

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ П. Н. ЛЕБЕДЕВА  
АСТРОКОСМИЧЕСКИЙ ЦЕНТР

---

На правах рукописи

**Зобнина Дарья Игоревна**

**Многодиапазонные исследования линейной поляризации и  
ее переменности в активных ядрах галактик**

Специальность 1.3.1 —  
«Физика космоса, астрономия»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2024

Работа выполнена в Астрокосмическом центре (АКЦ) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева (ФИАН) Российской Академии наук (РАН), г. Москва.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор РАН, ведущий научный сотрудник Крымской астрофизической обсерватории РАН (КраО РАН)  
**Пушкарев Александр Борисович**

Официальные оппоненты: **Байкова Аниса Талгатовна**,  
доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН (ГАО РАН)

**Сотникова Юлия Владимировна**,  
кандидат физико-математических наук, заместитель директора по научной работе (РАТАН-600), Специальная астрофизическая обсерватория РАН (САО РАН)

Ведущая организация: Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (МГУ, Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга)

Защита состоится 3 апреля 2024 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 24.1.262.02 Физического института им. П. Н. Лебедева по адресу: г. Москва, улица Профсоюзная, дом 84/32, подъезд А2, Институт космических исследований РАН, зал семинаров — к. 707.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П. Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, дом 53. Автореферат и диссертация в электронном виде представлены на сайтах ФИАН <https://www.lebedev.ru/> и <http://www.asc-lebedev.ru/> в разделе «Диссертационный совет».

Автореферат разослан 18 января 2024 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук

Н. Н. Шахворостова

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Активные ядра галактик (АЯГ) — центральные области галактик, физические процессы в которых сопровождаются выделением большого количества энергии, которое нельзя объяснить активностью звездной и газовой составляющей [1]. АЯГ излучают во всех диапазонах электромагнитного спектра и, возможно, являются источниками высокоэнергетичных (больше  $10^{12}$  эВ) нейтрино [2–5]. Излучение этих объектов имеет преимущественно нетепловую природу, на что указывает форма их спектра (например, [6]).

Примерно 10% – 15% АЯГ являются радиогромкими [7]. Они намного ярче в радиодиапазоне, чем в оптическом. Согласно унифицированной модели [8], в центре таких активных ядер находится сверхмассивная черная дыра, окруженная аккреционным диском. Вещество диска, теряя угловой момент вследствие турбулентности или вязкости, падает на черную дыру. В непосредственной близости от горизонта событий образуются биполярные истечения плазмы (джеты), ориентированные вдоль оси вращения аккреционного диска или черной дыры. Вещество в них ускоряется до релятивистских скоростей, на что указывает видимое сверхсветовое движение [9; 10], высокие (медиана  $\approx 10$ ) доплер-факторы [10–12] и яркостные температуры (до  $10^{10-13}$  К) [12–14], а также малые углы раскрытия выбросов [15]. При этом процесс формирования и ускорения джетов до конца не изучен. Теоретически было показано, что ускорение может происходить за счет энергии и углового момента керровской черной дыры [16] или аккреционного диска [17].

К радиогромким АЯГ, в частности, относятся блазары. Они включают в себя квазары с плоским спектром и объекты типа BL Lacertae (далее лацертиды). Отличительной особенностью лацертид является отсутствие сильных эмиссионных и абсорбционных линий в оптическом спектре [18]. Струи квазаров и лацертид имеют малый угол ( $< 10^\circ$ ) с лучом зрения (например, [12; 19]). Квазары типично находятся на больших красных смещениях (медиана  $\approx 1.5$ ) [20]. Это позволяет считать, что их положение на небе практически не меняется со временем, поэтому эти объекты можно использовать в качестве опорных источников небесной системы координат.

Международная небесная система отсчета ICRF3 [21] построена на измерениях положений компактных внегалактических радиоисточников методами радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). Этот подход был предложен в 60-е годы прошлого века Л.И. Матвеевко, Н.С. Кардашевым и Г.Б. Шоломицким [22] и в настоящее время позволяет измерять абсолютные положения источников с точностью до  $\sim 30$  микросекунд дуги [21]. В оптическом диапазоне сравнимой с ICRF3 точностью, но значительно большей плотностью источников обладает система отсчета *Gaia*-CRF2 [23], построенная по измерениям координат примерно полумиллиона квазаров космическим телескопом *Gaia* Европейского космического агентства, который был запущен

на орбиту в 2013 году [24]. Первое сравнение положений активных ядер, определенных в радио- и оптическом диапазонах, показало, что для большинства источников эти координаты совпадают в пределах ошибок измерений, однако для примерно 5% ( $\approx 110$ ) объектов существуют значимые сдвиги между двумя положениями [25] (сдвиги РСДБ–*Gaia*). В работе [26] было проведено сравнение координат активных ядер из каталога *Gaia* Data Release 1 с координатами из наиболее полного на тот момент каталога абсолютной астрометрии, построенного по РСДБ-наблюдениям, Radio Fundamental Catalogue (RFC) 2016с<sup>1</sup>. Этот анализ обнаружил около 400 объектов, имеющих значимые сдвиги положений. При использовании каталога *Gaia* Data Release 2 [27], содержащего почти на 50% больше источников и точнее измеренные положения, и RFC, построенного по РСДБ-наблюдениям, доля активных ядер со значимыми радио-оптическими сдвигами положений возросла до примерно 9%, что составляет около 900 объектов [28]. Объяснение этого феномена критически важно для физической модели внутренних областей АЯГ.

Изображения, построенные на основе РСДБ-наблюдений, показывают структуру источника на парсековых масштабах. РСДБ-мониторинг АЯГ позволяет построить усредненные по эпохам и совмещенные по положению РСДБ-ядра (стековые) карты распределения полной интенсивности по объекту. РСДБ-ядро является ярким, частично оптически толстым началом струи и, как правило, представляет собой наиболее яркую компактную деталь на РСДБ-карте. При возрастании интервала времени, который покрывают эпохи наблюдения, ширина выброса, восстанавливаемая на стековых изображениях, увеличивается. В работе [15] было обнаружено, что при временном покрытии в шесть лет и более на таких картах типично проявляется полная ширина внутренних областей струи, детектируемая в полной интенсивности. Стековые изображения полной интенсивности используются для изучения структуры выбросов, например, формы струи [29; 30] или угла ее раскрытия [15]. Актуальный вопрос о конфигурации магнитного поля в джете на парсековых масштабах [31; 32] можно исследовать с помощью стековых карт, показывающих усредненное распределение линейной поляризации вдоль и поперек струи [A2, A3].

