

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук

На правах рукописи

Корюкова Татьяна Андреевна

**ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН
В МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЕ ГАЛАКТИКИ НА НАБЛЮДАЕМЫЕ
СВОЙСТВА СТРУЙ АКТИВНЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИК**

Специальность 1.3.1 –
«Физика космоса, астрономия»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Астрокосмическом центре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института имени П. Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва.

Научный руководитель:

Пушкарев Александр Борисович, доктор физико-математических наук, профессор РАН, ведущий научный сотрудник Крымской астрофизической обсерватории РАН

Официальные оппоненты:

Сазонов Сергей Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор РАН, заведующий лабораторией экспериментальной астрофизики Института космических исследований РАН

Зинченко Игорь Иванович, доктор физико-математических наук, заведующий отделом радиоприемной аппаратуры и миллиметровой радиоастрономии Института прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН

Ведущая организация:

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

Защита состоится 15 апреля 2026 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 24.1.262.02 Физического института им. П. Н. Лебедева РАН 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 ____ января 2026 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Шахворостова Н. Н.

Общая характеристика диссертации

Актуальность темы.

Еще древние цивилизации пытались разгадать загадку наблюдаемой слабой полосы рассеянного света, простирающейся через все ночное небо, которая впоследствии получила название Млечный Путь. Сегодня мы знаем, что наша Галактика состоит из тонкого диска радиусом примерно 25–30 кпк и эффективной толщиной примерно 400–600 пк, а также сферической составляющей, простирающейся более чем на 30 кпк от центра [1]. Сотни миллиардов звезд в Галактике погружены в чрезвычайно разреженную и неоднородную межзвездную среду (МЗС). МЗС – многофазная, намагниченная и сильно турбулентная среда (число Рейнольдса $R_e \gg 10^3$, [2; 3]), заполняющая пространство между звездами в Галактике. МЗС включает в себя межзвездный газ (молекулярный, атомарный, ионизованный), пыль, электромагнитные поля и космические лучи. Все компоненты МЗС тесно связаны друг с другом. Круговорот материи и энергии между звездами и МЗС поддерживает ее неоднородную структуру. Все процессы от зарождения новых звезд в самых плотных и холодных (молекулярных) областях МЗС, до взрывов сверхновых, возвращающих часть обогащенного тяжелыми элементами материала обратно в МЗС, сопровождаются выделением энергии, которое порождает и поддерживает турбулентные движения плазмы в МЗС и ее крайне неоднородное распределение.

При прохождении радиоволны через турбулентный ионизированный газ в МЗС на ее пути встречаются случайные флуктуации плотности свободных электронов, которые, в свою очередь, вызывают флуктуации показателя преломления среды. Волновые фронты случайным образом искажаются, что приводит к рассеянию радиоизлучения. Рассеянные волны могут интерферировать, вызывая случайные флуктуации амплитуды и фазы принятого излучения, но при этом продолжают содержать в себе не только информацию об источнике излучения, но и о промежуточной среде, через которую они прошли [4].

О свойствах ионизованного компонента МЗС можно судить по его влиянию на радиоволны. Рассеяние радиоволн на неоднородностях частично-ионизованной плазмы вызывает ряд эффектов распространения излучения, особенно заметных при наблюдениях компактных ярких радиоисточников, таких как пульсары, мазеры и активные ядра галактик (АЯГ). Например, эффекты, имеющие преимущественно дифракционную природу, проявляют себя через угловое уширение наблюдаемого размера источника [5–7], «быстрые»

мерцания интенсивности по времени и частоте [8]. Рассеяние с доминированием рефракции может проявляться как «медленные» изменения интенсивности излучения [9], создание множественных изображений источника [10–12], а также как формирование симметричных модуляций плотности потока на кривых блеска радиоисточников, называемых событиями экстремального рассеяния (*extreme scattering event* или кратко ESE, [13]).

Впервые межзвездное рассеяние открыли в конце 1960-х по радионаблюдениям мерцаний пульсаров [14]. Пульсары предоставили уникальную информацию о свойствах локальной ионизованной МЗС. Было показано, что МЗС состоит из двух основных компонентов [15; 16]. Первый компонент, названный «диффузным», характеризуется малой степенью турбулентности и относительно равномерным распределением в плоскости Галактики [15]. Авторы работы [17] использовали радиоинтерферометрические наблюдения со сверхдлинной базой (РСДБ) за внегалактическими радиоисточниками и измерения мерцаний пульсаров, чтобы ограничить галактическое распределение диффузного компонента. Результаты исследования показали, что диффузная среда имеет экспоненциальное распределение по высоте над плоскостью Галактики на масштабах примерно 0.5 кпк с радиальной протяженностью до 7 кпк относительно центра Галактики [17]. Второй компонент межзвездной среды состоит из отдельных плотных образований (сгустков) простирающихся по высоте до 100 пк с приблизительным размером одного сгустка около 1 пк [15; 18]. На сегодняшний день пульсары являются основными зондами межзвездной турбулентности благодаря своей компактности, яркости и строгой регулярности радиоимпульсов, что позволяет с большой точностью отслеживать даже небольшие искажения сигнала, вызванные прохождением через межзвездную среду. Однако пульсары не столь эффективны для изучения крупномасштабных свойств МЗС, потому что они распределены преимущественно в плоскости Галактики. Внегалактические радиоисточники не имеют таких ограничений, так как их излучение пронизывает Галактику на всю ее глубину, а их изотропное распределение по небу позволяет зондировать МЗС во всех направлениях.

