

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Физический институт им. П. Н. Лебедева
Астрокосмический центр

На правах рукописи
УДК 52-13; 52-14; 52-65; 52-77; 524.7-1/-8

Кравченко Евгения Васильевна

**Многочастотные поляриметрические
исследования физических условий
в активных ядрах галактик**

Специальность 01.03.02 – «астрофизика и звездная астрономия»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2017

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

Научный руководитель: член-корреспондент РАН
доктор физико-математических наук
АКЦ ФИАН, г. Москва / Зав. лабораторией
внегалактической радиоастрономии
Ковалев Юрий Юрьевич

Официальные оппоненты: **Оппонент 1**, уч. степень, место работы / позиция в институте

Оппонент 2, уч. степень, место работы / позиция в институте

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

Защита состоится «XX» месяца 2017 г. в XX часов на заседании диссертационного совета Д002.023.01 Физического института им П. Н. Лебедева РАН по адресу: г. Москва, улица Профсоюзная, дом 84/32, Институт космических исследований РАН, конференц-зал.

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 сайте ФИАН <http://www.asc-lebedev.ru> в разделе «Диссертационный совет».

Автореферат разослан «02» февраля 2017 года.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д002.023.01,
доктор физико-математических наук

Ю. А. Ковалев

Общая характеристика работы

Актуальность темы и современное состояние исследований

Активные ядра галактик (АЯГ), включающие в себя квазары, лацертиды, сейфертовские и радиогалактики, являются ярчайшими нетранзиентными объектами Вселенной [1]. Они доступны для наблюдений с очень больших расстояний благодаря огромному энерговыделению вплоть до $\sim 10^{47}$ эрг/с, возникающему в их недрах. Нетепловые механизмы делают АЯГ видимыми во всем электромагнитном спектре: от радио до гамма-диапазона. Благодаря этим свойствам, активные ядра галактик используются для исследования структуры и эволюции Вселенной, изучения межгалактического вещества и магнитных полей, а с недавнего времени в системах глобального позиционирования и для прогнозирования космической погоды.

Являясь уникальными астрофизическими лабораториями, эти объекты активно изучаются на протяжении более чем 50 лет, с момента создания первых каталогов космических радиоисточников в 1959 г. [2]. основополагающие работы, теоретически описывающие природу и физические процессы в АЯГ, появились в 1977–1979 гг. [3; 4]. Тем не менее, детальная картина динамики этих объектов начала проясняться только в последнее десятилетие (например, [5]). Согласно современному пониманию, АЯГ представляют собой компактные области в центрах далеких галактик. При этом их активность вызвана падением вещества на центральную сверхмассивную черную дыру (ЧД, [6]), сопровождающимся формированием биполярных выбросов (струй, джетов). Они представляют собой высоко коллимированные потоки плазмы, движущиеся с ультрарелятивистскими скоростями [7]. Большинство релятивистских струй радиогромких АЯГ видны земному наблюдателю под малыми углами зрения [8]. Релятивистские эффекты усиливают измеряемую наблюдателем плотность потока движущейся релятивистской плазмы, в результате чего в спектре и на радиоизображениях этих источников доминирует излучение струй. Те же эффекты ответственны за наблюдаемое сверхсветовое движение деталей струй и экстремально высокие яркостные температуры [9; 10]. Более того, активные ядра галактик демонстрируют переменность излучения во всем электромагнитном спектре на масштабах от нескольких минут [11] до десятилетий [12]. А также показывают высокую степень линейной поляризации в радиодиапазоне [13].

Несмотря на активные продолжительные исследования, единого мнения о механизмах и свойствах активности АЯГ нет. Остаются неясными особенности и условия формирования АЯГ. Какие механизмы порождают их активность, а именно, какой процесс запускает формирование струйных выбросов?

Каков состав струй, как они ускоряется до ультрарелятивистских скоростей и фокусируются? Существенным также является вопрос о роли магнитного поля в АЯГ. Актуальными также остаются вопросы о механизмах излучения струй на разных длинах волн [14], как и то, где именно рождается и как распространяется это излучение. Так, широкоизвестные модели АЯГ (например, [15; 16]) неспособны объяснить новые результаты наземно-космического радиоинтерферометра РадиоАстрон [17; 18]. Наблюдаемые в проекте высокие яркостные температуры АЯГ [14] требуют привлечения таких моделей, как протонные релятивистские струи [19] или когерентное излучение [20]. Эти модели также успешно решают проблему генерации высокочастотного излучения АЯГ ($\gtrsim 10^{16}$ ГГц, [21]), в том числе космических лучей сверхвысоких энергий [22].

Активно развивающиеся исследования свойств и физических параметров активных ядер галактик существенно продвинуло наше понимание об их природе. Параллельно с этим существенно возросли возможности наблюдений, в связи с чем стали доступны наблюдения одновременно в нескольких диапазонах частот с очень высоким спектральным разрешением. Наблюдения показывают, что области, находящиеся в непосредственной близости от ЧД (доли парсек), имеют напряженности магнитных полей приблизительно единицы Гаусс [23; 24]. При этом формирование струй АЯГ происходит уже на расстоянии нескольких гравитационных радиусов от центра АЯГ [25]. Современные теоретические модели этих объектов согласуются с этими выводами, и отводят магнитным полям значительную роль в формировании и распространении струйных выбросов АЯГ [26], предсказывая напряженность магнитных полей около 10^2 – 10^4 Гаусс в окрестности ЧД [27; 28]. Вместе с этим модели протонных струй АЯГ или когерентного излучения требуют существования магнитных полей напряженностью 10^6 – 10^9 Гс. Такие области будут проявлять себя экстремально большими фарадеевскими мерами вращения ($\gtrsim 10^6$ рад/м²). Регистрация таких величин мер вращения в нескольких АЯГ (например, $(9.4 \pm 0.4) \times 10^6$ рад/м² в квазаре PKS 1830–21 [29]) может указывать на реальность этих моделей.

Единого мнения о структуре и геометрии магнитных полей в центральных частях и джетах АЯГ также не существует: остается неизвестным, преобладает ли турбулентное [30–32] или упорядоченное, широкомасштабное поле [33–35]. Какова геометрия и структура магнитных полей, формируются ли плазменные неустойчивости и релятивистские ударные волны в струях [36] и какое влияние они оказывают на магнитные поля?

Наличие магнитных полей в окружающей струю среде и в самом веществе джета оказывает влияние на распространение излучения до наблюда-

теля, приводя к появлению частотно-зависимых и поляризационных эффектов [37]. Среди прочих, это фарадеевское вращение плоскости поляризации волны и деполяризация излучения. Вместе с другими эффектами, например, релятивистской абберацией, эти явления искажают видимые наблюдателю характеристики излучения. Поскольку поляризационные радиоинтерферометрические исследования требуют большого наблюдательного времени и дополнительных усилий для калибровки данных, многие современные работы выполняются без учета этих эффектов (например, [13]). Помимо этого многие авторы рассматривают неодновременные поляриметрические наблюдения АЯГ на разных частотах (например, [38]). Такой анализ может привести к ошибочным результатам и интерпретации наблюдательных данных. Вопрос о локализации и свойствах вещества, в котором образуется фарадеевское вращение и происходит деполяризация излучения, также остается открытым (см., например, [39]). Наиболее вероятно, это может быть область узких эмиссионных линий, внешняя оболочка струи, вещество нашей Галактики и др. Существенное преимущество этих поляризационных эффектов состоит в сильной зависимости от длины волны, вследствие чего они могут быть изучены посредством многочастотных наблюдений.

Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ, [40]) является уникальным инструментом для исследования АЯГ, поскольку реализуемое высокое угловое разрешение этих наблюдений позволяет изучать структуру и кинематику АЯГ в деталях. Проведение многочастотных РСДБ-наблюдений дает дополнительную возможность изучать эти объекты одновременно на различных пространственных масштабах. Анализ РСДБ-изображений, в том числе поляризационных данных, совместно с результатами наблюдений в других диапазонах и на других инструментах, является основополагающим в современном изучении физики и свойств релятивистских струй АЯГ. Яркое подтверждение этому – недавние наблюдения VL Lacertae наземно-космическим интерферометром РадиоАстрон [18], в результате которых исследована поляризационная структура струи АЯГ с рекордным угловым разрешением 21 микросекунды дуги.

Цель работы

Целью настоящей диссертационной работы являются исследования структуры и физических характеристик АЯГ на парсековых масштабах, а именно:

- локализация и оценка физических параметров теплового замагниченного вещества АЯГ;
- восстановление, анализ структуры и свойств магнитных полей АЯГ;

- локализация области генерации гамма- и радиоизлучения и изучение особенностей его распространения вдоль релятивистских струй АЯГ;
- исследование временной переменности характеристик АЯГ и ее связь с активностью источника.

Конкретные задачи исследования

Достижение поставленных целей включает в себя решение следующих задач:

- исследование распределения и особенностей фарадеевского вращения в АЯГ на сантиметровых волнах, в том числе изучение вопроса о местоположении вещества, ответственного за формирование этого вращения;
- проведение исследований структуры и физических свойств АЯГ, характера и геометрии их магнитных полей посредством анализа величины и направления линейной поляризации;
- проверка предсказаний моделей АЯГ о физических процессах в их внутренних областях;
- исследование природы и свойств временной переменности АЯГ.

Методология и методы исследования

Решение поставленных целей и задач исследования выполняется посредством обработки и анализа наблюдательных данных с использованием методов радиоинтерферометрии, поляриметрии, фарадеевского вращения и синтеза фарадеевских мер вращения, кросс-корреляции данных, сдвига РСДБ ядра с частотой, математической статистики, в т.ч. подгонка модельных предсказаний под наблюдаемые данные и оценка достоверности результатов анализа и др.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Получены новые РСДБ-карты фарадеевской меры вращения для 21 квазара на сантиметровых волнах. Максимальная измеренная мера вращения в системе отсчета источника составила $(1.80 \pm 0.09) \times 10^4$ рад/м² в квазаре 3С 48. Обнаружено наличие переменности фарадеевской меры вращения на масштабах месяцев и лет в квазарах S4 1030+611, 3С 309.1, 3С 138, 1655+077 и 1803+784. Результаты свидетельствуют о зависимости временной переменности меры вращения и фазы активности струй, то есть о связи с их внутренними свойствами. Локализовано местоположение тепловой замагниченной плазмы, служащей источником образования фарадеевского враще-

ния, относительно областей генерации синхротронного излучения в струйных выбросах: это вещество представляет собой внешний фарадеевский экран и располагается в непосредственной близости от релятивистского джета АЯГ. Показано, что этот экран может представлять собой внешнюю оболочку или области струй АЯГ. При этом часть вращения может происходить в неоднородном веществе области узких эмиссионных линий. Произведены оценки физических условий в этих средах по наблюдаемым величинам мер вращения. В джетах квазаров 0148+274, 0952+179, 1004+141, 1219+285, 1458+718, 1642+690 и 2201+315 обнаружены значимые поперечные градиенты фарадеевского вращения. Это является косвенным подтверждением наличия спиралевидного магнитного поля во внешних областях струй, наличие которого предсказывается большинством теоретических и аналитических моделей АЯГ.

2. Определены действующие деполяризационные механизмы и физические свойства вещества, окружающего релятивистские струи 20 активных ядер галактик, на основе РСДБ исследований поляризационных свойств объектов в диапазоне 1.4–15 ГГц. Результаты указывают на то, что этот фарадеевский экран может иметь неоднородную структуру и содержать как хаотично ориентированные, так и упорядоченные магнитные поля. Построены новые РСДБ-карты ориентации истинного позиционного угла электрического вектора 20 АЯГ в интервале частот от 1.4 до 15 ГГц. Анализ распределения истинного поляризационного угла вдоль струи показывает простую поляризационную структуру в половине рассматриваемых АЯГ, в то время как остальные источники проявляют сложное поведение. Это случаи поворота поляризационного угла в видимом начале и вдоль по струе, в том числе скачки на 90° , различие ориентаций векторов линейной поляризации в «сердцевине» джета и по его краям. Детальное рассмотрение каждого источника показывает, что наличие регулярных тороидальных и полоидальных магнитных полей, сохраняющих свое направление на протяжении от единиц до сотен парсек, может объяснить проявляемое сложное поляризационное поведение большинства исследуемых струй АЯГ. Для некоторых источников получены указания на существование турбулентных магнитных полей и таких механизмов, как ударные волны и плазменные неустойчивости. По результатам анализа предложено рассматривать структуру струйных выбросов АЯГ в виде «сердцевины» и окружающей ее оболочки. В таком представлении фарадеевское вращение и деполяризация излучения происходят во внешних слоях струи (оболочке), а в ее «сердцевине» генерируется синхротронное излучение. При этом магнитные поля в этих областях могут отличаться свойствами и ориентацией. Такая модель способна объяснить все проявляемые поляри-

зационные свойства исследуемых АЯГ.

3. Успешно опробован метод синтеза фарадеевских мер вращения на наблюдениях галактического магнетара J1745–2900, выполненных на телескопе VLA в диапазоне 40–48 ГГц. Подтвержден потенциал метода для поиска и исследований больших и экстремально больших фарадеевских мер вращения в АЯГ.

4. Проведены исследования структуры, геометрии и кинематики струи активного ядра галактики S4 1030+61 после яркой гамма-вспышки по комплексному анализу наблюдений источника в радио- и гамма-диапазонах. Получены РСДБ-карты полной интенсивности и ориентации вектора линейной поляризации струи объекта. В рамках модельных предположений определены физические параметры объекта: установлена зависимость распределения плотности электронов, напряженности магнитного поля и ширины джета от расстояния вдоль струи, произведена оценка напряженности магнитного поля в области ядра и проведен анализ поведения яркостной температуры во времени и с расстоянием вдоль струи, определены поляризационные свойства ядра квазара. Выявлены изменения физических условий в начале релятивистской струи, сопутствующие активности квазара в гамма- и радиодиапазонах: мощная гамма-вспышка сопровождается вбросом вещества в начало струи, компрессией магнитного поля и возможным изменением направления распространения струйного выброса. Локализована область генерации гамма-излучения, которая находится в радиоджете на расстоянии нескольких парсек от центральной машины АЯГ.

Научная новизна и практическая значимость работы

Научная новизна работы состоит в том, что анализ и результаты работы проведены и получены либо впервые для отдельных источников в соответствующем диапазоне длин волн, либо впервые в таком детальном виде. Так, впервые получены карты фарадеевского вращения для 22 квазаров, показывающие распределение меры вращения в струях объектов на масштабах парсек. Для 20 из этих источников впервые получены одновременные поляризационные спектры в ядрах и оптически прозрачных компонентах выбросов. Сложность проведения и анализа поляриметрических наблюдений, получаемых одновременно в широком диапазоне частот, приводит к тому, что выполняемый другими авторами анализ ориентации магнитных полей АЯГ выполняется без учета фарадеевского вращения, либо мера вращения оценивается по данным, разнесенным во времени на разных частотах. В данной работе аккуратно учитываются поляризационные эффекты, искажаю-

щие внутренние характеристики линейно поляризованного излучения АЯГ, что представляет собой важнейшую ценность проведенных исследований. В результате этого оценены и изучены как физические условия в АЯГ, так и геометрия магнитных полей в разных областях АЯГ.