РСДБ-данные также используются для исследования переменности линейно-поляризованного излучения АЯГ (например, [33; 34]). Причиной изменения степени поляризации и ее направления (позиционного угла электрического вектора) в выбросе может служить движение яркой детали по винтовой траектории в магнитном поле спиральной конфигурации [33] или распространение компонентов вдоль изгиба джета [35; 36]. Также в работе [37] было предложено интерпретировать изменение направления поляризации на  $\sim 180^\circ$  в блазаре OJ 287 моделью джета с постоянной поляризацией и двумя последовательными вспышками, у которых векторы поляризации вращаются в противоположных направлениях. Переменность поляризации также может

---

<sup>1</sup><http://astrogeo.smce.nasa.gov/>

возникать из-за геометрических эффектов, таких как изменение доплеровского усиления вследствие прецессии выброса, магнито-гидродинамических волн, распространяющихся в струе [38; 39], турбулентности [40] или отражать пространственно-временную эволюцию магнитного поля [A3].

Изучение переменности линейной поляризации парсековых джетов является актуальным, поскольку способствует получению информации о физических условиях во внутренних областях АЯГ, а именно позволяет исследовать изменение направления и степени упорядоченности магнитного поля, свойства турбулентности и непрозрачности излучения плазмы. Сравнивая результаты анализа с предсказаниями различных моделей переменности, можно определить, какие физические процессы могут быть причиной этих вариаций.

## **Цель работы**

Основной целью данного исследования является изучение конфигурации и степени упорядоченности магнитного поля релятивистской струи активного ядра галактики, а также изменения со временем этих характеристик поля вдоль и поперек струи.

Для этого были поставлены и решены следующие задачи:

- анализ вклада релятивистского джета, аккреционного диска, полярных и экваториальных областей рассеяния излучения, а также пылевого тора в интегральную оптическую поляризацию АЯГ на основе опубликованных данных;
- исследование направления и степени интегральной оптической линейной поляризации АЯГ, у которых наблюдаются значимые сдвиги РСДБ–*Gaia*;
- построение РСДБ-карт переменности степени и направления линейной поляризации, а также стековых карт полной и поляризационной интенсивности, степени и направления поляризации, карт медианы по эпохам поляризационной интенсивности и степени поляризации для выборки из 436 АЯГ на частоте 15 ГГц;
- исследование переменности направления поляризации ядер и джетов, как целого, используя построенные РСДБ-карты соответствующего распределения на частоте 15 ГГц;
- анализ эволюции переменности степени и направления поляризации, медианы степени поляризации по эпохам, стековых распределений степени поляризации, ее направления, поляризационной интенсивности вдоль и поперек хребтовой линии джета, используя построенные РСДБ-карты на частоте 15 ГГц.

## **Научная новизна**

Научная новизна результатов, полученных в Главе 1, заключается в том, что впервые были выделены АЯГ с ярким протяженным оптическим

выбросом с использованием данных о линейной поляризации в оптическом диапазоне и радио-оптическом сдвиге положений. Также впервые была получена информация о конфигурации магнитного поля в струе у таких источников. Анализ поляризационных характеристик у различных компонент активного ядра показал, что у блазаров основной вклад в степень оптической поляризации вносит синхротронное излучение релятивистского выброса. Это дало возможность определить доминирующий источник оптического излучения у объектов со значимыми сдвигами РСДБ–*Gaia*, а также проверить и подтвердить гипотезу о том, что смещение, при котором положение, измеренное *Gaia*, находится ниже по струе относительно РСДБ-положения, обусловлено протяженным оптическим джетом, а сдвиг в противоположном направлении — доминированием аккреционного диска в полном оптическом излучении [41].

Научная новизна исследования, описанного в Главе 2, состоит в том, что впервые проводится массовый анализ переменности линейной поляризации, медианной по эпохам степени поляризации, стековых распределений степени, направления и интенсивности поляризации релятивистских выбросов АЯГ на парсековых масштабах на частоте 15 ГГц. Использование данных мониторинговой программы MOJAVE (Monitoring of Jets in AGNs with VLBA Experiments)<sup>2</sup> [42] и архивных наблюдений на VLBA с общим временным интервалом до 24 лет и достаточно высокой для отслеживания морфологических изменений скважностью дало уникальную возможность оценить переменность поляризации и ее усредненные по эпохам характеристики, а большое количество источников — получить статистически значимые результаты о ее свойствах. В частности, оказалось, что направление поляризации в джетах АЯГ гораздо более стабильное, чем в РСДБ-ядрах.

## Научная и практическая значимость

Результаты, описанные в Главе 1, совместно с предыдущими работами по данной теме [28; 41], показывают, что наблюдения в нескольких диапазонах электромагнитного спектра, в данном случае в радио- и оптическом, позволяют исследовать структуру и физические условия в системе «аккреционный диск — джет». Это подчеркивает научную значимость подобных исследований и служит их мотивацией.

Результаты анализа переменности линейной поляризации и ее усредненных по эпохам значений в джетах получены на основе богатого наблюдательного материала, накопленного в рамках самого крупного проекта по исследованию АЯГ (MOJAVE), а потому являются значимыми для более глубокого понимания свойств магнитного поля в релятивистских струях и уточнения моделей джетов.

---

<sup>2</sup><https://www.cv.nrao.edu/MOJAVE>

## Достоверность результатов

Достоверность результатов исследования основывается на использовании данных наблюдений, полученных на инструментах мирового класса и традиционных методах обработки данных. Полученные результаты проверялись с помощью стандартных статистических подходов, например, рандомизационного теста [43], бутстрапа [44] и Монте-Карло моделирования. Достоверность дополнительно обоснована апробацией основных результатов на научных конференциях и семинарах, а также их публикацией в международных журналах.

## Методология и методы исследования

В данной работе картографирование РСДБ-данных АЯГ проводилось с помощью стандартного метода CLEAN [45], реализованного в пакете *DIFMAP* [46]. Усреднение степени поляризации в Главе 1 выполнялось с использованием метода максимального правдоподобия [47]. Полная поперечная структура релятивистского джета в полной интенсивности восстанавливалась с помощью метода стекинга (пространственно-временного усреднения) [15]. Также при анализе данных применялись корреляционный тест Кендалла [48], статистический тест Андерсона-Дарлинга [49], бутстрап [44] и рандомизационный тест [43].

## Апробация результатов

Результаты представлялись на следующих российских и международных конференциях:

- XXXVI Всероссийская конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии», Пущино, 24–27 апреля 2019 г.
- «A Centenary of Astrophysical Jets: Observation, Theory, and Future Prospects», обсерватория Джодрелл Бэнк, Великобритания, 23–26 июля 2019 г.
- XVII Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», Москва, 30 сентября – 2 октября 2020 г.
- 63-я Всероссийская научная конференция МФТИ, Москва, 23–29 ноября 2020 г.
- «Extragalactic jets on all scales — launching, propagation, termination», Гейдельберг, Германия, 14–18 июня 2021 г. (онлайн).
- EVN Mini-Symposium & Users Meeting, Корк, Ирландия, 12–14 июля 2021 г. (онлайн).
- Всероссийская астрономическая конференция 2021 года «Астрономия в эпоху многоканальных исследований», Москва, 23–28 августа 2021 г.
- 64-я Всероссийская научная конференция МФТИ, Москва, 29 ноября – 3 декабря 2021 г.

