АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2020, том 97, № 8, с. 631–640

УДК 524.7

ПЕРЕМЕННОСТЬ БЛАЗАРА B1308+326 В 2011–2018 ГОДАХ

© 2020 г. В. А. Гаген-Торн[1,*], Д. А. Морозова[2], Е. И. Гаген-Торн[3], С. С. Савченко[1], И. С. Троицкий[2], Л. В. Шаляпина[1], Е. В. Волков[1]

[1] Санкт-Петербургский государственный университет, Кафедра астрофизики, Санкт-Петербург, Россия

[2] Санкт-Петербургский государственный университет, Лаборатория наблюдательной астрофизики, Санкт-Петербург, Россия

[3] Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

*****E-mail: hth-home@yandex.ru*

Поступила в редакцию 06.12.2019 г.
После доработки 02.03.2020 г.
Принята к публикации 30.03.2020 г.

Приводятся и анализируются результаты мониторинговых наблюдений блазара B1308+326 в оптическом и радиодиапазонах в 2011–2018 гг. Зафиксирована оптическая вспышка объекта, совпадающая по времени с вспышкой в гамма-диапазоне, а также вспышки на 43 ГГц, связанные с прохождением обнаруженных сверхсветовых компонентов через радиоядро. Фотометрическая переменность объяснена присутствием переменного компонента с постоянным в среднем степенным относительным распределением энергии в спектре ($F_\nu \sim \nu^{-1.6}$). Это, а также высокая наблюдаемая степень поляризации (до 40%), указывает на его синхротронную природу. Выделены отдельные источники поляризованного излучения с высокой степенью поляризации и направлением либо параллельным, либо перпендикулярным направлению джета, что дает сведения о направлении магнитного поля в джете во времена вспышек и позволяет сделать заключение о причине их появления: прохождение по джету ударной волны или появление в джете излучающих электронных ансамблей.

DOI: 10.31857/S0004629920080046

1. ВВЕДЕНИЕ

Блазар B1308+326 ($z = 0.997$) уже давно привлек к себе внимание благодаря сильной фотометрической переменности [1] и наличию высокой и переменной поляризации [2] в оптическом диапазоне, а также переменности в радиодиапазоне на сантиметровых длинах волн [3]. В дальнейшем в ходе РСДБ-наблюдений объект удалось разрешить, в джете были найдены компоненты, движущиеся со сверхсветовыми скоростями, и изучены их поляризационные характеристики [4]. Были выполнены наблюдения блазара в рентгеновском [5] и гамма-диапазонах [6].

Блазар B1308+326 входит в список объектов, наблюдающихся в Бостонском университете (США) по программе РСДБ-мониторинга блазаров, активных в гамма-диапазоне. В работе [7] приведены результаты РСДБ-наблюдений этого объекта. Настоящая статья, во-первых, продолжает эти наблюдения и, во-вторых, содержит результаты оптического мониторинга B1308+326, ведущегося в Санкт-Петербургском (СПбГУ) и Бостонском университетах, а также анализ и обсуждение полученных результатов с привлечением данных из других диапазонов длин волн.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

В СПбГУ фотометрические наблюдения проводились в полосах B, V, R, I на 70-см телескопе Крымской астрофизической обсерватории и на 40-см телескопе Астрономического института Санкт-Петербургского университета, оснащенных идентичными ПЗС фотометрами-поляриметрами. Методика наблюдений и обработки описана в [8]. Группа Бостонского университета вела наблюдения в тех же спектральных полосах на 1.8-м телескопе Перкинс Ловелловской обсерватории (Флагстафф, Аризона) с фотометром-поляриметром PRISM [9]. Систематических различий между рядами наблюдений нет. Ошибки фотометрических оценок не превышают 0.03^m.

Поляризационные наблюдения выполнялись либо в полосе R (на 70-см и 1.8-м телескопах), либо в широкой полосе с эффективной длиной волны, близкой к длине волны полосы R (на 40-см телескопе). Методика поляризационных наблюдений и обработки описана в [9, 10]. Для большей

