значения временных задержек с максимальными значениями ДКФ для пар кривых блеска 36.8 ГГц – 5 ГГц, R -полоса – 5 ГГц и R полоса – 36.8 ГГц

Частотная пара	Эпоха 1		Эпоха 2		Эпоха 3	
	τ , дни	Уровень ДКФ	τ , дни	Уровень ДКФ	τ , дни	Уровень ДКФ
R -полоса – 5 ГГц	275 ± 25	0.21	250 ± 30	0.60	210 ± 20	0.25
36.8 ГГц – 5 ГГц	60 ± 15	0.51	130 ± 20	0.50	55 ± 10	0.79
R -полоса – 36.8 ГГц	45 ± 5	0.79	380 ± 10	0.70	25 ± 5	0.55

9.4. Корреляция оптической вспышки с γ -излучением

В этом разделе мы попытаемся найти для S4 0954+658 связь между набором оптических вспышек и потоком в γ -диапазоне в интервале 0.10–100 ГэВ на протяжении последних 1000 дней (MJD = 59150–60150). Данные, полученные с телескопа Large Area Telescope (LAT) спутника Fermi (Atwood et al., 2009) с кратчайшим трехдневным усреднением, могут быть получены из репозитория этого инструмента (Abdollahi et al., 2023). Интервал усреднения для кривых блеска Fermi хорошо соответствует типичному интервалу наших оптических данных с посуточным усреднением.

Для ясности мы изобразили обе кривые блеска — для полосы R и γ -потока — на одном графике (рис. 11). Оригинальные данные Fermi, выраженные в фотонах за секунду на см², были умножены на величину 30 000. Даже визуальная проверка обеих кривых показывает в целом хорошее согласие, за исключением только нескольких оптических вспышек MJD = 59200–59260, 59500–59550, 59650–59680 и более длительного интервала MJD = 59800–59900. Внутри этих эпох γ -излучение находилось в спокойном состоянии или демонстрировало слабые события (ниже 1 в принятой шкале или $(3-5) \times 10^{-8}$ фотонов за секунду на см²). Обратное неверно: мы не обнаружили ни одной вспышки в γ -диапазоне без соответствующего ей оптического события в интервале 1–2 дня.

Мы исследовали корреляцию между оптическим и γ -излучением с помощью метода ДКФ, как было описано выше. Результат показан на рис. 12, где оптические и γ -данные предварительно усреднялись с пятидневным окном, а ДКФ определялась с этим шагом в интервале MJD между 59150 и 60150. Основной пик r около 0.68 указывает на значимую корреляцию с почти нулевой задержкой (положение пика соответствует $2^{\text{d}}5 \pm 2^{\text{d}}5$). Это находится в хорошем согласии с гипотезой об общем происхождении оптических фотонов и квантов жесткого γ -излучения.

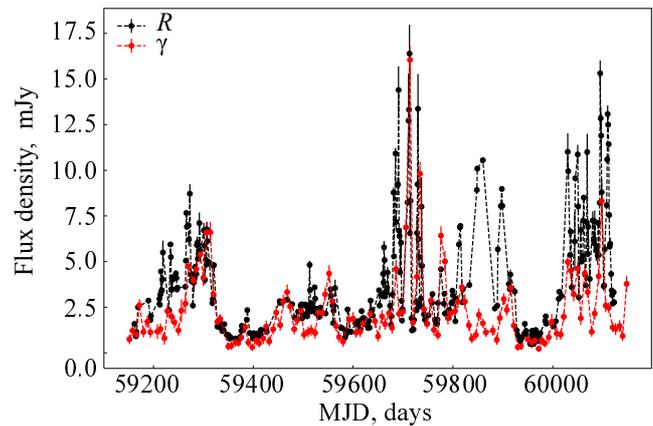


Рис. 11. Плотности потоков S4 0954+658 в оптическом и γ диапазонах за период MJD = 59150–60150.