АЯГ – исключительно яркие и компактные внегалактические источники радиоизлучения. Аккреция вещества на сверхмассивную черную дыру (СМЧД), расположенную в центре хозяйской галактики, приводит к экстремальному энерговыделению и формированию релятивистских струй (джетов), превращая обычные галактики в ярчайшие маяки Вселенной [19]. АЯГ наблю-

даются во всех диапазонах электромагнитного спектра. Излучение джета в оптическом, инфракрасном и радиодиапазонах – это синхротронное излучение, которое генерируется высокоэнергичными заряженными частицами (электронаами, позитронами, протонами) в магнитном поле выброса [20]. Ускорение частиц может происходить с помощью ударных волн [21], рожденных вследствие нестабильностей, вызванных сложной динамикой аккрецирующей материи вблизи центральной черной дыры, а также при рождении новых сгустков нетепловой плазмы повышенной яркости. На коротких длинах волн (ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучение) механизм излучения джетов – обратное комптоновское рассеяние.

Угловое уширение внегалактических радиоисточников на гигагерцовых частотах измеряется на масштабах миллисекунд дуги. Эта величина чрезвычайно мала, гораздо меньше, чем угловое разрешение одиночных радиотелескопов и даже некоторых интерферометров. Поэтому изучить этот и другие эффекты рассеяния, связанные с искажениями наблюдаемого изображения источника, можно только с помощью РСДБ-наблюдений. РСДБ – это эффективный в достижении рекордных уровней углового разрешения радиоастрономический метод, используемый в различных областях научных исследований. Измерения, выполняемые РСДБ-сетями (в том числе с участием космических антенн), достигают микросекундного углового разрешения и проводятся в широком диапазоне длин волн, что дает уникальную возможность изучения физических процессов в коллимированных выбросах активных ядер галактик на различных масштабах, вплоть до окрестностей СМЧД. Данный метод был предложен советскими учеными Л.И. Матвеенко, Н.С. Кардашевым, Г.В. Шоломицким [22] и его главной особенностью является возможность независимой регистрации сигнала на каждом из элементов интерферометра, используя высокоточные стандарты частоты. Наблюдения космических объектов проводится по единой программе одновременно на нескольких радиотелескопах (антеннах), расположенных на расстояниях от десятков до многих тысяч километров друг от друга. Такая объединенная сеть радиотелескопов работает как один инструмент с незаполненной апертурой и эффективным диаметром равным расстоянию между самыми удаленными элементами интерферометра.

В течение двух десятилетий после ввода в эксплуатацию интерферометра со сверхдлинными базами VLBA (Very Long Baseline Array) в 1994 году [23] были обнаружены тысячи активных галактик в широком диапазоне частот (от

1.4 до 86 ГГц). На сегодняшний день выборка АЯГ, наблюдаемых с помощью РСДБ, насчитывает десятки тысяч источников равномерно распределенных по небу и более 100 тысяч источник-эпох.

Рассеяние радиоизлучения в МЗС может сильно искажать наблюданное излучение компактных радиоисточников. В частности, формировать дополнительные ложные изображения источника, влиять на измеренный уровень плотности потока, создавая необычные вариации на кривых блеска, не связанные с изменениями внутри источника и др. Это, в свою очередь, может существенно усложнить интерпретацию наблюдательных данных и получение корректных физических выводов. Исследование и учет эффектов рассеяния позволяют восстанавливать истинные характеристики рассеянных источников и повышают точность оценки их параметров. Например, учет рассеяния критически важен при измерениях яркостных температур АЯГ, что имеет решающее значение для теоретических моделей релятивистских джетов [24]. В то же время, данные, содержащие сведения о рассеянии, представляют ценный источник информации о физических свойствах межзвездной среды, что вносит существенный вклад в понимание структуры и динамики Галактики.

Целью настоящей работы является исследование свойств рассеивающих экранов и влияния эффектов распространения радиоизлучения в межзвездной среде Галактики на наблюдаемые свойства активных ядер галактик по данным многочастотных радионаблюдений, проведенных как в режиме интерферометра, так и одиночной антенны. А именно:

- исследование свойств крупномасштабного рассеяния в межзвездной среде Галактики на основе данных измерений угловых размеров РСДБ-ядер активных галактик по всему небу в широком диапазоне частот;
- исследование влияния эффектов рефракционно-доминированного рассеяния на наблюдаемую с помощью РСДБ морфологию активных ядер галактик;
- исследование влияния эффектов распространения радиоволн в МЗС Галактики на наблюдаемые гигагерцовые кривые блеска активных галактик;
- восстановление истинных, неискаженных рассеянием характеристик активных галактик;

- определение физической природы рассеивающих экранов в направлении наблюдаемых внегалактических источников, их положения и основных физических характеристик.

