

УДК 524.7-357

О МЕТОДЕ ПОИСКА ВРАЩЕНИЙ ПОЗИЦИОННОГО УГЛА ПОЛЯРИЗАЦИИ КВАЗАРОВ

© 2024 С. С. Савченко^{1,2,3*}, Д. А. Морозова^{1**}, С. Г. Эрштадт^{1,4}, Д. А. Блинов^{5,6},
Г. А. Борман⁷, А. А. Васильев¹, Т. С. Гришина¹, А. В. Жовтан⁷, Е. Н. Кобацкая¹,
Е. Г. Ларионова¹, И. С. Троицкий¹, Ю. В. Троицкая¹, Е. В. Шишкина¹, Е. А. Шкодкина¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

²Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия

³Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

⁴Институт астрофизических исследований, Бостонский университет, Бостон, Массачусетс 02215, США

⁵Институт астрофизики, Фонд исследований и технологий «Эллада», Ираклион GR-71110, Греция

⁶Физический факультет и Институт теоретической и вычислительной физики, Университет Крита, Ираклион GR-70013, Греция

⁷Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, 298409 Россия

Поступила в редакцию 11 сентября 2023 года; после доработки 5 декабря 2023 года; принята к публикации 5 декабря 2023 года

Наблюдения квазаров показывают, что позиционный угол плоскости поляризации приходящего от них излучения сильно варьируется во времени, в том числе обнаруживаются периоды, называемые вращениями, в которые угол изменяется упорядоченно. В работе предложен метод выделения таких событий и оценки их статистической значимости. Работа метода показана на примере длительных поляриметрических наблюдений блазаров СТА 102, ЗС 454.3 и ОТ 081. В ходе анализа кривых блеска найдено 51 вращение позиционного угла поляризации и показано, что у объектов СТА 102 и ЗС 454.3 вращения преимущественно направлены в одну сторону.

Ключевые слова: *методики: поляриметрические — методы: анализ данных — галактики: активные*

1. ВВЕДЕНИЕ

Активные ядра галактик (АЯГ), составляющие менее 7% (Roy, 1995) от общего числа галактик во Вселенной, исследуются со все более возрастающим интересом уже на протяжении более полувека. Исследования этих объектов, начавшиеся в оптическом диапазоне, в настоящее время распространились на все доступные для наблюдений диапазоны — от радио до области сверхвысоких энергий. Свойства активных галактик наиболее ярко проявляются в подклассе блазаров. Причина экстремальных свойств блазаров заключается в том, что их джет направлен практически прямо на наблюдателя и излучение джета, релятивистски усиленное, доминирует во всем диапазоне длин волн. Нетепловой спектр, сильная переменность

плотности потока, высокая и переменная поляризация являются отличительными характеристиками блазаров в оптическом диапазоне.

Переменность блеска и поляризации может происходить как на продолжительных временных масштабах порядка недель, месяцев и лет, так и на коротких шкалах — дней или даже внутри одних суток. Впервые подобная сверхбыстрая (внутрисуточная) переменность поляризации была обнаружена для внегалактического объекта, блазара ОJ 287, в 1972 году В. А. Гаген-Торном, когда внутри одного часа наблюдалось изменение степени поляризации на 2.5% и изменение позиционного угла плоскости поляризации χ около 10° (Hagen-Thorn, 1972).

Поляризация оптического излучения объясняется его синхротронной природой, а направление позиционного угла плоскости поляризации перпендикулярно проекции магнитного поля на небесную плоскость. Конкретные значения степени и

*E-mail: s.s.savchenko@spbu.ru, savchenko.s.s@gmail.com

**E-mail: d.morozova@spbu.ru, comitcont@gmail.com

позиционного угла поляризации зависят от структуры магнитного поля в излучающей области и количества излучающих областей на луче зрения наблюдателя. Как правило, плотность потока и поляризация меняются хаотическим образом, что согласуется с моделью случайного блуждания (Moore et al., 1982; Marscher, 2014; Kiehlmann et al., 2016).

Однако в некоторых случаях вращения позиционного угла плоскости поляризации являются гладкими, продолжительными, имеют большую амплитуду, что чаще всего наблюдается во время вспышечной активности в широком диапазоне длин волн. Впервые взаимосвязь между вращением угла плоскости поляризации в оптическом и радиодиапазонах была обнаружена у объекта OJ 287 в работе Kikuchi et al. (1988). Позднее, в работе Marscher et al. (2008), отмечалось похожее поведение для одной из вспышек блазара BL Lac. С помощью РСДБ-наблюдений было показано, что вращение связано с появлением новой сверхсветовой компоненты, прошедшей через ядро джета на миллиметровых длинах волн. Позже в ряде работ (например, Marscher et al. 2010) подобное поведение было обнаружено и у других блазаров во время отдельных вспышек. Однако далеко не каждое вращение сопровождается появлением новой компоненты из ядра джета на миллиметровых длинах волн (Jorstad and Marscher, 2016).

В настоящее время из предпринятых попыток поиска и анализа большого количества вращений позиционного угла плоскости поляризации выделяется проект RoboPol (Blinov and Pavlidou, 2019), представляющий собой инструмент и программу наблюдений, которые были призваны систематизированно исследовать оптическую поляризацию блазаров. В рамках программы с 2013 по 2017 год проводились регулярные наблюдения выборки блазаров, найдено 40 вращений в 24 объектах.

Поскольку направление позиционного угла поляризации связано с магнитным полем, детальное исследование переменности угла позволит получить информацию о тонкой структуре джетов блазаров. Вращения могут генерироваться как детерминированными, так и стохастическими процессами. Детерминированные процессы связаны с упорядоченными магнитными полями. Это, например, ударные волны, бегущие по джету (Marscher et al., 2008; 2010), искривление джета (Nalewajko, 2010), двухкомпонентная модель (Cohen and Savolainen, 2020). Стохастические процессы характеризуются запутанными магнитными полями и турбулентным движением плазмы (Marscher, 2014; Kiehlmann et al., 2017). Получение как можно большей выборки вращений позиционного угла позволит прояснить,

какие вращения можно объяснить детерминированными процессами, а какие связаны с хаотическими изменениями. Кроме того, поскольку многие вращения наблюдаются при вспышечной активности в гамма-диапазоне (Marscher et al., 2010; Blinov et al., 2018), их исследование поможет обеспечить лучшее понимание физической взаимосвязи оптического синхротронного и высокоэнергетического излучения и определение структуры магнитного поля в излучающей области.

С запуском инструмента IXPE (Imaging X-ray Polarimetry Explorer) и первыми измерениями рентгеновской поляризации блазаров (Di Gesu et al., 2022) большой интерес стал представлять многоволновой анализ данных, получаемых в периоды вращений. Так, Di Gesu et al. (2023) обнаружили очень быстрое вращение угла поляризации в рентгеновском диапазоне для Mrk 421 (около 85° в день в течение пяти дней), в то время как оптический позиционный угол оставался постоянным. Такие сопоставления дают очень важную информацию о расположении излучающих областей и структуре магнитного поля (Di Gesu et al., 2023). В настоящее время активно обсуждается возможная связь астрофизических нейтрино с блазарами. По крайней мере, некоторые вращения, которые сопровождаются гамма-вспышками с повторяющейся структурой (Blinov et al., 2021), в свою очередь могут быть связаны с нейтрино (Novikova et al., 2023), поэтому создание большой выборки вращений в перспективе важно при поиске корреляций с событиями обнаружения высокоэнергичных нейтрино.

Исследование вращений представляет собой непростую задачу. Во-первых, вращения — это относительно редкие события, поэтому необходимы длительные ряды наблюдений. Во-вторых, измеренные величины угла плоскости поляризации содержат неоднозначность $\pm\pi n$, разрешение которой накладывает еще более строгие требования к плотности рядов. Таким образом, задача целенаправленного поиска вращений и их выделения на кривой блеска является сложной в первую очередь с наблюдательной точки зрения.

В данной работе предлагается новый метод обнаружения вращений угла поляризации и оценки их достоверности с учетом опыта подобных исследований в предыдущих работах (например, Blinov et al., 2015, 2016a,b; Kiehlmann et al., 2016; Blinov and Pavlidou, 2019 и др.).

Структура статьи следующая. Получение наблюдательных данных мы описываем в разделе 2. В разделе 3 дано описание метода поиска вращений. Результаты применения этого метода к наблюдениям трех блазаров приведены в разделе 4. Раздел 5 содержит выводы и заключение.

2. ОПТИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

В работе использовались данные, полученные авторами в рамках программы мониторинга выборки ярких в гамма-диапазоне блазаров, проводящейся в СПбГУ¹). Оптические фотометрические и поляриметрические данные были получены в полосе R на следующих телескопах: LX-200 (40-см, СПбГУ, г. Петергоф), АЗТ-8 (70-см, Крымская астрофизическая обсерватория, п. Научный), Perkins (1.83-м, Лоуэлловская обсерватория, г. Флагстаф, Аризона, США). Телескопы LX-200 (CCD-камера FLI MicroLine ML4710) и АЗТ-8 (CCD-камера SBIG ST-7) оснащены практически идентичными поляриметрами Санкт-Петербургского государственного университета. Поляриметрические наблюдения проводились с использованием двух пластин Савара, повернутых друг относительно друга на 45° . Наблюдая поочередно с каждой из пластин, можно получить относительные параметры Стокса q и u из двух разделенных изображений каждого источника в поле. Телескоп Perkins оснащен инструментом PRISM²) с CCD-камерой и поляриметром с вращающейся полуволновой пластинкой. Для определения поляризации производится четыре измерения при позиционных углах 0° , 45° , 90° и 135° .

На телескопах АЗТ-8 и Perkins измерения поляризации проводились в фильтре R , на LX-200 — в «белом свете» (без фильтра) с центральной длиной волны $\lambda_{\text{eff}} = 670$ нм, а с осени 2018 г. — также и в фильтре R . Инструментальная поляризация определялась по звездам, расположенным вблизи объекта, в предположении, что их излучение неполяризовано. Как правило, ошибки не превышают 1% для степени поляризации и 10° — для позиционного угла в случае объектов со звездной величиной около 17^m .

Детали наблюдений и обработки данных, полученных на LX-200 и АЗТ-8, приведены в работе Larionov et al. (2008), а на телескопе Perkins — в Jorstad et al. (2010).