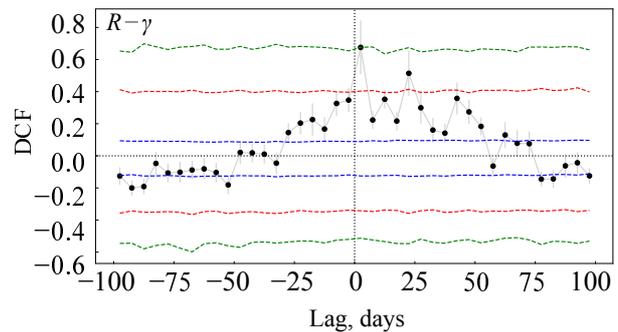


Рис. 12. Кросс-корреляция между плотностями потоков в оптическом (полоса R) и γ -диапазонах для S4 0954+658 в период MJD = 59150–60150. Данные сгруппированы с окном 5 дней.

10. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В течение долговременного периода наблюдений в 2003–2023 гг. блазар S4 0954+658 продемонстрировал экстремально высокую активность с амплитудой переменности спектральной плотности потока 70–100% в оптическом и радиодиапазонах. Активность в оптическом диапазоне сопровождается серией ярких радиовспышек, амплитуда и частота которых резко возрастают в 2022–2023 гг. В период высокого состояния в радиодиапазоне обнаружены многочисленные вспышки различной

амплитуды и длительности. Крупные радиовспышки длятся от 0.3 до 1 года на 22–36.7 ГГц и немного дольше на 5–11.2 ГГц. Выделяются оптические вспышки двух типов: более медленные с низкой амплитудой переменности и характерным временным масштабом порядка 50 дней и более короткие, длящиеся 7–20 дней.

Анализ временной структуры нестационарного излучения блазара выявил характерный временной масштаб τ процесса на 5–22 ГГц около 100 дней в эпохи 2 и 3 и порядка 1000 дней для относительно спокойного состояния в эпоху 1.

Оптическое и радиоизлучение на частоте 36.8 ГГц коррелируют при задержке 25–200 дней. Это может указывать на то, что мы наблюдаем одну популяцию фотонов, испускаемых из пространственно связанных областей излучения (Larionov et al., 2020). Линейные размеры такой области можно оценить как:

$$R < \frac{ct_{\text{obs}} \delta}{(1+z)}, \quad (14)$$

где c — скорость света, t_{obs} — временная задержка, δ — Доплер-фактор, который оценен в пределах $6.1 < \delta < 35$ (Kishore et al., 2023) для S4 0954+658. Верхний предел линейного размера для $t_{\text{obs}} = 100$ дней равен 0.4 пк, нижний предел — 2 пк.

Дискретная корреляционная функция ДКФ между γ - и оптическими кривыми блеска в период MJD = 59159–60150 показывает главный пик, совместимый с нулевой задержкой по времени (2.5).

Со времени обнаружения событий нейтрино сверхвысоких энергий (Aartsen et al., 2018) активные ядра галактик становятся интригующими кандидатами для источников нейтрино и эффективных ускорителей протонов (Kovalev et al., 2020, 2022). Источники таких нейтрино остаются пока неизвестными, но оказалось, что области неба, откуда приходят нейтрино сверхвысоких энергий, статистически связаны с положениями РСДБ-ярких квазаров, а время их прибытия совпадает с мощными вспышками синхротронного излучения в компактных струях этих объектов (Plavin et al., 2020; 2021).

Широкодиапазонные радиоспектры блазара S4 0954+658 проанализированы с использованием как электронов, так и протонов в качестве излучающих частиц. Показано, что спектры блазара могут быть объяснены каждым типом этих частиц. Оцененные значения параметров B_{\perp} и Θ хорошо согласуются с принятыми в общих теориях. Расчетная яркостная температура T_b для S4 0954+658 не превышает известного предела около 10^{12} К для релятивистских электронов (Kellermann and

Pauliny-Toth, 1969; Readhead, 1994) и около 10^{15} К — для релятивистских протонов (Kardashev, 2000; Kovalev et al., 2022). Обнаруженное превышение предела 10^{12} К в космическом проекте «РадиоАстрон» (Kovalev et al., 2020) для многих активных ядер галактик можно объяснить как доплеровским усилением при релятивистском движении массы излучающей плазмы (для части таких объектов), так и излучением релятивистских протонов (для всех таких источников).

БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдения проведены на научном оборудовании САО РАН: радиотелескопе РАТАН-600 и оптических рефлекторах Цейсс-1000 и AS-500/2, а также на телескопе РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории РАН. Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Наблюдения на частотах 5.05 и 8.63 ГГц выполнены с помощью радиотелескопов РТ-32 «Бадары» и «Зеленчукская» Центра коллективного пользования РСДБ-сети «Квазар» ИПА РАН (<https://iaaras.ru/cu-center/>). ВВВ и СОИ отдают дань памяти Н. С. Кардашеву, внесшему большой вклад в изучение переменности блазаров и обсуждение направлений исследований. Они также благодарят В. С. Бычкову за инициативу изучения этих объектов и ценные дискуссии на тему переменности их излучения. ВАЕ и ВЛН выражают благодарность сотрудникам отдела радиоастрономии КрАО РАН за их участие в наблюдениях. Исследование выполнено с использованием базы данных NASA/IPAC Extragalactic Database (NED); базы данных CATS, доступной на сайте Специальной астрофизической обсерватории РАН; базы данных SIMBAD, действующей в CDS, Страсбург, Франция. Использовался инструмент доступа к каталогу Vizier, CDS, Страсбург, Франция. Разработка репозитория кривых блеска Fermi-LAT частично финансировалась за счет программы Fermi Guest Investigator (объявления НАСА об исследованиях NNN19ZDA001N и NNN20ZDA001N). В работе использованы данные измерений VLBA программы мониторинга VLBA-BU Blazar (BEAM-ME и VLBA-BU-BLAZAR; <http://www.bu.edu/blazars/BEAM-ME.html>), финансируемой НАСА в рамках программы приглашенных исследователей Ферми. VLBA является инструментом Национальной радиоастрономической обсерватории.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Дополнительные материалы, представленные онлайн, включают полные версии таблиц 2, 4 и 5.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках контракта № 075-15-2022-1227. ЮЮОК был поддержан в рамках проекта M2FINDERS, финансируемого Европейским исследовательским советом (ERC) по программе исследований и инноваций Европейского Союза Horizon 2020 (грантовое соглашение № 101018682). ЛЯ благодарит Национальный фонд естественных наук Китая (грант № 12205388).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Лежащие в основе работы данные представлены в тексте статьи. Таблицы 2, 3 и 5 доступны в базе данных Vizier и как дополнительные онлайн-материалы данной публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. G. Aartsen et al. (IceCube Collab.), *Science* **361** (6398), id. eaat1378 (2018).
2. A. A. Abdo, M. Ackermann, I. Agudo, et al., *Astrophys. J.* **716**, 30 (2010).
3. S. Abdollahi, M. Ajello, L. Baldini, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **265** (2), id. 31 (2023).
4. F. Acero, M. Ackermann, M. Ajello, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **218** (2), article id. 23 (2015).
5. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **594**, id. A26 (2016).
6. M. L. Ahnen et al. (MAGIC Collab.), *Astron. and Astrophys.* **617**, id. A30 (2018).
7. H. D. Aller, M. F. Aller, G. E. Latimer, and P. E. Hodge, *Astrophys. J. Suppl.* **59**, 513 (1985).
8. M. F. Aller, H. D. Aller, and P. A. Hughes, *Astrophys. J.* **399**, 16 (1992).
9. E. Angelakis, L. Fuhrmann, I. Myserlis, et al., *Astron. and Astrophys.* **626**, id. A60 (2019).
10. W. B. Atwood, A. A. Abdo, M. Ackermann, et al., *Astrophys. J.* **697** (2), 1071 (2009).
