

**«УТВЕРЖДАЮ»:**

Проректор МГУ имени М.В. Ломоносова,  
доктор физико-математических наук,  
член-корреспондент РАН А.А. Федянин



*26* февраля 2026 г.

## **ОТЗЫВ**

*ведущей организации*

*(Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1) на диссертационную работу **КОРЮКОВОЙ Татьяны Андреевны** на тему «Влияние эффектов распространения радиоволн в межзвездной среде Галактики на наблюдаемые свойства струй активных ядер галактик» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «1.3.1 – Физика космоса, астрономия»*

### **Основное содержание диссертационной работы**

Диссертационная работа Корюковой Татьяны Андреевны «Влияние эффектов распространения радиоволн в межзвездной среде Галактики на наблюдаемые свойства струй активных ядер галактик» состоит из Введения, трёх Глав, Заключение и двух Приложений. Полный объем диссертации составляет 161 страниц, включая 42 рисунка и 18 таблиц. Список литературы содержит 196 наименований.

Диссертация посвящена изучению влияния межзвёздной среды (МЗС) на радиоинтерферометрические наблюдения активных ядер галактик (АЯГ) и возможному применению таких наблюдений для целей исследования свойств МЗС.

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.

В **Первой главе** работы было проведено исследование рассеивающих свойств МЗС Галактики с использованием обширной выборки РСДБ-наблюдений активных ядер галактик в широком диапазоне частот от 1.4 до 86 ГГц. Была изучена зависимость наблюдаемых размеров РСДБ-ядер от галактической широты и обнаружено угловое уширение измеренных размеров для источников, наблюдаемых вблизи галактической плоскости ( $|b| < 10^\circ$ ), особенно заметное на низких частотах. По одновременным данным наблюдений 2614 источников на 2 и 8 ГГц была исследована частотная зависимость углового размера РСДБ-ядра. Для источников вдали от галактической плоскости эта зависимость совпадает с ожиданиями от модели излучения АЯГ с коническим выбросом с синхротронным самопоглощением. Для источников же на низких широтах частотная зависимость более крутая и объясняется рассеянием в МЗС. По полученным оценкам индекса была построена первая подробная карта распределения рассеивающих свойств Галактики по небу на основе наблюдательных РСДБ-данных и обнаружена значимая пространственная корреляция между регионами Галактики, характеризующимися высокой интенсивностью излучения в линии  $H\alpha$ , и областями сильного рассеяния, прежде всего в области центральной части Галактики и областях активного звездообразования в созвездии Лебедя. Многочастотное моделирование наблюдаемых размеров РСДБ-ядер АЯГ, с учетом внутренней структуры источников, позволило разделить вклад истинной и рассеянной компоненты размера в наблюдаемый угловой размер 1411 источников. В среднем вклад рассеянной компоненты ожидаемо оказался выше для источников на низких галактических широтах, однако около 30% таких АЯГ не продемонстрировали значимого рассеяния, что может объясняться высокой степенью неоднородности в распределении рассеивающих экранов в Галактике. Большинство источников с

незначительным рассеянием расположены в направлении антицентра Галактики, а также вне плоскости Галактики.

Оценки степенного индекса рассеяния в пределах ошибок сошлись к значению  $k \approx 2.0$ , что хорошо согласуется с простой моделью рассеяния на плоском экране с гауссовым профилем неоднородности электронной плотности. Однако модель колмогоровской турбулентности, предсказывающая значение  $k = 2.2$ , также пока не может быть однозначно отвергнута.

**Глава 2** посвящена исследованию свойств рассеяния квазара 2005+403, находящегося за областью сильного рассеяния в созвездии Лебедя. Наблюдения проводились на частотах от 1.8 до 43.2 ГГц. На высоких частотах наблюдалась типичная для АЯГ морфология ядро-выброс на масштабах парсек, на частотах же ниже 8.3 ГГц всё большую роль играли эффекты распространения – появились вторичные изображения источника вследствие рефракционно-доминированного рассеяния радиоизлучения в МЗС. Источник 2005+403 стал вторым за всю историю РСДБ-наблюдений квазаром (после QSO 2023+335), в котором был обнаружен редкий эффект формирования множественных изображений, теоретически предсказанный около полувека назад. Прямым доказательством формирования вторичных изображений из-за рассеяния стало обнаружение того факта, что угловое расстояние между ядром и его вторичными изображениями увеличивается пропорционально квадрату длины волны. Частотная зависимость углового размера РСДБ-ядра описывается степенным законом с показателем степени  $k$  близким к 2, что согласуется с значением, ожидаемым для колмогоровской турбулентности. Измеренные спектральные плотности потока РСДБ-ядра позволили получить спектр синхротронного излучения источника и оценить величину напряженности магнитного поля на уровне  $\sim 60$  мГс. В кривой блеска, полученной на телескопе OVRO на частоте 15 ГГц, было обнаружено событие экстремального рассеяния с вариациями плотности потока на уровне около 10%. Моделирование показало, что линза имела плоскую геометрию с поперечным угловым размером около  $0.4 \pm 0.3$  мсек дуги и собственным движением  $4.4 \pm 3.1$  мсек дуги/год. Она скорее всего находилась в области

