

УДК 52-1/-8

ПЕРЕМЕННОСТЬ БЛАЗАРА 4С 38.41 В 2006–2017 ГОДАХ

© 2019 г. В. А. Гаген-Торн^{1*}, Ю. В. Троицкая^{2**}, Е. И. Гаген-Торн³, И. С. Троицкий^{2***}, С. С. Савченко¹, А. А. Архаров^{3,2****}, Н. В. Ефимова³, С. К. Климанов³, Е. В. Волков¹

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

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

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

Поступила в редакцию 16.10.2018 г.; после доработки 22.11.2018 г.; принята к публикации 27.11.2018 г.

Анализируются результаты многоцветных фотометрических и поляризационных наблюдений блазара 4С 38.41 (Q 1633+382), выполненных в Санкт-Петербургском государственном университете (СПбГУ), Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН, Бостонском университете и обсерватории Стюарда в 2006–2017 гг. Выделены отдельные переменные источники, ответственные за активность объекта; степенной спектр и высокая степень поляризации их излучения подтверждают их синхротронную природу. Наблюдаемая цветовая переменность объекта (“чем ярче, тем краснее”) объяснена увеличением вклада в суммарное излучение переменного по потоку красного компонента с неизменным относительным распределением энергии в спектре. Обнаружена тесная корреляция между кривыми блеска в оптическом и гамма-диапазонах, что указывает на идентичное местоположение переменных источников, ответственных за излучение в этих диапазонах.

DOI: 10.1134/S0004629919040030

1. ВВЕДЕНИЕ

Объект 4С 38.41 (ВЗ 1633+382) был открыт как радиоисточник в 1965 и в 1973 г. был идентифицирован как квазар [1]. Его красное смещение оказалось равным $z = 1.814$ [2]. Исследования показали, что объект является переменным во всех диапазонах от радио до гамма. Полный обзор литературы по объекту дан в работе [3], и повторять его мы здесь не будем. Отметим только обстоятельную работу Раитери и др. [4], появившуюся после большой вспышки объекта в 2011 г.

Настоящая работа посвящена анализу фотометрической и поляризационной переменности 4С 38.41 в оптическом, ИК и гамма-диапазонах с целью выяснения свойств источников, ответственных за активность.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Для анализа данных в оптическом диапазоне использовались фото-поляриметрические наблюдения, полученные на 0.7-м телескопе КраО и

на 0.4-м телескопе СПбГУ с идентичными ПЗС фотометрами-поляриметрами, а также наблюдения, полученные группой Бостонского университета на 1.8-м телескопе Перкинс, и имеющиеся в открытом доступе данные обсерватории Стюарда¹. Наблюдения в ИК диапазоне получены в обсерватории Кампо-Императоре на 1.2-м телескопе. Для анализа в гамма-диапазоне использовались данные, полученные космической обсерваторией Ферми в диапазоне 0.1–200 ГэВ. Для обработки данных использовалось стандартное программное обеспечение [5].

Методика оптических наблюдений и их обработки описана в [6]. Ошибки фотометрических оценок не превышают 0.03^m , ошибки в степени поляризации не превышают 2–3%. Для перехода от звездных величин к плотностям потоков (в дальнейшем, для краткости, потокам) использовалась калибровка [7]. Поскольку значительных изменений потока в течение ночи не было обнаружено, оценки блеска, соответствующие одной Юлианской дате, усреднялись. Построенные по полученным в СПбГУ данным кривые блеска в потоках (мЯн) приведены на рис. 1. Результаты по-

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

**E-mail: st024396@student.spbu.ru

***E-mail: i.troitsky@spbu.ru

****E-mail: arkadi@arharov.ru

¹<http://james.as.arizona.edu/~psmith/Fermi/>

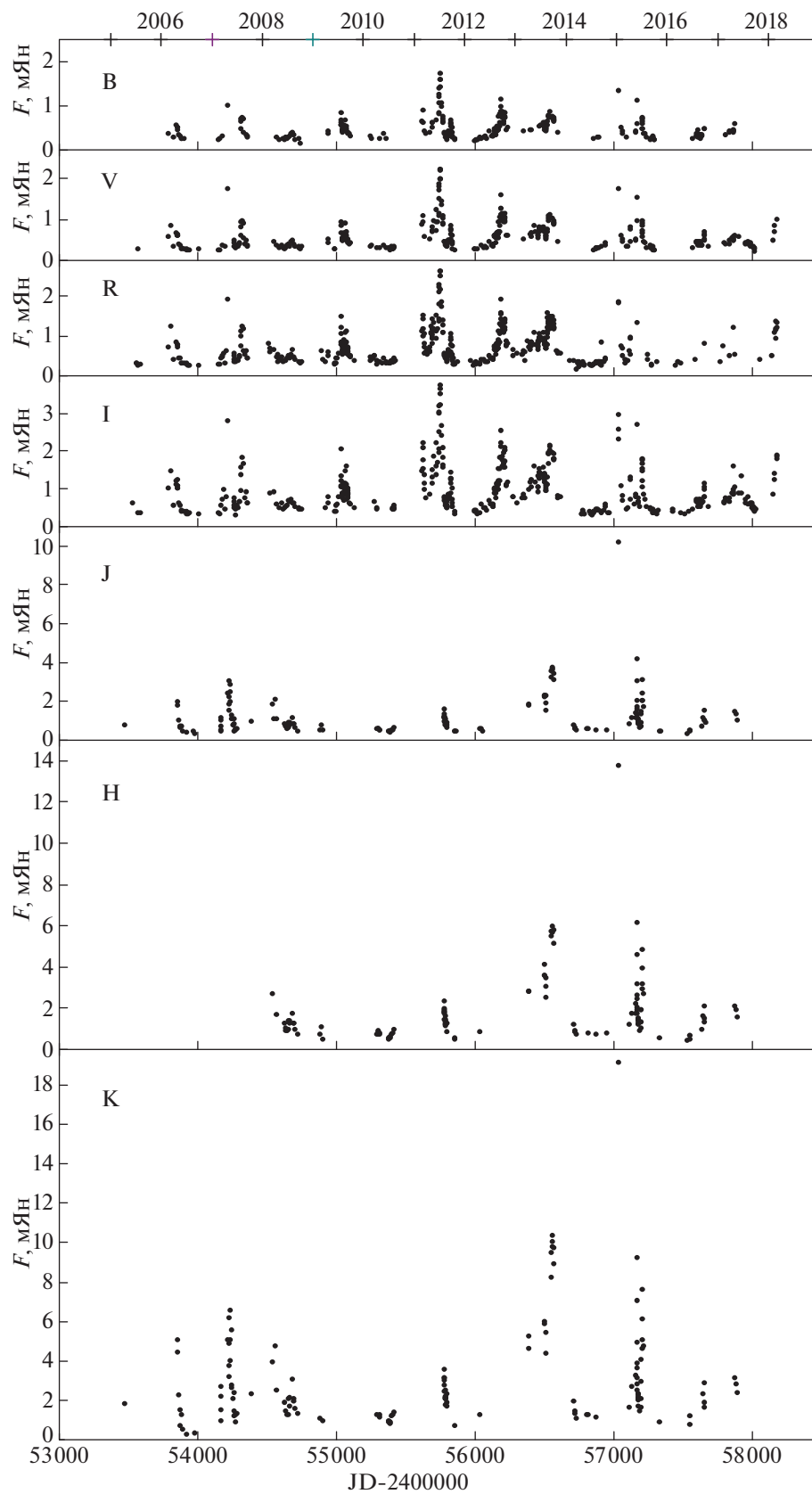


Рис. 1. Кривые блеска в потоках в оптическом и ИК диапазонах.