Мы использовали данные по трем объектам: ЗС 454.3 (2005–2021 гг.), СТА 102 (2005–2022 гг.) и ОТ 081 (2009–2021 гг.). Рисунок 1 показывает поведение степени и угла поляризации в зависимости от времени для указанных объектов.

¹<https://vo.astro.spbu.ru/program/>

²<https://www.bu.edu/prism/>

3. МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ВРАЩЕНИЙ ПОЗИЦИОННОГО УГЛА ПОЛЯРИЗАЦИИ

В этом разделе мы описываем методику поиска значимых вращений позиционного угла плоскости поляризации в полученных нами наблюдательных данных. Возникновение таких событий, как правило, происходит внезапно, и в наблюдаемой кривой позиционного угла они распределены неравномерно. Наличие таких событий в коротких наблюдательных сессиях зачастую выявляется фактически на глаз, по наличию или отсутствию крупномасштабных трендов на графике позиционного угла, после чего выделяется участок кривой, содержащий вращение, и определяются параметры последнего. Программа систематического поиска вращений, основанная на многолетних наблюдениях, должна оперировать более строгим критерием, позволяющим выполнить такой поиск однородно по всей кривой блеска с целью получения по возможности более полной выборки вращений. Например, в работе Blinov et al. (2015) критерием того, что участок кривой позиционного угла содержит вращение, является монотонное и значимое (превышающее ошибки измерений) изменение позиционного угла последовательно как минимум в четырех наблюдениях и с полной амплитудой более 90° подряд. Такой подход позволил обнаружить 14 вращений в кривых блеска 12 блазаров, полученных в наблюдательном сезоне 2013 года. Аналогичный подход применяется и в ряде других работ (например, Blinov et al., 2016a, b; Liodakis et al., 2017). Несомненным плюсом такого способа поиска вращений является его простота и предельная прозрачность результатов, однако он не лишен и весьма существенного недостатка: жесткое требование монотонности изменения позиционного угла приводит к тому, что отдельные точки, отклоняющиеся от монотонного поведения либо разбивают одно длительное вращение на несколько отдельных эпизодов, либо вращение не детектируется вообще. Такие отклоняющиеся от монотонности точки могут быть как проявлением шумов измерений, так и следствием наличия нескольких источников поляризованного оптического излучения в активном ядре. Даже если один источник дает длительное и гладкое вращение вектора поляризации, кратковременные вспышки других источников с отличающимися параметрами поляризации могут приводить к тому, что наблюдающиеся суммарные параметры Стокса демонстрируют сложное поведение и позиционный угол поляризации во время таких вспышек отклоняется от монотонного поведения, сохраняя при этом общий тренд. Авторы методики отмечают эту проблему и вручную объединяют отдельные части длительных эпизодов вращений, разбитые периодами немонотонности (см., например, рис. 2 в работе Blinov et al., 2015).

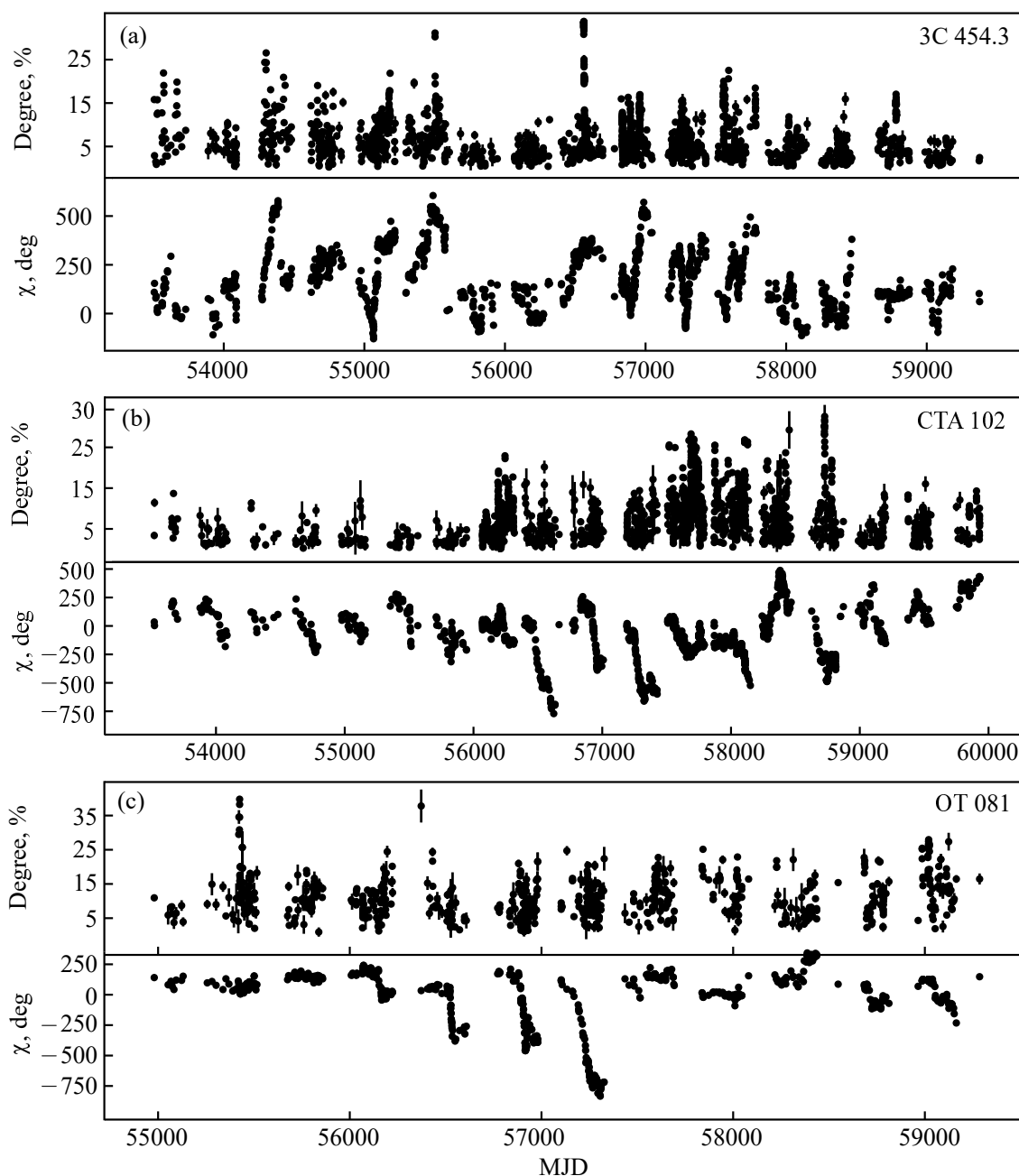


Рис. 1. Используемые в работе наблюдательные данные: зависимости степени и угла поляризации от времени для 3C 454.3 (a), CTA 102 (b) и OT 081 (c). Из-за большого диапазона позиционных углов бары ошибок для них меньше размера значков.

В данной работе мы предлагаем альтернативный подход к критерию выделения периодов вращения наблюдаемого вектора поляризации. Новый критерий должен обладать следующими свойствами:

1. Допускать присутствие отдельных эпизодов немонотонности внутри вращения для решения проблемы разбиения вращения на отдельные части.
2. Не быть привязанным к полной амплитуде вращения. Наблюдения показывают, что могут существовать сравнительно продолжительные, но

медленные вращения, так что полная амплитуда оказывается невысокой. Наложение жесткого ограничения на амплитуду вращения может привести к потере некоторой доли таких событий, к тому же вносит в процесс измерения субъективный параметр — ограничение на минимальную величину амплитуды вращения.

3. Должен выдавать некоторую величину, характеризующую надежность обнаружения вращения, то есть позволяющую оценить вероятность того, что такое вращение возникло случайным обра-

зом. Дело в том, что даже в отсутствие источника, производящего излучение с реально монотонно вращающимся вектором поляризации, переменное излучение турбулентно изменяющихся во времени отдельных ячеек джета может произвольно складываться таким образом, что суммарная поляризация демонстрирует монотонно вращающийся угол, причем на довольно продолжительном участке времени (Marscher, 2014; Kiehlmann et al., 2016). В многолетних наблюдательных данных такие случайные вращения могут присутствовать в немалом количестве, и должен быть критерий, позволяющий отсеять малозначимые вращения.

Прежде чем перейти непосредственно к описанию критериев, отметим необходимость общей предварительной обработки кривой позиционного угла. Во-первых, должна быть решена проблема неоднозначности позиционного угла χ : поскольку его величина определяется с точностью до $\pm\pi n$, вращения неизбежно будут содержать разрывы при прохождении угла через $0/180$ градусов. На практике стандартным подходом к решению этой проблемы (см., например, Abdo et al., 2010; Ikejiri et al., 2011; Blinov et al., 2015) является предположение о гладком поведении позиционного угла. В таком случае, если две соседние точки отличаются больше, чем на 90° , ко второй добавляется значение $\pm\pi n$, где n подбирается таким образом, чтобы минимизировать разницу. Подобный подход позволяет восстановить длительные вращения с амплитудой в сотни градусов, однако может быть применен только при наличии достаточно плотного наблюдательного ряда.

Если в наблюдениях имеется большой пропуск, то уже нельзя считать, что между значениями в двух соседних точках есть корреляция. В данной работе мы применяем описанный выше подход для разрешения неоднозначности позиционного угла, однако при больших пропусках в наблюдениях нельзя гарантировать, что соседние точки связаны, и следует отсчитывать позиционный угол с нуля, а возможное вращение при этом разрывается на отдельные события. Конкретный временной промежуток, после которого нельзя считать позиционные углы связанными, зависит от объекта и его локального поведения. Верхнюю границу этого промежутка можно получить из автокорреляционной функции позиционного угла поляризации (он не может быть больше, чем промежуток, на котором сохраняется высокая корреляция между значениями χ). На рис. 2 приведена автокорреляционная функция, вычисленная по методу LDCF (Welsh, 1999) для трех источников, рассматриваемых в данной работе. Как следует из рис. 2, даже на достаточно длительном промежутке времени значения χ сильно коррелируют, однако очевидно, что

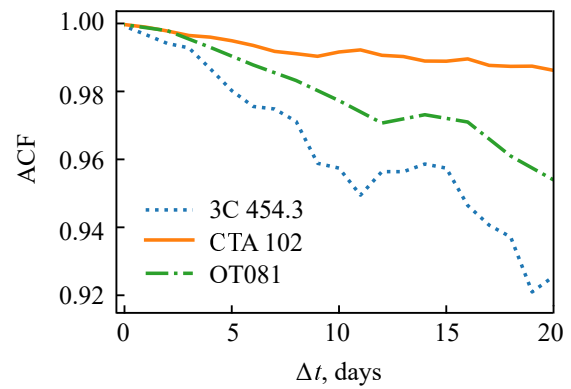


Рис. 2. Автокорреляционная функция для позиционного угла поляризации объектов 3C 454.3, СТА 102 и OT 081.