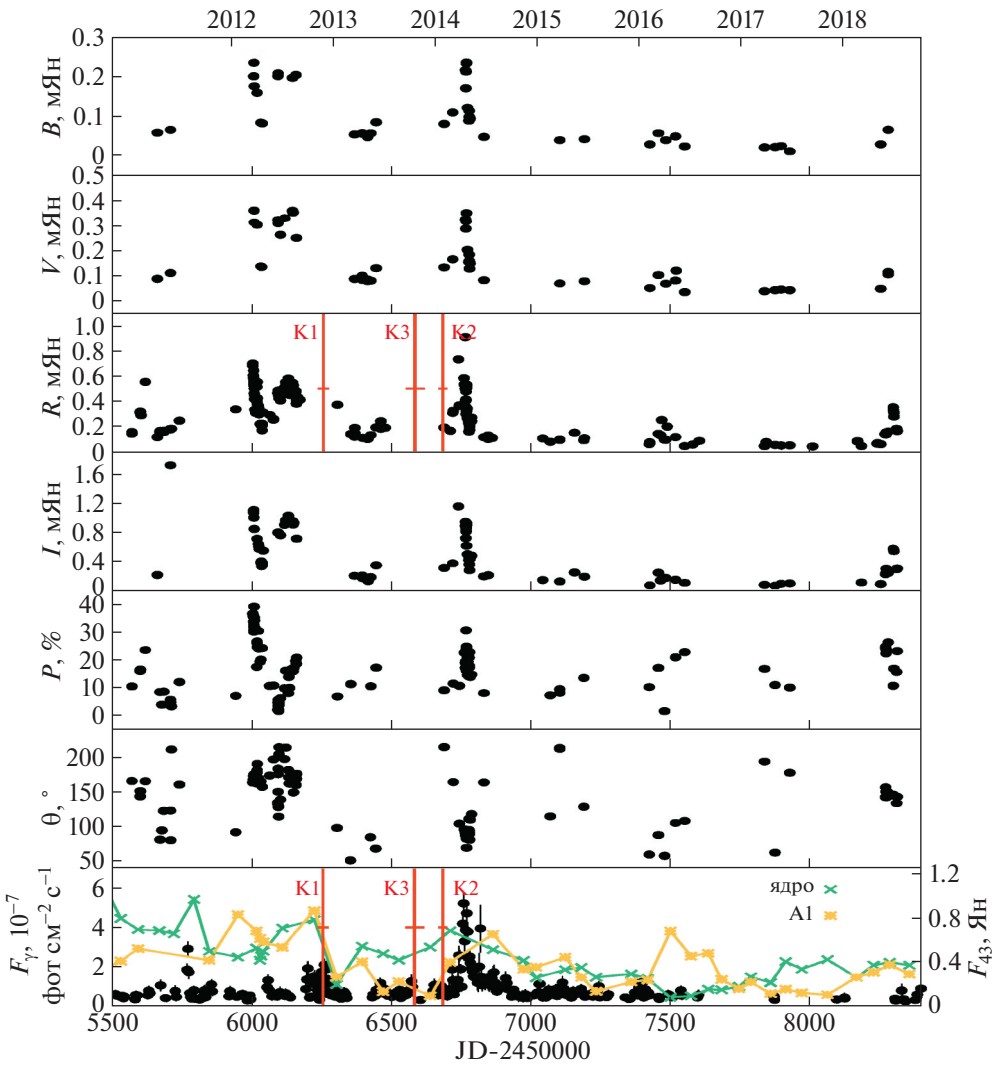

Рис. 1. Переменность B 1308+326 в различных диапазонах длин волн (см. текст).

части наблюдений ошибки в степени и направлении поляризации не превышают 2% и нескольких градусов.

При переходе от звездных величин к плотностям потоков, необходимым для дальнейшего анализа, использовалась калибровка из работы [11] (далее для краткости вместо “плотность потока” будем говорить “поток”). Усредненные на JD значения потоков приведены на рис. 1 на первых четырех панелях. На наиболее заполненной наблюдениями панели для полосы R заметно общее уменьшение минимальных потоков от 2011 к 2018 г., прерываемое отдельными вспышками, наиболее мощными (с увеличением потока в 8–10 раз) в 2012 г. (двойная) и 2014 г.

На рис. 1 на пятой и шестой панелях приведены наблюдаемые значения параметров поляризации. Степень поляризации изменяется в больших пределах, от практически 0% до 30–40%, причем вспышки степени поляризации часто совпадают с вспышками блеска. Направление поляризации также в высшей степени переменно, причем встречаются всевозможные значения направлений.

На седьмой панели (точки, левая шкала) рис. 1 приведена кривая блеска в гамма-диапазоне. Для ее построения были использованы данные, полученные космической гамма-обсерваторией “Fermi” в диапазоне энергий 0.1–200 ГэВ. При обработке данных использовалось стандартное программное обеспечение [12]. Время накопления сигнала 7 дней.

Объект 1308+326 входит в выборку ярких в гамма-диапазоне блазаров, для которых группой из Бостонского университета проводятся мониторинговые наблюдения на РСДБ-сети VLBA на частоте 43 ГГц (данные для всех эпох доступны по адресу www.bu.edu/blazars/VLBA_GLAST/3c279.html).

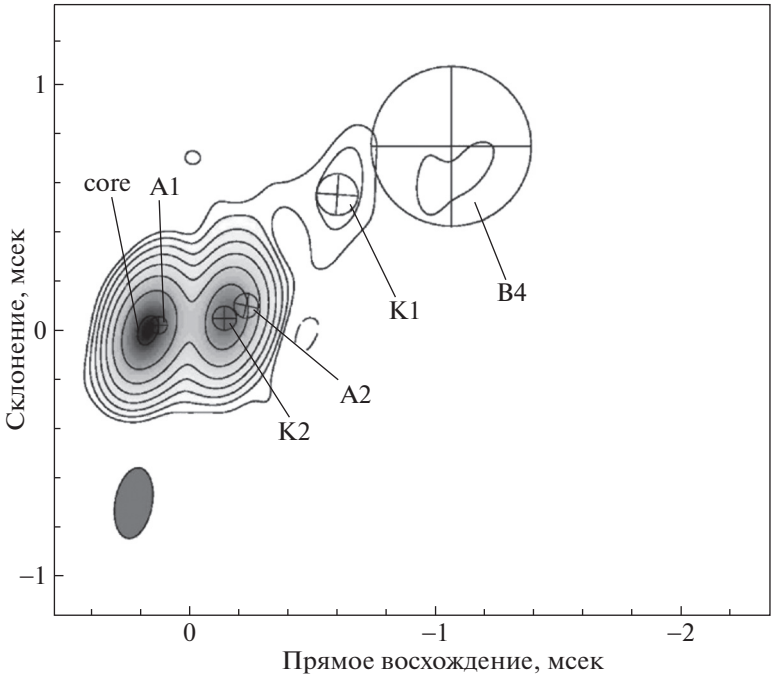

Рис. 2. Результаты моделирования изображения B 1308+326 для эпохи 12.04.2015.