11. J. W. M. Baars, R. Genzel, I. I. K. Pauliny-Toth, and A. Witzel, *Astron. and Astrophys.* **61**, 99 (1977).
12. J. Becerra González, J. A. Acosta-Pulido, W. Boschin, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **504** (4), 5258 (2021).
13. R. H. Becker, R. L. White, and A. L. Edwards, *Astrophys. J. Suppl.* **75**, 1 (1991).
14. R. H. Becker, R. L. White, and D. J. Helfand, *ASP Conf. Ser.*, **61**, 165 (1994).
15. G. Bhatta, *Astrophys. J.* **923** (1), id. 7 (2021).
16. G. Bhatta, S. Zola, M. Drozd, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **520** (2), 2633 (2023).
17. M. Böttcher, *Astrophys. and Space Sci.* **309** (1-4), 95 (2007).
18. P. Cassaro, C. Stanghellini, D. Dallacasa, et al., *Astron. and Astrophys.* **381**, 378 (2002).
19. A. M. Cohen, R. W. Porcas, I. W. A. Browne, et al., *Memoirs of the Royal Astronomical Society* **84**, 1 (1977).
20. J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen, et al., *Astron. J.* **115** (5), 1693 (1998).
21. J. J. Condon and Q. F. Yin, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **113** (781), 362 (2001).
22. J. N. Douglas, F. N. Bash, F. A. Bozayan, et al., *Astron. J.* **111**, 1945 (1996).
23. R. A. Edelson and J. H. Krolik, *Astrophys. J.* **333**, 646 (1988).
24. D. Emmanoulopoulos, I. M. McHardy, and I. E. Papadakis, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **433** (2), 907 (2013).
25. G. Fossati, L. Maraschi, A. Celotti, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **299**, 433 (1998).
26. D. C. Gabuzda and T. V. Cawthorne, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **283** (3), 759 (1996).
27. D. C. Gabuzda, T. V. Cawthorne, D. H. Roberts, and J. F. C. Wardle, *Astrophys. J.* **388**, 40 (1992).
28. D. C. Gabuzda, P. Y. Kochenov, R. I. Kollgaard, and T. V. Cawthorne, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **315** (2), 229 (2000).
29. D. C. Gabuzda, C. M. Mullan, T. V. Cawthorne, et al., *Astrophys. J.* **435**, 140 (1994).
30. H. Gaur, A. C. Gupta, A. Strigachev, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **425** (4), 3002 (2012).
31. G. Ghisellini, F. Tavecchio, L. Foschini, and G. Ghirlanda, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **414** (3), 2674 (2011).
32. Gopal-Krishna, R. Sagar, and P. J. Wiita, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **262**, 963 (1993).
33. P. C. Gregory and J. J. Condon, *Astrophys. J. Suppl.* **75**, 1011 (1991).
34. P. C. Gregory, W. K. Scott, K. Douglas, and J. J. Condon, *Astrophys. J. Suppl.* **103**, 427 (1996).
35. M. Gu and Y. L. Ai, *Journal of Astrophysics and Astronomy* **32** (1-2), 87 (2011).
36. M. F. Gu, C. U. Lee, S. Pak, et al., *Astron. and Astrophys.* **450** (1), 39 (2006).
37. A. C. Gupta, D. P. K. Banerjee, N. M. Ashok, and U. C. Joshi, *Astron. and Astrophys.* **422**, 505 (2004).
38. A. C. Gupta, A. Mangalam, P. J. Wiita, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **472** (1), 788 (2017).
39. V. A. Hagen-Thorn, V. M. Larionov, A. A. Arkharov, et al., *Astronomy Reports* **59** (6), 551 (2015).
40. S. E. G. Hales, C. R. Masson, P. J. Warner, and J. E. Baldwin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **246**, 256 (1990).
41. S. E. Healey, R. W. Romani, G. B. Taylor, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **171** (1), 61 (2007).
42. J. Heidt and S. J. Wagner, *Astron. and Astrophys.* **305**, 42 (1996).
43. O. Hivet, C. Boisson, and H. Sol, *Astron. and Astrophys.* **592**, id. A22 (2016).