Для достижения поставленных целей необходимо было решить следующие **задачи**:

- определить, как наблюдаемые размеры АЯГ зависят от направления на небе и частоты наблюдения;
- построить наиболее полную и детализированную карту свойств крупномасштабного рассеяния в МЗС Галактики; определить области неба, где наблюдается угловое уширение радиоисточников вследствие рассеяния;
- определить характеристики турбулентности МЗС, вызывающей дифракционно-доминированное рассеяние радиоволн АЯГ, и сравнить результаты с предсказаниями теоретических моделей, чтобы сделать выводы о физических свойствах межзвездной среды;
- обнаружить признаки анизотропного рассеяния и исследовать вторичные изображения источника особого интереса – квазара 2005+403, сформированные из-за прохождения рассеивающего экрана через луч зрения на источник, предложить модель их формирования;
- обнаружить события экстремального рассеяния на гигагерцовых кривых блеска квазара 2005+403 и получить оценки основных физических параметров рассеивающих экранов, используя существующие модели экстремального рассеяния для кривых блеска активных галактик;
- в рамках модели рассеивающей линзы восстановить истинные характеристики квазара 2005+403.

Научная новизна работы заключается в комплексном анализе, основанном на уникальных многочастотных и многоэпоховых наблюдательных данных, полученных в режиме интерферометра (система апертурного синтеза VLBA), а также данных мониторинговых наблюдений на радиотелескопах РАТАН-600 и OVRO (в режиме одиночной антенны). Исследование крупномасштабных свойств рассеяния МЗС в Галактике основано на наиболее полной выборке измеренных угловых размеров почти 9 тыс. АЯГ, равномерно распределенных по небу, в широком диапазоне частот от 1.4 до 86 ГГц. Это позволило построить первую детализированную карту распределения мощности рассеяния радиоволн в Галактике и выявить как протяженные, так и локальные области наиболее сильного рассеяния. Впервые обнаружены множественные

события экстремального рассеяния, характеризующиеся квазисимметричными модуляциями на гигагерцовых кривых блеска квазара 2005+403, вызванные прохождением рассеивающего экрана через луч зрения на источник. Это позволило восстановить физические характеристики плазменных экранов в эпоху наблюдения этих событий рассеяния. Таким образом был проведен первый многолетний и многочастотный комплексный анализ событий экстремального рассеяния на кривых блеска квазара. Впервые обнаружено одновременное проявление анизотропного рассеяния в двух компактных РСДБ-компонентах струи квазара.

Научная значимость и ценность. Результаты работы позволили улучшить уровень понимания физики плазменных структур в МЗС, вызывающих рассеяние радиоволн далеких источников радиоизлучения, разработать новые подходы для исследования свойств плазменных линз, а также обогатить наблюдательные проявления рассеяния для дальнейшего развития теоретических моделей турбулентности межзвездной среды в Галактике. Данная работа также позволила достичь прогресса в исследовании анизотропного межзвездного рассеяния, его влияния на радионаблюдения и того, какие структуры могут создавать подобные эффекты. Этот результат имеет важное значение для корректного восстановления истинных характеристик радиоисточников, особенно на низких частотах, где рассеяние может доминировать в наблюдаемой структуре активного ядра.

Результаты, вошедшие в данную диссертационную работу, были отмечены Научным советом по астрономии Отделения физических наук РАН среди важнейших достижений астрономических исследований за 2023 год. В 2024 году за особые достижения в области астрофизики докторантке была присуждена Премия им. Д.В. Скobelцына, а также назначена стипендия Президента Российской Федерации для аспирантов и адъюнктов, проводящих научные исследования в рамках реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации.

Практическая ценность. Наиболее компактные АЯГ, расположенные на космологических расстояниях, используются для построения международной небесной системы координат ICRF (International Celestial Reference Frame) и дальнейшего ее уточнения (ICRF 2/3/4), которая до недавнего времени основывалась на РСДБ-наблюдениях активных галактик на частотах от 2 до 8 ГГц. На этих частотах эффекты рассеяния могут играть значимую роль, поэтому

для создания более точной и стабильной системы отсчета необходимо учитывать не только эффекты, связанные с физикой самих АЯГ – такие как наличие структуры источника и ее переменность, нестабильность положения РСДБ-ядра при рождении новых сгустков нетепловой плазмы и их распространении вниз по джету, – но также и эффекты распространения излучения в межзвездной среде Галактики. Исследование эффектов рассеяния радиоволн позволяет не только восстанавливать истинные характеристики рассеянных источников, которые необходимы для анализа особенностей механизмов излучения АЯГ, но и непосредственно зондировать свойства турбулентной МЗС. Новые фундаментальные знания о нашей Галактике, в частности ее межзвездной среды, в совокупности с детальной информацией об особенностях механизмов излучения АЯГ на масштабах миллисекунд и суб-миллисекунд дуги, имеют важное практическое значение для построения и уточнения высокоточной инерциальной системы отсчета нового поколения, а также для решения задач земной и космической навигации и глобального позиционирования в рамках российских систем «ГЛОНАСС» и ее следующего поколения – «Сфера».