основной вклад тут дают спокойные состояния, без вращений. В таком случае ограничение на максимальный пропуск в наблюдениях даст средняя скорость вращения поляризации: если за время пропуска угол поляризации успеет повернуться более чем на 180° , разрешение неоднозначности $\pm\pi n$ станет невозможным. Характерные значения скорости вращения вектора поляризации, опубликованные в литературе, составляют около десяти или чуть больше градусов в сутки (Blinov et al., 2015; Kiehlmann et al., 2016), следовательно, при пропуске в наблюдениях порядка 10–15 дней возникнет полная неопределенность в значении угла. Более быстрые вращения потребуют более плотных наблюдений (Kiehlmann et al., 2021).

Другим важным моментом является сглаживание наблюдательных данных. Относительная точность определения параметров поляризации не превышает точность фотометрических измерений. В результате ошибка оценок позиционного угла может значительно превосходить измеренное изменение этой величины между соседними наблюдениями. При этом только значимые изменения χ важны для поиска и анализа вращений. В последнее время большое распространение получил алгоритм сглаживания данных на основе байесовских блоков (Scargle et al., 2013). Основная идея метода заключается в том, чтобы заменить наблюдаемый временной ряд на кусочно-постоянную функцию: временной ряд разбивается на неперекрывающиеся интервалы (блоки), в которых зависимая переменная (в нашей задаче — позиционный угол χ) описывается постоянным значением. То есть разбиение на блоки выполняется таким образом, что измеряемая величина внутри блоков изменяется недостаточно сильно, чтобы признать эти изменения значимыми. Отдельные же блоки представляют собой периоды, между которыми величина изменилась значимо. Среди всех возможных разбиений ищется такое, что минимизирует невязку

между реальными наблюдениями и аппроксимирующей кусочно-постоянной функцией. Понятно, что наилучший результат даст разбиение, в котором каждая наблюдательная точка выделяется в отдельный блок, однако такое разбиение лишено смысла, поскольку не сглаживает данные. Для решения этой проблемы задается априорное количество блоков, меньшее числа наблюдательных точек, в результате чего близкие по величине χ соседние точки объединяются в один блок. Установленное априори количество блоков разбиения выбирается из следующих соображений: при отсутствии сигнала, то есть когда позиционный угол не изменяется, а наблюдаемые изменения возникают только из-за ошибок, вероятность выделить случайное изменение в отдельный ложный блок должна быть меньше 0.05. Отметим, что выбранное априорное количество блоков разбиения не является итоговым числом блоков, на которое будет разбит временной ряд: оно является ожидаемой величиной количества блоков до того, как разбиение будет начато. В случае сильно переменного сигнала итоговое количество блоков будет больше, а в случае отсутствия переменности все точки могут быть объединены в один блок. В этом заключается байесовская часть метода: как и в любом байесовском моделировании сначала задается априорная модель, которая в процессе моделирования изменяется согласно имеющимся наблюдательным данным. Непосредственный алгоритм поиска оптимального разбиения представлен в статье Scargle et al. (2013). После того как разбиение закончено, точки, попавшие в общий блок, осредняются при помощи вычисления средневзвешенного значения (то есть учитываются ошибки индивидуальных измерений). Преимущество такого подхода в сравнении с другими методами сглаживания, например бегущим средним, заключается в отсутствии «размазывания» резких изменений величины: резкие изменения всегда выделяются в отдельный блок, что важно в контексте нашей задачи.

В дальнейшей части нашей работы мы используем описанный выше подход для сглаживания наблюдаемых кривых позиционного угла. Все вычисления выполняются со сглаженными кривыми, однако для иллюстративности на рисунках, содержащих зависимость позиционного угла от времени, мы наносим как сглаженные кривые (в виде кусочно-постоянных кривых), так и исходные наблюдения (в виде точек).

3.1. Биномиальный критерий

В основе критерия, удовлетворяющего указанным требованиям, мы предлагаем использовать односторонний биномиальный тест. В отсутствие выделенного направления вращения вектора поляризации χ (то есть когда величина χ испытывает

только хаотические изменения), оба направления изменения угла между двумя соседними измерениями равновероятны. На любом участке кривой с таким хаотическим изменением угла поляризации количество изменений угла по часовой стрелке должно в среднем уравниваться количеством изменений угла против часовой стрелки. Если же у вектора поляризации есть доминирующее направление вращения, то число изменений угла в эту сторону будет, в среднем, преобладать.

Естественно, ошибки измерений, случайность, а также стохастические процессы в джете приводят к тому, что в первом случае (нет упорядоченного вращения) число изменений χ в обе стороны не будет строго равным, а во втором случае (есть вращение) не все изменения будут односторонними. Отделить один случай от другого и поможет биномиальный тест.

Пусть в процессе наблюдений обнаружено N_{obs} изменений величины χ , причем из них N_{cw} произошли по часовой стрелке и N_{ccw} — против (естественно, $N_{\text{obs}} = N_{\text{cw}} + N_{\text{ccw}}$). Пусть также, для примера, $N_{\text{ccw}} > N_{\text{cw}}$. Вероятность того, что такой дисбаланс может возникнуть случайно, определяется через биномиальные коэффициенты следующим выражением:

$$p_{\text{binom}} = 0.5^{N_{\text{obs}}} \sum_{i=N_{\text{ccw}}}^{N_{\text{obs}}} \binom{N_{\text{obs}}}{i}. \quad (1)$$

Нулевой гипотезой в такой формулировке является предположение о том, что оба направления изменения угла χ равновероятны (нет упорядоченного вращения). Если полученное значение величины p не близко к нулю (не ниже выбранного заранее некоторого уровня значимости), то нельзя отвергнуть нулевую гипотезу и, таким образом, подтвердить наличие вращения. Если же величина p оказалась ниже заданного уровня значимости, то на данном участке вероятно наличие выделенного направления вращения вектора поляризации.

3.2. Критерий на основе T -теста

Слабой стороной предложенного критерия на основе биномиального теста можно назвать его абстрагирование от скорости изменения угла поляризации и от того, как средняя скорость вращения соотносится с разбросом скоростей между отдельными измерениями. Для решения этой проблемы мы предлагаем второй тест, который основывается на требовании наличия значимой средней скорости вращения.

Пусть есть N -изменений угла поляризации между соседними наблюдениями. Если на данном участке кривой блеска изменения χ определяются

только стохастическими процессами, без устойчивого вращения, то средняя скорость вращения будет близка к нулю. В противном же случае, если помимо стохастических изменений есть также и устойчивое вращение, то усредненная по отдельным измерениям скорость будет отличаться от нулевой, обнаруживая постоянный компонент в изменении позиционного угла. Статистические тесты (Шапиро–Уилка и Q–Q) показали, что на отдельных участках кривой позиционного угла, на которых производится поиск вращений, распределение скоростей изменения угла близко к нормальному, поэтому проверку значимости отличия средней скорости от нуля можно выполнить при помощи Т-теста Стьюдента.

Обозначим χ_i и χ_j величины угла поляризации, измеренные в моменты времени t_i и t_j соответственно. Тогда за скорость изменения угла поляризации на этом участке можно взять

$$r_{ij} = \frac{\chi_i - \chi_j}{t_i - t_j}.$$

Если известны ошибки измерений поляризационного угла σ_{χ_i} и σ_{χ_j} , то ошибка скорости будет

$$\sigma_{r_{ij}} = \frac{\sqrt{\sigma_{\chi_i}^2 + \sigma_{\chi_j}^2}}{t_i - t_j}. \quad (2)$$

В таком случае средневзвешенная скорость изменения угла на некотором участке будет равна

$$\bar{r} = \frac{\sum_{k=1}^N \frac{r_k}{\sigma_{r_k}^2}}{\sum_{k=1}^N \frac{1}{\sigma_{r_k}^2}}, \quad (3)$$

а ее стандартное отклонение:

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N \frac{(r_k - \bar{r})^2}{\sigma_{r_k}^2}}{\frac{N-1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{1}{\sigma_{r_k}^2}}}. \quad (4)$$

Имея эти величины, можно вычислить t -статистику Стьюдента для проверки нулевой гипотезы о равенстве нулю средней скорости изменения позиционного угла:

$$t = \frac{\bar{r}}{\sigma_r / \sqrt{N}}, \quad (5)$$

откуда стандартным способом при помощи распределения Стьюдента вычисляется p -значение для данного количества степеней свободы $\nu = N - 1$:

$$p_{t\text{-test}}(t) = \frac{\Gamma\left(\frac{\nu+1}{2}\right)}{\sqrt{\nu\pi}\Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)} \left(1 + \frac{t^2}{\nu}\right)^{-\frac{\nu+1}{2}}. \quad (6)$$

Бликие к нулю величины p означают низкую вероятность того, что стохастический процесс породит такое согласованное изменение позиционного угла и приведет к возникновению средней скорости, значимо превышающей наблюдающийся разброс. В противном случае средняя скорость позиционного угла на этом участке не отличается значимо от нуля и нельзя сказать, что имеет место вращение.

3.3. Обсуждение критериев

Отметим, что описанные критерии отвечают всем перечисленным выше требованиям:

- 1) не требуется жесткой монотонности изменения угла поляризации, лишь бы наблюдалось преобладание выделенного направления над шумовой составляющей;
- 2) полная амплитуда вращения и средняя скорость не играют никакой роли, и если точность измерений позволяет, то при достаточном количестве наблюдений может быть обнаружено сколь угодно малое и медленное вращение;
- 3) имеется численная характеристика надежности вращения.

Также важным моментом является то, что количество наблюдательных точек внутри вращения естественным образом влияет на его значимость, определенную по обоим критериям. Поскольку направление χ может демонстрировать случайное блуждание, то короткие периоды, когда позиционный угол монотонно повернулся несколько раз подряд, могут возникать спонтанно, без наличия механизмов, генерирующих истинное вращение. Критерий, использовавшийся в предыдущих работах и требующий для обнаружения вращения четыре или более последовательных односторонних изменений позиционного угла, не обладает таким свойством, в результате чего для коротких отрезков наблюдаемой кривой возрастает вероятность ложного срабатывания, так как случайно изменяющийся позиционный угол с вероятностью 0.0625 повернется четыре раза подряд в одну сторону. Использующееся в этих работах ограничение на минимальную амплитуду вращения лишь отчасти решает эту проблему, поскольку при низкой степени поляризации случайные блуждания позиционного угла могут быть очень велики (Larionov et al., 2016).