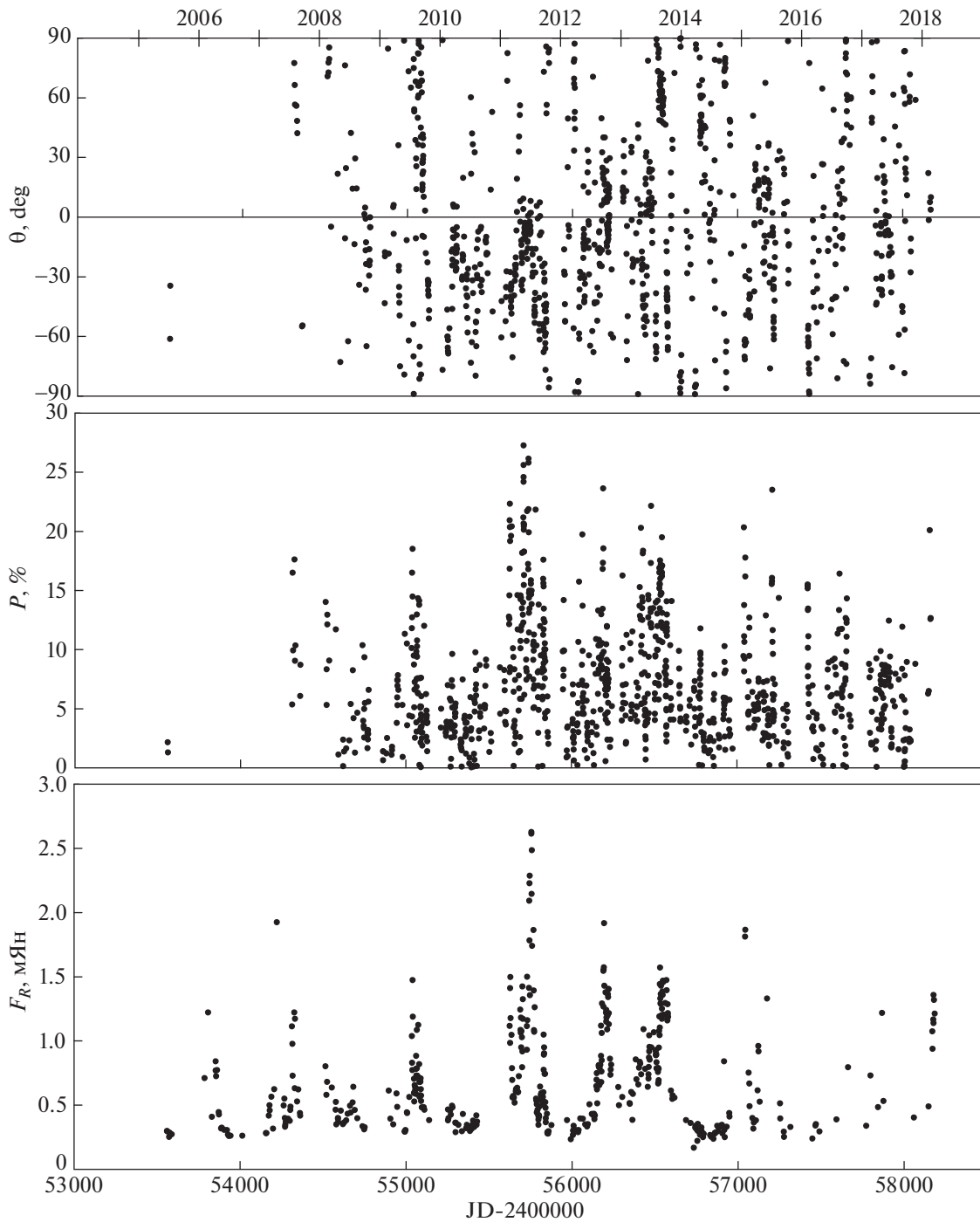


Рис. 2. Изменения параметров поляризации и блеска (данные относятся к полосе R).

ляризационных наблюдений — степень поляризации P и преимущественное направление колебаний электрического вектора θ (они относятся к полосе R) — приведены на рис. 2. Здесь же для удобства сопоставления параметров поляризации с блеском приведена кривая блеска в полосе R . На рис. 3 приведена кривая блеска в гамма-диапазоне, полученная со временем накопления сигнала 7 дней, и кривая блеска в полосе R (для сопоставления).

Рассмотрение этих рисунков подтверждает отмеченную в [4] активность 4С 38.41. На рис. 1 видны многочисленные вспышки объекта с изменением потока в оптической области в 5–10 раз. Интерес представляет мощная вспышка в ИК диапазоне в момент JD 245 7038. Рис. 2 показывает, что наблюдаемая степень поляризации во время вспышек увеличивается, достигая в максимуме 25%. Преимущественного направления в значениях угла

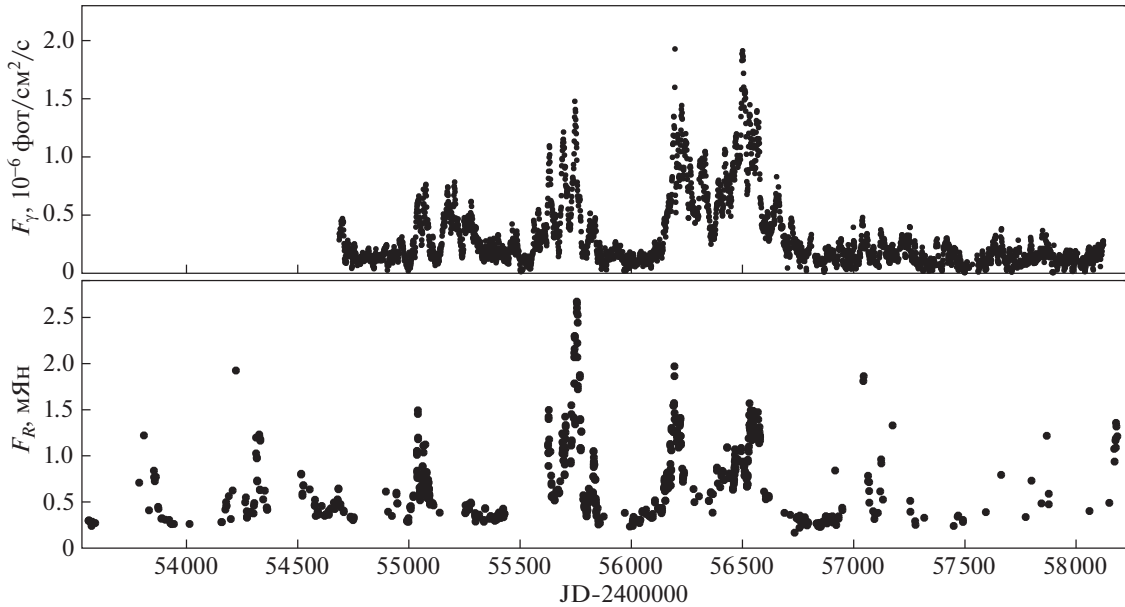


Рис. 3. Кривые блеска в гамма-диапазоне и в полосе R.

θ в целом не наблюдается. На кривых блеска в оптическом и гамма-диапазонах в ряде случаев присутствуют сходные детали.