Методология и методы исследования. Для достижения поставленной цели и решения соответствующих задач осуществлялся комплексный анализ наблюдательных РСДБ-данных с применением методов обработки изображений, использованием астрономических каталогов, а также современных статистических подходов, включая оценку значимости и надежности полученных результатов. Обработка РСДБ-данных производилась при помощи стандартных процедур: априорная калибровка с использованием программного пакета AIPS [25], а также гибридное картографирование с применением алгоритма CLEAN [26] в пакете Difmap [27]. Оценка угловых размеров источников проводилась путем подгонки моделей распределения яркости к интерферометрическим данным с использованием метода Nested Sampling [28]. В работе также использовались кривые блеска, полученные в рамках долгосрочной мониторинговой программы в радиообсерватории Оуэнс-Вэлли и в рамках многолетнего мониторинга микроказаров на радиотелескопе РАТАН-600. Для анализа данных применялись различные статистические методы, включая бутстррап [29] и Монте-Карло моделирование [напр., 30], методы байесовской статистики [31; 32], моделирование гауссовыми процессами [33], корреляционный тест Кендалла [34], рандомизационный тест [35] и др.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. По данным массовых РСДБ-наблюдений построена первая подробная карта распределения рассеивающих свойств межзвездной среды Галактики по небу. Самое сильное рассеяние обнаружено в направлении области центра Галактики и созвездия Лебедя. Обнаружена значимая пространственная корреляция между участками Галактики, характеризующимися высокой интенсивностью излучения в линии H_{α} , с областями сильного рассеяния.
2. Обнаружены анизотропные морфологические особенности в наблюдаемой структуре квазара 2005+403, вызванные формированием вторичных изображений яркого компактного компонента. Угловой размер РСДБ-ядра, а также угловое расстояние между ядром и его субизображениями масштабируются как квадрат длины волны, что доказывает их происхождение вследствие рассеяния, а не внутренних изменений в источнике. По данным РСДБ-наблюдений квазара на частоте 15.4 ГГц впервые обнаружено анизотропное рассеяние двух РСДБ-компонент выброса одновременно.
3. На кривых блеска, полученных на радиотелескопе РАТАН-600, обнаружены многочастотные модуляции плотности потока, отождествленные с событиями экстремального рассеяния. Получены оценки физических параметров рассеивающих линз: угловой и линейный размеры 0.3 ± 0.1 мсек дуги и 0.6 ± 0.1 а.е., собственное движение 8.3 ± 0.7 мсек дуги/год и соответствующая поперечная скорость 70.1 ± 5.7 км/с.

Достоверность проведенных исследований основана на использовании данных, полученных на инструментах мирового уровня, установленных в отечественных и зарубежных обсерваториях. Достоверность полученных результатов дополнительно подтверждается обработкой и анализом наблюдательных данных с использованием современных статистических и вычислительных методов. Все результаты апробированы на российских и международных конференциях и семинарах, а также опубликованы в рецензируемом научном журнале.

Апробация работы. Все результаты опубликованы в ведущих международных научных журналах, доложены и обсуждены на научных семинарах Астрокосмического центра Физического института им. П. Н. Лебедева, а также на трех российских и пяти международных научных конференциях, включая:

- EVN Mini-Symposium & Users' meeting, Корк, Ирландия, 12–14 июля 2021 г.
- Всероссийская астрономическая конференция (ВАК-2021) «Астрономия в эпоху многоканальных исследований», Москва, Россия, 23–28 августа 2021 г.
- 15th EVN Symposium and User's Meeting: Providing the Sharpest View of the Universe, Корк, Ирландия, 11–15 июля 2022 г.
- 65-я Всероссийская научная конференция МФТИ, Москва, Россия, 3–7 апреля 2023 г.
- Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра, Москва, Россия, 18–21 декабря 2023 г.
- Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2024, п. Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская республика, Россия, 25–31 августа 2024 г.
- Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра, Москва, Россия, 23–26 декабря 2024 г.
- Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2025», Москва, Россия, 11–25 апреля 2025 г.

Публикации по теме диссертации. Основные результаты по теме диссертации изложены в трех статьях, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК и индексируемых Web of Science и Scopus:

1. *Koryukova T. A., Pushkarev A. B., Plavin A. V., Kovalev Y. Y.* Tracing Milky Way scattering by compact extragalactic radio sources // MNRAS. — 2022. — т. 515, № 2. — с. 1736–1750.
2. *Koryukova T. A., Pushkarev A. B., Kiehlmann S., Readhead A. C. S.* Multiple imaging of the quasar 2005 + 403 formed by anisotropic scattering // MNRAS. — 2023. — т. 526, № 4. — с. 5932–5948.
3. *Koryukova T. A., Trushkin S. A., Pashchenko I. N., Pushkarev A. B.* Probing plasma scattering screens towards the quasar 2005+403 with long-term RATAN-600 observations // MNRAS. — 2025. — т. 542, № 4. — с. 2733–2751.

Личный вклад. Во всех выносимых на защиту результатах вклад диссертанта является основным и включает обработку и анализ наблюдательных РСДБ-данных, работу с кривыми блеска активных ядер галактик, анализ и

интерпретацию полученных результатов и подготовку научных публикаций. Диссертант совместно с соавторами участвовал в постановке исследовательских задач, выборе методов их решения и разработке скриптов для описания и анализа наблюдаемых эффектов рассеяния.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из Введения, трех Глав, Заключения и двух Приложений. Полный объем диссертации включает 161 страницу, 42 рисунка и 18 таблиц. Список литературы содержит 196 наименования.