44. T. Hovatta, E. Valtaoja, M. Tornikoski, and A. Lähteenmäki, *Astron. and Astrophys.* **494** (2), 527 (2009).
45. B. R. Huftnagel and J. N. Bregman, *Astrophys. J.* **386**, 473 (1992).
46. P. A. Hughes, H. D. Aller, and M. F. Aller, *Astrophys. J.* **396**, 469 (1992).
47. N. Hurley-Walker, J. R. Callingham, P. J. Hancock, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **464** (1), 1146 (2017).
48. H. T. Intema, P. Jagannathan, K. P. Mooley, and D. A. Frail, *Astron. and Astrophys.* **598**, id. A78 (2017).
49. J. C. Isler, C. M. Urry, P. Coppi, et al., *Astrophys. J.* **844** (2), article id. 107 (2017).
50. T. Jenness, E. I. Robson, and J. A. Stevens, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **401** (2), 1240 (2010).
51. K. J. Johnston, A. L. Fey, N. Zacharias, et al., *Astron. J.* **110**, 880 (1995).
52. S. G. Jorstad, A. P. Marscher, D. A. Morozova, et al., *Astrophys. J.* **846** (2), article id. 98 (2017).
53. N. S. Kardashev, *Astronomy Reports* **44** (11), 719 (2000).
54. K. I. Kellermann and F. N. Owen, *Galactic and Extragalactic Radio Astronomy*, 2nd ed. (Springer-Verlag, Berlin and New York, 1988), pp. 563–602.
55. K. I. Kellermann and I. I. K. Pauliny-Toth, *Astrophys. J.* **155**, L71 (1969).
56. M. A. Kharinov and A. E. Yablokova, *Trudy IPA RAN (Proceedings of IAA RAS)* pp. 342–347 (2012) [in Russian].
57. S. Kishore, A. C. Gupta, and P. J. Wiita, *Astrophys. J.* **943** (1), id. 53 (2023).
58. R. I. Kollgaard, J. F. C. Wardle, D. H. Roberts, and D. C. Gabuzda, *Astron. J.* **104**, 1687 (1992).
59. Y. A. Kovalev, Y. A. Kovalev, N. A. Nizhelsky, et al., in *Proc. Conf. on Multifaceted Universe: Theory and Observations—2022, Nizhny Arkhыз, Spec. Astrophys. Obs. RAS, Russia, 2022*, id. 27 (online at <https://pos.sissa.it/425/027/pdf>).
60. Y. A. Kovalev, Y. Y. Kovalev, and N. A. Nizhelsky, *Publ. Astron. Soc. Japan* **52**, 1027 (2000).
61. Y. A. Kovalev, N. S. Kardashev, Y. Y. Kovalev, et al., *Advances in Space Research* **65** (2), 745 (2020).
62. Y. Y. Kovalev, N. S. Kardashev, K. V. Sokolovsky, et al., *Advances in Space Research* **65** (2), 705 (2020).
63. Y. Y. Kovalev, N. A. Nizhelsky, Y. A. Kovalev, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **139**, 545 (1999).
64. A. Kraus, T. P. Krichbaum, R. Wegner, et al., *Astron. and Astrophys.* **401**, 161 (2003).
65. N. Kudryavtseva, D. Gabuzda, M. Mahmud, and S. O’Sullivan, in *Proc. 10th European VLBI Network Symposium and EVN Users Meeting: VLBI and the New Generation of Radio Arrays, Manchester, UK, 2010*, id. 45 (online at <https://pos.sissa.it/125/045/pdf>).
66. M. Lacy, S. A. Baum, C. J. Chandler, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **132** (1009), id. 035001 (2020).
67. A. Lähteenmäki and E. Valtaoja, *Astrophys. J.* **521** (2), 493 (1999).
68. V. M. Larionov, S. G. Jorstad, A. P. Marscher, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **492** (3), 3829 (2020).