С помощью комплексного анализа квазара S4 1030+61 в гамма- и радиодиапазонах впервые проведено детальное исследование структуры, кинематики и свойств этого объекта. Определен ряд параметров струйного выброса квазара. Локализована область генерации высокоэнергетического излучения, изучены особенности распространения излучения по струе S4 1030+61, а также выявлены сопутствующие гамма-вспышке изменения физических условий в ядре джета: увеличение плотности плазмы, сжатие силовых линий магнитного поля и возможное изменение направления распространения струи.

Научная ценность и практическая значимость работы заключается в получении новых и важных сведений о свойствах струй АЯГ, которые будут использованы в дальнейшем изучении струйных выбросов АЯГ. Так, на заложенных в работе идеях и отработанных методиках анализа нами уже начато новое направление исследований по поиску экстремально больших фарадеевских мер вращения. Потенциальная регистрация таких мер вращения даст возможность существенно продвинуться в вопросе состава и механизма излучения релятивистских выбросов. Так, это позволило бы подтвердить и развить модели активных ядер галактик с протонными струями или когерентным механизмом излучением [20], привлекаемые для объяснения результатов, получаемые в рамках наблюдений АЯГ [14] наземно-космическим радиоинтерферометром РадиоАстрон.

Во время выполнения исследований по теме диссертации изучено влияние искажения поверхности радиоантенн VLA под действием силы тяжести на поляризационные наблюдения источников на низких высотах. Это позволило разработать и внедрить в пакет обработки данных Orbit [41] новую методику калибровки поляриметрических данных, т.н. «дифференциальную инструментальную калибровку». Результаты и особенности этого анализа описаны В. Д. Коттоном в соавторстве с диссертантом в одном из номеров [42] технической документации Orbit.

Достоверность результатов

Достоверность проведенных исследований и представляемых результатов основана на использовании современных телескопов и интерферометров, зарекомендовавших надежность своей работы по количеству и качеству исследований, выполняемых учеными со всего мира; использовании современных

методик обработки, анализа данных и проверки достоверности статистических гипотез. Результаты проведенных исследований доложены на всероссийских и международных конференциях с участием ведущих ученых, и опубликованы в ведущих международных журналах и изданиях.

Личный вклад автора в совместные работы

Диссертант совместно с соавторами и научным руководителем участвовал в постановке задач исследований и методов их решения, анализе, интерпретации и обсуждении результатов, а также формулировке выводов работы. При этом во всех основных результатах, выносимых на защиту, личный вклад автора является основным и определяющим. Диссертант лично провел следующую работу:

1. Диссертантом произведен сравнительный анализ результатов, получаемых методами линейной аппроксимации поляризационного угла от квадрата длины волны и фарадеевским синтезом мер вращений для трех квазаров, наблюдаемых в рамках проекта «TCAL0004» на VLA. Им построены карты фарадеевского вращения для всех исследуемых источников и выполнен анализ распределения меры вращения вдоль струй рассматриваемых объектов. Диссертант принимал равное участие с соавторами (В. Д. Коттон, Ю. Ю. Ковалев, Ф. Эдвардс) в обсуждении и интерпретации результатов анализа, в том числе в подготовке публикации [A1].
2. В работе [B4] автором самостоятельно выполнена вся пост-корреляционная калибровка, обработка и анализ архивных данных наблюдений семи активных ядер галактик (проект «TPO0003» на VLA). Интерпретация результатов выполнена диссертантом совместно с научным руководителем.
3. Автор участвовал в первичной обработке и в дальнейшем анализе наблюдений центра Галактики, выполненных интерферометрической решеткой VLA на частотах 40–48 ГГц в рамках проекта «SE0824F» в 2014 г. Автор совместно с В. Д. Коттоном участвовал в усовершенствовании поляризационной калибровки в пакете Orbit, по учету влияния деформации антенн решетки на получаемые ее поляриметрические наблюдения. Автором самостоятельно проведен поляризационный анализ и опробован метод фарадеевского синтеза мер вращения к наблюдательным данным магнетара J1745–2900, также написан текст статьи. При этом интерпретация физической природы фарадеевского экрана магнетара выполнена диссертантом в соавторстве с коллегами (В. Д. Коттон, Ю. Ю. Ковалев,

Ф. Юсеф-Задэ). Результаты этого исследования опубликованы в работе [A2].

4. Диссертант провел работу по обработке и анализу многочастотных данных наблюдений квазара S4 1030+61 в рамках проекта «S2087E». А именно, им выполнена пост-корреляционная калибровка многочастотных данных VLBA, проведено моделирование кривой блеска в диапазоне 15 ГГц, полученной на 40-м телескопе OVRO, и выполнен сравнительный анализ этих данных с данными наблюдений, полученных в рамках программ мониторинга MOJAVE и *Fermi*. Автором лично проанализированы физические характеристики и особенности источника в радио- и гамма-диапазонах. Все результаты и их интерпретация, полное оформление содержания и написание текста статьи [A3] и публикаций [B5;B7-B9] выполнены автором самостоятельно.
5. Автор совместно с научным руководителем принимал равное участие в постановке задач исследования поляризационных особенностей струй 20 АЯГ, наблюдавшихся радиointерферометром VLBA в проекте «BK134». Диссертант самостоятельно провел поляризационную калибровку и обработку данных, а также анализ и интерпретацию результатов. Им выполнено оформление полученных результатов, в том числе подготовлена статья [A4] и публикации [B1-B3;B6;B10].

Апробация результатов

Исследования, изложенные в работе, отмечены премией им. Д. В. Скобельцина учебно-научным комплексом ФИАН в 2016 г. Результаты диссертации обсуждались и были представлены на семинарах и научных сессиях Астрокосмического центра ФИАН (Россия), а также на 6 научных конференциях в России и 8 международных научных конференциях:

1. Актуальные проблемы внегалактической астрономии, Пущино, Россия (2013).
2. The innermost regions of relativistic jets and their magnetic fields, Гранада, Испания (2013).
3. XIII Одесская Гамовская Астрономическая Конференция – школа «Астрономия на стыке наук: астрофизика, космофизика, космология и гравитация, радиоастрономия и астробиология», Одесса, Украина (2013).
4. Всероссийская астрономическая конференция «Многоликая Вселенная», Санкт-Петербург, Россия (2013).

5. 5-ая Всероссийская молодежная конференция «Фундаментальные вопросы и инновационные аспекты современной физики», Москва, Россия (2013).
6. IAU Symposium 313 «Extragalactic jets from every angle», Галапагосские острова, Эквадор (2014).
7. 12 European VLBI Network Symposium, Кальяри, Италия (2014).
8. Relativistic Jets: Creation, Dynamics, and Internal Physics, Краков, Польша (2015).
9. 5th Workshop on Compact Steep Spectrum and GHz-Peaked Spectrum Radio Sources, Римини, Италия, (2015).
10. Мини-симпозиум «Задачи обсерватории Миллиметрон», Пущино, Россия (2015).
11. 6-ая Всероссийская молодежная конференция «Фундаментальные и инновационные вопросы современной физики», Москва, Россия (2015).
12. Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра», Москва, Россия (2015).
13. Blazars through Sharp Multi-Wavelength Eyes, Малага, Испания (2016).
14. 13th European VLBI Network Symposium, Санкт-Петербург, Россия (2016).