Используемые нами VLBA-данные были прокалиброваны и обработаны способом, описанным в работе [13]. В работе были использованы результаты наблюдений в полном потоке для 27 эпох в интервале 17.04.2013–26.08.2018. Каждое изображение было промоделировано набором компонентов с круговым гауссовским распределением яркости в программном пакете Difmap. В качестве примера на рис. 2 приведены результаты моделирования изображения для эпохи 12.04.2015.

3. АНАЛИЗ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Фотометрическая переменность является одним из главных проявлений активности объекта. Обычно при наблюдениях изменения потока сопровождаются изменениями цвета объекта, часто приписываемыми цветовым изменениям переменного компонента. Однако корректный анализ показывает, что на самом деле цветовые характеристики переменного компонента в пределах данного события обычно остаются неизменными (см., например, [8, 10]). Проверим это в случае изучаемого блазара.

Методика анализа цветовой переменности описана в [14]. Она предполагает наличие в наблюдаемом излучении двух компонентов: постоянного и переменного, ответственного за активность. Именно его свойства представляют интерес для интерпретации поведения объекта. Основное достоинство данной методики состоит в том, что *цветовые характеристики переменного компонента находятся непосредственно из наблюдений* без предварительного определения его вклада в суммарное наблюдаемое излучение.

Суть методики состоит в построении для пары полос диаграмм “поток-поток”, на которых точки, представляющие одновременные наблюдения, в случае *неизменности цветовых характеристик* переменного компонента на данном временно́м интервале лежат на прямых линиях. Угловые коэффициенты прямых дают отношения потоков *переменного* компонента в рассматриваемых полосах. Многоцветные наблюдения переменности дают, таким образом, относительное распределение энергии в спектре переменного компонента. Уклонение точек от прямых указывает на изменение на данном временно́м интервале цветовых характеристик переменного компонента; в этом случае метод неприменим. Как показывает опыт, такие уклонения при надлежащем выборе временно́го интервала (определяемого в соответствии с кривой блеска) встречаются редко.

Диаграммы “поток–поток” для всего массива наблюдательных данных приведены на рис. 3. Видно, что связь между потоками линейна, т.е. распределение энергии в спектре переменного компонента не меняется. Методом ортогональной регрессии получены следующие уравнения прямых (в скобках указаны ошибки коэффициентов на уровне 1σ, после каждого из уравнений указано число точек n, использованных при опре-

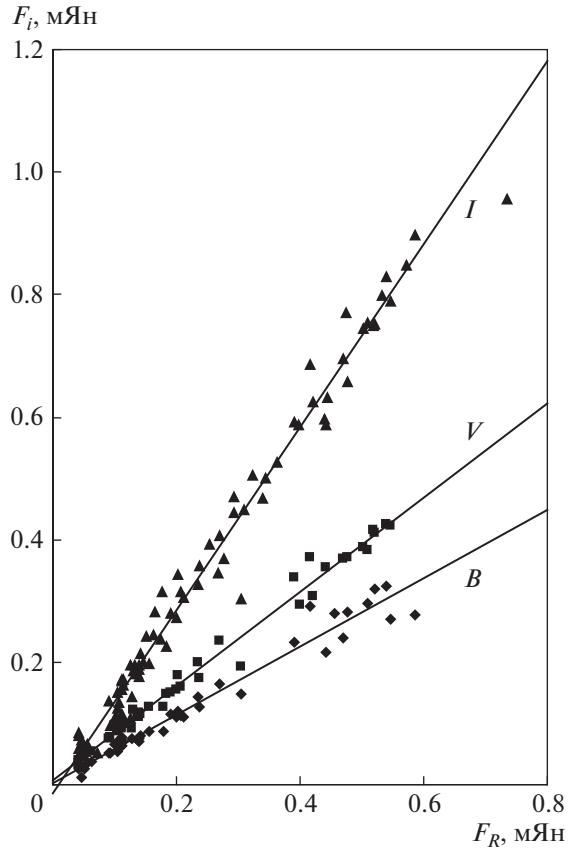

Рис. 3. Диаграммы “поток–поток” для всего массива наблюдательных данных.