Основное содержание работы

Во **Введении** приведено общее описание диссертации, обзор современного состояния исследований влияния эффектов распространения радиоволн в межзвездной среде Галактики на наблюдаемые свойства струй активных ядер галактик; обосновывается актуальность проводимого исследования; обсуждаются цели и задачи работы; приводятся основные результаты, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена исследованию рассеивающих свойств МЗС Галактики с использованием наиболее полной выборки РСДБ-наблюдений активных ядер галактик в широком диапазоне частот от 1.4 до 86 ГГц. На основе этих данных построены зависимости наблюдаемых размеров РСДБ-ядер от галактической широты, что позволило обнаружить угловое уширение измеренных размеров для источников, наблюдаемых сквозь галактическую плоскость ($|b| < 10^\circ$). Этот эффект особенно заметен на низких частотах, в частности на 2 ГГц.

Используя данные наблюдений 2614 источников, размер которых был одновременно измерен на 2 и 8 ГГц, исследована частотная зависимость углового размера РСДБ-ядра. Для источников, наблюдаемых за пределами плоскости Галактики, степенной индекс частотной зависимости размера равен $k = 1.02 \pm 0.01$, что хорошо согласуется с теоретически предсказанным $k = 1$ для ядер АЯГ с синхротронным самопоглощением в рамках модели конического выброса [36]. Для источников, наблюдаемых через плоскость Галактики, среднее значение степенного индекса составило $k = 1.60 \pm 0.02$. Используя полученные оценки индекса k , расчетного по данным на 2 и 8 ГГц, построена первая подробная карта распределения рассеивающих свойств Галактики по небу на основе наблюдательных РСДБ-данных. Обнаружена значимая пространственная корреляция между регионами Галактики, характеризующимися высокой интенсивностью излучения в линии H_α , и областями сильного рассеяния. Одна из них позиционно связана с областью в созвездии Лебедя, которая содержит множественные центры звездообразования и остаток сверхновой W78. В местах расположения остатков сверхновых Телец А, Парус и Кассиопея А, туманности Ориона (M42) также обнаружено усиление рассеяния МЗС. Самое сильное рассеяние обнаружено в центральной части Галактики и галактического бара, который простирается в пределах $\pm 20^\circ$ по галактической долготе.

Многочастотное Монте-Карло моделирование наблюдаемых размеров РСДБ-ядер АЯГ, с учетом внутренней структуры источников, позволило разделить вклад истинной и рассеянной компоненты размера в наблюдаемый угловой диаметр 1411 источников. Как и ожидалось, вклад рассеянной компоненты наблюдаемого размера для источников в плоскости Галактики систематически больше, чем для наблюдаемых вне плоскости Галактики. Около 30% АЯГ, наблюдаемых в плоскости Галактики, не подвержены значимому рассеянию, что отражает высокую степень неоднородности в распределении рассеивающих экранов в Галактике. Большинство источников с незначительным рассеянием расположены в направлении антицентра Галактики, а также за пределами плоскости Галактики.

Оценки степенного индекса рассеяния, полученные в рамках данной Главы, с использованием различных подходов, в пределах ошибок сходятся к значению $k \simeq 2.0$, что согласуется с моделью рассеяния на плоском экране с гауссовым профилем неоднородности электронной плотности. Однако модель колмогоровской турбулентности также не может быть однозначно отвергнута.

Вторая глава посвящена исследованию свойств рассеяния квазара 2005+403, наблюдаемого в направлении области в созвездии Лебедя. На основе анализа наблюдательных РСДБ-данных квазара показано, что он демонстрирует типичную для активных ядер галактик одностороннюю морфологию типа ядро-выброс на парсековых масштабах на частотах 43.2, 23.8, 15.4, 8.3 и 5.0 ГГц. Однако начиная с частоты 8.3 ГГц и ниже в наблюдаемой структуре квазара начинают проявляться нетипичные анизотропные морфологические особенности. Данные особенности в наблюдаемой структуре квазара вызваны формированием вторичных изображений источника вследствие рефракционно-доминированного рассеяния радиоизлучения в МЗС Галактики. Субизображения источника в большинстве случаев ориентированы вдоль позиционного угла примерно 40° , что совпадает с позиционным углом линии равной галактической широты. Формирование субизображений вдоль этого направления может быть результатом пересечения луча зрения рассеивающей плазменной линзой в ходе ее галактического движения вокруг центра Галактики. Таким образом, источник 2005+403 является вторым за всю историю РСДБ-наблюдений квазаром (после 2023+335, [11]), в котором обнаружено формирование редкого эффекта множественных изображений, теоретически предсказанного около полувека назад.