3. АНАЛИЗ ЦВЕТОВОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ

Методика анализа цветовой переменности подробно описана в [8]. Она предполагает наличие в излучении двух компонентов: постоянного и переменного, ответственного за активность. Основное ее достоинство состоит в том, что цветовые характеристики переменного компонента находят непосредственно из наблюдений без предварительного определения его вклада в суммарное наблюдаемое излучение, что исключает возможные ошибки, связанные с некорректной оценкой вклада постоянного компонента.

Суть методики состоит в построении диаграмм “поток-поток” для пар полос, на которых представляющие одновременные наблюдения точки в случае неизменности цветовых характеристик переменного компонента на рассматриваемом временном интервале располагаются вдоль прямых линий. Угловые коэффициенты этих прямых дают отношения потоков переменного компонента в рассматриваемых полосах. Многоцветные наблюдения дают, таким образом, относительное распределение энергии (SED) в спектре переменного компонента. Уклонение точек от прямых указывает на изменение цветовых характеристик переменного компонента, в этом случае метод неприменим и работает лишь качественно. Нахождение SED для переменного источника удобно выполнять отдельно для оптического и ИК диапазонов. Затем

эти распределения “сшиваются” с помощью диаграммы “поток-поток”, на которой сопоставляются потоки в одной из оптических и одной из ИК полос.

Диаграммы “поток-поток” для всего массива наблюдательных данных приведены на рис. 4а и 4б отдельно для оптического и ИК диапазонов, соответственно. На рис. 4с приведена диаграмма “поток-поток” для базовых полос оптического (R) и ИК (K) диапазонов, необходимая для сшивания спектров. Видно, что связь между потоками линейна, что говорит о неизменности в среднем относительного распределения энергии в спектре переменного компонента на всем рассматриваемом временном интервале.

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 определении коэффициентов уравнения, и коэффициенты корреляции r):

$$\begin{cases} F_B = 0.560(\pm 0.006)F_R + 0.055(\pm 0.006), \\ n = 214, \quad r = 0.984; \\ F_V = 0.798(\pm 0.004)F_R + 0.014(\pm 0.004), \\ n = 268, \quad r = 0.994; \\ F_I = 1.453(\pm 0.005)F_R - 0.048(\pm 0.004), \\ n = 330, \quad r = 0.994; \\ F_K = 9.002(\pm 0.061)F_R - 2.089(\pm 0.041), \\ n = 19, \quad r = 0.968; \\ F_J = 0.426(\pm 0.008)F_K + 0.010(\pm 0.030), \\ n = 141, \quad r = 0.974; \\ F_H = 0.641(\pm 0.007)F_K - 0.031(\pm 0.031), \\ n = 106, \quad r = 0.991. \end{cases} \quad (1)$$

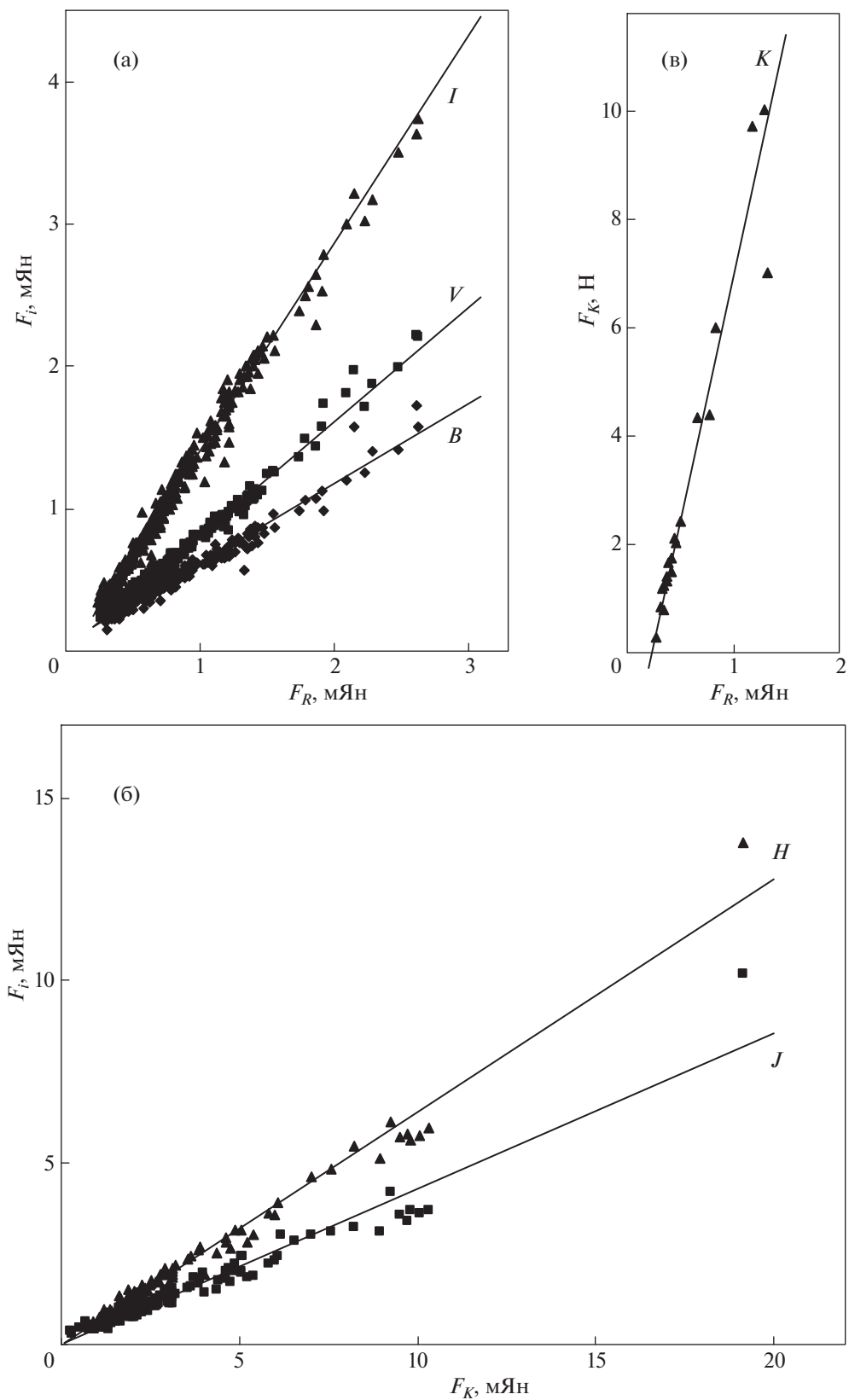


Рис. 4. Диаграммы "поток-поток".