## Основные результаты, выносимые на защиту

1. Исследованы направление и степень оптической линейной поляризации у 287 АЯГ со значимыми сдвигами РСДБ–*Gaia*. Получено, что объекты со сдвигами вниз по струе имеют значимо бóльшую степень поляризации (медиана 4.7%), чем источники с противоположным направлением сдвига (медиана 1.2%). Это обусловлено тем, что сдвиг вниз по струе происходит из-за протяженного оптического выброса, а смещение в противоположную сторону — из-за доминирования аккреционного диска в полном оптическом излучении. Также обнаружено, что у большинства источников со сдвигами вниз по выбросу направление оптической поляризации сонаправлено с выбросом, что является указанием на крупномасштабное тороидальное магнитное поле струи.

2. Анализ РСДБ-карт распределений усредненной по эпохам степени линейной поляризации 436 АЯГ в радиодиапазоне на частоте наблюдения 15 ГГц показал ее значимый рост вниз по струе, типично на 12% (в среднем около 2%/мсек дуги). Это может быть вызвано такими эффектами, как укрупнение спектрального индекса, ослабление ударных волн и уменьшение деполяризации, порожденной фарадеевским вращением, с расстоянием от РСДБ-ядра. Установлено значимое возрастание, типично на 20%, степени линейной поляризации к краю струи, а также асимметричность поперечных профилей поляризованной интенсивности и степени поляризации. Это указывает на тороидальную или спиральную конфигурацию крупномасштабного магнитного поля выброса.

3. Исследование стековых РСДБ-карт направления линейной поляризации 436 АЯГ на частоте наблюдения 15 ГГц показало, что наблюдаются три основные характерные распределения: 1) преимущественно вдоль хребтовой линии в пределах центрального канала струи (типично для лацертид), 2) ортогонально выбросу по всей его ширине (типично для квазаров и радиогалактик), 3) с постепенным поворотом электрического вектора от локального направления выброса в центральном канале к поперечному у его края (типично для квазаров). При этом профиль стековой степени поляризации поперек струи имеет U- или W-образную форму. Эти наблюдательные результаты указывают на присутствие спирального магнитного поля, ассоциированного с выбросом, с возможным образованием сдвигового слоя и соответствующей оболочки с продольным полем в результате взаимодействия выброса с окружающей средой.

4. Проведен анализ РСДБ-карт переменности линейной поляризации 436 АЯГ на частоте 15 ГГц. Обнаружено, что переменность направления поляризации в области РСДБ-ядра значимо выше (медиана примерно 25°), чем во

внешних областях струи (медиана около  $10^\circ$ ). Это может являться следствием искривленности струи в РСДБ-ядре и/или того, что компоненты с разным направлением поляризации в этой области не разрешаются. Установлено, что направление поляризации в РСДБ-ядрах лацертид более стабильно, чем в квазарах. Показано, что направление поляризации в выбросе обычно становится более стабильным с удалением от РСДБ-ядра: типичные изменения направления поляризации спадают с  $\approx 28^\circ$  около РСДБ-ядра до примерно  $8^\circ$  на периферии струи. Причиной этого может являться возрастание доли регулярной компоненты магнитного поля.

## Публикации автора по теме диссертации

Основные результаты по теме диссертации изложены в трех научных статьях, опубликованных в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

- A1. *Kovalev Y. Y., Zobnina D. I., Plavin A. V., Blinov D.* Optical polarization properties of AGNs with significant VLBI-Gaia offsets // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2020. — Vol. 493, no. 1. — P. L54–L58. — DOI: [10.1093/mnrasl/slaa008](https://doi.org/10.1093/mnrasl/slaa008).
- A2. *Pushkarev A. B., Aller H. D., Aller M. F., Homan D. C., Kovalev Y. Y., Lister M. L., Pashchenko I. N., Savolainen T., Zobnina D. I.* MOJAVE XX. Persistent linear polarization structure in parsec-scale AGN jets // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2023. — Vol. 520, no. 4. — P. 6053–6069. — DOI: [10.1093/mnras/stad525](https://doi.org/10.1093/mnras/stad525).
- A3. *Zobnina D. I., Aller H. D., Aller M. F., Homan D. C., Kovalev Y. Y., Lister M. L., Pashchenko I. N., Pushkarev A. B., Savolainen T.* MOJAVE - XXI. Decade-long linear polarization variability in AGN jets at parsec scales // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2023. — Vol. 523, no. 3. — P. 3615–3628. — DOI: [10.1093/mnras/stad1481](https://doi.org/10.1093/mnras/stad1481).

## Личный вклад

В работе [A1] соискатель оценил вклад релятивистского джета, аккреционного диска и областей рассеяния излучения в интегральную оптическую поляризацию АЯГ по опубликованным теоретическим и наблюдательным работам, проанализировал данные и участвовал, наравне с другими соавторами, в обсуждении результатов и подготовке публикации.

В работе [A2] вклад соискателя заключается в анализе стековых карт степени и направления поляризации, поляризационной интенсивности, а также участии, наравне с другими соавторами, в обсуждении результатов и подготовке публикации.

В работе [А3] вклад соискателя основной. Он включает в себя построение РСДБ-карт распределения стековой полной интенсивности, переменности поляризации и медианной по эпохам степени поляризации, а также медианной поляризационной интенсивности, проведение анализа этих карт, обсуждение результатов и подготовку публикации.

## Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из Введения, двух Глав, Заключения и Приложения. Полный объем диссертации составляет 159 страниц, включая 77 Рисунков и 7 Таблиц. Список литературы содержит 179 наименований.

## Содержание работы

Во **Введении** приведены полное описание диссертации, обзор современного понимания феномена активных ядер галактик и результатов недавних исследований этих объектов на парсековых масштабах в радио- и оптическом диапазонах в полной интенсивности и линейной поляризации. Также в этом разделе обсуждаются актуальность, цели и задачи работы, ее новизна и значимость, описываются основные результаты работы в виде положений, выносимых на защиту.