Сравнение результатов выделения вращений при помощи предложенных критериев с методом, основанным на поиске строго монотонного изменения позиционного угла, представлено на рис. 3 на примере двух объектов, S4 1749+70 (a) и 3C 454.3 (b), по данным Robopol (Blinov et al., 2020). В этой работе для обнаружения вращения требовалось минимум четыре односторонних изменения χ подряд, что в биномиальном критерии

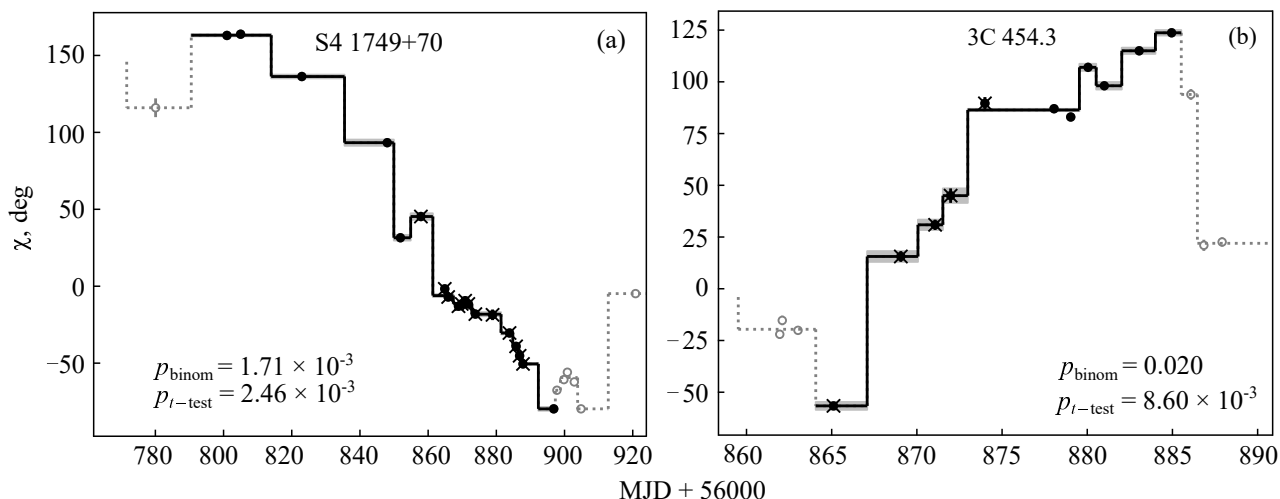


Рис. 3. Примеры вращений, выделенных при помощи предложенных критериев (по данным Robopol, Blinov et al., 2020). Кружки с барами ошибок — наблюдательные данные, линии — данные, сглаженные при помощи байесовских блоков. Полные кружки и темная сплошная линия показывают область выделенного вращения, пустые кружки и пунктирная линия — области вне вращений. Числа — p -значения вращений, определенные по биномиальному критерию (p_{binom}) и по Т-тесту ($p_{t\text{-test}}$). Для сравнения крестиками показаны точки, приписанные к вращениям по результатам применения критерия, основанного на строгой монотонности изменения позиционного угла, в работе Blinov et al. (2016a).

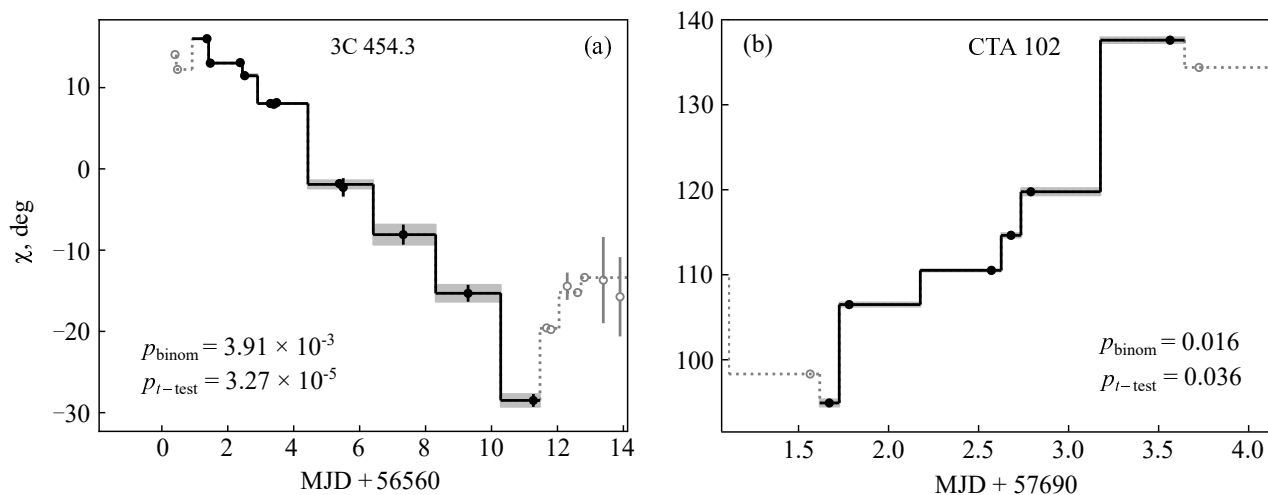


Рис. 4. Примеры найденных вращений с низкой (менее 90°) амплитудой на основании наших наблюдательных данных. Структура рисунка аналогична рис. 3.

соответствует p -значению 0.0625, поэтому для поиска вращений мы использовали это ограничение в качестве уровня значимости наших тестов. На указанном рисунке мы привели и данные, которые были включены во вращения, найденные по критерию монотонности изменения χ в работе Blinov et al. (2016a) Поскольку в этой работе не было ограничения на максимальный пропуск в наблюдениях, который бы «разорвал» вращение, для корректного сравнения с их результатом мы также не накладывали никаких ограничений. Видно, что предложенные нами критерии позволяют выделить более длительные вращения, включив в них новые точки, отделенные от остальных

коротким периодом немонотонности. Например, в случае объекта S4 1749+70 (рис. 3a) всего лишь одна точка (в районе MJD 58852) отклоняется от монотонности, в результате чего все предыдущие точки теряются и не включаются во вращение.

На рис. 4 показаны примеры надежно установленных вращений с низкой амплитудой (меньше 90°), найденные у объектов 3C 454.3 (рис. 4a) и STA 102 (рис. 4b) в наших наблюдательных данных. Несмотря на то, что в обоих случаях позиционный угол монотонным образом меняется на протяжении значительного количества наблюдений, нижняя граница на амплитуду вращения, используемая в прошлых работах для защиты

от ложных срабатываний, не позволила бы обнаружить эти вращения. Вычисленные p -величины обоих критериев (см. рис. 4) показывают, что эти вращения статистически значимы.

Возможность обнаружения вращений с низкой амплитудой особенно важна, поскольку наблюдаемая амплитуда вращений может быть мала при наличии в исследуемом объекте нескольких источников поляризованного (и неполяризованного) излучения. В таких случаях наблюдаемый вектор Стокса представляет собой сумму векторов отдельных источников, а наблюдаемое направление вектора поляризации излучения будет зависеть не только от направлений векторов поляризации в этих источниках, но и от их относительной интенсивности и степени поляризации. Так, если в объекте есть яркий постоянный источник поляризованного излучения и относительно слабый источник, демонстрирующий вращение угла χ , то наблюдатель вместо вращения вектора поляризации будет наблюдать его колебания относительно выделенного направления, соответствующего направлению поляризации в постоянном источнике, причем амплитуда колебаний будет тем меньше, чем меньше светимость и степень поляризации переменного источника. Предложенный нами метод позволяет выделять полупериоды таких малых колебаний, если ошибка измерения угла поляризации много меньше амплитуды колебаний, однако дополнительной проверкой тут может послужить исследование структур, очерчиваемых вектором Стокса на плоскости $Q-U$ (см., например, Uemura et al., 2016; Shablovinskaya and Afanasiev, 2019).

3.4. Численные эксперименты

Для проверки работоспособности предложенных критериев мы провели два численных эксперимента, основная цель которых — продемонстрировать, с одной стороны, низкую вероятность обнаружения вращений, возникающих из-за случайного блуждания вектора поляризации в пределах ошибок измерения, а с другой — высокую вероятность обнаружить истинное вращение в зашумленных данных.

Для первого эксперимента мы сформировали искусственные кривые позиционного угла поляризации, которые не содержат вращений: истинное значение χ для них постоянно, но измерения содержат ошибку, ведущую к разбросу наблюдаемых значений χ . На практике ошибка позиционного угла увеличивается при уменьшении степени поляризации. Для слабо поляризованных объектов она может быть весьма велика, и случайные отклонения измеренных значений χ могут выстроиться в последовательное вращение. Если погрешности

измерения позиционного угла известны, то предложенный нами метод устойчив к такого рода ошибкам, поскольку вычисление p_{binom} и $p_{t\text{-test}}$ предваряется сглаживанием при помощи байесовских блоков: случайные изменения χ в пределах ошибок не дают значимого изменения этой величины между соседними измерениями, так что такое блуждание будет усреднено в пределах одного блока, даже если ошибки очень велики.

Однако на практике может оказаться, что ошибки позиционного угла недооценены (например, вследствие какого-либо неучтенного фактора). В таком случае случайное изменение χ может быть принято за значимое, и это измерение будет выделено в отдельный блок. При сильной недооценке ошибок измерения позиционного угла это может привести к тому, что будет выделено несколько таких отдельных блоков, которые с некоторой вероятностью могут продемонстрировать гладкое изменение χ . Мы проверили такую возможность, введя в симуляцию дополнительный фактор f_σ , определяющий, насколько сильно недооценена ошибка позиционного угла:

$$\sigma_{\chi, \text{used}} = f_\sigma \sigma_{\chi, \text{true}},$$

где $\sigma_{\chi, \text{true}}$ — истинное значение ошибки позиционного угла, использовавшееся при создании искусственных кривых, а $\sigma_{\chi, \text{used}}$ — значение, использовавшееся при поиске вращений.