Публикации по теме диссертации

Результаты автора по теме диссертации опубликованы в научных журналах (ссылки с обозначением [A]) и в трудах всероссийских и международных конференций (ссылки с обозначением [B]). Всего имеется 14 публикаций. Первые четыре работы из приведенного списка опубликованы в рецензируемых высокорейтинговых зарубежных журналах (входящих в список Web of Science Core Collection), рекомендованных ВАК.

- A1. Cotton W. D., **Kravchenko E. V.**, Kovalev Y. Y., Fomalont E. *Search for Extreme Rotation Measures in CSS Sources* // Astron. Nachr. – 2016. – Vol. 337. – P. 87–90.
- A2. **Kravchenko E. V.**, Cotton W. D., Yusef-Zadeh F., Kovalev Y. Y. *Rotation Measure synthesis study and polarized properties of PSR J1745-2900 at 7 mm* // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2016. – Vol. 458. – P. 4456–4461.
- A3. **Kravchenko E. V.**, Kovalev Y. Y., Hovatta T., Ramakrishnan V. *Multi-wavelength observations of the γ -ray flaring quasar S4 1030+61 in 2009-2014* // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2016. – Vol. 462. – P. 2747–2761.

- A4. **Kravchenko E. V.**, Kovalev Y. Y., Sokolovsky K. V. *Parsec-scale Faraday rotation and polarization of 20 AGN jets* // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2017. – stx021.
- B1. **Kravchenko E. V.**, Kovalev Y. Y., Sokolovsky K. V. *Faraday rotation measures in 20 AGN jets at parsec scales* // Europ. Phys. J. Web Conf. – 2013. – Vol. 61. – P. 07006.
- B2. **Кравченко, Е. В.**, Ковалев, Ю. Ю., Соколовский, К. В. Вращение в струях двадцати активных галактических ядер на парсековых масштабах // Тезисы докладов на Всерос. астрон. конф. «Многоликая Вселенная», Санкт-Петербург, 23-27 сентября, 2013. – Санкт-Петербург: Изд-во ООО «Сборка», 2013. – С. 156–157.
- B3. **Кравченко Е. В.**, Ковалев Ю. Ю., Соколовский К. В. *Фарадеевское вращение в струях двадцати активных галактических ядер на парсековых масштабах* // Сб. тр. ФИАН: 5-ая Всерос. мол. конф. «Фундаментальные и инновационные вопросы современной физики», Москва, 10–15 ноября 2013. – Москва: Изд-во физ. инст. акад. наук, 2013. – С. 210.
- B4. **Kravchenko E. V.**, Cotton W. D., Kovalev Y. Y. *Rotation measures in AGN jets seen by VLA at 21 cm to 6 mm* // Proc. In. Astron. Union.: IAU Symposium «Extragalactic jets from every angle». – 2015. – Vol. 313. – P. 128–132.
- B5. **Kravchenko E. V.** *Multi-wavelength observations of blazar 1030+611 in its flaring state during 2008–2014* // Abstract book of the 12th European VLBI Network Symposium and Users Meeting, Cagliari, Italy, 7-10 october, 2014. – Cagliari: Published by Istituto di Radioastronomia INAF, 2014. – P. 22. – http://evn2014.oa-cagliari.inaf.it/EVN2014/EVN2014_AbstractBook.pdf.
- B6. **Kravchenko E. V.** *Depolarization and Faraday Effects in 20 AGN Jets from 1.4 to 15 GHz* // Abstract book of the conference «Relativistic Jets: Creation, Dynamics, and Internal Physics », Krakow, Poland, 20-24 april, 2015. – Krakow: Published by Jagiellonian University, 2015. – P. 41.
- B7. **Кравченко Е. В.** *Исследование квазара 1030+611 в 2008–2014 гг. в радио и γ диапазонах* // Сб. тр. ФИАН: 6-ая Всерос. мол. конф. «Фундаментальные и инновационные вопросы современной физики», Москва, 15–20 ноября 2015. – Москва: Изд-во физ. инст. акад. наук, 2015. – С. 148. – http://sites.lebedev.ru/modules/show_image.php?id=5156.

- B8. **Кравченко Е. В.** *Многоволновое исследование γ -яркого квазара 1030+611 во время его активного состояния в 2008–2014 гг.* // Тезисы докладов на конференции «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра», Москва, 21-24 декабря, 2015. – Москва: Изд-во инст. космич. исслед. Рос. акад. наук, 2015. – С. 52. – <http://hea.iki.rssi.ru/conf/hea2015/book.pdf>.
- B9. **Kravchenko E. V.** *Radio and gamma-ray study of the quasar S4 1030+61 during its activity in 2009–2014* // Abstract book of the conference «Blazars through Sharp Multi-Wavelength Eyes», Malaga, Spain, 30 may – 3 june, 2016. – Granada: Published by Instituto de Astrofísica de Andalucía-CSIC, 2016. – P. 55. – <http://jets2016.iaa.es/sites/default/files/imagecache/Program%26Abstracts.pdf>.
- B10. **Kravchenko, E. V.** *Linearly polarized properties and rotation measure study of parsec-scale AGN jets* // Abstract book of the 13th European VLBI Network Symposium, Saint Petersburg, 20-23 september, 2016. – Saint Petersburg: Published by Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, 2016. – P. 23. – http://www.ipa.nw.ru/EVN2016/data/EVN2016_Book.pdf.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем составляет 148 страниц, включая 28 рисунков и 14 таблиц. Список цитируемой литературы включает 240 наименований, объемом 17 страниц.

Краткое содержание работы

Во Введении представлено общее описание диссертации, приведено современное состояние исследований активных ядер галактик, обосновывается актуальность исследования; обсуждается тема, цели и задачи работы, которые основаны на изучении физических свойств радиогромких АЯГ, видимых наблюдателю под малым углом зрения; а также приводятся выносимые на защиту результаты работы.

В Главе 1 «Радиоинтерферометрия. Методы наблюдений, обработки и анализа данных» рассмотрен принцип работы радиоинтерферометров, особенности и основные методы обработки и анализа получаемых

на них наблюдательных данных. В том числе приводится описание и принцип работы систем апертурного синтеза VLBA и VLA, с помощью которых получена бóльшая часть данных наблюдений, анализ которых составляет основу диссертации (разделы 1.2–1.3). Тут же рассмотрены важнейшие шаги пост-корреляционной калибровки радиоинтерферометрических данных, в том числе поляриметрических наблюдений (разделы 1.4–1.5). В разделах 1.6–1.8 рассмотрены базовые методы анализа данных: это построение радиоизображений, в том числе самокалибровка и гибридное картографирование, моделирование структуры струи АЯГ отдельными компонентами и совмещение изображений источников, получаемых на разных частотах.

В Главе 2 «Фарадеевское вращение в активных ядрах галактик» представлены результаты исследования распределения фарадеевской меры вращения (МВ) в АЯГ и анализа местоположения и свойств среды, являющейся источником фарадеевского вращения. Настоящая глава основана на исследовании свойств 31 источника и анализе пяти экспериментов, выполненных на телескопах VLA и VLBA в радиодиапазоне 1.4–48 ГГц.

Фарадеевская мера вращения (см. раздел 2.1) определяется физическими свойствами среды: плотностью частиц, напряженностью компоненты магнитного поля, направленной вдоль луча зрения, и размером области. Из наблюдений ее величину можно измерить по зависимости направления ориентаций вектора линейной поляризации (EVPA) излучения от квадрата длины волны (λ^2).