**Глава 1** посвящена анализу интегральной линейной поляризации в оптическом диапазоне активных ядер галактик со значимыми радио-оптическими сдвигами положений. Основные результаты опубликованы в статье [А1]. В **Разделе 1.1** приводится обзор исследований источников с различием между положением, определенным в радиодиапазоне с помощью РСДБ, и координатами в оптическом. У подавляющего большинства объектов положения в радио- и оптическом диапазонах совпадают (например, [25; 26; 41]). Однако, существуют АЯГ, у которых сдвиг между этими координатами обусловлен физическими условиями в источниках. При использовании каталогов RFC (Radio Fundamental Catalogue), построенного по РСДБ-наблюдениям, и *Gaia* Data Release 2 с координатами, измеренными космическим оптическим телескопом *Gaia*, значимые сдвиги между положениями в радио- и оптическом диапазонах были обнаружены для  $\approx 900$  (около 9% от выборки) активных ядер [28]. Направление этих смещений в основном совпадает с парсековым релятивистским выбросом. Этот результат указывает на связь таких сдвигов с системой «аккреционный диск — джет» [28]. При исследовании РСДБ- и *Gaia*-астрометрии важно отметить, что РСДБ-положение измеряется с использованием функции видности, в то время как телескоп *Gaia* определяет положение центра полного оптического излучения. Следовательно, протяженные структуры будут оказывать влияние на *Gaia*-координаты, а с помощью РСДБ будет измерено положение самой компактной и яркой области

активного ядра в радиодиапазоне. В работе [41] также были обнаружены отличия между АЯГ с оптическим положением, находящимся дальше от основания джета, чем РСДБ-координаты, и объектами, у которых, наоборот, положение в оптическом диапазоне расположено ближе к началу струи, чем в радио. Первые источники имеют как красный, так и голубой оптический цвет, вторые — преимущественно голубой. Более того, величина смещений положений у первых объектов больше (до 20–50 миллисекунд дуги) по сравнению со вторыми (до 2–5 мсек дуги). Эти различия могут быть обусловлены тем, что яркий протяженный оптический выброс сдвигает *Gaia*-положение вниз по струе относительно РСДБ-координат. Такие АЯГ будут иметь красный или голубой цвет в зависимости от того, доминирует ли в полном потоке в оптическом диапазоне джет или аккреционный диск. Случай, при котором *Gaia*-координаты смещаются, наоборот, ближе к апексу струи относительно РСДБ-положения, соответствует преобладанию в оптическом излучении аккреционного диска, который имеет голубой цвет. У объектов с малым углом к лучу зрения излучение аккреционного диска почти неполяризовано в оптическом диапазоне, а основной вклад в степень оптической поляризации вносит релятивистский выброс (Раздел 1.4). Следовательно, используя информацию о направлении и степени интегральной линейной поляризации в оптическом диапазоне, можно выделить среди АЯГ со сдвигами между РСДБ- и *Gaia*-координатами объекты с яркими протяженными оптическими выбросами, а также определить конфигурацию магнитного поля в этих выбросах.

Далее (Раздел 1.2) приводится описание используемых наблюдательных данных. Рассмотрено 9081 АЯГ из работы [28], которое входило и в каталог RFC и в *Gaia* Data Release 2. Для 287 источников в опубликованной литературе была обнаружена информация об интегральной степени и направлении оптической линейной поляризации. Именно эти активные ядра составили исследуемую выборку.

В Разделе 1.3 описывается анализ поляризационных данных в оптическом диапазоне АЯГ с радио-оптическими смещениями положений. У всей выборки и отдельно у лацертид направление оптической поляризации лежит вдоль парсекового выброса. Также было обнаружено, что степень оптической поляризации выше у источников с *Gaia*-координатами, лежащими дальше от начала джета относительно РСДБ-положения, чем у объектов с направлением смещения в противоположную сторону на уровне более  $3\sigma$ .

В Разделе 1.4 описываются наблюдаемые и теоретические типичные величины степени и направления поляризации парсековой релятивистской струи, аккреционного диска, пылевого тора, областей полярного и экваториального рассеяния в оптическом диапазоне. Обсуждение результатов анализа свойств оптической поляризации приводится в Разделе 1.5. Большинство объектов, рассматриваемых нами, имеют малый угол к лучу зрения ( $\lesssim 5^\circ$ ), поэтому основной вклад в измеряемую степень поляризации будет от джета,

а остальные компоненты дают незначительную составляющую из-за симметрии относительно оси системы. Следовательно, бóльшая степень поляризации у источников с РСДБ-координатами ближе к началу струи, чем в оптическом диапазоне может быть обусловлена синхротронным излучением джета, а малая степень поляризации у объектов с противоположным направлением радио-оптических смещений — преобладанием в полном оптическом потоке аккреционного диска с почти неполяризованным излучением. Эти результаты подтверждают выводы работ [41; 50] о том, что протяженный оптический выброс сдвигает *Gaia*-координаты вниз по джету относительно РСДБ-положения, а смещение в противоположную сторону происходит из-за доминирования в полном оптическом излучении аккреционного диска. Параллельность направления поляризации и парсекового джета, которая наиболее ярко проявляется у АЯГ с положением в оптическом диапазоне, находящимся ниже по течению выброса, чем в радио, может указывать на крупномасштабное тороидальное магнитное поле струи [16; 17] или ударные волны [51], распространяющиеся по джету. Основные выводы Главы 1 приведены в **Разделе 1.6**.

**Глава 2** посвящена изучению усредненной по эпохам линейной поляризации и ее переменности в парсековых выбросах активных ядер на частоте 15 ГГц. Результаты нашего исследования опубликованы в статьях [A2; A3]. Введение в рассматриваемую тему приводится в **Разделе 2.1**. Синхротронное излучение релятивистских выбросов на парсековых масштабах обладает линейной поляризацией (например, [52–54]). Она и наблюдаемое фарадеевское вращение [55–57] указывают на присутствие магнитного поля в струе и вокруг нее. Глобальное магнитное поле играет важную роль в запуске релятивистских джетов [16; 17; 58]. Тороидальная компонента этого поля способствует коллимации выбросов [59; 60]. Наблюдаемая сильная переменность степени и направления поляризации указывает на турбулентность плазмы и существование стоячих и движущихся ударных волн [33; 36; 37]. Цель нашего исследования состояла в визуализации стабильной компоненты магнитного поля парсекового выброса и анализа пространственно-временных изменений степени упорядоченности и направления переменной составляющей этого поля при помощи построения РСДБ-изображений усредненной по эпохам поляризации, а также ее переменности.