В результате численный эксперимент выглядит следующим образом: мы сформировали 1000 случайных кривых позиционного угла, каждая из которых состоит из 1000 точек с постоянным значением χ , к которому добавлены распределенные по нормальному закону случайные ошибки. Для каждой кривой мы выполнили процедуру поиска вращений, варьируя при этом значение f_σ в пределах от 0.1 до 1.0 (то есть в экстремальном случае ошибка измерения χ недооценена в 10 раз). Тут важно отметить, что абсолютная величина добавляемой ошибки не имеет значения, поскольку вероятность того, что измеренная величина χ случайным образом несколько раз подряд изменится в одну и ту же сторону, не зависит от величины ошибки. Разные значения добавляемой ошибки могут изменить только среднюю скорость такого ложного вращения, но к скорости предложенный нами метод не чувствителен.

На рис. 5 показано среднее количество обнаруженных случайных вращений в кривой позиционного угла, состоящей из 1000 измерений, в зависимости от того, насколько сильно недооценены ошибки. Видно, что сглаживание наблюдений при помощи байесовских блоков надежно предохраняет от обнаружения случайных блужданий позиционного угла внутри ошибок (даже если ошибки

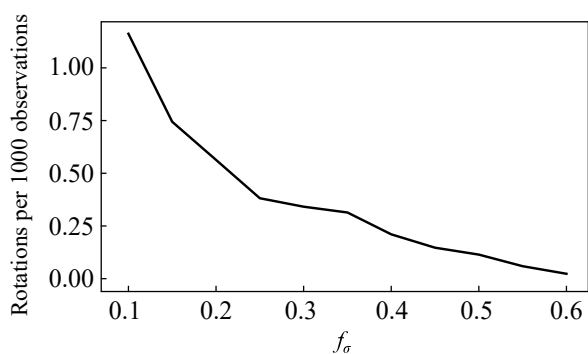


Рис. 5. Среднее количество обнаруженных случайных вращений на тысячу измерений в зависимости от недооценки ошибки измерения позиционного угла.

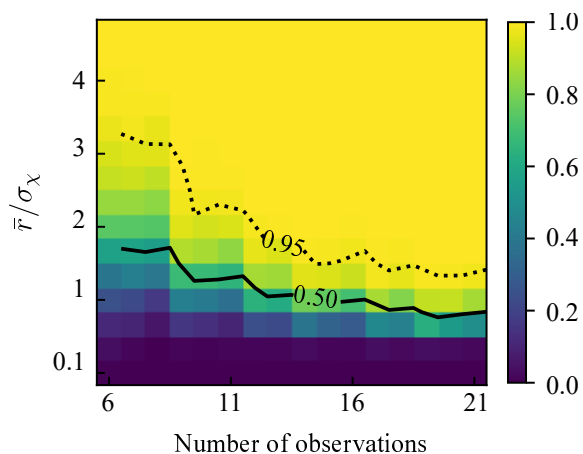


Рис. 6. Вероятность обнаружения вращения в зависимости от его длительности (числа наблюдений) и отношения его средней скорости к средней ошибке наблюдения.

недооценены в два раза, такие ложные обнаружения практически исключены). Если же ошибки наблюдений сильно недооценены, то количество ложных обнаружений растет.

Второй эксперимент нацелен на определение возможности обнаружения истинных вращений при наличии больших ошибок измерений. Если ошибки велики, а скорость вращения мала, то систематическое изменение позиционного угла может оказаться меньше разброса измерений и тогда вращение может быть не обнаружено. Естественно ожидать, что в нашем подходе данная проблема может быть решена увеличением количества наблюдений, поскольку оба предложенных критерия имеют статистический характер. Например, для биномиального теста требуется, чтобы изменений χ в одну сторону было значимо больше, чем в другую. При увеличении ошибки измерений статистика будет ухудшаться, так как будут возникать случайные противоположные доминирующему направлению изменения позиционного угла. В любом случае, изменений χ в доминирующую сторону будет в

среднем больше, и при достаточном количестве наблюдений удастся накопить значимый сигнал. Аналогично и с Т-тестом: достаточно большое количество измерений позволит определить, что среднее изменение позиционного угла значимо отличается от нуля даже при наличии ошибок, превышающих изменение позиционного угла между последовательными наблюдениями.

Чтобы продемонстрировать это, мы провели следующую симуляцию. Создается кривая позиционного угла, содержащая монотонное его изменение (то есть истинное вращение), к которому добавляются нормально распределенные ошибки измерения. Первым параметром симуляции является отношение средней скорости вращения к величине ошибки измерения (чем меньше это отношение, тем труднее обнаружить вращение, так как изменения χ между отдельными наблюдениями начинают «тонуть» в ошибках измерений). Вторым параметром — это продолжительность вращения (то есть число наблюдений в предположении равномерного наблюдательного ряда). Далее происходит поиск вращения, а результаты усредняются по 1000 реализаций для каждой пары значений параметров симуляции. Рисунок 6 показывает результаты этого эксперимента, демонстрируя ограничение нашего метода: труднее всего выявить короткое медленное вращение. Например, если среднесуточное изменение позиционного угла примерно равно ошибке измерений, даже 14 ежедневных наблюдений подряд позволят обнаружить такое вращение лишь с вероятностью 50%. Чтобы надежно выявить медленное вращение, оно должно быть длительным настолько, чтобы произошло значимое изменение позиционного угла. Если же позиционный угол в течение суток меняется втрое больше ошибок измерений, то шесть наблюдений практически гарантированно позволяют такое вращение обнаружить.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Описанные выше критерии были применены для поиска вращений в наблюдениях трех объектов: 3С 454.3 ($z = 0.859$, Jackson and Browne, 1991), СТА 102 ($z = 1.037$, Schmidt, 1965) и ОТ 081 ($z = 0.320$, Stickel et al., 1993). Эти объекты, входящие в программу мониторинга СПбГУ, были выбраны исходя из наличия продолжительных и плотных рядов наблюдений: объекты входят в подвыборку с наивысшим приоритетом наблюдений и имеют периоды регулярных (практически ежедневных) наблюдений.

Всего было выделено 51 вращение: 17 вращений у 3С 454.3, 23 вращения у СТА 102 и 11 вращений у ОТ 081. На текущий момент это наиболее полная

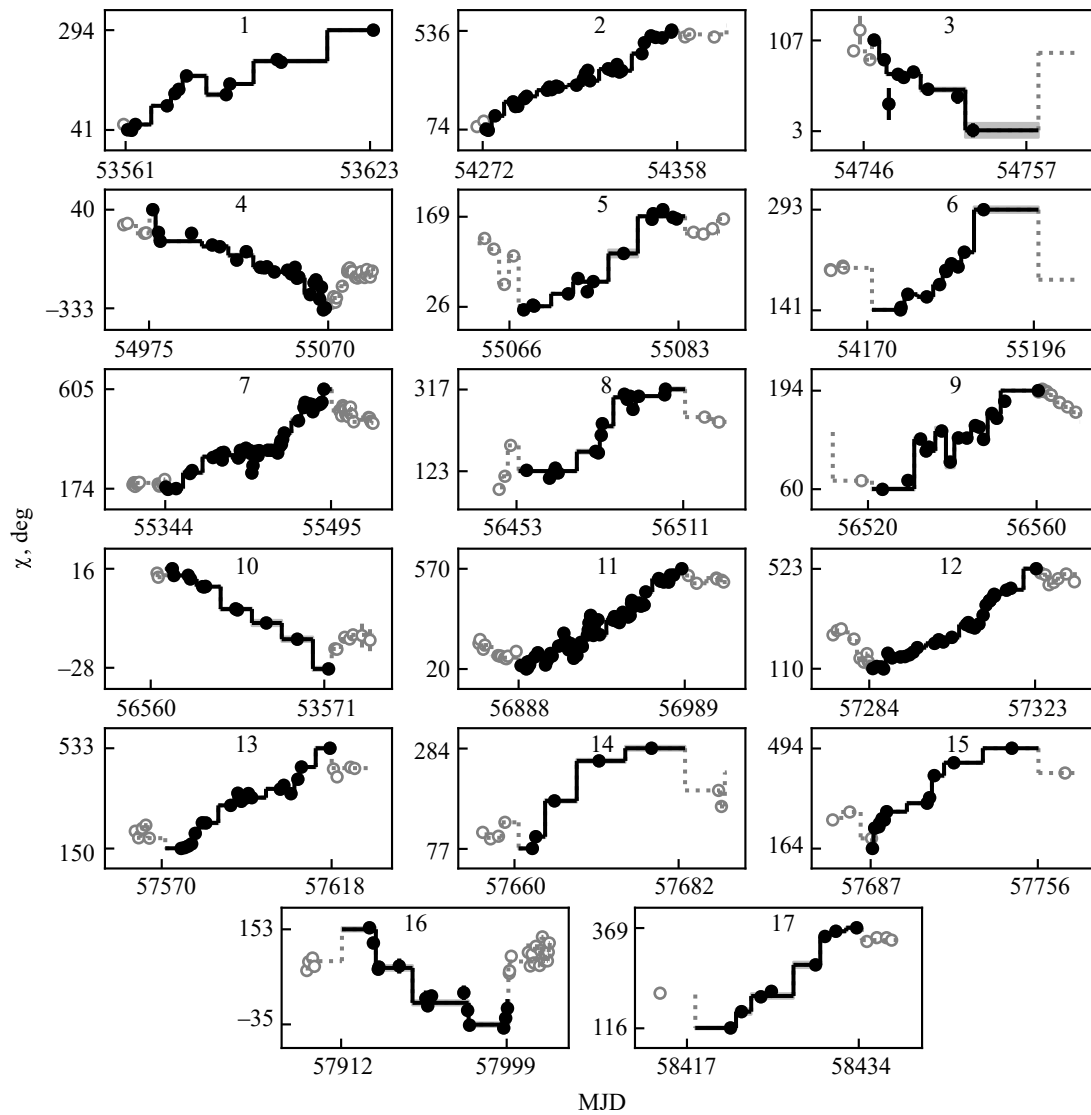


Рис. 7. Все вращения позиционного угла вектора поляризации, обнаруженные у объекта 3C 454.3.

выборка известных вращений для данных объектов, полученная в результате систематического поиска. Значения позиционного угла вектора поляризации для всех обнаруженных вращений показаны на рис. 7 (3C 454.3), рис. 8 (СТА 102) и рис. 9 (ОТ 081). Параметры вращений (даты, амплитуды, абсолютные значения средних скоростей и определенные двумя методами значимости) приведены в таблицах 1, 2 и 3. Знак в амплитуде определяет направление вращения (положительный соответствует вращению против часовой стрелки). Для наглядности значения амплитуд и средних скоростей вращений приведены также в виде гистограмм на рис. 10, 11 и 12.