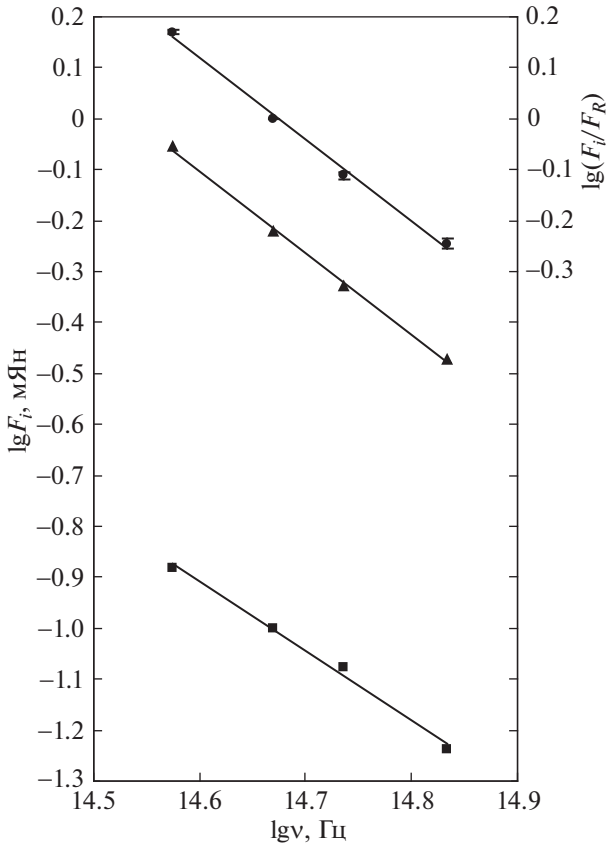

Рис. 4. Спектр переменного компонента, его сопоставление с наблюдаемыми спектрами.

делении коэффициентов уравнения, и коэффициенты корреляции r):

$$F_B = 0.558\,(\pm0.014)F_R + 0.002\,(\pm0.004),\quad n = 44,\quad r = 0.982;$$

$$F_V = 0.769\,(\pm0.010)F_R + 0.007\,(\pm0.003),\quad n = 47,\quad r = 0.994; \qquad (1)$$

$$F_I = 1.494\,(\pm0.013)F_R - 0.015\,(\pm0.004),\quad n = 79,\quad r = 0.990.$$

Угловые коэффициенты прямых дают отношения потоков переменного компонента, т.е. *среднее для рассматриваемого временно́го интервала наблюдаемое* относительное распределение энергии в его спектре. Оно дается в третьем столбце табл. 1. Полученное распределение следует исправить за межзвездное поглощение. Для этого значения из третьего столбца табл. 1 были умножены на коэффициенты C_{iR}, где $\lg C_{iR} = 0.4(A_i - A_R)$. Значения поглощения A_i взяты из базы данных NED[1]. Исправленное распределение энергии (мало отличающееся от наблюдаемого, так как поглощение невелико) дает пятый столбец табл. 1. В логарифмическом масштабе оба распределения представлены в шестом и седьмом столбцах таблицы. На рис. 4 (точки, правая шкала ординат) представлено распределение, исправленное за поглощение. Видно, что распределение энергии в спектре переменного компонента степенное $F_\nu \sim \nu^\alpha$. Проведение прямой методом наименьших квадратов дает спектральный индекс $\alpha = -1.61 \pm 0.07$.

Посмотрим, как изменение вклада переменного компонента в суммарное излучение влияет на наблюдаемое распределение энергии в спектре. Для этого, воспользовавшись уравнениями (1), построим наблюдаемое распределение энергии для областей, близких к минимальному (F_R = = 0.1 мЯн) и максимальному (F_R = 0.6 мЯн) блеску (рис. 4, левая шкала ординат). Видно, что наклон спектра при минимальном (квадраты) и максимальном (треугольники) блеске различен. Спектральные индексы оказываются равными $\alpha = -1.36 \pm 0.09$ для минимума и $\alpha = -1.61 \pm 0.05$ для максимума. Это означает, что с увеличением блеска объект краснеет, хотя переменный компо-

[1] https://ned.ipac.caltech.edu/

Таблица 1. Результаты определения относительного распределения энергии в спектре переменного источника

Полоса	lgν	$(F_i/F_R)^{obs}$	C_{iR}	$(F_i/F_R)^{cor}$	$\lg(F_i/F_R)^{cor}$	$\lg(F_i/F_R)^{obs}$
1	2	3	4	5	6	7
B	14.833	0.558 ± 0.014	1.02	0.569 ± 0.014	−0.245 ± 0.010	−0.253
V	14.736	0.769 ± 0.010	1.01	0.772 ± 0.010	−0.112 ± 0.006	−0.114
R	14.670	1.0		1.0	0	0
I	14.574	1.494 ± 0.013	0.99	1.479 ± 0.013	0.170 ± 0.004	0.174

нент, как мы выяснили ранее, цвета не меняет. Спектральный индекс в максимуме, как и следовало ожидать, оказывается близким к спектральному индексу переменного компонента, который вносит основной вклад в наблюдаемое излучение. Эта близость хорошо видна на рис. 4, на котором наблюдаемое распределение (седьмой столбец табл. 1) не нанесено, поскольку оно практически совпадает с исправленным за межзвездное поглощение.

4. АНАЛИЗ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ДАННЫХ

На рис. 5 показана зависимость степени поляризации от наблюдаемого потока. Разброс точек на графике велик, но, как можно ожидать из рассмотрения рис. 1, степень поляризации в среднем тем больше, чем больше поток. При малых потоках нет экстремально высоких степеней поляризации, а при больших поляризация всегда велика.

Что касается наблюдаемых направлений поляризации, то на рис. 1 видно, что во вспышках 2012 и 2014 г. они различны. Представляет интерес изучить поляризационные характеристики активных источников, ответственных за вспышки.