В **Разделе 2.2** описано построение выборки рассматриваемых АЯГ. Для исследования усредненной по эпохам поляризации и ее переменности использовались данные, полученные в рамках программы мониторинга MOJAVE [42]. В этом проекте наблюдения проводятся на РСДБ-решетке VLBA более 20 лет, типичная скважность которых составляет около полугода. Основным критерием отбора источников при составлении выборки являлось наличие не менее пяти эпох наблюдений линейной поляризации на частоте 15 ГГц. Количество источников в исследуемой выборке составляет 436: примерно 59% объектов являются квазарами, около 31% — лацертидами, остальные активные ядра — радиогалактики, сейфертовские галактики первого типа с узкими

линиями и объекты с неопределенным оптическим классом. Медианы количества эпох наблюдений и соответствующих временных интервалов составляют девять и семь лет, соответственно.

В Разделе 2.3 описана процедура построения усредненных по эпохам изображений, а также карт переменности линейной поляризации. Стековые карты полной и поляризованной интенсивности, а также степени и направления поляризации были получены, используя усредненные одноэпоховые карты параметров Стокса  $I$ ,  $Q$  и  $U$ . Полученные стековые изображения имеют большую чувствительность по сравнению с одноэпоховыми. При этом в них эффективно подавлена переменная составляющая величины. Таким образом, подобные поляризационные карты показывают распределение направления и степени упорядоченности стабильной компоненты магнитного поля в парсековом джете. Также были построены медианные изображения поляризационной интенсивности и степени поляризации. Они определялись, как медиана по эпохам соответствующих одноэпоховых изображений. Карты, построенные таким образом, отражают типичные значения величины. Были получены карты переменности во времени степени и направления поляризации. В качестве меры разброса было выбрано стандартное отклонение. Стековые и медианные изображения, а также карты переменности были получены для всей выборки. Для всех изображений были построены карты распределения ошибок с использованием Монте-Карло моделирования.

В Разделе 2.4 приводится анализ переменности направления поляризации в областях РСДБ-ядра и джета, как целого. Распределение медианной по РСДБ-ядру переменности оказалось шире по сравнению с медианной по парсековому выбросу: интерквартильный размах в первом случае составляет  $\approx 20^\circ$ , во втором — около  $9^\circ$ . Сравнение распределений медиан переменности направления поляризации по РСДБ-ядру и струе с помощью рандомизационного теста [43] показало, что направление поляризации в джете является более стабильным, чем в области РСДБ-ядра. Уровень значимости этого различия составляет более  $3\sigma$ . Причиной могут являться неразрешенные компоненты с разным направлением поляризации в РСДБ-ядре, где они приводят к более переменному углу поляризации, чем в выбросе, где компоненты разрешаются. Также искривленность струи в ядерной области, возможно, тоже способствует более высокой переменности направления поляризации. Еще одним результатом является то, что направление поляризации в РСДБ-ядрах лацертид оказалось более стабильным на уровне значимости более  $3\sigma$ , чем в квазарах. Ранее подобный результат был получен в работе [34] на основе меньшей по числу источников выборки и более короткого временного интервала наблюдения каждого из них. Причиной различия в стабильности направления поляризации у квазаров и лацертид может служить более высокая переменность во времени меры фарадеевского вращения в квазарах по сравнению с лацертидами при условии доминирования упорядоченной составляющей магнитного поля.

В **Разделе 2.5** описывается исследование поведения переменности поляризации, а также медианной и стековой степени поляризации вдоль парсековой струи. Установлено, что стабильность направления поляризации возрастает с расстоянием от РСДБ-ядра. Такая зависимость может быть обусловлена уменьшением переменности направления магнитного поля вниз по струе. Анализ зависимости доли значимых корреляций переменности с расстоянием вдоль струи от временного интервала наблюдения источника и количества эпох показал, что для обнаружения значимого на уровне  $2\sigma$  тренда необходимо более 15 эпох и не менее 12 лет наблюдений. Анализ показал, что стековая и медианная степень поляризации возрастают вниз по выбросу. Такое поведение на одноэпоховых картах было получено в более ранних работах [61–64]. Вклад в увеличение усредненной по времени степени поляризации могут давать несколько факторов: уменьшение деполяризации внутри диаграммы направленности, фарадеевского вращения [57; 65], угла закрутки спирального магнитного поля [66] и ослабление ударных волн с расстоянием от РСДБ-ядра, эффект старения спектрального индекса [67]. Также было обнаружено, что относительная переменность степени поляризации значимо не меняется вниз по выбросу.

Анализ карт усредненной по эпохам поляризации поперек парсековой струи обсуждается в **Разделе 2.6**. В АЯГ выборки типично наблюдаются следующие распределения усредненного по эпохам направления поляризации: оно параллельно оси выброса, перпендикулярно ему, параллельно оси во внутренних областях джета и становится перпендикулярным ей ближе к его краям. Также оказалось, что у лацертид направление поляризации типично параллельно струе, а степень поляризации почти не меняется поперек джета. У квазаров наблюдается U- или W-образный поперечный профиль усредненной по эпохам степени поляризации, при этом стековое направление поляризации либо перпендикулярно джету по всей его ширине, либо параллельно струе в ее внутренних областях и становится перпендикулярным ей во внешних. Такие сочетания распределений стековой степени и направления поляризации указывают на существование спирального магнитного поля в джете с оболочкой вокруг него, порожденной взаимодействием с внешней средой [68]. Когда наблюдается направление поляризации параллельное выбросу, причем поляризационная структура уже, чем в полной интенсивности, то в излучении преобладают области центрального канала выброса, а оболочка является либо геометрически тонкой, либо ее излучение слабое. Если поляризация измеряется по всей ширине струи и усредненное направление поляризации перпендикулярно ей, то это указывает на то, что в излучении источника доминирует оболочка. Случай, при котором направление поляризации плавно поворачивается от продольного у оси к поперечному у края джета, а степень поляризации возрастает поперек джета, соответствует сравнимому вкладу струи и оболочки в полное излучение источника. В **Разделе 2.7** суммируются выводы Главы 2.

В **Заключении** приводятся основные результаты всей диссертации. В **Приложении А** показаны усредненные по эпохам изображения и карты переменности линейной поляризации на частоте 15 ГГц парсековых выбросов 15 АЯГ с наиболее богатой/протяженной поляризационной структурой.