Для выделения МВ, создаваемой АЯГ или его окрестностями, из наблюдаемой величины МВ необходимо вычесть вклад Галактики и межгалактического вещества. Оценки физических свойств межгалактической среды показывают, что производимая ею МВ составляет приблизительно единицы рад/м², т.е. ее вклад не существен. Фарадеевское вращение в Галактике существенно больше и доходит до сотен рад/м². Галактическую МВ для произвольного источника можно определить, например, с помощью каталога Тэйлора и др. [43].

Методика построения карт фарадеевского вращения (раздел 2.2) включает приведение рассматриваемых диапазонов частот к одному пространственному разрешению, их совмещение по положению оптически прозрачной компоненты струи и определение МВ линейной аппроксимацией зависимости EVPA от λ^2 в каждом пикселе карт. Для анализа фарадеевского вращения на разных пространственных масштабах и его распределения вдоль струй, исследуемый радиодиапазон разбивался на участки, в которых зависимость EVPA от λ^2 имеет линейное поведение. Проблема с измерением поляризационных углов с точностью до добавки $\pm 180^\circ n$ (n – количество оборотов) решается

минимизацией χ^2 .

Результаты анализа пяти экспериментов даны в разделах 2.3–2.7.

Исследование МВ в семи ярких и компактных АЯГ: DA 193, 0710+439, OI 061, OJ 287, 4C +39.25, 3C 279, OP 313 (раздел 2.3) выполнено по их VLA наблюдениям в диапазоне 1.4–43.4 ГГц в течении трех сеансов в 2012 и 2014 годах. При анализе рассматривались области на карте, соответствующие максимуму полной интенсивности излучения источников. В результате (см. работу [B4]) измеренные величины показывают увеличение МВ на более коротких волнах, следуя степенной зависимости с частотой наблюдения: $MV \propto \nu^{1.6 \pm 0.1}$. Многократные наблюдения источников позволили зарегистрировать временную переменность фарадеевского вращения на масштабах месяцев и лет. Данные выводы не выносятся на защиту, однако подтверждаются результатами, полученными в других разделах диссертации.

Более детальное изучение особенностей МВ АЯГ выполнено по анализу однократных наблюдений квазаров 3C 48, 3C 138 и 3C 147 на телескопе VLA в диапазоне 18–48 ГГц (раздел 2.4). В течении суточной длительности сеанса эксперимента достигнута высокая чувствительность, что позволило исследовать слабые плотности потока поляризованного излучения. В результате, для этих источников впервые были получены карты распределения фарадеевского вращения вдоль выбросов на таких высоких частотах (см. работу [A1]). Получены следующие измерения МВ в центральных областях этих объектов: 9671 ± 484 рад/м² (3C 48), -3224 ± 101 рад/м² (3C 138) и -1509 ± 7 рад/м² (3C 147). Максимальная МВ, измеренная в системе покоя источника, составила $(1.80 \pm 0.09) \times 10^4$ рад/м² в квазаре 3C 48. Сравнение этих величин с результатами работ других авторов показывают, что наши высокочастотные наблюдения разрешают структуру фарадеевского экрана в 3C 48 и 3C 138, которая не видна в наблюдениях на более длинных волнах. При этом МВ 3C 147 сохраняет свою величину на протяжении приблизительно 25 лет. Данные результаты указывают на неоднородность фарадеевского экрана этих АЯГ, физические параметры которого (плотность и напряженность магнитного поля) медленно или вовсе не меняется во времени. Вероятно, фарадеевское вращение этих квазаров образуется в области узких эмиссионных линий. Оценка напряженности магнитного поля в этой области составляет единицы мкГс при использовании измеренного фарадеевского вращения ~ 1500 рад/м² в системе отсчета источника, и в предположении плотности плазмы этой среды 10^3 см⁻³, объемного фактора заполнения $\sim 10^{-2}$ и размера ~ 100 пк.

Исследование фарадеевского вращения на парсековых масштабах выполнено для 20 АЯГ с использованием однократных наблюдений на радиоинтерферометре VLBA в диапазоне 1.4–15 ГГц в 2007 году (раздел 2.5). Осо-

бенность этих объектов состоит в проявляемых больших сдвигах видимого начала джета и наличии яркой протяженной струи во используемом радиодиапазоне. Он разбивался на участки, по которым МВ определялась линейной аппроксимацией $EVPA-\lambda^2$: 1.4–2.4 ГГц, 4.6–8.4 ГГц и 8.1–15.4 ГГц. Для этих АЯГ были впервые получены РСДБ карты распределения фарадеевского вращения вдоль их струй на сантиметровых волнах. Измеренные абсолютные величины МВ находятся в пределах от 1 ± 4 до 2767 ± 53 рад/м². Медианная величина фарадеевского вращения, приведенная в систему отсчета источников, составила ~ 1461 рад/м² в диапазоне 8.1–15.4 ГГц. Такое вращение приводит к повороту позиционного угла электрического вектора на $\sim 30^\circ$ и $\sim 300^\circ$ на волнах 2 и 6 см. При этом распределение меры вращения неоднородно вдоль струй АЯГ, и имеет тенденцию существенно увеличиваться в ядрах джетов с уменьшением длины волны наблюдений (см. рисунок 2 из [A4]). Вероятнее всего, такое поведение связано с эффектом синхротронного самопоглощения в этих областях и очень близким расположением фарадеевского экрана к струе. Это приводит к тому, что более высокочастотное излучение выходит из областей, находящихся ближе к истинному началу струи с более высокой напряженностью магнитного поля и плотностью тепловой плазмы. Это предположение подтверждается наблюдаемой зависимостью в виде $MV \sim \nu^2$. Показано, что наблюдаемая мера вращения ~ 1500 рад/м² в ядрах струй согласуется с оценками других авторов напряженности магнитного поля 10–100 мГс и плотности тепловой плазмы 1–10 см⁻³ в положении начала струи, видимой на 15 ГГц (например, [23]). При этом фарадеевский экран должен иметь толщину приблизительно 0.1–1 пк.

В разделе 2.5.4 рассмотрен вопрос временной переменности меры вращения. Восемь из 20 рассматриваемых АЯГ исследовались ранее другими авторами на предмет фарадеевского вращения. В трех источниках из восьми обнаружена переменность МВ на масштабах лет: 3С 309.1, 1655+077 и 1803+784. Такая быстрая переменность физических условий (напряженности магнитного поля и концентрации частиц) способна возникнуть только в фарадеевском экране, расположенном близко к струе.

В разделе 2.6 представлены результаты анализа распределения фарадеевского вращения поперек струй 20 АЯГ, рассмотренных в разделе 2.5. Такие исследования представляют особый интерес, поскольку поперечный к выбросу градиент МВ является подтверждением существования тороидальных и спиралевидных магнитных полей, образование которых предсказывается в рамках многих моделей АЯГ (например, [15; 28]). В результате, впервые были обнаружены значимые градиенты МВ в семи квазарах: 0148+274, 0952+179, 1004+141, 1219+285, 1458+718, 1642+690 и 2201+315 (см. работу [A4]).