Лебеда на расстоянии  $\sim 1.8$  кпк, что позволяет оценить её линейные размер и поперечную скорость как  $0.7 \pm 0.5$  а.е. и  $31 \pm 27$  км/с, соответственно.

**Глава 3** 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. Было показано, что вариации на частоте 11.2 ГГц опережают вариации на частотах 7.7/8.2 ГГц примерно на  $2.8 \pm 1.2$  месяца, а на частотах 4.7/4.8 ГГц на  $7.6 \pm 1.3$  месяца. Эта переменность демонстрирует частотную эволюцию, ожидаемую вследствие эффекта синхротронного самопоглощения АЯГ. Была исследована переменность в широком диапазоне временных масштабов (от дней до лет). Самый длительный масштаб составил около семи лет и отчетливо наблюдается на кривых блеска всех трех частот. Причиной долговременной переменности может быть изменение величины доплеровского усиления, вызванное, например, прецессией струи, а также рождением и распространением новых РСДБ-компонент выброса в активном ядре.

На кривых блеска РАТАН-600 было выявлено 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. Внешнее происхождение этих модуляций следует из отсутствия значимых временных задержек между модуляциями на разных частотах. С помощью модели гауссовой линзы были получены количественные оценки физических параметров рассеивающих экранов, а именно: угловой и линейный размеры  $0.3 \pm 0.1$  мсек дуги и  $0.6 \pm 0.1$  а.е., соответственно, собственное движение  $8.3 \pm 0.7$  мсек дуги/год и поперечную скорость  $70.1 \pm 5.7$  км/с, максимальная плотность свободных электронов на луче зрения составила  $1200 \pm 120$  см<sup>-3</sup>, а полная масса линзы была оценена в  $(0.8 \pm 0.4) \times 10^{-15} M_{\odot}$ .

Изменения плотности потока квазара 2005+403 на частотах 7.7/8.2 и 11.2 ГГц в период с 2015.1 по 2016.6 проявились в виде последовательности ESE (extreme scattering event)-подобных модуляций, включающей до шести событий подряд. Средний интервал между модуляциями составил около 2.5

месяцев, а длительность каждого отдельного события – порядка нескольких месяцев. Такие модуляции могли быть сформированы как многокомпонентной структурой фонового источника, так и неоднородной структурой рассеивающего экрана.

**В Заключении** приводятся основные результаты диссертации и обсуждаются перспективы дальнейших исследований.

**Актуальность** выполненной работы не вызывает сомнений. РСДБ наблюдения АЯГ являются одним из основных методов их исследований. Однако рассеяние радиоизлучения при распространении в МЗС может сильно искажать наблюдаемое изображение компактных радиоисточников. Например, могут возникать модуляции плотности потока и формироваться дополнительные ложные изображения источника. Это существенно усложняет интерпретацию наблюдательных данных и извлечение из них информации об источнике. Учет эффектов рассеяния позволяет провести коррекцию за них и восстановить истинные характеристики рассеянных источников и точнее оценить их параметры, для примера, яркостную температуру на различных частотах. Также детальная информация о рассеянии в различных направлениях является ценным источником информации о физических свойствах МЗС – одной из важнейших составных компонент Галактики.

**Наиболее важные и новые результаты.** По теме диссертации опубликовано 3 научные статьи в журналах, рекомендованных ВАК, все они в высокорейтинговом журнале *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. Основные результаты исследований были доложены на международных и всероссийских конференциях, а также научных семинарах Астрокосмического центра Физического института им. П. Н. Лебедева. Результаты работы получили признание как в научной литературе, так и на конференциях, что подтверждает **достоверность** положений и выводов диссертационной работы. Все результаты, представленные в диссертации, являются **новыми**.