## Список литературы

1. *Засов А. В., Постнов К. А.* Общая АСТРОФИЗИКА. — 3-е изд, исправл. — М. : БЕК 2, 2015. — 576 с.
2. *Plavin A., Kovalev Y. Y., Kovalev Y. A., [et al.]*. Observational Evidence for the Origin of High-energy Neutrinos in Parsec-scale Nuclei of Radio-bright Active Galaxies // *The Astrophysical Journal*. — 2020. — Vol. 894, no. 2. — P. 101. — DOI: [10.3847/1538-4357/ab86bd](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab86bd).
3. *Hovatta T., Lindfors E., Kiehlmann S., [et al.]*. Association of IceCube neutrinos with radio sources observed at Owens Valley and Metsähovi Radio Observatories // *Astronomy & Astrophysics*. — 2021. — Vol. 650. — A83. — DOI: [10.1051/0004-6361/202039481](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039481).
4. *Plavin A. V., Kovalev Y. Y., Kovalev Y. A., [et al.]*. Directional Association of TeV to PeV Astrophysical Neutrinos with Radio Blazars // *The Astrophysical Journal*. — 2021. — Vol. 908, no. 2. — P. 157. — DOI: [10.3847/1538-4357/abceb8](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abceb8).
5. *Buson S., Tramacere A., Pfeiffer L., [et al.]*. Beginning a Journey Across the Universe: The Discovery of Extragalactic Neutrino Factories // *The Astrophysical Journal*. — 2022. — Vol. 933, no. 2. — P. L43. — DOI: [10.3847/2041-8213/ac7d5b](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac7d5b).
6. *Abdo A. A., Ackermann M., Agudo I., [et al.]*. The Spectral Energy Distribution of Fermi Bright Blazars // *The Astrophysical Journal*. — 2010. — Vol. 716, no. 1. — P. 30–70. — DOI: [10.1088/0004-637X/716/1/30](https://doi.org/10.1088/0004-637X/716/1/30).
7. *Kellermann K. I., Condon J. J., Kimball A. E., [et al.]*. Radio-loud and Radio-quiet QSOs // *The Astrophysical Journal*. — 2016. — Vol. 831, no. 2. — P. 168. — DOI: [10.3847/0004-637X/831/2/168](https://doi.org/10.3847/0004-637X/831/2/168).
8. *Urry C. M., Padovani P.* Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. — 1995. — Vol. 107. — P. 803. — DOI: [10.1086/133630](https://doi.org/10.1086/133630).
9. *Seielstad G. A., Cohen M. H., Linfield R. P., [et al.]*. Further monitoring of the structure of superluminal radio sources. // *The Astrophysical Journal*. — 1979. — Vol. 229. — P. 53–72. — DOI: [10.1086/156929](https://doi.org/10.1086/156929).
10. *Jorstad S. G., Marscher A. P., Morozova D. A., [et al.]*. Kinematics of Parsec-scale Jets of Gamma-Ray Blazars at 43 GHz within the VLBA-BU-BLAZAR Program // *The Astrophysical Journal*. — 2017. — Vol. 846, no. 2. — P. 98. — DOI: [10.3847/1538-4357/aa8407](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa8407).

11. *Lioudakis I., Hovatta T., Huppenkothen D., [et al.]. Constraining the Limiting Brightness Temperature and Doppler Factors for the Largest Sample of Radio-bright Blazars // The Astrophysical Journal. — 2018. — Vol. 866, no. 2. — P. 137. — DOI: [10.3847/1538-4357/aae2b7](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aae2b7).*
12. *Homan D. C., Cohen M. H., Hovatta T., [et al.]. MOJAVE. XIX. Brightness Temperatures and Intrinsic Properties of Blazar Jets // The Astrophysical Journal. — 2021. — Vol. 923, no. 1. — P. 67. — DOI: [10.3847/1538-4357/ac27af](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac27af).*
13. *Gómez J. L., Lobanov A. P., Bruni G., [et al.]. Probing the Innermost Regions of AGN Jets and Their Magnetic Fields with RadioAstron. I. Imaging BL Lacertae at 21 Microarcsecond Resolution // The Astrophysical Journal. — 2016. — Vol. 817, no. 2. — P. 96. — DOI: [10.3847/0004-637X/817/2/96](https://doi.org/10.3847/0004-637X/817/2/96).*
14. *Kovalev Y. Y., Kardashev N. S., Kellermann K. I., [et al.]. RadioAstron Observations of the Quasar 3C273: A Challenge to the Brightness Temperature Limit // The Astrophysical Journal. — 2016. — Vol. 820, no. 1. — P. L9. — DOI: [10.3847/2041-8205/820/1/L9](https://doi.org/10.3847/2041-8205/820/1/L9).*
15. *Pushkarev A. B., Kovalev Y. Y., Lister M. L., [et al.]. MOJAVE - XIV. Shapes and opening angles of AGN jets // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2017. — Vol. 468, no. 4. — P. 4992–5003. — DOI: [10.1093/mnras/stx854](https://doi.org/10.1093/mnras/stx854).*
16. *Blandford R. D., Znajek R. L. Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 1977. — Vol. 179. — P. 433–456. — DOI: [10.1093/mnras/179.3.433](https://doi.org/10.1093/mnras/179.3.433).*
17. *Blandford R. D., Payne D. G. Hydromagnetic flows from accretion disks and the production of radio jets. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 1982. — Vol. 199. — P. 883–903. — DOI: [10.1093/mnras/199.4.883](https://doi.org/10.1093/mnras/199.4.883).*
18. *Stickel M., Fried J. W., Kuehr H. The complete sample of 1 Jy BL Lac objects. II. Observational data. // Astronomy and Astrophysics, Suppl. Ser. — 1993. — Vol. 98. — P. 393–442.*
19. *Hovatta T., Valtaoja E., Tornikoski M., [et al.]. Doppler factors, Lorentz factors and viewing angles for quasars, BL Lacertae objects and radio galaxies // Astronomy & Astrophysics. — 2009. — Vol. 494, no. 2. — P. 527–537. — DOI: [10.1051/0004-6361:200811150](https://doi.org/10.1051/0004-6361:200811150).*
20. *Schneider D. P., Richards G. T., Hall P. B., [et al.]. The Sloan Digital Sky Survey Quasar Catalog. V. Seventh Data Release // The Astronomical Journal. — 2010. — Vol. 139, no. 6. — P. 2360. — DOI: [10.1088/0004-6256/139/6/2360](https://doi.org/10.1088/0004-6256/139/6/2360).*