В разделе 2.7 рассматривается вопрос существования и метода поиска больших ($\sim 10^6$ рад/м²) и экстремально больших ($\sim 10^7 - 10^{10}$ рад/м²) фарадеевских мер вращения. Такие величины МВ могут рождаться в областях, находящихся на расстоянии суб-пк от центральной машины АЯГ. Разные модели предсказывают напряженности магнитных полей в этих областях от 10^2 [27] до 10^9 Гс [20]. Такие большие МВ сложно выявить линейной регрессией EVPA- λ^2 , в то время как новый метод синтеза фарадеевских мер вращения [44], представляющий собой Фурье-разложение поляризованного сигнала в пространстве λ^2 , способен находить любые периодические сигналы и эффективен при исследовании АЯГ в широкой полосе длин волн. Для инициирования исследований с целью глубокого поиска больших фарадеевских мер вращения в АЯГ нами опробован метод синтеза фарадеевских мер вращения в ультрашироком диапазоне высоких радиочастот. Наши исследования основаны на анализе наблюдений галактического магнетара J1745–2900, выполненных на телескопе VLA на частотах 40–48 ГГц со спектральным разрешением 2 МГц (см. работу [A2]). Использование этого источника обусловлено близким расположением к Галактическому центру, который проявляет рекордную среди всех космических объектов меру вращения $-(4.3 \pm 0.1) \times 10^5$ рад/м². Метод фарадеевского синтеза был успешно отработан на магнетаре, МВ которого составила $-(6.7 \pm 3.0) \times 10^3$ рад/м². Эти результаты подтверждают потенциал нового метода для будущих исследований активных ядер галактик.

В разделе 2.8 суммированы основные выводы главы.

В Главе 3 «Степень и направление линейной поляризации в струях активных ядер галактик» рассмотрены свойства вещества и особенности конфигурации магнитных полей 20 АЯГ, описанных в разделе 2.5, посредством моделирования поляризованных спектров ядер и оптически прозрачных компонент струй и анализа скорректированных за фарадеевское вращение карт распределения EVPA вдоль струй квазаров. Результаты этой главы опубликованы в работах [A4; B6; B10].

Любая среда, содержащей плазму и магнитное поле и находящейся на пути распространения электромагнитного излучения от источника к наблюдателю. Раздел 3.1 посвящен описанию эффектов, вызывающих не только фарадеевское вращение, но и деполяризацию излучения (см. обзор в работе Соколова и др. [37]). Выделяют несколько основных эффектов: внутреннюю, внешнюю, аномальную и спектральную деполяризацию. Отличие этих механизмов состоит в характере магнитных полей и свойствах вещества, деполяризующего излучение. Перечисленные эффекты приводят к нелинейной зависимости степени (m) и направления линейной поляризации с λ^2 . Моделированием

этих зависимостей можно определить деполяризационный механизм, имеющий место в каждом исследуемом источнике. Раздел 3.2 содержит описание методики моделирования m - и $EVPA-\lambda^2$ параметрическими функциями, а также критерий выборки модели, наилучшим образом описывающей наблюдения. Раздел 3.3 содержит результаты этого анализа. Величина средней степени поляризации в ядрах составила 1%, а в оптически тонких компонентах 8%. Эти результаты указывают на то, что излучение от АЯГ испытывает значительную деполяризацию. Зависимости m - и $EVPA-\lambda^2$ демонстрируют сложное поведение в большинстве рассматриваемых источников. Результаты моделирования этих зависимостей показывают, что во многих АЯГ присутствуют внешний (по отношению к областям генерации излучения) неоднородный фарадеевский экран. При этом магнитное поле в этой среде может быть как турбулентным, так и регулярным. Внутреннее фарадеевское вращение также наблюдается, особенно в ядрах джетов. Такой эффект объясняется наличием нескольких неразрешенных компонент с разными мерами вращения или несколько деталей струи в исследуемой компактной области.

В то время, как фарадеевское вращение характеризует внешние слои струй АЯГ или окружающее их вещество, то ориентация $EVPA$, скорректированная за это вращение, характеризует области выбросов, в которых генерируется синхротронное излучение. В разделе 3.4 обсуждается истинное, поправленное за фарадеевское вращение, направление электрического поля (χ_0) в исследуемых источниках. Этот анализ реализован с использованием трех подходов, рассмотренных в разделах 3.4.1–3.4.3 и описанных далее.

В разделе 3.4.1 производится анализ распределения χ_0 относительно направления распространения джета в плоскости изображения (θ) в ядрах и оптически прозрачных компонентах струй (см. рисунок 6 из работы [A4]). В результате 55% случаев имеют сонаправленную или поперечную ориентацию истинного $EVPA$ относительно направления распространения струи. Такое поведение ожидается в рамках осесимметричных моделей АЯГ, например, описанных в работе Лютикова и др. [34] или Каторн [45]. В остальных 45% случаев χ_0 ориентирован под произвольным углом относительно θ (т.е. $|\chi_0 - \theta| \neq 0^\circ, 90^\circ$). Эти результаты указывают на более сложную структуру релятивистских выбросов, например, существование в них плазменных неустойчивостей или наклонных ударных волн.

В разделе 3.4.2 исследуются карты распределения истинного $EVPA$ вдоль струй исследуемых АЯГ. Анализ показывает наличие сложных структур: скачков χ_0 на 90° при смещении вдоль струи (например, квазар 0952+179), отличие ориентации $EVPA$ на краях и в центре струи на 90° (т.н. структура «сердцевина-оболочка» [46], например, квазар 1458+718), отличие ориента-

ции χ_0 в ядре от наклона EVPA ниже по струе.

Детальное обсуждение каждого источника выполнено в разделе 3.4.3. Наше исследование показывает наличие упорядоченных на масштабах от единиц до сотен парсек магнитных полей в большинстве АЯГ и хаотично ориентированных магнитных полей в остальных источниках. Наблюдаемые сложные поляризациянные структуры могут быть вызваны изменением направления распространения струи, взаимодействием с окружающей средой, наличием ударных волн, вспышечной активностью АЯГ и др. Совместно с выводами раздела 3.4.1, эти результаты указывают на отсутствие единой конфигурации регулярных магнитных полей: они могут иметь полоидальную или тороидальную (в т.ч. спиралевидную) форму в разных объектах.

В разделе 3.5 рассматривается и обсуждается модель АЯГ «сердцевина-оболочка», в рамках которой возможно объяснить наблюдаемые поляризациянные характеристики исследуемых источников. В этом предположении регистрируемое фарадеевское вращение и деполяризация излучения возникают в замагниченных внешних слоях струи (оболочка) или внешнем веществе, окружающем релятивистскую струю АЯГ. Согласно выводам раздела 3.3, вещество во внешнем фарадеевском экране может быть распределено неоднородно и может содержать как турбулентные, так и регулярные магнитные поля. В то же время синхротронно-излучающая «сердцевина» струи в большинстве случаев содержит упорядоченное полоидальное или тороидальное магнитное поле.

Раздел 3.6 суммирует результаты исследования данной главы.

В Главе 4 «Широкодиапазонное исследование квазара S4 1030+61» приводятся результаты изучения физических условий и процессов в квазаре S4 1030+61 во время яркой гамма-вспышки. Результаты анализа этой главы представлены в работах [A3;B10-B12].

В разделе 4.1 обсуждается связь разных характеристик АЯГ в различных диапазонах электромагнитного спектра во время их вспышечной фазы, а также рассматриваются возможные причины, местоположение и особенности переменности АЯГ. Одновременные широкодиапазонные наблюдения являются ключевой методикой исследования физических свойств. Мониторинг радиогромких АЯГ выполняется многими телескопами, среди которых 40-м телескоп в Оуэнс Вэлли, радиоинтерферометр VLBA в проекте MOJAVE и космическая гамма-обсерватория *Fermi*. Однако только отдельные из этих объектов наблюдаются более детально и с более высоким разрешением (например, [47]). АЯГ S4 1030+61 является одним из таких немногих источников. После яркой гамма-вспышки в 2010 г. источник стал активно наблюдаться многими наземными и космическими обсерваториями, в том числе были

проведены многократные широкодиапазонные наблюдения телескопом VLBA в диапазоне 4.6–43 ГГц. Подробное описание наблюдений квазара приведено в разделе 4.2.