В работе [14] описана принципиальная возможность определения параметров поляризации переменного компонента в рамках модели “постоянный + переменный источник”, если относительные параметры Стокса у переменного компонента на рассматриваемом временно́м интервале не изменяются, а наблюдаемая переменность поляризации связана только с изменением его вклада в суммарное излучение. В этом случае в пространстве наблюдаемых абсолютных параметров Стокса {*I*, *Q*, *U*} точки должны лежать на прямой линии. Направляющие тангенсы прямой дают от-

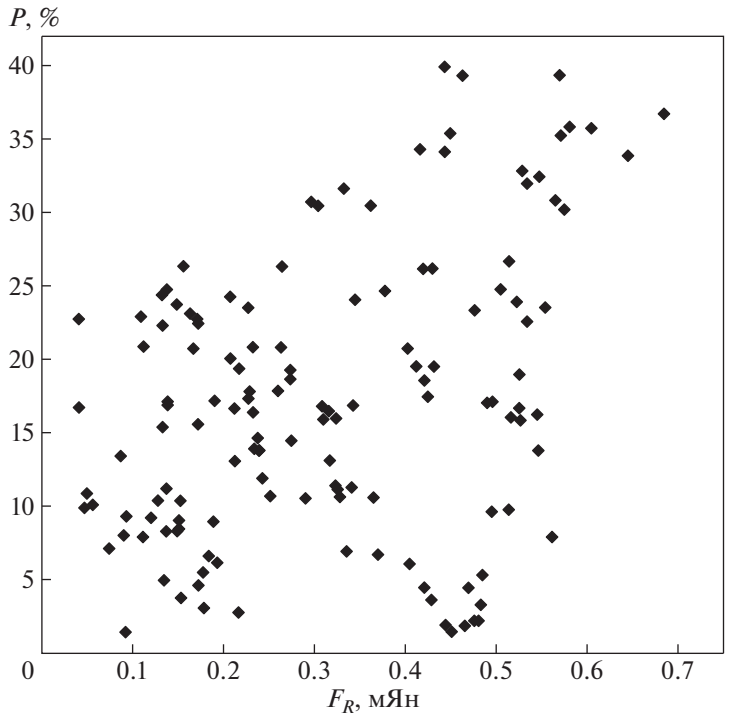

Рис. 5. Зависимость степени поляризации от наблюдаемого потока.

Таблица 2. Параметры поляризации переменных источников во вспышках

Интервал JD 2450000+	Число точек	$p\nu_x \pm 1\sigma$	$p\nu_y \pm 1\sigma$	P_ν	$\theta_{0,\nu}$
1	2	3	4	5	6
6007–6019	16	0.31 ± 0.04	-0.24 ± 0.05	39%	−19°
6021–6042	9	0.30 ± 0.06	0.08 ± 0.08	31%	7°
6764–6791	20	-0.25 ± 0.03	-0.03 ± 0.03	25%	−87°

Таблица 3. Видимые скорости и другие характеристики обнаруженных компонентов

Компонент	μ, мсек/год	β_{app}, c	T_0, JD 2400000+	$\langle F \rangle$, Ян	$\langle \theta \rangle$, град
K1	0.48 ± 0.012	25.35 ± 0.61	56260 ± 20	0.03 ± 0.01	-55.9 ± 4.5
K2	0.24 ± 0.002	12.70 ± 0.10	56687 ± 15	0.08 ± 0.13	-83.6 ± 4.1
K3	0.10 ± 0.005	5.14 ± 0.26	56588 ± 34	0.05 ± 0.04	-78.0 ± 5.0
A1	–	–	–	0.27 ± 0.15	-67.7 ± 12.5
A2	–	–	–	0.24 ± 0.15	-71.1 ± 5.8

носительные параметры Стокса переменного компонента. Верно и обратное: расположение точек на прямых указывает на неизменность параметров поляризации у переменного компонента и возможность их определения. В реальности рассматриваются плоскости $\{I, Q\}$ и $\{I, U\}$, на которых точки должны располагаться на прямых. Угловые коэффициенты этих прямых дают относительные параметры Стокса для переменного компонента $p\nu_x$ и $p\nu_y$, по которым затем находятся степень поляризации P_ν и направление поляризации $\theta_{0,\nu}$ переменного компонента. Поскольку поляризация измерялась в полосе R, в качестве I нужно брать поток F_R, и его же использовать для определения величин Q и U. Найденные относительные параметры Стокса переменного компонента, естественно, относятся к полосе R.

Опыт показывает, что даже в случае коротких временных интервалов точки, представляющие наблюдения, редко оказываются на прямых линиях из-за быстрых изменений параметров поляризации у переменного компонента. В нашем случае удалось выделить три временных интервала, связанных со вспышками, когда точки удовлетворительно укладываются на прямые линии (см. рис. 6). Результаты собраны в табл. 2.