По данным неодновременных многочастотных РСДБ-наблюдений источника обнаружено, что угловое расстояние между ядром и его вторичными изображениями масштабируются как квадрат длины волны, что является прямым доказательством происхождения вторичных изображений вследствие рассеяния, а не внутренних изменений в источнике. Используя результаты измерений углового размера РСДБ-ядра в диапазоне от 0.6 до 43.2 ГГц исследована частотная зависимость углового размера источника. Согласно полученным оценкам, угловой размер РСДБ-ядра масштабируется как ν^{-k} , где $k = 2.00 \pm 0.08$. Значение k согласуется в пределах ошибок с 2.2, ожидаемым для канонической колмогоровской турбулентности, когда для подгонки используются только низкочастотные данные ($\lesssim 8.3$ ГГц).

Плотности потока РСДБ-ядра измерены в широком диапазоне частот (1.4–43.2 ГГц). Эти данные использовались для подгонки синхротронного спектра 2005+403. В результате была получена оценка величины напряженности магнитного поля в области РСДБ-ядра на уровне 0.06 Гаусс.

Преобладание вклада рассеяния на низких частотах в наблюдаемую структуру квазара приводит к нетипичному распределению спектрального индекса по источнику с экстремальными значениями в диапазоне от -6 до $+2$. Карты распределения спектрального индекса, построенные с использованием одновременных РСДБ-наблюдений на 1.5, 1.8, 2.3 и 5.0 ГГц и всех их возможных комбинаций, демонстрируют одни и те же характерные особенности, а именно симметричное относительно фазового центра распределение спектрального индекса с экстремальными значениями в центре и на периферии источника.

На кривой блеска квазара 2005+403, полученной на телескопе OVRO на частоте 15 ГГц, обнаружено событие экстремального рассеяния с вариациями плотности потока на уровне около 10%. Это событие произошло в мае 2019 г. и длилось около 1.6 месяцев. Подгоняя данное событие с помощью модели стохастического перераспределения потока, показано, что рассеивающий экран, ответственный за формирование каустических поверхностей на кривой блеска, имеет плоскую геометрию с поперечным угловым размером около 0.4 ± 0.3 мсек дуги и пересекает луч зрения с собственным движением 4.4 ± 3.1 мсек дуги/год. Предполагая, что линза расположена в области Лебедя на расстоянии примерно 1.8 кпк, ее линейный размер и поперечная скорость относительно наблюдателя составляют 0.7 ± 0.5 а.е. и 31 ± 27 км/с, соответственно. Кроме того, кривая блеска показала еще несколько потенциальных

ESE с меньшей амплитудой модуляций плотности потока и сопоставимой продолжительностью в несколько месяцев. Некоторые из этих событий следуют друг за другом последовательно на масштабах меньше года, что может свидетельствовать о сложной или множественной структуре рассеивающего экрана на луче зрения.

Третья глава посвящена исследованию кривых блеска квазара 2005+403, полученных с помощью радиотелескопа РАТАН-600 на частотах 4.7/4.8, 7.7/8.2 и 11.2 ГГц, с целью обнаружения признаков рассеяния радиоволн. Кросс-корреляционный анализ многолетних кривых блеска показал, что вариации на частоте 11.2 ГГц опережают вариации на 7.7/8.2 ГГц примерно на 2.8 ± 1.2 месяца, а также опережают вариации на 4.7/4.8 ГГц на 7.6 ± 1.3 месяца. Между вариациями на 7.7/8.2 ГГц и 4.7/4.8 ГГц наблюдается задержка порядка 3.5 ± 1.1 месяца. Полученный результат говорит о том, что переменность 2005+403 демонстрирует частотную эволюцию, ожидаемую вследствие эффекта синхротронного самопоглощения АЯГ [36; 37].

Кривые блеска РАТАН-600 характеризуются переменностью в широком диапазоне временных масштабов (от дней до лет). Самый длительный масштаб составляет около семи лет и отчетливо наблюдается на кривых блеска всех трех частот. Причиной долговременной переменности может быть изменение доплеровского усиления, вызванное, например, прецессией струи, а также рождением и распространением новых РСДБ-компонент выброса в активном ядре. Модуляции, наблюдаемые на более коротких временных интервалах (1.5 года и меньше), скорее всего, связаны с эффектами рассеяния. Необычные высокоамплитудные модуляции плотности потока на масштабе 1.36 года были обнаружены на кривой блеска РАТАН-600 на частоте 4.7/4.8 ГГц до 2018 года. Данные модуляции не наблюдаются после 2018 года. Происхождение и физическая природа данных модуляций пока неясна и требует дальнейшего изучения.

На кривых блеска РАТАН-600 выявлены три отдельные многочастотные модуляции, связанные с экстремальным рассеянием, которые произошли в 2011, 2015 и 2020 годах. Продолжительность каждого события составляет около четырех месяцев, а амплитуда вариаций плотности потока достигает 10% на частоте 11.2 ГГц. Отсутствие значимых временных задержек между модуляциями на разных частотах свидетельствует о внешнем («по дороге»), относительно источника, происхождении этих вариаций. Данные события были подогнаны с помощью модели стохастического перераспределения потока [38] и модели гаус-

свой линзы [10], что позволило получить количественные оценки физических параметров рассеивающих экранов, а именно: угловой и линейный размеры 0.3 ± 0.1 мсек дуги и 0.6 ± 0.1 а.е., соответственно, собственное движение 8.3 ± 0.7 мсек дуги/год и поперечную скорость 70.1 ± 5.7 км/с, максимальную плотность свободных электронов на луче зрения 1200 ± 120 см⁻³, а также массу линзы $(0.8 \pm 0.4) \times 10^{-15} M_{\odot}$. Рассеивающие экраны, формирующие наблюдаемые события рассеяния на гигагерцовых кривых блеска квазара, могут быть связаны с плотными ионизованными радиофиламентами, ориентированными преимущественно перпендикулярно плоскости Галактики [39], с протяженными слоями плазмы с толщиной порядка а.е. или нитевидными плазменными структурами, ориентированными преимущественно вдоль луча зрения [40].