Средняя частота наблюдения вращений для этих объектов в системе наблюдателя 1.05 (3C 454.3), 1.31 (СТА 102) и 0.93 (ОТ 081) событий в год. Время в системе джета связано

со временем в системе наблюдателя следующим образом:

$$\Delta T_{\text{jet}} = \Delta T_{\text{obs}} \frac{\delta}{1+z},$$

где δ — доплер-фактор джета, а z — красное смещение. Используя оценки доплер-факторов из работы Weaver et al. (2022), получаем следующие средние частоты вращений в системе джета: 0.068 (3C 454.3), 0.065 (СТА 102) и 0.047 (ОТ 081) событий в год.

При сравнении с результатами других исследователей по наблюдениям на других инструментах (см., например, Blinov et al., 2015; Itoh et al., 2016), можно отметить, что найденные нами параметры вращений согласуются с опубликованными ранее. Так, продолжительность самых коротких по времени вращений в программе Robopol равна 5–7 дням

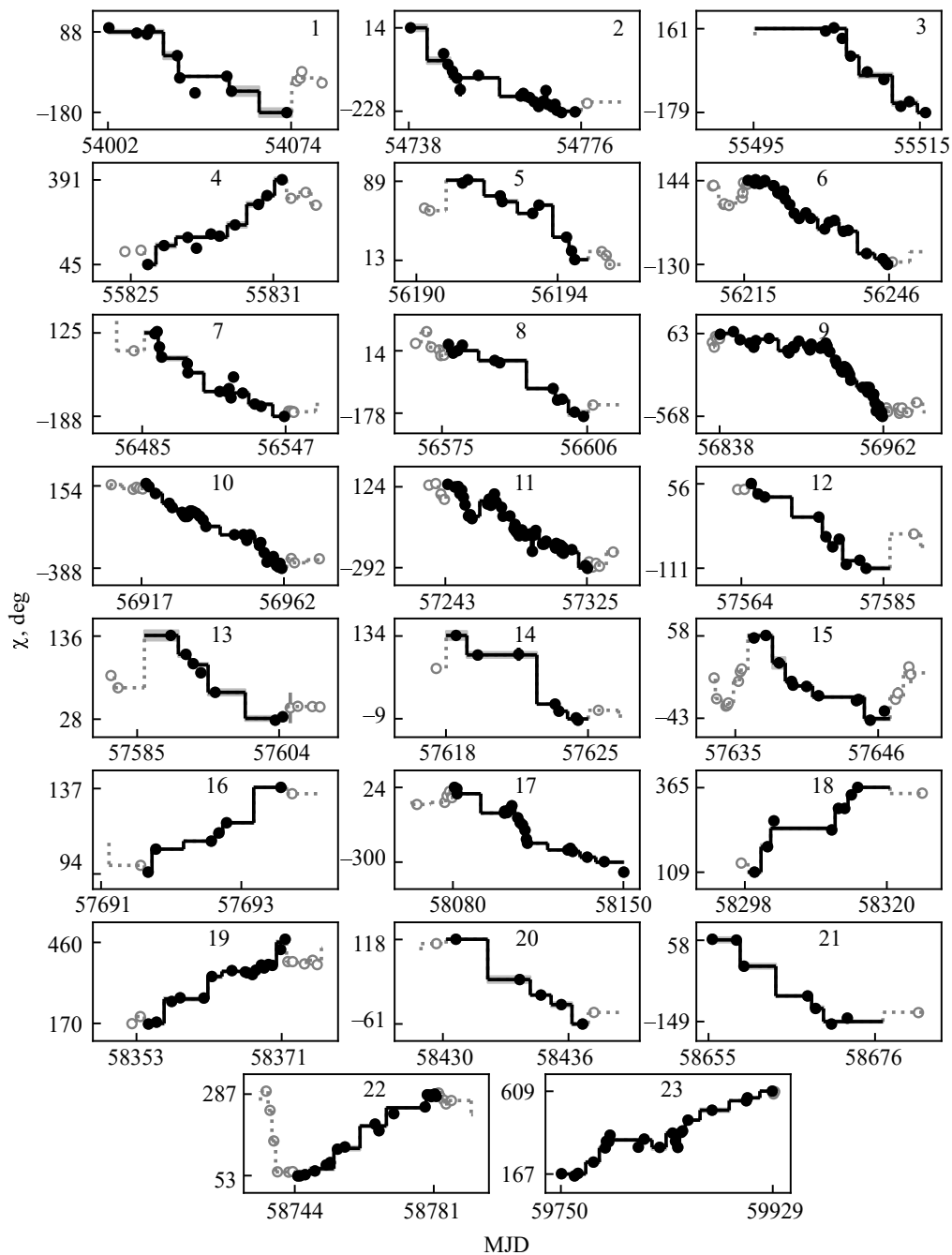


Рис. 8. Все вращения позиционного угла вектора поляризации, обнаруженные у объекта СТА 102.

(Blinov et al., 2015), минимальная же амплитуда составляет не менее 90° из-за ограничений критериев. По длительности отдельные из обнаруженных нами вращений превышают 100 дней, тогда как, согласно RoboPol, максимальная длительность составляет 90 дней (Blinov et al., 2016a), по данным телескопа KANATA также видны длительные вращения более 100 дней (Itoh et al., 2016). Нужно заметить, что некоторые модели предсказывают более быстрые и короткие вращения (Hosking and Sironi, 2020), и такие вращения действительно об-

наруживаются (Ahnen et al., 2018), но происходит это спорадически, при совпадении такого события с плотной наблюдательной кампанией. При систематическом поиске вращений в длительных наблюдательных программах такой плотности наблюдений достичь не удастся и верхний предел наблюдаемой скорости вращений определяется средней частотой наблюдений (Kiehlmann et al., 2021).

Значительное число обнаруженных в данной работе вращений позволяет провести для них статистический анализ. В частности, на гистограммах

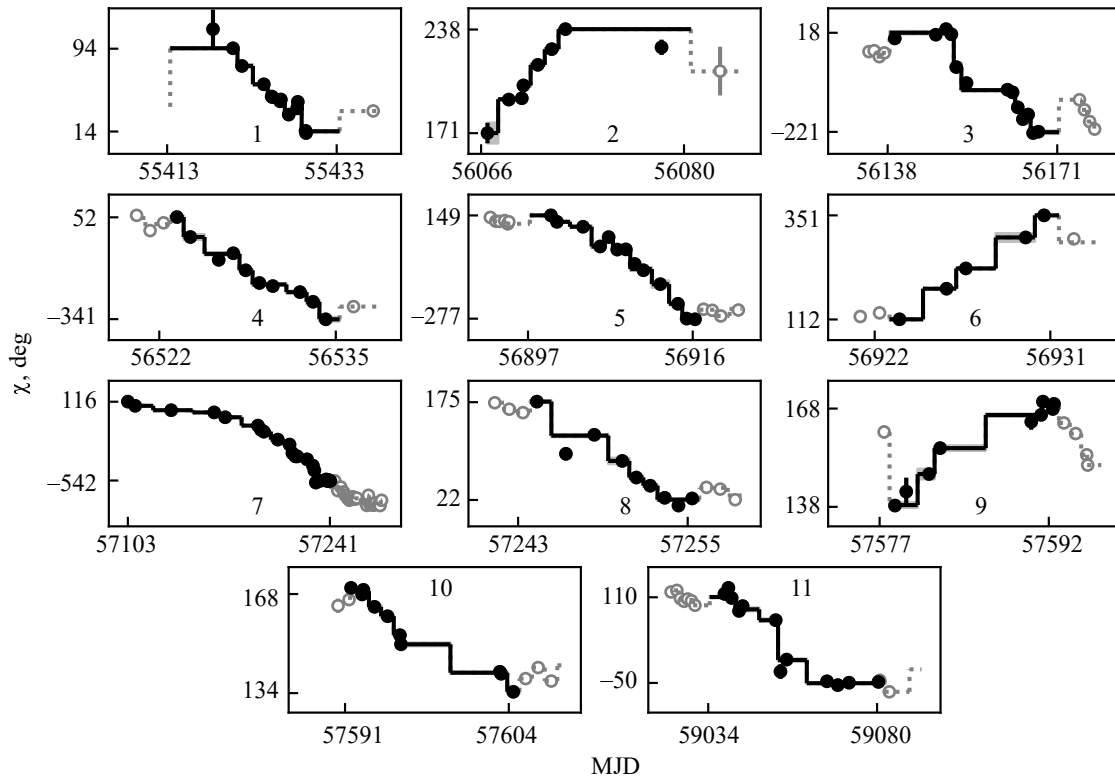


Рис. 9. Все вращения позиционного угла вектора поляризации, обнаруженные у объекта OT 081.