5. КИНЕМАТИКА И СТРУКТУРА ДЖЕТА ПО ДАННЫМ РСДБ-НАБЛЮДЕНИЙ

Рассмотрение всей совокупности изображений позволяет выделить отдельные движущиеся компоненты. При их отождествлении учитывались плотность потока, позиционный угол относительно радиоядра на 43 ГГц и расстояние от него на последовательных изображениях. В 2013–2018 гг. были отождествлены 3 новых движущихся компонента, K1, K2, K3 (два из них указаны на рис. 2, там же нанесен компонент B4, обнаруженный в работе [7]) и наблюдавшийся также и нами). Движение компонентов иллюстрируется на рис. 7. Времена прохождения компонентов через радиоядро на 43 ГГц, T_0, найденные линейной экстраполяцией, указаны в табл. 3 и нанесены на рис. 1 вертикальными прямыми. В той же таблице даются видимые скорости компонентов β_{app}, оказывающиеся в диапазоне от $5c$ до $25c$ (были использованы космологические параметры $H_0 = 70$ км с$^{-1}$ Мпк$^{-1}$, $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$), а также средние потоки компонентов $\langle F \rangle$ и их позиционные углы $\langle \theta \rangle$ относительно радиоядра. Кроме движущихся компонентов, были обнаружены два квазистационарных компонента A1 и A2 на расстояниях ~0.11 и 0.34 мсек соответственно. На седьмой панели рис. 1 (правая шкала, линии) приведены кривые блеска радиоядра и стационарного компонента A1. Компонент A1 был обнаружен на предыдущих эпохах в работе [7]. Компонент A2, по всей видимости, является трейлинговым компонентом, появившимся после прохождения B4 и исчезнувшим после появления компонента K3. В работе [15] численно показана возможность образования трейлинговых компонентов в результате распространения первичного возмущения в джете.

Компонент B4, имевший скорость ~7 с до расстояния 0.4 мсек [7], после 2013 г. ускорился до ~28 с, его позиционный угол при этом изменился

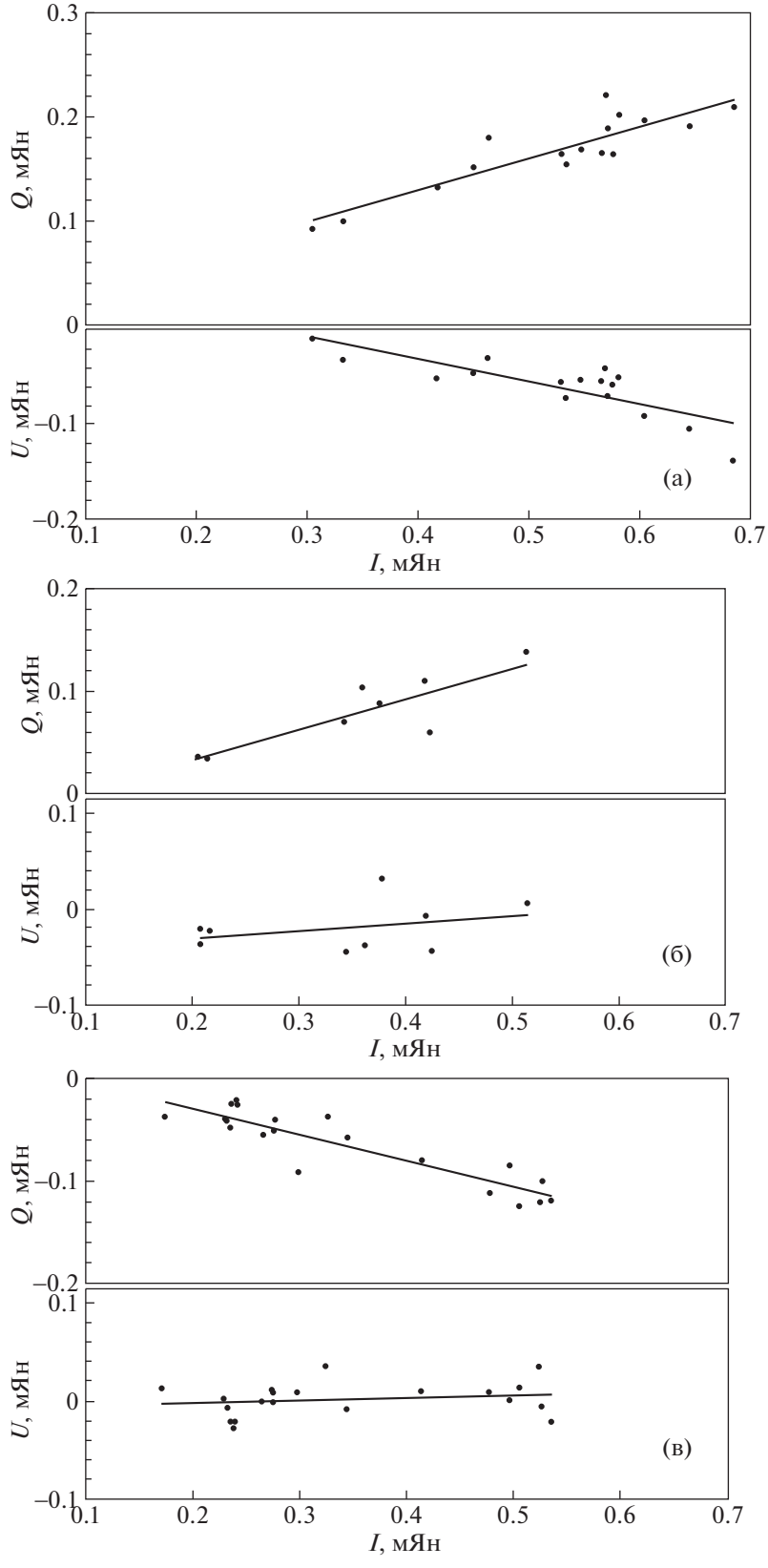

Рис. 6. К определению параметров поляризации переменных компонентов в разных событиях (а – JD 2456007 – 6019, б – JD 2456021 – 6042, в – JD 2456764 – 6791) (см. текст).