Таблица 1. Результаты определения среднего относительного распределения энергии в спектре переменного компонента

Полоса	$\lg(\nu)$	$(F_i/F_R)^{obs}$	C_{iR}	$(F_i/F_R)^{corr}$	$\lg(F_i/F_R)^{corr}$	$\lg(F_i/F_R)^{obs}$
<i>B</i>	14.833	0.560 ± 0.006	1.016	0.569 ± 0.006	-0.244 ± 0.005	-0.252
<i>V</i>	14.736	0.798 ± 0.004	1.007	0.804 ± 0.004	-0.095 ± 0.002	-0.098
<i>R</i>	14.670	1.0	1.0	1.0	0	0
<i>I</i>	14.574	1.453 ± 0.005	0.993	1.443 ± 0.005	0.159 ± 0.002	0.162
<i>J</i>	14.387	3.835 ± 0.070	0.985	3.777 ± 0.069	0.577 ± 0.008	0.584
<i>H</i>	14.262	5.770 ± 0.070	0.982	5.666 ± 0.069	0.753 ± 0.006	0.761
<i>K</i>	14.140	9.002 ± 0.061	0.980	8.822 ± 0.060	0.946 ± 0.003	0.954

Угловые коэффициенты прямых дают отношения потоков переменного компонента. После подстановки в пятое и шестое уравнения значения F_K из четвертого (“сшивание спектра”) получаем среднее для всего рассматриваемого временного интервала *наблюдаемое* относительное SED переменного компонента (третий столбец табл. 1). Полученное SED необходимо исправить за межзвездное поглощение. Для этого значения из третьего столбца табл. 1 были домножены на коэффициенты C_{iR} , где $\lg C_{iR} = 0.4(A_i - A_R)$. Значения поглощения A_i взяты из базы данных NED². Исправленное распределение энергии (мало отличающееся от наблюдаемого, так как поглощение невелико) дает пятый столбец табл. 1. В логарифмическом масштабе оно представлено в шестом столбце таблицы и на рис. 5. Видно, что распределение энергии в спектре переменного компонента степенное, $F_\nu \sim \nu^\alpha$. Проведение прямой методом наименьших квадратов дает спектральный индекс $\alpha = -1.78 \pm 0.05$. В работе [4] указано, что в среднем при увеличении блеска объект становится более красным. Наши данные подтверждают этот тренд. Для объяснения этой *наблюдаемой* цветовой переменности сопоставим SED вблизи минимума ($F_R = 0.5$ мЯн) и максимума ($F_R = 2.5$ мЯн) блеска с SED переменного компонента (рис. 6). Распределения вблизи минимума и максимума (левая шкала на рисунке), найденные в соответствии с формулами (1–6) выражения (1), нанесены символами “+” и “▲” соответственно. Для переменного компонента (правая шкала, символ “x”) естественно нанесены данные, не исправленные за поглощение (столбец 7 в табл. 1). Получены значения спектральных индексов $\alpha = -1.21 \pm 0.04$ вблизи минимума, $\alpha = -1.62 \pm 0.07$ вблизи максимума и $\alpha = -1.80 \pm 0.05$ для переменного компонента.

Рассмотрение рис. 6 легко объясняет наблюдаемую у 4С 38.41 зависимость цвета объекта от блеска: “чем ярче, тем краснее”. Вблизи минимума блеска вклад переменного компонента невелик и не только он определяет наблюдаемое значение спектрального индекса. Увеличение блеска означает увеличение вклада переменного компонента. Спектр переменного компонента более красный и при приближении к максимуму наблюдаемый спектральный индекс приближается к спектральному индексу переменного компонента, то есть объект становится более красным. Подчеркнем, что *на-*

Таблица 2. Спектральные индексы относительных SED в оптической области спектра для разных временных интервалов

Интервал JD 245 0000+	Спектральный индекс
4020–4500	-1.77 ± 0.19
4900–5150	-1.64 ± 0.10
5500–5950	-1.46 ± 0.05
6000–6299	-1.57 ± 0.01
6300–6700	-1.91 ± 0.07
7000–7400	-1.14 ± 0.16
5500–5650	-1.61 ± 0.24
5651–5715	-1.86 ± 0.20
5716–5800	-1.40 ± 0.05
5801–5950	-1.43 ± 0.10
Весь интервал	-1.55 ± 0.03

²<http://ned.ipac.caltech.edu/>

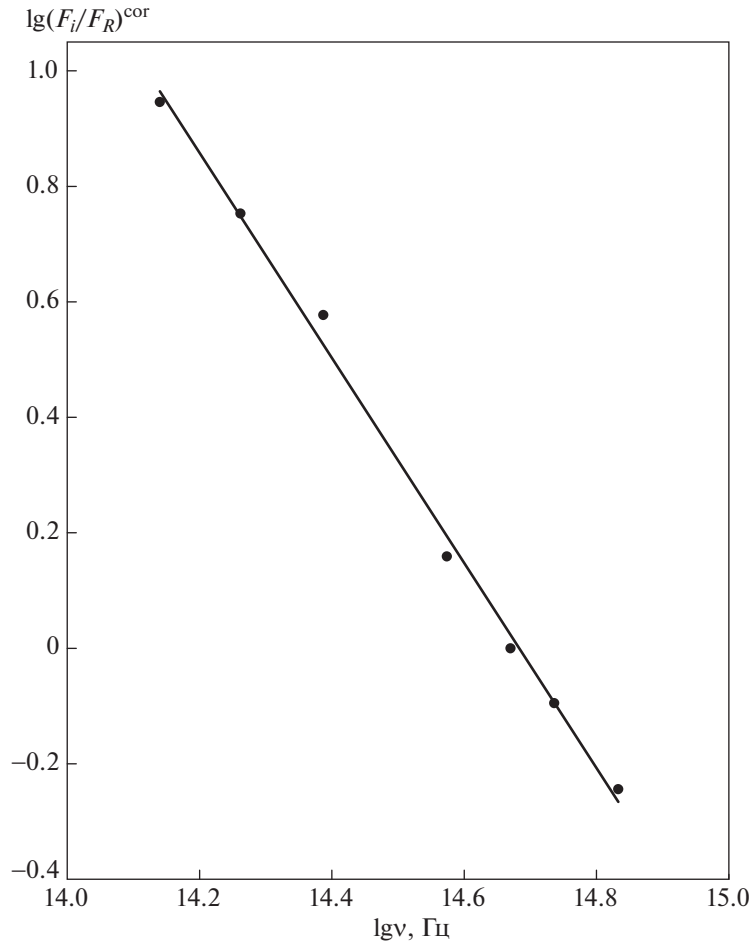


Рис. 5. Исправленное за поглощение среднее относительное SED переменного компонента.

блюдаемая цветовая переменность не означает наличия цветовой переменности у источника, ответственного за активность объекта.

Предыдущие исследования, выполненные в СПбГУ, показали, что SED переменного компонента в разных событиях может быть как различным [9, 10] так и одинаковым [11]. В связи с этим мы определили спектральные индексы переменного компонента в разные периоды наблюдений. Использовались только оптические данные из-за недостаточного количества ИК наблюдений. Результаты собраны в табл. 2.

4. АНАЛИЗ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Сопоставление параметров поляризации представлено на рис. 7. Видно, что наибольшие значения степени поляризации наблюдаются при значениях угла θ около -5° , а наибольшая частота встречаемости углов находится в области отрицательных значений от 0° до -40° .