Результаты совместного анализа гамма- и радионаблюдений, выполненных с 2009 по 2014 гг., изложены в разделе 4.3. Моделирование структуры релятивистской струи S4 1030+61 в виде отдельных деталей показывает (см. раздел 4.3.1) наличие компонент, движущихся с видимыми сверхсветовыми скоростями: 2.7 ± 0.7 с (компонента С2) и 6.4 ± 0.4 с (С3). При этом, эпохи, соответствующие совпадению положений этих компонент с видимым началом струи на 15 ГГц, составляют 2000.0 ± 0.7 (С2) и 2007.4 ± 1.2 (С3) г. Таким образом, ни одной новой видимой компоненты не образуется в течении периода рассматриваемых наблюдений. Помимо этого ядро струи доминирует в спектре источника на 15 ГГц. Это указывает на то, что временная переменность радиопотока происходит в видимом начале релятивистской струи квазара.

Спектральный индекс α (определяемый как $I \propto \nu^\alpha$, где I – плотность потока) видимого начала струи в диапазоне 4.6–43 ГГц увеличивается с 0.47 ± 0.02 (2010-05-24) до 0.69 ± 0.02 (2010-10-18) после мощной гамма-вспышки (2010-05-15, см. раздел 4.3.2). Вероятно, такое поведение α связано с вбросом плазмы в начало струи и потерями энергии, сопровождающие активное состояние источника.

Моделирование кривой блеска источника на 15 ГГц (раздел 4.3.3) набором экспоненциальных вспышек согласно подходу, предложенному Вальтаою и др. [48], показывает наличие девяти отдельных вспышек в источнике с 2009 по 2014 годы. Используя параметры самой быстрой вспышки (2011-11-18) и видимую скорость компоненты С3, оценены следующие параметры струи S4 1030+61: Допплер-фактор $\delta_{\text{var}} \approx 15$, Лоренц-фактор $\Gamma_{\text{var}} \approx 9$ и угол наблюдения струи к лучу зрения $\theta_{\text{var}} \approx 3^\circ$.

Совмещение карт источника на разных частотах относительно положения оптически прозрачной компоненты показывает, что сдвиг видимого начала струи квазара r с частотой ν следует степенной зависимости $r \propto \nu^1$ (раздел 4.3.4). Согласно измерениям, изложенным подробно в работе [А3], мера смещения положения ядра между всеми парами частот наблюдений в диапазоне 4.6–43 ГГц составило 32 ± 8 пк·ГГц. Это соответствует положению РСДБ-ядра, видимом на 15 ГГц, на расстоянии 14 ± 2 пк от ЧД. Согласно модельным предсказаниям [49], оценка напряженности магнитного поля в этой области струи S4 1030+61 составляет приблизительно 0.16 Гс.

Яркостная температура ядра джета (см. раздел 4.3.5) после отделения от него компоненты С3 составляет $\geq 3.3 \times 10^{11}$ К, что выше значения температуры в режиме равнораспределения между плотностями энергий магнитного

поля и излучающих частиц ($\sim 10^{11}$ К, [10]). Это говорит о том, что плотность энергии частиц существенно превышает плотность энергии магнитного поля, что может являться результатом инъекции плотной плазмы в видимое начало релятивистской струи в течение его вспышечной фазы. Яркостная температура $T_{b,jet}$ компонент струи, расположенных ниже ядра, следует степенной зависимости с расстоянием вдоль струи $T_{b,jet} \propto r^{2.7}$ и с размером компонент $T_{b,jet} \propto r^{2.8}$. Эти результаты совместно с измерениями сдвига ядра (раздел 4.3.4) позволили получить следующие степенные зависимости для ширины струи $d \propto r^{1.0}$, плотности частиц $n_e \propto r^{1.7}$ и напряженности магнитного поля $B \propto r^{1.1}$. Эти результаты свидетельствуют о равномерном распределении плотности магнитного поля и релятивистских частиц в оптически прозрачных областях струи S4 1030+61.

Совместное исследование гамма- и радиоизлучений представлено в разделе 4.3.6. Анализ показывает отсутствие значимой корреляции между этими диапазонами, что объясняется различными масштабами переменности. Визуальный анализ кривых блеска в этих двух диапазонах показывает выраженную вспышечную активность в близкие периоды времени. В предположении связи ярчайшего пика активности в гамма-диапазоне (2010-04-15) с самой большой радиовспышкой (2011-03-07), временная разница между ними, вызванная задержкой сигнала из-за распространения возмущения вдоль струи, составит 0.80 ± 0.11 лет. Эта величина соответствует пространственному разнесению областей генерации гамма- и радиоизлучения 12 ± 2 пк. Так как видимое на 15 ГГц ядро оценено нами на расстоянии 14 ± 2 пк от ЧД, гамма-излучение может возникать на расстоянии 2 ± 2 пк от центральной машины АЯГ. Масштаб переменности кривой блеска в гамма-диапазоне соответствует размерам области < 0.18 пк. Согласно результатам моделирования структуры струи отдельными компонентами (см. раздел 4.3.1), размер РСДБ-ядра на 43 ГГц составляет ~ 0.12 пк, а его смещение от ЧД оценено примерно в 1.3 пк. Эти результаты показывают, что гамма-излучение может генерироваться в видимом начале струи на 43 ГГц.

В разделе 4.3.7 представлены поляризационные свойства квазара. Степень поляризации РСДБ ядра увеличивается с развитием ярчайшей радиовспышки, что сопровождается увеличением фарадеевской меры вращения. Такое поведение поляризационных характеристик объясняется изменением напряженности магнитного поля и плотности частиц, подтверждая выводы раздела 4.3.2. Таким образом, вспышечная активность источника, скорее всего, сопровождается вбросом вещества в начало струи квазара и вероятной компрессией магнитного поля.

В разделе 4.4 перечислены выводы, полученные в данной главе.

В Заключении сформулированы основные результаты работы, выносимые на защиту.

Список цитируемой литературы

1. Boettcher M., Harris D. E., Krawczynski H. Relativistic Jets from Active Galactic Nuclei. — Berlin : Wiley, 2012.
2. Edge D. O., Shakeshaft J. R., McAdam W. B. et al. A survey of radio sources at a frequency of 159 Mc/s. // Mem. R. Astron. Soc. — 1959. — Vol. 68. — P. 37–60.
3. Blandford R. D., Znajek R. L. Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1977. — Vol. 179. — P. 433–456.
4. Blandford R. D., Königl A. Relativistic jets as compact radio sources // Astrophys. J. — 1979. — Vol. 232. — P. 34–48.
5. Бескин В. С. Осесимметричные стационарные течения в астрофизике. — Москва : Физматлит, 2005.
6. Rees M. J. Black Hole Models for Active Galactic Nuclei // Annu. Rev. Astron Astrophys. — 1984. — Vol. 22. — P. 471–506.
7. Meier D. L. Black Hole Astrophysics: The Engine Paradigm. — Verlag Berlin Heidelberg : Springer, 2012.
8. Sikora M., Madejski G. Blazars // American Institute of Physics Conference Series / Ed. by F. A. Aharonian, H. J. Völk. — Vol. 558 of American Institute of Physics Conference Series. — 2001. — P. 275–288.
9. Rees M. J. Appearance of Relativistically Expanding Radio Sources // Nature. — 1966. — Vol. 211. — P. 468–470.
10. Readhead A. C. S. Equipartition brightness temperature and the inverse Compton catastrophe // Astrophys. J. — 1994. — Vol. 426. — P. 51–59.
11. Wagner S. J., Witzel A. Intraday Variability In Quasars and BL Lac Objects // Annu. Rev. Astron Astrophys. — 1995. — Vol. 33. — P. 163–198.
12. Pauliny-Toth I. I. K., Kellermann K. I. Variations in the Radio-Frequency Spectra of 3c 84, 3c 273, 3c 279, and Other Radio Sources // Astrophys. J. — 1966. — Vol. 146. — P. 634.