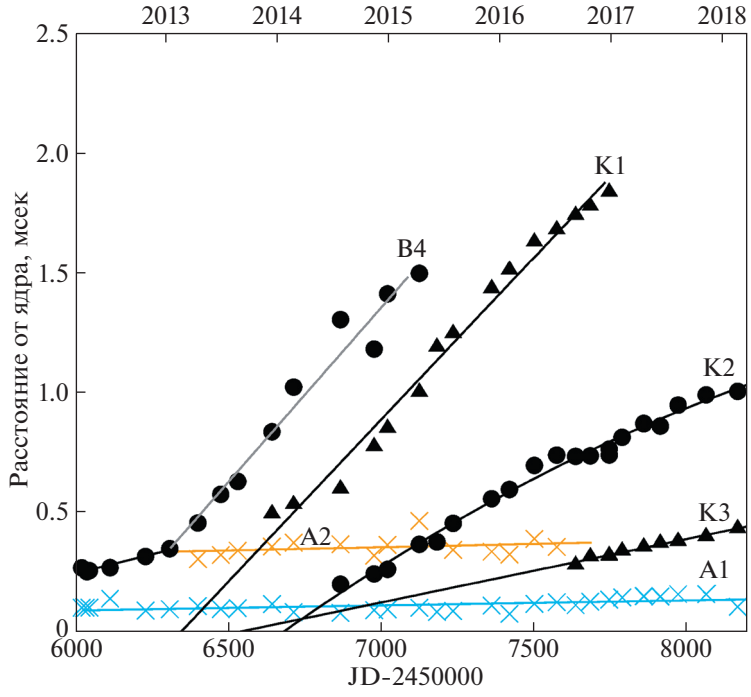

Рис. 7. Зависимость от времени в расположении сверхсветовых и стационарных компонентов в миллисекундном масштабе.

незначительно. Подобное поведение у объекта 1308+326 отмечено в работе [7] и для компонента B2, который также значительно ускорился, удалившись от радиоядра на расстояние, превышающее 0.4 мсек. Такое поведение согласуется с результатами, полученными в рамках программы мониторинга MOJAVE [16], согласно которой у объекта B1308+326 компоненты, обнаруженные на расстоянии от радиоядра, превышающем 1 мсек, имеют бóльшие скорости (>20 с), в то время как более близкие компоненты имеют скорости, сходные с теми значениями, которые получили мы. Этот наблюдательный факт подтверждает предположение о том, что джет ускоряется и на расстоянии нескольких парсек от радиоядра [17].

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

По сравнению с компонентами K1 и K2, скорости которых 25 с и 12 с соответственно, компонент K3 имеет значительно меньшую скорость 5*c*. Прохождение более быстрых компонентов K1 и K2 через радиоядро на частоте 43 ГГц сопровождалось вспышкой в радиоядре.

Прохождение компонентом K1 радиоядра в конце 2012 г. совпадает с вспышкой в гамма-диапазоне, но данные в оптическом диапазоне для этого периода, к сожалению, отсутствуют. Появление же компонента K2 предшествовало мощной вспышке в оптическом и гамма-диапазонах в первой половине 2014 г.

Как видно из рассмотрения рис. 1, между изменениями блеска в оптическом и гамма-областях спектра во время вспышки 2014 г. наблюдается тесная корреляция. Это подтверждает рис. 8, дающий результаты вычисления DCF для интервала JD 2456600-2456900. Максимальный коэффициент корреляции близок к 1, причем временная задержка между изменениями в рассматриваемых диапазонах спектра близка к 0. Подобная картина наблюдается у многих блазаров и говорит об идентичной локализации источников оптического и гамма-излучения в джете блазара во время вспышки. Усиления гамма-излучения в областях JD 2455780 и JD 2456200-6300, к сожалению, приходятся на лакуны в оптических наблюдениях.

Степенное распределение энергии в спектре переменного компонента (рис. 4) и высокая степень поляризации оптического излучения во вспышках (рис. 6) говорят о синхротронной природе переменных источников. В этом случае направление поляризации перпендикулярно направлению магнитного поля. Данные табл. 2 указывают, что во вспышках 2012 и 2014 г. направления магнитного поля в областях джета, где возникает излучение, были различны. Поскольку считается общепринятым, что в джете имеется спиралевидное магнитное поле, это различие,