Одна из эпох наблюдений источника в рамках программы MOJAVE на частоте 15.4 ГГц (24 июня 2011 г.) совпала с правой каустикой события рассеяния, обнаруженного на кривых блеска РАТАН-600. В рассматриваемую эпоху самым ярким по плотности потока компонентом является внутренний компактный компонент выброса, а не РСДБ-ядро. С помощью моделирования структуры источника набором гаусс-компонент обнаружено, что анизотропное рассеяние происходит как в ядре, так и во внутреннем компоненте джета. Это первый экспериментально установленный случай анизотропного рассеяния, наблюданного одновременно в двух РСДБ-компонентах выброса активного ядра.

Изменения плотности потока квазара 2005+403 на частотах 7.7/8.2 и 11.2 ГГц в период с 2015.1 по 2016.6 проявляются в виде последовательности ESE-подобных модуляций, включающей до шести событий подряд. Средний интервал между модуляциями составляет около 2.5 месяцев, а длительность каждого отдельного события – порядка нескольких месяцев. Данные вариации плотности потока, по-видимому, обусловлены рассеянием радиоизлучения в межзвездной среде. Как многокомпонентная структура фонового источника, так и неоднородная структура рассеивающего экрана способны формировать несколько событий экстремального рассеяния на кривой блеска радиоисточника. Примечательно, что данные модуляции не обнаружены на частоте 4.7/4.8 ГГц, вероятно, из-за сглаживания каустик, вызванного большим соотношением размера источника и рассеивающей линзы на низкой частоте.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации и обсуждаются перспективы дальнейших исследований.

Список литературы

1. *Binney J., Merrifield M.* Galactic Astronomy // Princeton Series in Astrophysics. — 1998.
2. *Combes F.* Astrophysical Fractals: Interstellar Medium and Galaxies // The Chaotic Universe / под ред. V. G. Gurzadyan, R. Ruffini. — 2000. — с. 143—172.
3. *Falceta-Gonçalves D., Kowal G., Falgarone E., Chian A. C. -L.* Turbulence in the interstellar medium // Nonlinear Processes in Geophysics. — 2014. — т. 21, № 3. — с. 587—604.
4. *Ferrière K.* Plasma turbulence in the interstellar medium // Plasma Physics and Controlled Fusion. — 2020. — т. 62, № 1. — с. 014014.
5. *Duffett-Smith P. J., Readhead A. C. S.* The angular broadening of radio sources by scattering in the interstellar medium. // MNRAS. — 1976. — т. 174. — с. 7—17.
6. *Pushkarev A. B., Kovalev Y. Y.* Milky Way scattering properties and intrinsic sizes of active galactic nuclei cores probed by very long baseline interferometry surveys of compact extragalactic radio sources // MNRAS. — 2015. — т. 452, № 4. — с. 4274—4282.
7. *Koryukova T. A., Pushkarev A. B., Plavin A. V., Kovalev Y. Y.* Tracing Milky Way scattering by compact extragalactic radio sources // MNRAS. — 2022. — т. 515, № 2. — с. 1736—1750.
8. *Jauncey D. L., Koay J. Y., Bignall H.* [и др.]. Interstellar scintillation, ISS, and intrinsic variability of radio AGN // Advances in Space Research. — 2020. — т. 65, № 2. — с. 756—762.
9. *Rickett B. J., Coles W. A., Bourgois G.* Slow scintillation in the interstellar medium. // A&A. — 1984. — т. 134. — с. 390—395.
10. *Clegg A. W., Fey A. L., Lazio T. J. W.* The Gaussian Plasma Lens in Astrophysics: Refraction // ApJ. — 1998. — т. 496, № 1. — с. 253—266.
11. *Pushkarev A. B., Kovalev Y. Y., Lister M. L.* [и др.]. VLBA observations of a rare multiple quasar imaging event caused by refraction in the interstellar medium // A&A. — 2013. — т. 555. — A80.