На рис. 8 представлена связь между степенью поляризации и потоком. В общем, степень поляризации возрастает при увеличении потока, хотя разброс точек на графике велик. Вероятно, он связан с разными свойствами переменного компонента в разных событиях. Рассмотрение рис. 2 позволяет заключить, что на многих временных интервалах имеет место корреляция между степенью поляризации и блеском. Как показано в работе [8], сопоставление наблюдаемых абсолютных параметров Стокса I, Q, U для отдельных интервалов в предположении, что переменность обусловлена действием переменного по потоку компонента с неизменными относительными параметрами Стокса, позволяет найти эти параметры, если точки в пространстве (I, Q, U) лежат на прямой линии. Угловые коэффициенты прямых на плоскостях (I, Q) и (I, U) дают значения относительных параметров Стокса переменного компонента p_x, v и p_y, v . При этом нет необходимости определять предварительно вклад постоянного (на данном временном интервале) компонента. Если точки не лежат на

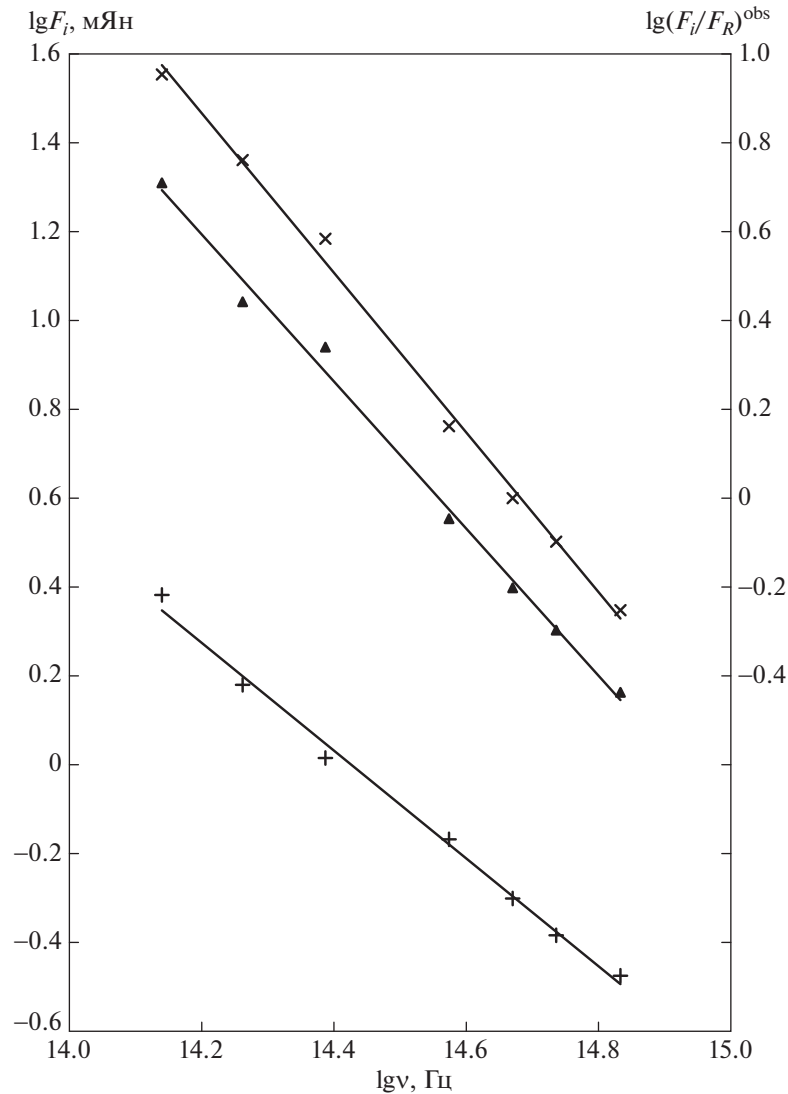


Рис. 6. К объяснению наблюдаемой цветовой переменности объекта (см. текст).

прямой, модель переменного по потоку компонента с неизменными относительными параметрами Стокса неприменима. Для примера на рис. 9 приведены результаты сопоставления абсолютных параметров Стокса для двух временных интервалов. В табл. 3 приведены значения p_x, v и p_y, v и полученные по ним значения p, v и θ, v , найденные для всех интервалов, когда изложенная выше модель применима.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Прежде всего отметим, что нет никаких оснований сомневаться в синхротронной природе переменных источников, ответственных за активность в оптико-инфракрасной области спектра, на что

указывает наблюдаемая высокая степень поляризации, коррелирующая с изменениями блеска (рис. 2), и степенное распределение энергии в спектре (рис. 5). Результаты анализа как всей совокупности наблюдательных данных, так и данных для отдельных временных интервалов, позволили найти относительные SED переменных источников как в среднем (табл. 1 и рис. 5), так и для отдельных временных интервалов (табл. 2). Для сложной вспышки 2011 г. (рис. 10) были определены как средний спектральный индекс, так и индексы для отдельных событий.

Рассмотрение табл. 2 показывает, что относительные SED в большинстве временных интервалов оказываются близкими к среднему (спектральные индексы отличаются от среднего незначительно), но в нескольких случаях (см. рис. 11) отличия

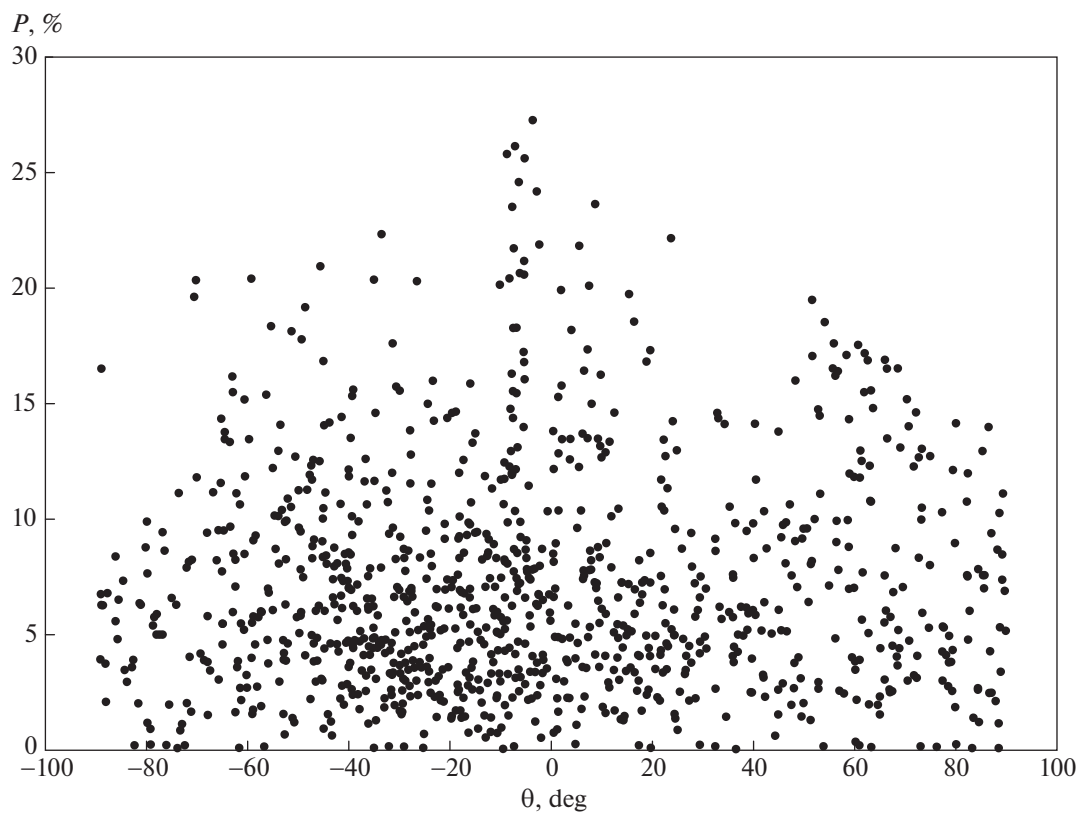


Рис. 7. Сопоставление параметров поляризации.