Таблица 1. Параметры вращений объекта ЗС 454.3: дата вращения, ΔMJD — продолжительность вращения, A — полная амплитуда вращения (в градусах), \bar{r} — средняя скорость вращения (в градусах в сутки), p_{binom} — p -значение по биномиальному тесту, а $p_{t\text{-test}}$ — p -значение по Т-тесту

Number	MJD	ΔMJD	A , deg	\bar{r} , deg day ⁻¹	p_{binom}	$p_{t\text{-test}}$
1	53561.011–53623.827	62.817	252.6	4.5	0.011	8.70×10^{-5}
2	54272.986–54358.503	85.516	462.2	5.7	0.047	8.59×10^{-4}
3	54746.563–54757.818	11.255	-103.5	-12.1	0.031	0.019
4	54975.245–55070.195	94.951	-373.2	-4.1	9.16×10^{-4}	0.045
5	55066.922–55083.660	16.738	142.8	11.2	0.031	3.83×10^{-3}
6	55170.736–55196.715	25.979	151.3	8.1	0.011	0.063
7	55344.029–55495.613	151.584	430.5	3.1	7.57×10^{-4}	0.025
8	56453.73–56511.647	57.911	194.4	4.4	7.81×10^{-3}	0.071
9	56520.947–56560.438	39.490	133.8	4.5	0.055	3.97×10^{-3}
10	56560.921–56571.471	10.550	-44.5	-4.6	3.91×10^{-3}	3.27×10^{-5}
11	56888.015–56989.194	101.179	533.3	5.5	0.023	5.68×10^{-3}
12	57284.646–57323.783	39.137	412.8	11.1	1.30×10^{-3}	8.97×10^{-3}
13	57570.997–57618.028	47.031	382.1	9.1	3.69×10^{-3}	3.53×10^{-3}
14	57660.555–57682.864	22.309	206.7	12.0	0.031	0.059
15	57687.548–57756.252	68.704	330.3	5.8	9.77×10^{-4}	4.30×10^{-3}
16	57912.430–57999.893	87.464	-188.5	-2.8	0.062	0.029
17	58417.826–58434.294	16.467	252.8	18.5	7.81×10^{-3}	0.014

Таблица 2. Параметры вращений объекта СТА 102, колонки аналогичны таблице 1

Number	MJD	Δ MJD	A , deg	\bar{r} , deg day ⁻¹	p_{binom}	$p_{t\text{-test}}$
1	54002.357–54074.267	71.911	–268.9	–4.9	0.031	1.70×10^{-3}
2	54738.397–54776.005	37.608	–242.2	–7.3	3.91×10^{-3}	3.47×10^{-3}
3	55495.169–55515.673	20.504	–341.3	–23.5	0.031	5.87×10^{-4}
4	55825.572–55831.556	5.984	346.6	63.1	7.81×10^{-3}	0.028
5	56190.842–56194.866	4.024	–76.3	–23.3	0.035	0.037
6	56215.792–56246.202	30.410	–274.9	–9.3	9.61×10^{-3}	1.08×10^{-5}
7	56485.953–56547.393	61.440	–313.6	–5.7	3.91×10^{-3}	0.024
8	56575.889–56606.226	30.337	–192.8	–7.8	0.031	0.019
9	56838.232–56962.820	124.587	–632.6	–5.4	0.061	0.026
10	56917.906–56962.820	44.913	–543.3	–12.7	6.56×10^{-4}	0.030
11	57243.460–57325.784	82.324	–417.9	–5.5	0.032	0.012
12	57564.960–57585.968	21.008	–167.8	–9.1	0.020	2.71×10^{-3}
13	57585.968–57604.989	19.021	–107.9	–7.7	0.031	7.43×10^{-4}
14	57618.009–57625.012	7.003	–144.3	–24.1	0.031	0.016
15	57635.967–57646.911	10.944	–101.7	–11.3	0.016	3.17×10^{-3}
16	57691.618–57693.644	2.026	42.7	24.6	0.016	0.036
17	58080.137–58150.148	70.011	–324.7	–5.1	7.25×10^{-5}	0.018
18	58298.467–58320.489	22.022	256.7	14.1	0.016	0.016
19	58353.982–58371.597	17.615	290.8	18.4	0.016	0.059
20	58430.155–58436.943	6.789	–179.7	–33.2	0.031	6.60×10^{-3}
21	58655.482–58676.988	21.506	–208.1	–13.0	0.031	8.08×10^{-3}
22	58744.130–58781.959	37.828	227.3	6.4	0.035	4.98×10^{-3}
23	59750.504–59929.098	178.594	442.3	2.7	0.011	2.15×10^{-3}

Таблица 3. Параметры вращений объекта OT 081, колонки аналогичны таблице 1

Number	MJD	Δ MJD	A , deg	\bar{r} , deg day ⁻¹	p_{binom}	$p_{t\text{-test}}$
1	55413.364–55433.347	19.983	–80.2	–5.8	0.020	6.69×10^{-3}
2	56066.445–56080.470	14.026	67.2	7.4	0.016	0.032
3	56138.370–56171.333	32.963	–239.8	–10.0	0.016	1.36×10^{-3}
4	56522.806–56535.281	12.476	–394.5	–35.1	3.91×10^{-3}	4.55×10^{-4}
5	56897.216–56916.755	19.539	–426.5	–24.8	9.77×10^{-4}	3.07×10^{-3}
6	56922.761–56931.442	8.680	238.7	33.1	0.031	2.13×10^{-3}
7	57103.012–57241.859	138.848	–659.4	–5.0	3.05×10^{-5}	0.010
8	57243.833–57255.821	11.987	–153.4	–15.7	0.016	4.15×10^{-4}
9	57577.880–57592.899	15.019	30.4	2.3	0.031	0.022
10	57591.399–57604.847	13.448	–34.5	–2.8	7.81×10^{-3}	3.01×10^{-3}
11	59034.403–59080.562	46.159	–161.0	–4.9	0.031	0.045

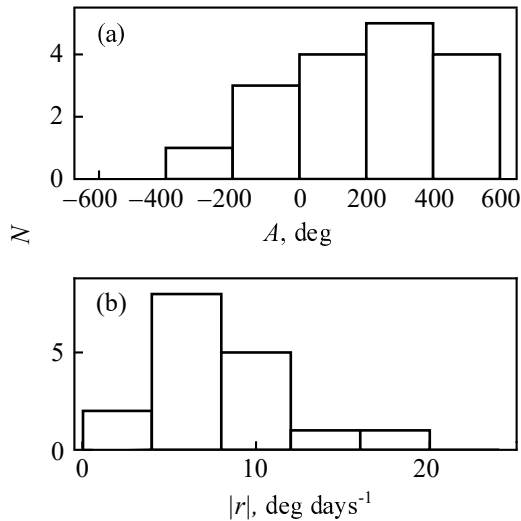


Рис. 10. Распределение амплитуд (а) и скоростей вращений позиционного угла (b) для объекта 3C 454.3.

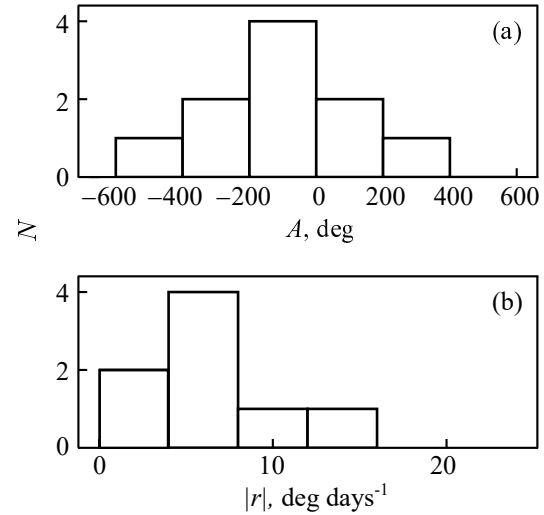


Рис. 12. Распределение амплитуд (а) и скоростей вращений позиционного угла (b) для объекта OT 081.

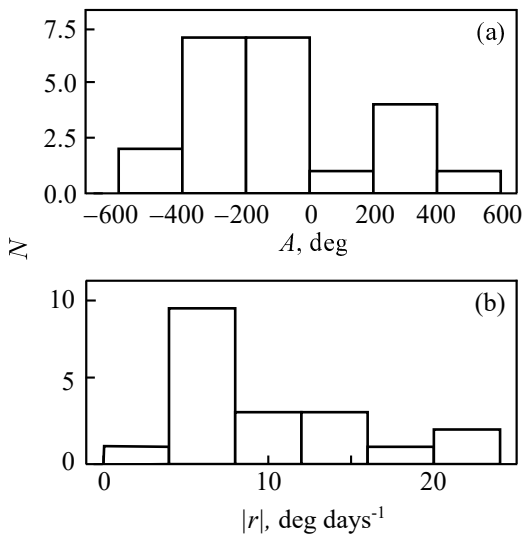


Рис. 11. Распределение амплитуд (а) и скоростей вращений позиционного угла (b) для объекта STA 102.

для объектов 3C 454.3 и STA 102 видна явная асимметричность в распределении амплитуд вращений относительно нуля. Для объекта 3C 454.3 из 17 обнаруженных вращений 14 происходят против часовой стрелки, а для STA 102 17 из 23 найденных вращений совершаются по часовой стрелке. Вероятности такой (или большей) асимметрии при случайном распределении направлений вращений равны соответственно 0.025 и 0.017. В то же время у объекта OT 081 асимметрия направлений вращений хоть и присутствует (из 11 вращений восемь происходят по часовой стрелке), но ее значимость ниже: вероятность такой или большей асимметрии 0.113.

Присутствие вращений вектора поляризации может объясняться спиральной структурой магнитного поля в джете (например, Marscher et al. (2008), модель ударной волны, бегущей по джету). В таком случае наблюдаемое доминирующее направление вращений отражает глобальную структуру магнитного поля, которая связана с направлением вращения черной дыры или аккреционного диска (Semenov et al., 2004).

Предполагается, что ближе к черной дыре в зоне ускорения и коллимации магнитное поле должно быть закручено в более тугую спираль (Vlahakis, 2006), и по мере удаления, на масштабах парсеков, степень закрученности уменьшается. Таким образом, наблюдаемые нами разные скорости вращений в одном и том же объекте могут быть указанием на положение области излучения в джете. С другой стороны, согласно наблюдениям (Weaver et al., 2022), для отдельного объекта скорость движения радиоконтента в джете может существенно отличаться, что будет отражаться и на скорости вращений, если вращения связаны с движением сверхсветовых компонент в джете. Кроме того, могут оказывать влияние геометрические эффекты, обусловленные различным углом видности отдельных участков искривленного джета, что приводит к изменению доплер-фактора (Raiteri et al., 2017).

Существование же вращений, направленных в противоположную сторону от доминирующего направления, может говорить об одновременном действии механизма случайного блуждания вектора поляризации в результате турбулентных движений в джете. В этой модели излучение от отдельных турбулентных ячеек джета, в которых поле считается однородным, складывается в полное излучение. Наблюдаемая поляризация определяется

Таблица 4. Средние амплитуды вращений в доминирующем направлении (2-й столбец) и противоположном направлении (3-й столбец)

Объект	$\langle \Delta\chi_{\text{rot}} \rangle$, градус	$\langle \Delta\chi_{\text{counter}} \rangle$, градус
(1)	(2)	(3)
ЗС 454.3	298 ± 37	177 ± 72
СТА 102	271 ± 37	267 ± 55
ОТ 081	269 ± 74	110 ± 64

суммой параметров Стокса от отдельных ячеек (Marscher, 2014). Если стохастический механизм имеет место, то он должен производить вращения в обе стороны с равной вероятностью. Следовательно, нельзя ожидать, что все вращения по доминирующему направлению отражают глобальную структуру магнитного поля джета, поскольку набор таких вращений содержит и стохастические вращения. Тем не менее, вполне возможно различие статистических характеристик вращений, направленных в разные стороны. Например, вероятность возникновения стохастического вращения уменьшается с ростом амплитуды, поскольку оно требует продолжительного случайного выравнивания магнитного поля в несвязанных друг с другом турбулентных ячейках. Для исследуемых в данной работе объектов оценки средней амплитуды вращений в доминирующем направлении ($\langle \Delta\chi_{\text{rot}} \rangle$) и в противоположном ему ($\langle \Delta\chi_{\text{counter}} \rangle$) приведены в таблице 4. Можно видеть, что для двух объектов из трех средние амплитуды вращений в доминирующем направлении значительно превышают средние амплитуды вращений в противоположном направлении, что может свидетельствовать о том, что среди вращений в доминирующем направлении вклад случайных блужданий незначительный. Однако для подтверждения этого факта требуется исследование большей выборки объектов.