21. *Charlot P., Jacobs C. S., Gordon D., [et al.]*. The third realization of the International Celestial Reference Frame by very long baseline interferometry // *Astronomy & Astrophysics*. — 2020. — Vol. 644. — A159. — DOI: [10.1051/0004-6361/202038368](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038368).
22. *Матвеевко Л. И., Кардашев Н. С., Шоломицкий Г. Б.* О радиоинтерферометре с большой базой // *Известия ВУЗов. Радиофизика*. — 1965. — Т. 8, № 4. — С. 651–654.
23. *Gaia Collaboration, Mignard F., Klioner S. A., [et al.]*. Gaia Data Release 2. The celestial reference frame (Gaia-CRF2) // *Astronomy & Astrophysics*. — 2018. — Vol. 616. — A14. — DOI: [10.1051/0004-6361/201832916](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832916).
24. *Gaia Collaboration, Prusti T., de Bruijne J. H. J., [et al.]*. The Gaia mission // *Astronomy & Astrophysics*. — 2016. — Vol. 595. — A1. — DOI: [10.1051/0004-6361/201629272](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629272).
25. *Mignard F., Klioner S., Lindgren L., [et al.]*. Gaia Data Release 1. Reference frame and optical properties of ICRF sources // *Astronomy & Astrophysics*. — 2016. — Vol. 595. — A5. — DOI: [10.1051/0004-6361/201629534](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629534).
26. *Petrov L., Kovalev Y. Y.* On significance of VLBI/Gaia position offsets // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — Vol. 467, no. 1. — P. L71–L75. — DOI: [10.1093/mnras/slx001](https://doi.org/10.1093/mnras/slx001).
27. *Gaia Collaboration, Brown A. G. A., Vallenari A., [et al.]*. Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties // *Astronomy & Astrophysics*. — 2018. — Vol. 616. — A1. — DOI: [10.1051/0004-6361/201833051](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833051).
28. *Petrov L., Kovalev Y. Y., Plavin A. V.* A quantitative analysis of systematic differences in the positions and proper motions of Gaia DR2 with respect to VLBI // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2019. — Vol. 482. — P. 3023–3031. — DOI: [10.1093/mnras/sty2807](https://doi.org/10.1093/mnras/sty2807).
29. *Kovalev Y. Y., Pushkarev A. B., Nokhrina E. E., [et al.]*. A transition from parabolic to conical shape as a common effect in nearby AGN jets // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2020. — Vol. 495, no. 4. — P. 3576–3591. — DOI: [10.1093/mnras/staa1121](https://doi.org/10.1093/mnras/staa1121).
30. *Baczko A.-K., Ros E., Kadler M., [et al.]*. Ambilateral collimation study of the twin-jets in NGC 1052 // *Astronomy & Astrophysics*. — 2022. — Vol. 658. — A119. — DOI: [10.1051/0004-6361/202141897](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141897).
31. *Prior C., Gourgouliatos K. N.* Observational signatures of magnetic field structure in relativistic AGN jets // *Astronomy & Astrophysics*. — 2019. — Vol. 622. — A122. — DOI: [10.1051/0004-6361/201834469](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834469).

32. *Gabuzda D. C.* Inherent and Local Magnetic Field Structures in Jets from Active Galactic Nuclei // *Galaxies*. — 2021. — Vol. 9, no. 3. — P. 58. — DOI: [10.3390/galaxies9030058](https://doi.org/10.3390/galaxies9030058).
33. *Marscher A. P., Jorstad S. G., D’Arcangelo F. D., [et al.]*. The inner jet of an active galactic nucleus as revealed by a radio-to- $\gamma$ -ray outburst // *Nature*. — 2008. — Vol. 452, no. 7190. — P. 966–969. — DOI: [10.1038/nature06895](https://doi.org/10.1038/nature06895).
34. *Hodge M. A., Lister M. L., Aller M. F., [et al.]*. MOJAVE XVI: Multi-epoch Linear Polarization Properties of Parsec-scale AGN Jet Cores // *The Astrophysical Journal*. — 2018. — Vol. 862, no. 2. — P. 151. — DOI: [10.3847/1538-4357/aacb2f](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aacb2f).
35. *Gomez J. L., Alberdi A., Marcaide J. M.* Synchrotron emission from bent shocked relativistic jets. II. Shock waves in helical jets. // *Astronomy & Astrophysics*. — 1994. — Vol. 284. — P. 51–64.
36. *Myserlis I., Komossa S., Angelakis E., [et al.]*. High cadence, linear, and circular polarization monitoring of OJ 287. Helical magnetic field in a bent jet // *Astronomy & Astrophysics*. — 2018. — Vol. 619. — A88. — DOI: [10.1051/0004-6361/201732273](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732273).
37. *Cohen M. H., Aller H. D., Aller M. F., [et al.]*. Reversals in the Direction of Polarization Rotation in OJ 287 // *The Astrophysical Journal*. — 2018. — Vol. 862, no. 1. — P. 1. — DOI: [10.3847/1538-4357/aacb31](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aacb31).
38. *Zhang H., Chen X., Böttcher M.* Synchrotron Polarization in Blazars // *The Astrophysical Journal*. — 2014. — Vol. 789, no. 1. — P. 66. — DOI: [10.1088/0004-637X/789/1/66](https://doi.org/10.1088/0004-637X/789/1/66).
39. *Zhang H., Chen X., Böttcher M., [et al.]*. Polarization Swings Reveal Magnetic Energy Dissipation in Blazars // *The Astrophysical Journal*. — 2015. — Vol. 804, no. 1. — P. 58. — DOI: [10.1088/0004-637X/804/1/58](https://doi.org/10.1088/0004-637X/804/1/58).
40. *Marscher A. P.* Turbulent, Extreme Multi-zone Model for Simulating Flux and Polarization Variability in Blazars // *The Astrophysical Journal*. — 2014. — Vol. 780, no. 1. — P. 87. — DOI: [10.1088/0004-637X/780/1/87](https://doi.org/10.1088/0004-637X/780/1/87).
41. *Plavin A. V., Kovalev Y. Y., Petrov L. Y.* Dissecting the AGN Disk-Jet System with Joint VLBI-Gaia Analysis // *The Astrophysical Journal*. — 2019. — Vol. 871. — P. 143. — DOI: [10.3847/1538-4357/aaf650](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaf650).
42. *Lister M. L., Aller M. F., Aller H. D., [et al.]*. MOJAVE. XV. VLBA 15 GHz Total Intensity and Polarization Maps of 437 Parsec-scale AGN Jets from 1996 to 2017 // *The Astrophysical Journals*. — 2018. — Vol. 234, no. 1. — P. 12. — DOI: [10.3847/1538-4365/aa9c44](https://doi.org/10.3847/1538-4365/aa9c44).
43. *Edgington E. S.* Randomization Tests // *International Encyclopedia of Statistical Science* / ed. by M. Lovric. — Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2011. — P. 1182–1183. — DOI: [10.1007/978-3-642-04898-2\\_56](https://doi.org/10.1007/978-3-642-04898-2_56).