69. S. A. Laurent-Muehleisen, R. I. Kollgaard, P. J. Ryan, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **122**, 235 (1997).
70. C. R. Lawrence, T. J. Pearson, A. C. S. Readhead, and S. C. Unwin, *Astron. J.* **91**, 494 (1986).
71. T. J. W. Lazio, E. B. Waltman, F. D. Ghigo, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **136** (2), 265 (2001).
72. I. Liodakis, R. W. Romani, A. V. Filippenko, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **480** (4), 5517 (2018).
73. J. Liu, H. Bignall, T. Krichbaum, et al., *Galaxies* **6** (2), 49 (2018).
74. M. J. M. Marcha, I. W. A. Browne, C. D. Impey, and P. S. Smith, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **281**, 425 (1996).
75. S. V. Markelov, V. A. Murzin, A. N. Borisenko, et al., *Astronomical and Astrophysical Transactions* **19** (3), 579 (2000).
76. M. Massardi, A. Bonaldi, L. Bonavera, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **415** (2), 1597 (2011).
77. M. Massardi, R. D. Ekers, T. Murphy, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **384** (2), 775 (2008).
78. E. Massaro, R. Nesci, M. Maesano, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **299** (1), 47 (1998).
79. A. R. G. Mead, K. R. Ballard, P. W. J. L. Brand, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **83**, 183 (1990).
80. H. R. Miller, M. T. Carini, and B. D. Goodrich, *Nature* **337** (6208), 627 (1989).
81. M. Mingaliev, Y. Sotnikova, T. Mufakharov, et al., *Astronomische Nachrichten* **338**, 700 (2017).
82. M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, R. Y. Udovitskiy, et al., *Astron. and Astrophys.* **572**, A59 (2014).
83. R. Mirzoyan, *The Astronomer’s Telegram No. 7080* (2015).
84. J. S. Morgan, J. P. Macquart, R. Ekers, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **473** (3), 2965 (2018).
85. D. Morozova, V. Larionov, S. Jorstad, et al., *Galaxies* **4** (3), 24 (2016).
86. D. A. Morozova, V. M. Larionov, I. S. Troitsky, et al., *Astron. J.* **148** (3), article id. 42 (2014).
87. T. Murphy, E. M. Sadler, R. D. Ekers, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **402** (4), 2403 (2010).
88. R. Narayan, *Philosophical Transactions of the Royal Society A* **341** (1660), 151 (1992).
89. A. Osterman Meyer, H. R. Miller, K. Marshall, et al., *Astron. J.* **136** (3), 1398 (2008).
90. A. Osterman Meyer, H. R. Miller, K. Marshall, et al., *Astron. J.* **138** (6), 1902 (2009).
91. M. Ott, A. Witzel, A. Quirrenbach, et al., *Astron. and Astrophys.* **284**, 331 (1994).
92. F. N. Owen, R. W. Porcas, S. L. Mufson, and T. J. Moffett, *Astron. J.* **83**, 685 (1978).
93. Y. N. Parijskij, *IEEE Antennas and Propagation Magazine* **35** (4), 7 (1993).
94. I. I. K. Pauliny-Toth, A. Witzel, E. Preuss, et al., *Astron. J.* **83**, 451 (1978).
95. R. A. Perley, *Astron. J.* **87**, 859 (1982).
96. R. A. Perley and B. J. Butler, *Astrophys. J. Suppl.* **204** (2), article id. 19 (2013).