5. ВЫВОДЫ

В работе был предложен и реализован новый подход к выделению вращений позиционного угла поляризации. В основе метода лежат два статистических критерия, позволяющих оценить достоверность найденных вращений, то есть вероятность их случайного возникновения. По сравнению с предыдущими работами новый метод обладает большей гибкостью, позволяя находить не только вращения со строго монотонным изменением угла поляризации, но и вращения, в которых угол кратковременно отклоняется от монотонности, сохраняя при этом среднее направление вращения. Кроме того, в методе отсутствует ограничение на минимальную

амплитуду вращения, статистическая значимость вращений при этом определяется количеством и точностью наблюдений.

Предложенный метод был протестирован в численных экспериментах на искусственных данных и продемонстрировал устойчивость к ошибкам наблюдений как с точки зрения обнаружения ложных вращений из-за случайного блуждания χ в пределах ошибок, так и с точки зрения обнаружения зашумленных истинных вращений. Применение метода к трем блазарам (ЗС 454.3, СТА 102, ОТ 081) позволило обнаружить 51 событие значимого вращения угла поляризации — это самая объемная выборка таких событий из опубликованных в литературе в настоящее время. В дальнейшем мы планируем применить описанный метод к большой выборке галактик с активными ядрами для систематического исследования параметров вращений и сопоставления их с поведением объектов в оптическом и иных областях спектра.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-00121, <https://rscf.ru/project/23-22-00121/>.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят анонимных рецензентов за замечания, которые позволили существенно улучшить текст данной работы.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. A. Abdo, M. Ackermann, M. Ajello, et al., *Nature* **463** (7283), 919 (2010). DOI:10.1038/nature08841
2. M. L. Ahnen et al. (MAGIC Collab.), *Astron. and Astrophys.* **619**, id. A45 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201832677
3. D. Blinov, S. G. Jorstad, V. M. Larionov, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **505** (3), 4616 (2021). DOI:10.1093/mnras/stab1484
4. D. Blinov, S. Kiehlmann, V. Pavlidou, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **501** (3), 3715 (2020). DOI:10.1093/mnras/staa3777
5. D. Blinov and V. Pavlidou, *Galaxies* **7** (2), id. 46 (2019). DOI:10.3390/galaxies7020046
6. D. Blinov, V. Pavlidou, I. Papadakis, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **453** (2), 1669 (2015). DOI:10.1093/mnras/stv1723

7. D. Blinov, V. Pavlidou, I. Papadakis, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **462** (2), 1775 (2016a). DOI:10.1093/mnras/stw1732
8. D. Blinov, V. Pavlidou, I. Papadakis, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **474** (1), 1296 (2018). DOI:10.1093/mnras/stx2786
9. D. Blinov, V. Pavlidou, I. E. Papadakis, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **457** (2), 2252 (2016b). DOI:10.1093/mnras/stw158
10. M. H. Cohen and T. Savolainen, *Astron. and Astrophys.* **636**, id. A79 (2020). DOI:10.1051/0004-6361/201936907
11. L. Di Gesu, I. Donnarumma, F. Tavecchio, et al., *Astrophys. J.* **938** (1), id. L7 (2022). DOI:10.3847/2041-8213/ac913a
12. L. Di Gesu, H. L. Marshall, S. R. Ehlert, et al., *Nature Astronomy* **7**, 1245 (2023). DOI:10.1038/s41550-023-02032-7
13. D. N. Hosking and L. Sironi, *Astrophys. J.* **900** (2), id. L23 (2020). DOI:10.3847/2041-8213/abafa6
14. Y. Ikejiri, M. Uemura, M. Sasada, et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **63**, 639 (2011). DOI:10.1093/pasj/63.3.327
15. R. Itoh, K. Nalewajko, Y. Fukazawa, et al., *Astrophys. J.* **833** (1), article id. 77 (2016). DOI:10.3847/1538-4357/833/1/77
16. N. Jackson and I. W. A. Browne, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **250**, 414 (1991). DOI:10.1093/mnras/250.2.414
17. S. Jorstad and A. Marscher, *Galaxies* **4** (4), id. 47 (2016). DOI:10.3390/galaxies4040047
18. S. G. Jorstad, A. P. Marscher, V. M. Larionov, et al., *Astrophys. J.* **715** (1), 362 (2010). DOI:10.1088/0004-637X/715/1/362
19. S. Kiehlmann, D. Blinov, I. Liodakis, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **507** (1), 225 (2021). DOI:10.1093/mnras/stab2055
20. S. Kiehlmann, D. Blinov, T. J. Pearson, and I. Liodakis, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **472** (3), 3589 (2017). DOI:10.1093/mnras/stx2167
21. S. Kiehlmann, T. Savolainen, S. G. Jorstad, et al., *Astron. and Astrophys.* **590**, id. A10 (2016). DOI:10.1051/0004-6361/201527725
22. S. Kikuchi, M. Inoue, Y. Mikami, et al., *Astron. and Astrophys.* **190**, L8 (1988).
23. V. Larionov, S. Jorstad, A. Marscher, and P. Smith, *Galaxies* **4** (4), id. 43 (2016). DOI:10.3390/galaxies4040043
24. V. M. Larionov, S. G. Jorstad, A. P. Marscher, et al., *Astron. and Astrophys.* **492** (2), 389 (2008). DOI:10.1051/0004-6361:200810937
25. I. Liodakis, D. Blinov, I. Papadakis, and V. Pavlidou, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **465** (4), 4783 (2017). DOI:10.1093/mnras/stw3038
26. A. P. Marscher, *Astrophys. J.* **780** (1), article id. 87 (2014). DOI:10.1088/0004-637X/780/1/87
27. A. P. Marscher, S. G. Jorstad, F. D. D'Arcangelo, et al., *Nature* **452** (7190), 966 (2008). DOI:10.1038/nature06895
28. A. P. Marscher, S. G. Jorstad, V. M. Larionov, et al., *Astrophys. J.* **710** (2), L126 (2010). DOI:10.1088/2041-8205/710/2/L126
29. R. L. Moore, J. R. P. Angel, R. Duerr, et al., *Astrophys. J.* **260**, 415 (1982). DOI:10.1086/160266
30. K. Nalewajko, *International Journal of Modern Physics D* **19** (6), 701 (2010). DOI:10.1142/S0218271810016853
31. P. Novikova, E. Shishkina, and D. Blinov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **526** (1), 347 (2023). DOI:10.1093/mnras/stad2747
32. C. M. Raiteri, M. Villata, J. A. Acosta-Pulido, et al., *Nature* **552** (7685), 374 (2017). DOI:10.1038/nature24623
33. A. L. Roy, *Publ. Astron. Soc. Australia* **12** (2), 273 (1995).
34. J. D. Scargle, J. P. Norris, B. Jackson, and J. Chiang, *Astrophys. J.* **764** (2), article id. 167 (2013). DOI:10.1088/0004-637X/764/2/167
35. M. Schmidt, *Astrophys. J.* **141**, 1295 (1965). DOI:10.1086/148217
36. V. Semenov, S. Dyadechkin, and B. Punsly, *Science* **305** (5686), 978 (2004). DOI:10.1126/science.1100638
37. E. S. Shablovinskaya and V. L. Afanasiev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **482** (4), 4322 (2019). DOI:10.1093/mnras/sty2943
38. M. Stickel, J. W. Fried, and H. Kuehr, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **98**, 393 (1993).
39. M. Uemura, R. Itoh, L. Xu, et al., *Galaxies* **4** (3), id. 23 (2016). DOI:10.3390/galaxies4030023
40. N. Vlahakis, *ASP Conf. Ser.* **350**, 169 (2006).
41. Z. R. Weaver, S. G. Jorstad, A. P. Marscher, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **260** (1), id. 12 (2022). DOI:10.3847/1538-4365/ac589c
42. W. F. Welsh, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **111** (765), 1347 (1999).
43. V. A. Hagen-Thorn, *Astronomicheskii Tsirkulyar* **714**, 5 (1972).

The Method of Searching for Rotations of the Polarization Position Angle of Quasars

S. S. Savchenko^{1,2,3}, D. A. Morozova¹, S. G. Jorstad^{1,4}, D. A. Blinov^{5,6}, G. A. Borman⁷, A. A. Vasilyev¹,
T. S. Grishina¹, A. V. Zhovtan⁷, E. N. Kopatskaya¹, E. G. Larionova¹, I. S. Troitskiy¹, Yu. V. Troitskaya¹,
E. V. Shishkina¹, and E. A. Shkodkina¹

¹St. Petersburg University, St. Petersburg, 199034 Russia

²Central (Pulkovo) Astronomical Observatory, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 196140 Russia

³Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

⁴Institute for Astrophysical Research, Boston University, Boston, MA 02215 USA

⁵Institute of Astrophysics, Foundation Research and Technology-Hellas, Vassilika Vouton, Heraklion, GR-71110 Greece

⁶Department of Physics and Institute for Theoretical and Computational Physics, University of Crete, Heraklion, GR-70013 Greece

⁷Crimean Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nauchny, 298409 Russia

Observations of quasars show that the polarization position angle of the emission coming from them varies greatly over time, including periods called rotations during which the angle changes in an orderly manner. The study proposes a method for identifying such events and assessing their statistical significance. The operation of the method is demonstrated using the example of long-term polarimetric observations of the blazars CTA 102, 3C 454.3, and OT 081. During the analysis of light curves, 51 rotations of the polarization position angle were found and it was shown that for CTA 102 and 3C 454.3 the rotations are predominantly oriented in one direction.

Keywords: methods: data analysis techniques: polarimetric quasars: general