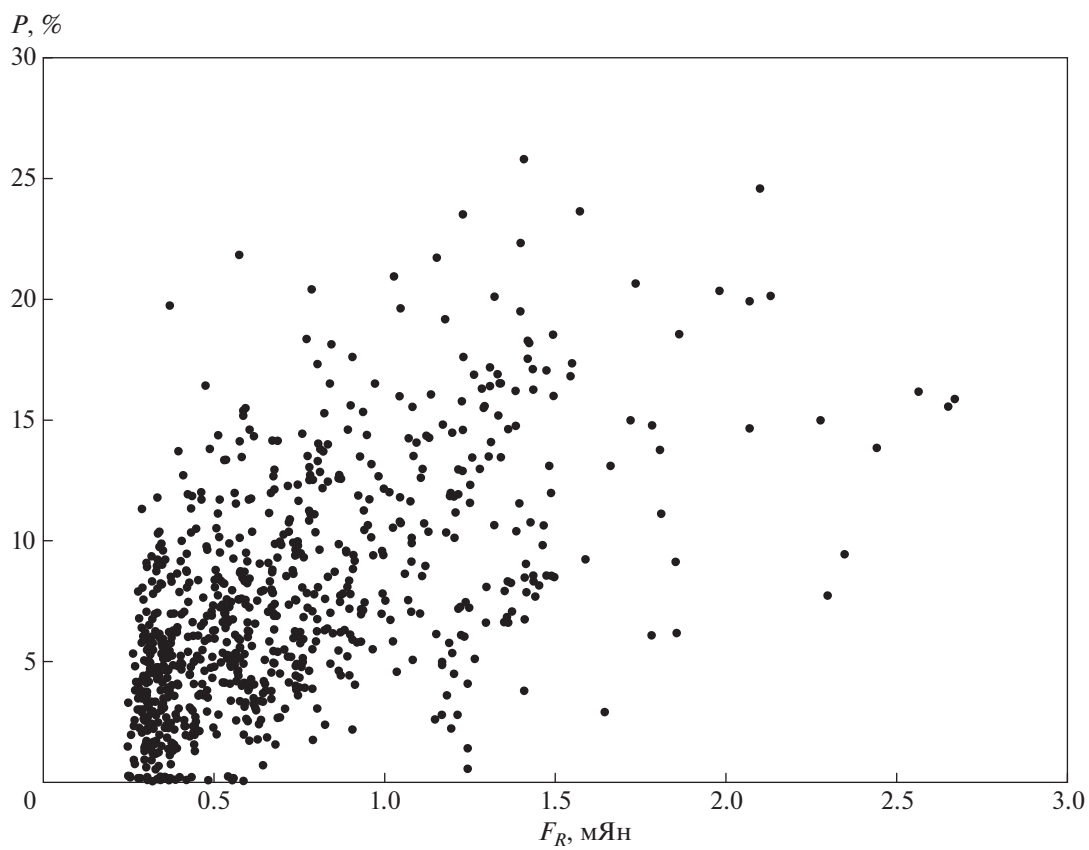


Рис. 8. Связь между степенью поляризации и потоком.

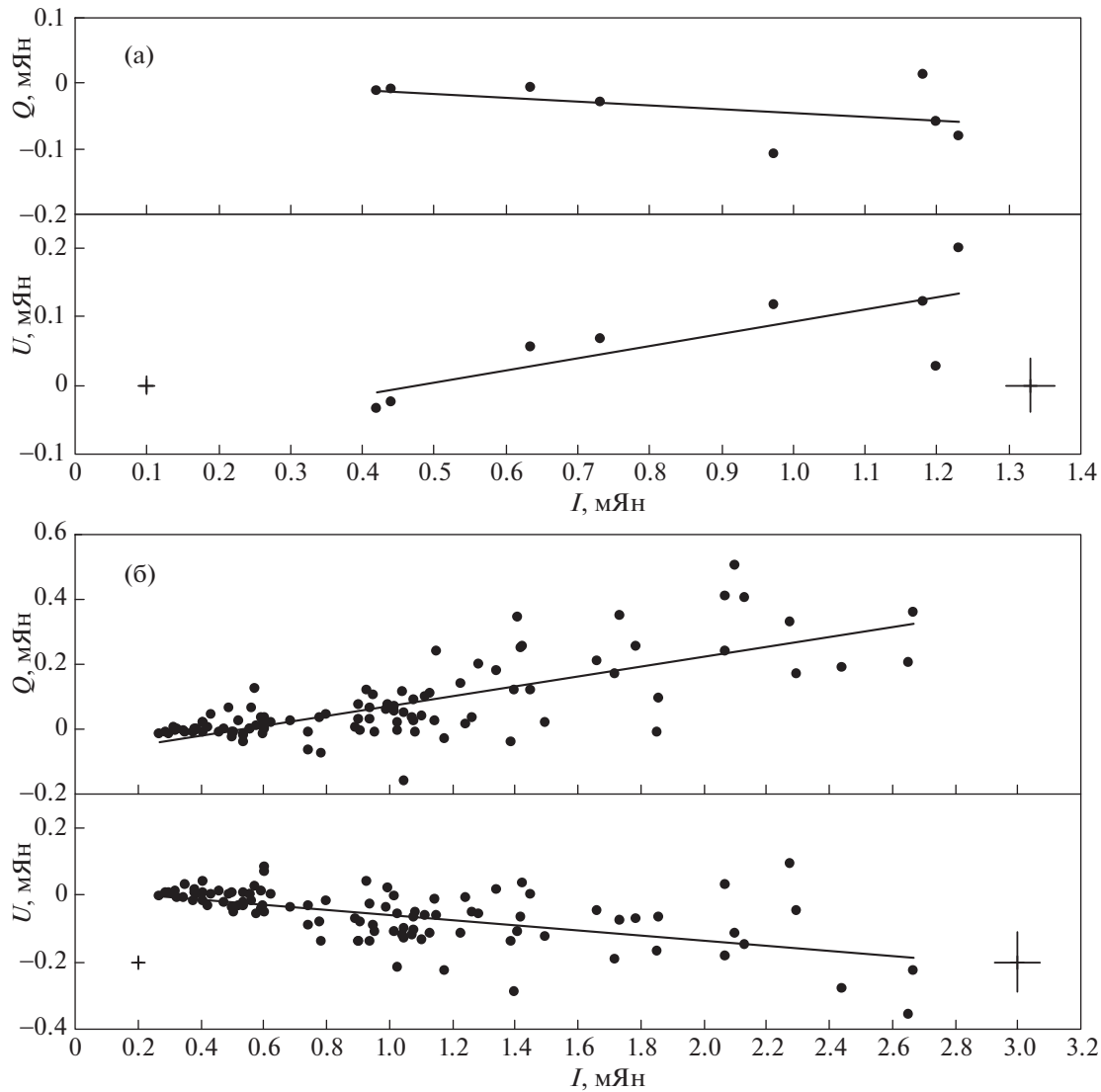


Рис. 9. Примеры сопоставления абсолютных параметров Стокса в разных событиях (интервалы JD 2454 313–363 (а) и JD 2455 504–949 (б)). Крестики показывают ошибки наблюдений.

спектральных индексов от среднего существенны (даже имея в виду большие ошибки их определения). Это не позволяет объяснить переменность потока только геометрическими причинами (изменением Доплер-фактора из-за изменения угла между лучом зрения и направлением субсветового движения излучающего ансамбля электронов). Распределения электронов по энергиям в ансамблях должны быть различными. Что же касается вспышки 2011 г., то из-за больших ошибок определенного вывода о переменности или постоянстве спектрального индекса для разных участков вспышки сделать нельзя.