**Основные результаты работы** заключаются в следующем:

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  $H\alpha$ , 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 суб-изображениями 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  $0.3 \pm 0.1$  мсек дуги и  $0.6 \pm 0.1$  а.е., собственное движение  $8.3 \pm 0.7$  мсек дуги/год и соответствующая поперечная скорость  $70.1 \pm 5.7$  км/с

**Научное значение полученных в диссертации результатов.** В работе был получен ряд результатов, которые обладают большой научной значимостью. Различными способами были оценены различные важные параметры, описывающие неоднородность МЗС в Галактике и свойства плазменных структур, которые могут вызывать эффект сильного рассеяния. Были разработаны новые подходы для исследования свойств плазменных линз и получен ряд результатов, которые в дальнейшем послужат для уточнения теоретических моделей неоднородностей МЗС в Галактике. Это будет в дальнейшем использовано для корректного восстановления истинных

характеристик радиоисточников, особенно на низких частотах, где рассеяние может доминировать в наблюдаемой структуре активного ядра.

**Практическое значение полученных результатов** состоит в том, что учет эффектов рассеяния, особенно сильных на низких частотах, может быть важен для повышения точности установления международной небесной системы координат ICRF (International Celestial Reference Frame), которая основывается в том числе и на РСДБ-наблюдениях далёких квазаров в S- и X-диапазонах (2.3 и 8.4 ГГц). В свою очередь, это имеет 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.

**Замечания по содержанию диссертации.**

1. Основное замечание – несмотря на значительный объём работы, в ней не хватило места для короткого теоретического описания рассматриваемых эффектов, прежде всего рассеяния в различных его режимах (дифракционном и рефракционном), а также в применении к кривым блеска квазаров с описанием экстремального рассеяния, межзвёздных сцинтилляций, переменности, вызванной влиянием Солнца. Этот материал мог бы быть вынесен в отдельный раздел или в Приложения и его наличие значительно упростило бы восприятие работы.

2. Структура диссертации не выглядит оптимизированной, материал глав 2 и 3 частично пересекается и повторяет друг друга. Например, в разделе 3.2 описываются два класса применявшихся моделей, но впервые их использовали уже в разделе 2.5. Лучше было бы разделить материал иным способом, чтобы главы были более независимы.

3. Стр. 7: «На коротких длинах волн (ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучение) механизм излучения джетов – обратное комптоновское рассеяние». Есть блазары, где УФ и даже рентген возникает из-за синхротронного излучения.

4. Стр. 22, подпись к рис. 1.3. Лучше сразу в подписи указать на то, что видимое усиление рассеяния вблизи Южного галактического полюса является артефактом.

5. Стр. 24. В описании механизма построения выборки есть непонятная часть «Приблизительно 8% всех рассчитанных амплитуд на частоте 2 ГГц и 6% на частоте 8 ГГц были исключены из анализа, поскольку они не превышают расчетную погрешность для этой амплитуды, т.е. переменность в пределах допустимой ошибки не учитывалась.»

6. Стр. 25, в интерпретации результатов встречается следующее: «переменность размеров за пределами плоскости Галактики выше, чем внутри плоскости для временных масштабов  $\Delta t$  больше нескольких лет, что может быть результатом вклада внутренней переменности источников». Как это может быть? На высоких широтах другие источники?

7. Стр. 28. Таблица 4 должна идти после рисунка 1.6.

8. Стр. 32: «а также область умеренного рассеяния в направлении остатка сверхновой Телец А в точке  $(l, b) = (-175^\circ.4, -5^\circ.8)$  в созвездии Тельца». Упоминание Крабовидной туманности тут может ввести в заблуждение, её угловые размеры очень малы и, собственно, она не имеет никакого отношения к наблюдаемым эффектам.

9. Стр. 34. «Известными индикаторами областей МЗС с высокой концентрацией свободных электронов являются: мера вращения плоскости поляризации или мера фарадеевского вращения, типичное угловое уширение, оцененное на основе модели NE2001 и распределение интенсивности излучения в линии  $H\alpha$  в Галактике». Почему не упомянута мера дисперсии, DM?