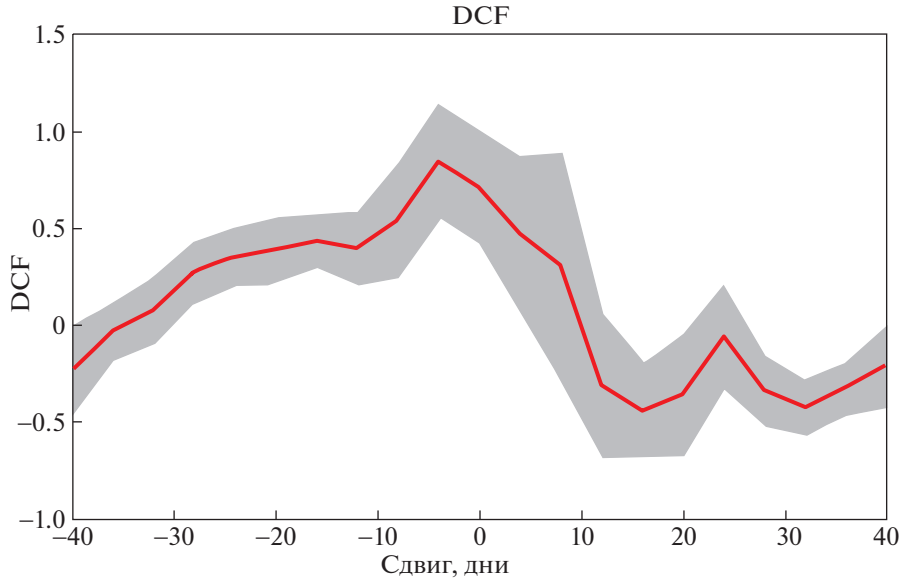

Рис. 8. Результаты вычисления DCF для интервала JD 2456600-2456900.

скорее всего, обусловлено различной локализацией излучающих ансамблей, хотя глобальную перестройку магнитного поля исключить нельзя.

Во вспышке 2014 г. направление поляризации практически совпадало с направлением джета (табл. 2 и 3), т.е. направление магнитного поля было перпендикулярно направлению джета. Это вполне согласуется с общепринятой моделью прохождения вниз по джету ударной волны, ответственной за вспышку, которая упорядочивает магнитное поле в направлении, перпендикулярном направлению ее движения.

С другой стороны, во вспышках 2012 г. направление поляризации примерно перпендикулярно направлению джета, что указывает на наличие магнитного поля, направление которого параллельно направлению джета. В ряде работ (см., например, [18]) отмечается, что к такой конфигурации магнитного поля может привести продвижение излучающего ансамбля электронов вниз по джету. Вспышки 2012 г. следует тогда связать с появлением в джете излучающих электронных ансамблей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам СПбГУ, принимавшим участие в наблюдениях, и группе Бостонского университета за предоставление результатов оптического мониторинга. Таблицы с результатами наблюдений доступны при обращении к собравшему их В.М. Ларионову (vlar2@yandex.ru). В работе использованы данные программы мониторинга Бостонского университета VLBA-BU-BLAZAR (http://www.bu.edu/blazars/), которая финансируется грантом NASA в рамках программы “Fermi Guest Investigator Program”.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 17-12-01029.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *W. Liller, E. W. Gottlieb, and H. R. Miller*, IAU Circ. 2939, 2, (1976).
2. *J. J. Puschell, W. A. Stein, T. W. Jones, et al.* Astrophys. J. **227**, L11, (1979).
3. *S. L. Mufson, W. Z. Wisniewski, J. Pollock, et al.*, BAAS **15**, 671, (1983).
4. *D. C. Gabuzda, R. I. Kollgaard, D. H. Roberts, and J. F. C. Wardle*, Astrophys. J. **410**, 39, (1993).
5. *D. Watson, N. Smith, L. Hanlon, et al.*, Astron. and Astrophys. **364**, 43, (2000).
6. *M. Ackermann, M. Ajello, A. Allafort, et al.*, Astrophys. J. Supp. **209**, 34, (2013).
7. *S. G. Jorstad, A. P. Marscher, D. A. Morozova, et al.*, Astrophys. J. **846**, 98, (2017).
8. *В. А. Гаген-Торн, В. М. Ларионов, Н. В. Ефимова и др.*, Астрон. журн. **83**, 516, (2006).
9. *S. G. Jorstad, A. P. Marscher, P. Smith, et al.*, Astrophys. J. **773**, 147, (2013).
10. *V. A. Hagen-Thorn, V. M. Larionov, S. G. Jorstad, A. A. Arkharov, E. I. Hagen-Thorn, N. V. Efimova, L. V. Larionova, and A. P. Marscher*, Astrophys. J. **672**, 40 (2008).

11. *A. R. J. Mead, K. R. Ballard, P. W. J. L. Brand, J. H. Hough, C. Brindle, and J.A. Bailey*, Astron. and Astrophys. Supp. **83**, 183 (1990).
12. *W. B. Atwood, A. A. Abdo, M. Ackermann, W. Althouse, et al.*, Astrophys. J. **697**, 1071 (2009).
13. *S. G. Jorstad, A. P. Marscher, M. L. Lister, A. M. Stirling, et al.*, Astron. J. **130**, 1418 (2005).
14. *V. A. Hagen-Thorn and S. G. Marchenko*, Baltic Astronomy **8**, 575 (1999).
15. *I. Agudo, J.-L. Gómez, J.-M. Martí et al.*, Astrophys. J. **549**, L183 (2001).
16. *M. L. Lister, M. F. Aller, H. D. Aller, et al.*, Astron. J. **146**, 120 (2013).
17. *D. C. Homan, M. L. Lister, Y. Y. Kovalev, et al.*, Astrophys. J. **798**, 134 (2015).
18. *F. D. D'Arcangelo, A. P. Marscher, S. G. Jorstad, et al.*, Astrophys. J. **697**, 985 (2009).