Рассмотрение рис. 3 указывает на наличие тесной корреляции между изменениями блеска в оп-

тической и гамма-областях спектра. Это подтверждается рис. 12, дающим результаты вычисления дискретной корреляционной функции (DCF) [12]. Максимальный коэффициент корреляции близок к 1, причем временная задержка между изменениями в рассматриваемых диапазонах спектра близка к 0. Подобная картина наблюдается у многих блазаров, в частности, ранее такой результат уже был получен и для 4С 38.41 [4, 13]. Это говорит об идентичной локализации источников оптического и гамма-излучения в джете блазара.

К сожалению, оптических наблюдений на момент ИК вспышки (JD 245 7038) нет. Имеющиеся оптические данные, полученные за несколько дней до вспышки [14] и через несколько дней после

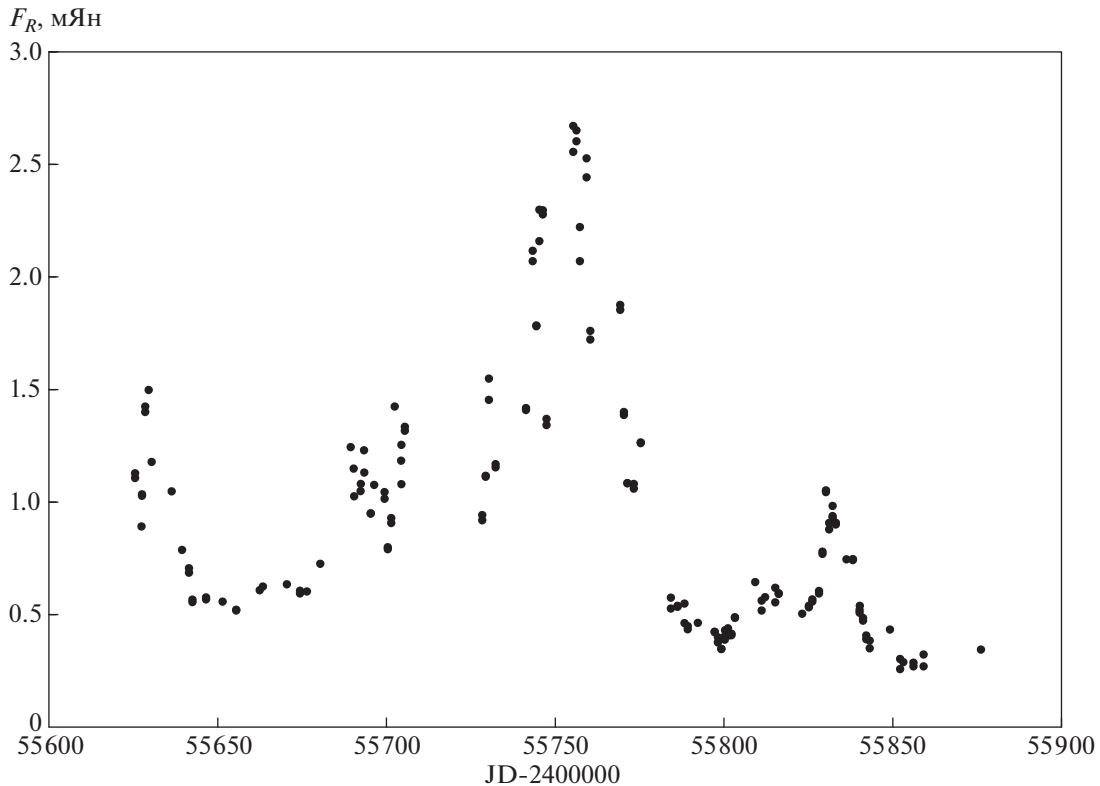


Рис. 10. Изменения потока в полосе R для вспышки 2011 г.

нее, указывают на то, что вспышка имела место и в оптическом диапазоне. Кривая блеска в гамма-диапазоне также демонстрирует кратковременную вспышку, однако менее мощную, нежели вспышки 2011 г. Недостаток наблюдательного материала не позволяет детально исследовать поведение объекта в окрестности ИК вспышки.

Остановимся на результатах поляризационного анализа. Рассмотрение зависимостей между абсолютными параметрами Стокса Q , U и параметром I (величиной F_R), примеры которых приведены на рис. 9, показывает, что, несмотря на большой разброс точек, во всех событиях зависимости в грубом приближении оказываются линейными. Это позволяет определить средние для каждого события значения параметров поляризации переменного компонента (табл. 3). С другой стороны, разброс точек, превышающий ошибки наблюдений, может указывать на наличие быстрых (и, возможно, хаотических) изменений параметров поляризации в пределах события. Кроме того, поскольку источник может быть не один и направления поляризации отдельных источников могут быть различны, степень поляризации отдельных источников может быть выше указанной в таблице.

Отметим, что направления поляризации переменного компонента в разных событиях суще-

ственно различны (такая же картина имеет место и у объекта S4 0954+658 [11]). Для случая синхротронного излучения направление поляризации связано с направлением магнитного поля. Данные последнего столбца табл. 3 указывают на то, что в разные периоды времени направление магнитного поля в излучающем источнике не было одинаковым. В случае разной локализации переменных источников в джете в разных событиях (что вполне допустимо) это может служить аргументом в пользу представления о спиралевидном магнитном поле в джете. Об этом же может говорить и найденный в [4] непрерывный поворот позиционного угла.

Как было указано в [4], у 4С 38.41 между изменениями потока в оптическом и радиодиапазонах нет корреляции, что говорит о разной локализации излучающих в этих диапазонах источников. Однако в VLBA-наблюдениях обнаруживается миллисекундный джет в позиционном угле около -40° [13]. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что во время вспышки 2011 г. (см. табл. 3) направление поляризации переменного компонента было близко к этому значению, то есть направление магнитного поля было перпендикулярно направлению джета. Именно такая картина должна наблюдаться при интерпретации вспышки как результата прохождения по джету ударной волны.

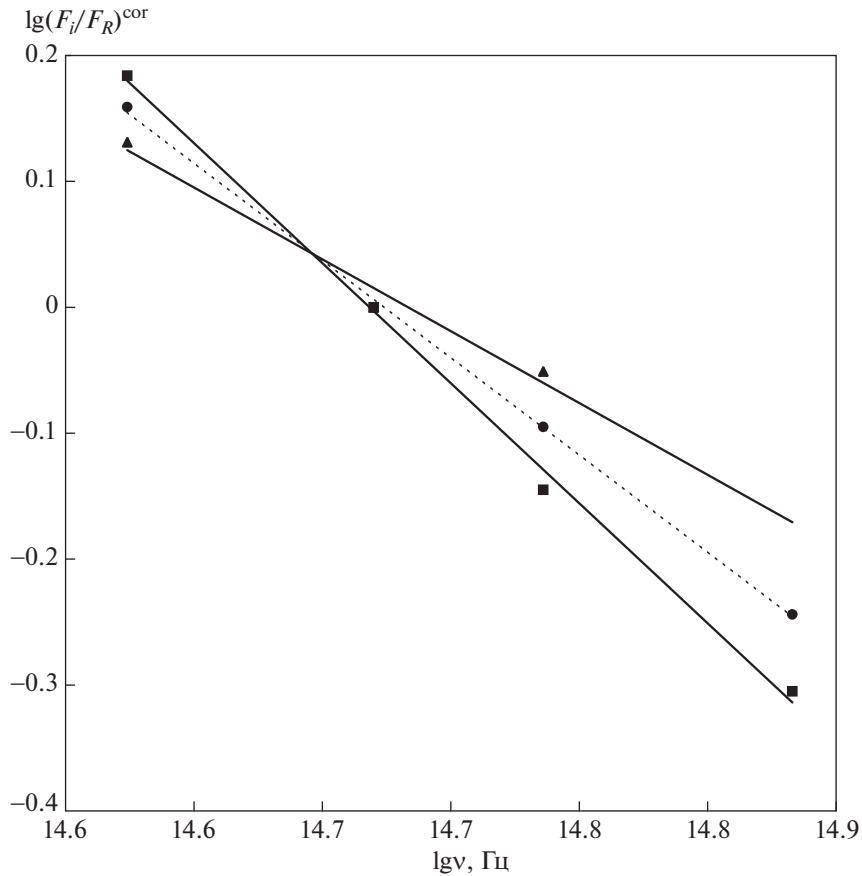


Рис. 11. Примеры относительных SED в оптическом диапазоне для разных событий: интервал JD 245 6300–6700 (квадраты) и интервал JD 245 7000–7400 (треугольники). Для сравнения приведено среднее SED, найденное по всем данным (точки).