44. *Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T.*, [et al.]. Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing, Section 15.6.2. — 3rd ed. — New York, NY, USA : Cambridge University Press, 2007.
45. *Högbom J. A.* Aperture Synthesis with a Non-Regular Distribution of Interferometer Baselines // *Astronomy & Astrophysics, Suppl. Ser.* — 1974. — Vol. 15. — P. 417.
46. *Shepherd M. C.* Difmap: an Interactive Program for Synthesis Imaging // *Astronomical Data Analysis Software and Systems VI.* Vol. 125 / ed. by G. Hunt, H. Payne. — 1997. — P. 77. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
47. *Blinov D., Pavlidou V., Papadakis I. E.*, [et al.]. RoboPol: optical polarization-plane rotations and flaring activity in blazars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2016. — Vol. 457, no. 2. — P. 2252–2262. — DOI: [10.1093/mnras/stw158](https://doi.org/10.1093/mnras/stw158).
48. *Kendall M.* RANK CORRELATION METHODS. — Second Edition. — London : Charles Griffin Co. Ltd., 1955.
49. *Scholz F. W., Stephens M. A.* K-Sample Anderson-Darling Tests // *Journal of the American Statistical Association.* — 1987. — Vol. 82, no. 399. — P. 918–924. — DOI: [10.2307/2288805](https://doi.org/10.2307/2288805).
50. *Kovalev Y. Y., Petrov L., Plavin A. V.* VLBI-Gaia offsets favor parsec-scale jet direction in active galactic nuclei // *Astronomy & Astrophysics.* — 2017. — Vol. 598. — P. L1. — DOI: [10.1051/0004-6361/201630031](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201630031).
51. *Hughes P. A., Aller H. D., Aller M. F.* Polarized radio outbursts in BL Lacertae. II. The flux and polarization of a piston-driven shock. // *The Astrophysical Journal.* — 1985. — Vol. 298. — P. 301–315. — DOI: [10.1086/163611](https://doi.org/10.1086/163611).
52. *Roberts D. H., Gabuzda D. C., Wardle J. F. C.* Linear Polarization Structure of the BL Lacertae Object OJ 287 at Milliarcsecond Resolution // *The Astrophysical Journal.* — 1987. — Vol. 323. — P. 536. — DOI: [10.1086/165849](https://doi.org/10.1086/165849).
53. *Gabuzda D. C., Cawthorne T. V., Roberts D. H.*, [et al.]. The Milliarcsecond Polarization Structure of Six BL Lacertae Objects // *The Astrophysical Journal.* — 1989. — Vol. 347. — P. 701. — DOI: [10.1086/168162](https://doi.org/10.1086/168162).
54. *Cawthorne T. V., Wardle J. F. C., Roberts D. H.*, [et al.]. Milliarcsecond Polarization Structure of 24 Objects from the Pearson-Readhead Sample of Bright Extragalactic Radio Sources. I. The Images // *The Astrophysical Journal.* — 1993. — Vol. 416. — P. 496. — DOI: [10.1086/173253](https://doi.org/10.1086/173253).
55. *Gabuzda D. C., Pushkarev A. B., Garnich N. N.* Unusual radio properties of the BL Lac object 0820+225 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2001. — Vol. 327, no. 1. — P. 1–9. — DOI: [10.1046/j.1365-8711.2001.04446.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2001.04446.x).

56. *Zavala R. T., Taylor G. B.* A View through Faraday's Fog: Parsec-Scale Rotation Measures in Active Galactic Nuclei // *The Astrophysical Journal*. — 2003. — Vol. 589, no. 1. — P. 126–146. — DOI: [10.1086/374619](https://doi.org/10.1086/374619).
57. *Hovatta T., Lister M. L., Aller M. F., [et al.]*. MOJAVE: Monitoring of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. VIII. Faraday Rotation in Parsec-scale AGN Jets // *The Astronomical Journal*. — 2012. — Vol. 144, no. 4. — P. 105. — DOI: [10.1088/0004-6256/144/4/105](https://doi.org/10.1088/0004-6256/144/4/105).
58. *Lovelace R. V. E., Wang J. C. L., Sulkanen M. E.* Self-collimated Electromagnetic Jets from Magnetized Accretion Disks // *The Astrophysical Journal*. — 1987. — Vol. 315. — P. 504. — DOI: [10.1086/165156](https://doi.org/10.1086/165156).
59. *Benford G.* Current-carrying beams in astrophysics: models for double radio sources and jets. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1978. — Vol. 183. — P. 29–48. — DOI: [10.1093/mnras/183.1.29](https://doi.org/10.1093/mnras/183.1.29).
60. *Chan K. L., Henriksen R. N.* On the supersonic dynamics of magnetized jets of thermal gas in radio galaxies // *The Astrophysical Journal*. — 1980. — Vol. 241. — P. 534–551. — DOI: [10.1086/158368](https://doi.org/10.1086/158368).
61. *Cawthorne T. V., Wardle J. F. C., Roberts D. H., [et al.]*. Milliarcsecond Polarization Structure of 24 Objects from the Pearson-Readhead Sample of Bright Extragalactic Radio Sources. II. Discussion // *The Astrophysical Journal*. — 1993. — Vol. 416. — P. 519. — DOI: [10.1086/173254](https://doi.org/10.1086/173254).
62. *Lister M. L., Smith P. S.* Intrinsic Differences in the Inner Jets of High and Low Optically Polarized Radio Quasars // *The Astrophysical Journal*. — 2000. — Vol. 541, no. 1. — P. 66–87. — DOI: [10.1086/309413](https://doi.org/10.1086/309413).
63. *Lister M. L.* Parsec-Scale Jet Polarization Properties of a Complete Sample of Active Galactic Nuclei at 43 GHz // *The Astrophysical Journal*. — 2001. — Vol. 562, no. 1. — P. 208–232. — DOI: [10.1086/323522](https://doi.org/10.1086/323522).
64. *Lister M. L., Homan D. C.* MOJAVE: Monitoring of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. I. First-Epoch 15 GHz Linear Polarization Images // *The Astronomical Journal*. — 2005. — Vol. 130, no. 4. — P. 1389–1417. — DOI: [10.1086/432969](https://doi.org/10.1086/432969).
65. *Kravchenko E. V., Kovalev Y. Y., Sokolovsky K. V.* Parsec-scale Faraday rotation and polarization of 20 active galactic nuclei jets // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — Vol. 467, no. 1. — P. 83–101. — DOI: [10.1093/mnras/stx021](https://doi.org/10.1093/mnras/stx021).
66. *Porth O., Fendt C., Meliani Z., [et al.]*. Synchrotron Radiation of Self-collimating Relativistic Magnetohydrodynamic Jets // *The Astrophysical Journal*. — 2011. — Vol. 737, no. 1. — P. 42. — DOI: [10.1088/0004-637X/737/1/42](https://doi.org/10.1088/0004-637X/737/1/42).
67. *Kardashev N. S.* Nonstationarity of Spectra of Young Sources of Nonthermal Radio Emission // *Soviet Astronomy*. — 1962. — Vol. 6. — P. 317.

68. *Butuzova M. S., Pushkarev A. B.* Configuration of the global magnetic field in AGN parsec-scale jets // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2023. — Vol. 520, no. 4. — P. 6335–6349. — DOI: [10.1093/mnras/stad121](https://doi.org/10.1093/mnras/stad121).