97. R. A. Perley and B. J. Butler, *Astrophys. J. Suppl.* **230** (1), article id. 7 (2017).
98. E. S. Perlman, T. Daugherty, M. Georganopoulos, et al., *ASP Conf. Ser.*, **350**, 191 (2006).
99. V. R. Pininti, G. Bhatta, S. Paul, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **518** (1), 1459 (2023).
100. A. Plavin, Y. Y. Kovalev, Y. A. Kovalev, and S. Troitsky, *Astrophys. J.* **894** (2), id. 101 (2020).
101. A. V. Plavin, Y. Y. Kovalev, Y. A. Kovalev, and S. V. Troitsky, *Astrophys. J.* **908** (2), id. 157 (2021).
102. C. M. Raiteri, M. Villata, G. Tosti, et al., *Astron. and Astrophys.* **352**, 19 (1999).
103. A. Ramírez, J. A. de Diego, D. Dultzin-Hacyan, and J. N. González-Pérez, *Astron. and Astrophys.* **421**, 83 (2004).
104. A. C. S. Readhead, *Astrophys. J.* **426**, 51 (1994).
105. R. B. Rengelink, Y. Tang, A. G. de Bruyn, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **124**, 259 (1997).
106. E. Resconi, D. Franco, A. Gross, et al., *Astron. and Astrophys.* **502** (2), 499 (2009).
107. H. P. Reuter, C. Kramer, A. Sievers, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **122**, 271 (1997).
108. J. L. Richards, W. Max-Moerbeck, V. Pavlidou, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **194**, article id. 29 (2011).
109. J. M. W. Riley, E. M. Waldram, and J. M. Riley, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **306** (1), 31 (1999).
110. D. R. S. Robertson, L. C. Gallo, A. Zoghbi, and A. C. Fabian, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **453** (4), 3455 (2015).
111. E. I. Robson, J. A. Stevens, and T. Jenness, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **327** (3), 751 (2001).
112. T. Savolainen, K. Wiik, E. Valtaoja, et al., *Astron. and Astrophys.* **394**, 851 (2002).
113. G. A. Seielstad, T. J. Pearson, and A. C. S. Readhead, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **95**, 842 (1983).
114. J. H. Simonetti, J. M. Cordes, and D. S. Heeschen, *Astrophys. J.* **296**, 46 (1985).
115. Y. Sotnikova, Y. A. Kovalev, Y. Y. Kovalev, et al., in *European VLBI Network Mini-Symposium and Users' Meeting, 2021*, id. 9 (online at <https://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=399>, 2022a).
116. Y. V. Sotnikova, Y. A. Kovalev, A. N. Ermakov, et al., *Astrophysical Bulletin* **78** (1), 105 (2023).
117. Y. V. Sotnikova, T. V. Mufakharov, A. G. Mikhailov, et al., *Astrophysical Bulletin* **77** (3), 246 (2022b).
118. M. Steffen, *Astron. and Astrophys.* **239**, 443 (1990).
119. H. Steppe, G. Paubert, A. Sievers, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **102**, 611 (1993).
120. M. Stickel, P. Padovani, C. M. Urry, et al., *Astrophys. J.* **374**, 431 (1991).
121. H. Tabara and M. Inoue, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **39**, 379 (1980).
122. H. Teraesranta, M. Tornikoski, A. Mujunen, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **132**, 305 (1998).
123. D. J. Thompson, D. L. Bertsch, B. L. Dingus, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **101**, 259 (1995).
124. M. Tornikoski, M. Lainela, and E. Valtaoja, *Astron. J.* **120**, 2278 (2000).
125. P. G. Tsybulev, *Astrophysical Bulletin* **66**, 109 (2011).
126. P. G. Tsybulev, N. A. Nizhelskii, M. V. Dugin, et al., *Astrophysical Bulletin* **73** (4), 494 (2018).
127. R. Y. Udovitskiy, Y. V. Sotnikova, M. G. Mingaliev, et al., *Astrophysical Bulletin* **71** (4), 496 (2016).
128. M. Ulrich, L. Maraschi, and C. M. Urry, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **35**, 445 (1997).
129. J. Ulvestad, K. Johnston, R. Perley, and E. Fomalont, *Astron. J.* **86**, 1010 (1981).
130. C. M. Urry and P. Padovani, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **107**, 803 (1995).
131. F. Vagnetti, D. Trevese, and R. Nesci, *Astrophys. J.* **590** (1), 123 (2003).
132. E. Valtaoja, A. Lähteenmäki, H. Teräsanta, and M. Lainela, *Astrophys. J. Suppl.* **120** (1), 95 (1999).
133. G. Valyavin, G. Beskin, A. Valeev, et al., *Astrophysical Bulletin* **77** (4), 551 (2022).
134. S. Vaughan, R. Edelson, R. S. Warwick, and P. Uttley, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **345** (4), 1271 (2003).
135. O. V. Verkhodanov, *ASP Conf. Ser.* **125**, 46 (1997).
136. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 118 (2005).
137. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, *Data Science Journal* **8**, 34 (2009).
138. M. Villata, C. M. Raiteri, O. M. Kurtanidze, et al., *Astron. and Astrophys.* **390**, 407 (2002).
139. V. V. Vlasyuk, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **36** (3), 107 (1993).
140. A. E. Volvach, V. S. Bychkova, M. G. Larionov, et al., *Astronomy Reports* **60** (12), 1035 (2016).
141. A. E. Vol'vach, L. N. Vol'vach, N. S. Kardashev, and M. G. Larionov, *Astronomy Reports* **52** (6), 429 (2008).
142. A. E. Vol'vach, L. N. Vol'vach, and M. G. Larionov, *Galaxies* **11** (5), 96 (2023).
143. C. von Montigny, D. L. Bertsch, J. Chiang, et al., *Astrophys. J.* **440**, 525 (1995).
144. S. J. Wagner and A. Witzel, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **33**, 163 (1995).
145. M. A. Walker, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **294**, 307 (1998).
146. D. Walsh, J. M. Beckers, R. F. Carswell, and R. J. Weymann, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **211**, 105 (1984).
147. G. Wang, R.-s. Lu, Z.-q. Shen, et al., *Progress in Astronomy* **41**, 257 (2023).
148. J. M. Wrobel, A. R. Patnaik, I. W. A. Browne, and P. N. Wilkinson, *Bull. American Astron. Soc.*, **30**, 1308 (1998).
149. X. Zhang, Y. Zheng, H. Chen, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **121**, 59 (1997).