12. *Koryukova T. A., Pushkarev A. B., Kiehlmann S., Readhead A. C. S.* Multiple imaging of the quasar 2005 + 403 formed by anisotropic scattering // MNRAS. — 2023. — т. 526, № 4. — с. 5932—5948.
13. *Fiedler R. L., Dennison B., Johnston K. J., Hewish A.* Extreme scattering events caused by compact structures in the interstellar medium // Nature. — 1987. — т. 326, № 6114. — с. 675—678.
14. *Lang K. R.* Interstellar Scintillations of Pulsar Radiation // Science. — 1969. — т. 166, № 3911. — с. 1401—1403.
15. *Cordes J. M., Weisberg J. M., Boriakoff V.* Small-scale electron density turbulence in the interstellar medium. // ApJ. — 1985. — т. 288. — с. 221—247.
16. *Fey A. L., Spangler S. R., Mutel R. L.* VLBI Angular Broadening Measurements in the Cygnus Region // ApJ. — 1989. — т. 337. — с. 730.
17. *Cordes J. M., Rickett B. J., Backer D. C.* Radio wave scattering in the interstellar medium, San Diego, CA, 1988 // Radio Wave Scattering in the Interstellar Medium. т. 174. — 1988. — (American Institute of Physics Conference Series).
18. *Cordes J. M., Pidwerbetsky A., Lovelace R. V. E.* Refractive and diffractive scattering in the interstellar medium // ApJ. — 1986. — т. 310. — с. 737—767.
19. *Urry C. M., Padovani P.* Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei // PASP. — 1995. — т. 107. — с. 803.
20. *Fossati G., Maraschi L., Celotti A.* [и др.]. A unifying view of the spectral energy distributions of blazars // MNRAS. — 1998. — т. 299, № 2. — с. 433—448.
21. *Hughes P. A., Aller H. D., Aller M. F.* Synchrotron Emission from Shocked Relativistic Jets. I. The Theory of Radio-Wavelength Variability and Its Relation to Superluminal Motion // ApJ. — 1989. — т. 341. — с. 54.
22. *Матвеенко Л.И. Кардашев Н.С. III. Г.* О радиоинтерферометре с большой базой. — Москва : Изв. высших учебных заведений, 1965, т. 8, № 4, с. 651; 1965.
23. *Napier P. J., Bagri D. S., Clark B. G.* [и др.]. The Very Long Baseline Array. // IEEE Proceedings. — 1994. — т. 82, № 5. — с. 658—672.

24. *Johnson M. D., Kovalev Y. Y., Gwinn C. R.* [и др.]. Extreme Brightness Temperatures and Refractive Substructure in 3C273 with RadioAstron // ApJL. — 2016. — т. 820, № 1. — с. L10.
25. *Greisen E. W.* AIPS, the VLA, and the VLBA // Information Handling in Astronomy - Historical Vistas. т. 285 / под ред. A. Heck. — 2003. — с. 109. — (Astrophysics and Space Science Library).
26. *Högbom J. A.* Aperture Synthesis with a Non-Regular Distribution of Interferometer Baselines // A&As. — 1974. — т. 15. — с. 417.
27. *Shepherd M. C.* Difmap: an Interactive Program for Synthesis Imaging // Astronomical Data Analysis Software and Systems VI. т. 125 / под ред. G. Hunt, H. Payne. — 1997. — с. 77. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
28. *Skilling J.* Nested Sampling // Bayesian Inference and Maximum Entropy Methods in Science and Engineering: 24th International Workshop on Bayesian Inference and Maximum Entropy Methods in Science and Engineering. т. 735 / под ред. R. Fischer, R. Preuss, U. V. Toussaint. — AIP, 2004. — с. 395—405. — (American Institute of Physics Conference Series).
29. *Efron B.* Bootstrap methods: another look at the jackknife annals of statistics 7: 1–26 // View Article PubMed/NCBI Google Scholar. — 1979. — т. 24.
30. *Metropolis N., Ulam S.* The Monte Carlo Method // Journal of the American Statistical Association. — 1949. — т. 44, № 247. — с. 335—341 ; — PMID: 18139350.
31. *Bayes T., Price R.* An Essay Towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances. By the late Rev. Mr. Bayes, communicated by Mr. Price, in a letter to John Canton, MA. and F.R.S. // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. — 1763. — т. 53. — с. 370—418.
32. *Laplace P.* Memoire sur la Probabilite des Causes par les Evenements // l'Academie Royale des Sciences. — 1774. — т. 6. — с. 621—656.
33. *Rasmussen C. E., Williams C. K. I.* Gaussian Processes for Machine Learning (Adaptive Computation and Machine Learning). — The MIT Press, 2005.
34. *Kendall M. G.* Rank Correlation Methods. — 2-е изд. — London : Charles Griffin & Company Ltd., 1955.

35. *Edgington E. S.* Randomization Tests // International Encyclopedia of Statistical Science / под ред. M. Lovric. — Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2011. — с. 1182—1183.
36. *Blandford R. D., Königl A.* Relativistic jets as compact radio sources. // ApJ. — 1979. — т. 232. — с. 34—48.
37. *Pacholczyk A. G.* Radio astrophysics. Nonthermal processes in galactic and extragalactic sources. — 1970.
38. *Fiedler R., Dennison B., Johnston K. J.* [и др.]. A Summary of Extreme Scattering Events and a Descriptive Model // ApJ. — 1994. — т. 430. — с. 581.
39. *Churazov E., Khabibullin I., Barnouin T.* [и др.]. Pulsar-wind-nebula-powered Galactic center X-ray filament G0.13-0.11. Proof of the synchrotron nature by IXPE // A&A. — 2024. — т. 686. — A14.
40. *Jow D. L., Pen U.-L., Baker D.* On the cusp of cusps: a universal model for extreme scattering events in the ISM // MNRAS. — 2024. — т. 528, № 4. — с. 6292—6301.