Таблица 3. Параметры поляризации переменных источников для разных временных интервалов

Интервал JD 245 0000+	Число точек	$p_x, v \pm 1\sigma$	$p_y, v \pm 1\sigma$	p, v %	θ, v deg
4313–4363	8	-0.058 ± 0.045	0.180 ± 0.061	18.9	54
4913–5130	51	-0.109 ± 0.020	0.107 ± 0.032	15.3	68
5504–5949	89	0.151 ± 0.014	-0.077 ± 0.012	16.9	-14
6007–6245	77	0.113 ± 0.011	0.056 ± 0.012	12.6	13
6305–6699	146	-0.062 ± 0.017	0.097 ± 0.022	11.5	61
6974–7311	71	-0.017 ± 0.016	-0.090 ± 0.041	9.2	-50
5605–5646	11	0.061 ± 0.064	-0.213 ± 0.078	22.2	-37
5651–5715	27	0.233 ± 0.029	-0.080 ± 0.020	24.6	-9
5728–5799	28	0.122 ± 0.028	-0.079 ± 0.024	14.5	-16
5800–5979	29	0.066 ± 0.029	-0.209 ± 0.020	21.9	-36

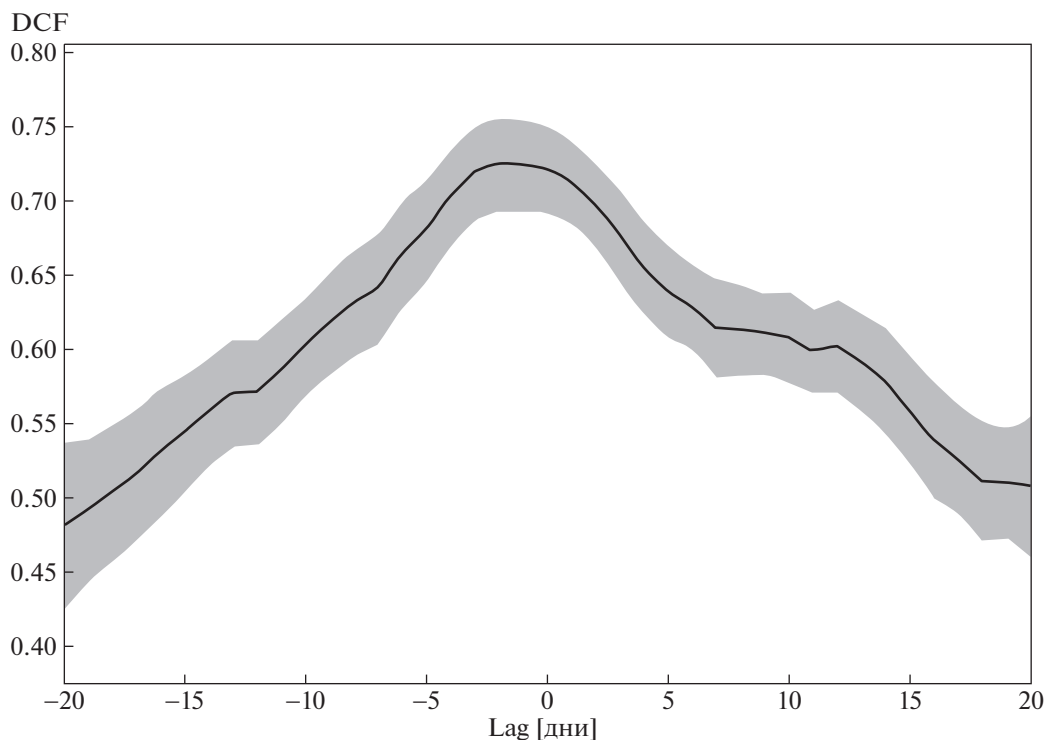


Рис. 12. Дискретная корреляционная функция (DCF).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам СПбГУ, принимавшим участие в наблюдениях, группе Бостонского университета за предоставленные поляриметрические данные. Наблюдения на телескопе АЗТ-24 ведутся в соответствии с договором между Пулковской обсерваторией и обсерваториями Рима и Терамо (Италия). Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 17-12-01029.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. I. K. Paulini-Toth, E. Preuss, and A. Witzel, *Astron. and Astrophys.* **27**, 475, (1973).
2. P. A. Strittmatter, R. F. Carswell, G. Gilbert, and E. M. Burbidge, *Astrophys. J.* **190**, 509 (1974).
3. J.-C. Algaba, S.-S. Lee, B. Rani, D.-W. Kim, *et al.*, arXiv:1805.02849 [astro-ph.HE] (2018). a
4. C. M. Raiteri, M. Villata, P. S. Smith, V. M. Larionov, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **545**, id. A48 (2012).
5. W. B. Atwood, A. A. Abdo, M. Ackermann, W. Althouse, *et al.*, *Astrophys. J.* **697**, 1071 (2009).
6. В. А. Гаген-Торн, В. М. Ларионов, Н. В. Ефимова, Е. И. Гаген-Торн, и др., *Астрон. журн.* **83**(6), 516 (2006).
7. A. R. J. Mead, K. R. Ballard, P. W. J. L. Brand, J. H. Hough, C. Brindle, and J. A. Bailey, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **83**, 183 (1990).
8. V. A. Hagen-Thorn and S. G. Marchenko, *Baltic Astronomy* **8**, 575 (1999).
9. В. А. Гаген-Торн, Д. А. Блинов, Е. И. Гаген-Торн, *Астрон. журн.* **88**(11), 1084 (2011).
10. В. А. Гаген-Торн, Н. В. Ефимова, В. М. Ларионов, Л. М. Райтери, и др., *Астрон. журн.* **86**, 555 (2009).
11. В. А. Гаген-Торн, В. М. Ларионов, А. А. Архаров, Е. И. Гаген-Торн, и др., *Астрон. журн.* **92**, 514 (2015).
12. R. A. Edelson and J. H. Krolik, *Astrophys. J.* **333**, 646 (1988).
13. S. G. Jorstad, A. P. Marscher, I. Agudo, P. S. Smith, V. M. Larionov, A. Lähteenmäki, *J. Astrophys. and Astron.* **32**, 239 (2011).
14. A. B. Danilet, K. Z. Stanek, C. S. Kochanek, T. W.-S. Holoiien, *et al.*, *Astron. Telegram № 6930* (2015) (<http://www.astronomerstelegam.org/?findmsg>).