Optical and Radio Variability of the Blazar S4 0954+658

V. V. Vlasyuk¹, Yu. V. Sotnikova^{1,2}, A. E. Volvach³, O. I. Spiridonova¹, V. A. Stolyarov^{1,4}, A. G. Mikhailov¹, Yu. A. Kovalev⁵, Y. Y. Kovalev^{6,5,7}, M. L. Khabibullina¹, M. A. Kharinov⁸, L. Yang⁹, M. G. Mingaliev^{1,2,8}, T. A. Semenova¹, P. G. Zhekanis¹, T. V. Mufakharov^{1,2}, R. Yu. Udovitskiy¹, A. A. Kudryashova¹, L. N. Volvach³, A. K. Erkenov¹, A. S. Moskvitin¹, E. V. Emelianov¹, T. A. Fatkhullin¹, P. G. Tsybulev¹, N. A. Nizhelsky¹, G. V. Zhekanis¹, E. V. Kravchenko^{7,5}

¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

²Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia

³Crimean Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nauchny, 298409 Russia

⁴Cavendish Laboratory, University of Cambridge, Cambridge, CB3 0HE UK

⁵Astro Space Center, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia

⁶Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn, 53121 Germany

⁷Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, 141700 Russia

⁸Institute of Applied Astronomy, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 191187 Russia

⁹School of Physics and Astronomy, Sun Yat-Sen University, 519082, Zhuhai China

We present an optical-to-radio study of the BL Lac object S4 0954+658 observations during 1998–2023. The measurements were obtained with the SAO RAS Zeiss-1000 and AS-500/2 0.5-m telescopes in 2003–2023, with the RATAN-600 radio telescope at 1.25 (0.96, 1.1), 2.3, 4.7 (3.7, 3.9), 8.2 (7.7), 11.2, 22.3 (21.7) GHz in 1998–2023, with the IAA RAS RT-32 Zelenchukskaya and Badary telescopes at 5.05 and 8.63 GHz in 2020–2023, and with the RT-22 single-dish telescope of CrAO RAS at 36.8 GHz in 2009–2023. In this period the blazar was showing extremely high broadband activity with the variability amplitude of the flux densities up to 70–100% both in the optical and radio domains. In the period of 2014–2023 the blazar was showing the historically highest activity in the radio wavelengths, and we detected multiple radio flares of various amplitude and duration. The large flares last on average from 0.3 to 1 year at 22–36.8 GHz and a little bit longer at 5–11.2 GHz. The optical flares are shorter and last 7–50 days. The characteristic time scale τ of variation at 5–22 GHz is about 100 days in the most active epoch of 2014–2023 and about 1000 days for the state with lower activity in 2009–2014. We found a general correlation between the optical, radio, and γ -ray flux variations, which suggests that we observe the same photon population from different emission regions. We estimated the linear size of this region as 0.5–2 pc for different epochs. A broadband two-component radio spectrum of the S4 0954+658 jet was modeled by using both electrons and protons as emitting particles. We show that the synchrotron radio waves in this AGN may be generated by relativistic protons.

Keywords: *galaxies: active—galaxies: BL Lacertae objects—quasars: general—radio continuum: galaxies*