13. 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 // *Astron. J.* — 2005. — Vol. 130. — P. 1389–1417.
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 // *Astrophys. J Lett.* — 2016. — Vol. 820. — P. L9.
15. Meier D. L., Koide S., Uchida Y. Magnetohydrodynamic Production of Relativistic Jets // *Science.* — 2001. — Vol. 291. — P. 84–92.
16. Vlahakis N., Königl A. Magnetic Driving of Relativistic Outflows in Active Galactic Nuclei. I. Interpretation of Parsec-Scale Accelerations // *Astrophys. J.* — 2004. — Vol. 605. — P. 656–661.
17. Кардашев Н. С., Алакоз А. В., Андрианов А. С. et al. РадиоАстрон: итоги выполнения научной программы исследований за 5 лет полета. // *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина.* — 2016. — Vol. 3. — P. 4.
18. 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 // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 817. — P. 96.
19. Zhang H., Diltz C., Böttcher M. Radiation and Polarization Signatures of the 3D Multizone Time-dependent Hadronic Blazar Model // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 829. — P. 69.
20. Кардашев Н. С. Синхротронное радиоизлучение от протонов и электронов в пульсарах и квазарах. // *Астрон. журн.* — 2000. — Vol. 77. — P. 813.
21. Böttcher M., Reimer A., Sweeney K., Prakash A. Leptonic and Hadronic Modeling of Fermi-detected Blazars // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 768. — P. 54.
22. Sahu S., Zhang B., Fraija N. Hadronic-origin TeV γ rays and ultrahigh energy cosmic rays from Centaurus A // *Phys. Rev. D.* — 2012. — Vol. 85, no. 4. — P. 043012.
23. Pushkarev A. B., Hovatta T., Kovalev Y. Y. et al. MOJAVE: Monitoring of Jets in Active galactic nuclei with VLBA Experiments. IX. Nuclear opacity // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 545. — P. A113.

24. Eatough R. P., Falcke H., Karuppusamy R. et al. A strong magnetic field around the supermassive black hole at the centre of the Galaxy // *Nature*. — 2013. — Vol. 501. — P. 391–394.
25. Hada K., Kino M., Doi A. et al. High-sensitivity 86 GHz (3.5 mm) VLBI Observations of M87: Deep Imaging of the Jet Base at a Resolution of 10 Schwarzschild Radii // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 817. — P. 131.
26. Zamaninasab M., Clausen-Brown E., Savolainen T., Tchekhovskoy A. Dynamically important magnetic fields near accreting supermassive black holes // *Nature*. — 2014. — Vol. 510. — P. 126–128.
27. Field G. B., Rogers R. D. Radiation from magnetized accretion disks in active galactic nuclei // *Astrophys. J.* — 1993. — Vol. 403. — P. 94–109.
28. Begelman M. C., Blandford R. D., Rees M. J. Theory of extragalactic radio sources // *Reviews of Modern Physics*. — 1984. — Vol. 56. — P. 255–351.
29. Martí-Vidal I., Müller S., Vlemmings W. et al. A strong magnetic field in the jet base of a supermassive black hole // *Science*. — 2015. — Vol. 348. — P. 311–314.
30. Cawthorne T. V., Hughes P. A. The Radiative Transfer of Synchrotron Radiation through a Compressed Random Magnetic Field // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 771. — P. 60.
31. Marscher A. P. Turbulent, Extreme Multi-zone Model for Simulating Flux and Polarization Variability in Blazars // *Astrophys. J.* — 2014. — Vol. 780. — P. 87.
32. Aller M. F., Hughes P. A., Aller H. D. et al. Constraining the Physical Conditions in the Jets of γ -Ray Flaring Blazars Using Centimeter-band Polarimetry and Radiative Transfer Simulations. I. Data and Models for 0420-014, OJ 287, and 1156+295 // *Astrophys. J.* — 2014. — Vol. 791. — P. 53.
33. Laing R. A., Bridle A. H. Dynamical models for jet deceleration in the radio galaxy 3C 31 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2002. — Vol. 336. — P. 1161–1180.
34. Lyutikov M., Pariev V. I., Gabuzda D. C. Polarization and structure of relativistic parsec-scale AGN jets // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2005. — Vol. 360. — P. 869–891.

35. Zakamska N. L., Begelman M. C., Blandford R. D. Hot Self-Similar Relativistic Magnetohydrodynamic Flows // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 679. — P. 990–999.
36. Zhang H., Deng W., Li H., Böttcher M. Polarization Signatures of Relativistic Magnetohydrodynamic Shocks in the Blazar Emission Region. I. Force-free Helical Magnetic Fields // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 817. — P. 63.
37. Sokoloff D. D., Bykov A. A., Shukurov A. et al. Depolarization and Faraday effects in galaxies // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1998. — Vol. 299. — P. 189–206.
38. Farnes J. S., Gaensler B. M., Carretti E. A Broadband Polarization Catalog of Extragalactic Radio Sources // *Astrophys. J. Suppl.* — 2014. — Vol. 212. — P. 15.
39. Pasetto A., Carrasco-González C., Bruni G. et al. JVLA Wideband Polarimetry Observations on a Sample of High Rotation Measure Sources // *Galaxies.* — 2016. — Vol. 4. — P. 66.
40. Матвеевко Л. И., Кардашев Н. С., Шоломицкий Г. Б. О радиоинтерферометре с большой базой // *Известия вузов «Радиофизика».* — 1965. — Vol. 8. — P. 651.
41. Cotton W. D. Obit: A Development Environment for Astronomical Algorithms // *Publ. Astron. Soc. Pac.* — 2008. — Vol. 120. — P. 439–448.
42. Cotton W. D., Kravchenko E. V. Differential Instrumental Polarization Calibration // *Obit Development Memo Series.* — 2014. — Vol. 39. — P. 1–4.
43. Taylor A. R., Stil J. M., Sunstrum C. A Rotation Measure Image of the Sky // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 702. — P. 1230–1236.
44. Brentjens M. A., de Bruyn A. G. Faraday rotation measure synthesis // *Astron. Astrophys.* — 2005. — Vol. 441. — P. 1217–1228.
45. Cawthorne T. V. Polarization of synchrotron radiation from conical shock waves // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2006. — Vol. 367. — P. 851–859.
46. Attridge J. M., Roberts D. H., Wardle J. F. C. Radio Jet-Ambient Medium Interactions on Parsec Scales in the Blazar 1055+018 // *Astrophys. J Lett.* — 1999. — Vol. 518. — P. L87–L90.

47. Ramakrishnan V., León-Tavares J., Rastorgueva-Foi E. A. et al. The connection between the parsec-scale radio jet and γ -ray flares in the blazar 1156+295 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2014. — Vol. 445. — P. 1636–1646.
48. Valtaoja E., Lähteenmäki A., Teräsranata H., Lainela M. Total Flux Density Variations in Extragalactic Radio Sources. I. Decomposition of Variations into Exponential Flares // *Astrophys. J. Suppl.* — 1999. — Vol. 120. — P. 95–99.
49. Lobanov A. P. Ultracompact jets in active galactic nuclei // *Astron. Astrophys.* — 1998. — Vol. 330. — P. 79–89.