10. Стр. 38. «Более высокие значения коэффициента корреляции  $\tau$  Кендалла, полученные при сравнении  $k$  и  $\theta_{\text{obs}, 2 \text{ GHz}}$  с  $H\alpha$ , могут быть связаны с более высоким разрешением  $H\alpha$  данных по сравнению с RM и NE2001.» Это спорное утверждение. Во-первых, количество источников с известным RM в несколько раз превосходит количество квазаров с измеренным уширением, так что недостаточное разрешение вряд ли может быть причиной этого. Во-вторых, что важнее, корреляцию следует проводить не с RM, а с вариацией RM относительно среднего в этом направлении.

11. Стр. 48. «Предположим, что вклад рассеянных источников в распределение наблюдаемых размеров на небе может быть аппроксимирован с помощью половины распределения Стьюдента». Почему было сделано это предположение?

12. Стр. 85. На рисунке 2.8 цветом отмечена предполагаемое местоположение экстремального события (05.2019), но прямо перед ним на кривой блеска визуально заметен ещё более явный провал, который никак не упоминается в тексте.

13. Стр. 88. Были получены поперечные скорости движения облаков, но не хватает сравнения с ожидаемой скоростью, если эти облака движутся по околокруговым траекториям.

14. Стр. 91. В заключении к Главе 2 «Согласно полученным оценкам, угловой размер РСДБ-ядра масштабируется как  $\nu^{-k}$ , где  $k = 2.01 \pm 0.13$ . Значение  $k$  согласуется в пределах ошибок с  $k = 2.2$ , ожидаемым для канонической колмогоровской турбулентности». С другой стороны, в заключении к Главе 1 на стр. 41 интерпретация близкого результата отличается «Полученные с помощью многочастотного метода подгонки индексы рассеяния в пределах ошибок близки к предсказываемым теорией значениям, особенно к  $k_{\text{scat}} = 2.0$ . Однако однозначно отбросить распространенность колмогоровской турбулентности в МЗС тоже невозможно».

15. Стр. 95. Описание выборки: «Для дополнительной фильтрации данных измеренные плотности потока ( $S$ ) были усреднены в интервале времени шириной 0.2 года. Те измерения, отклонения которых от усредненной кривой превышали  $2\sigma_s$ , где  $\sigma_s$  – неопределенность измерения плотности потока  $S$ , были исключены из дальнейшего анализа.» Необходимо пояснение, почему это не подавит значительную часть кратковременной переменности, которую исследует автор.

16. Стр. 117, описание квазипериодических процессов: «Происхождение этих высокоамплитудных модуляций неизвестно и требует дальнейшего более детального исследования. Оно может быть связано как с процессами, происходящими внутри источника, так и с эффектами

рассеяния, что наиболее вероятно». Почему эти модуляции никак не проявились на других частотах кроме 4.7/4.8 ГГц?

17. Стр. 121-122 (и несколько других мест). «Структурные особенности, вызванные рассеянием, вытянуты в направлении, близком к линии равной галактической широты ( $RA = 40^\circ$ ), что может свидетельствовать в пользу плоской геометрии экрана и/или его орбитального движения параллельно плоскости Галактики.» Почему плоская геометрия экрана вызовет такую картину рассеяния? Непонятно и как может орбитальное движение повлиять на формирование изображения, которое зависит от геометрических и физических параметров линзы, но не от её движения.

18. Аналогично и на стр. 128: «Рассеивающие экраны, формирующие наблюдаемые события рассеяния на гигагерцовых кривых блеска квазара, могут быть связаны с плотными ионизованными радиофиламентами, ориентированными преимущественно перпендикулярно плоскости Галактики и, вероятно, связанными с пульсарами». Почему они будут на этих масштабах следовать нормали к плоскости Галактики и какие конкретно пульсары могут быть ответственны за возникновение этих неоднородностей?

19. Присутствуют опечатки: «незвисимой», «аналогичена», «предсказыват» и др.

20. Работе также не хватает списка использованных сокращений.

Перечисленные замечания не умаляют научной ценности выполненных диссертантом исследовательских работ.

### **Заключение ведущей организации по диссертации**

Диссертация Т.А. Корюковой представляет значительный вклад в исследование свойств межзвёздной среды и её влияния на РСДБ-наблюдения квазаров. Используя данные наблюдений большого количества РСДБ-наблюдения АЯГ, диссертант построил построена карту распределения рассеивающих экранов в Галактике и показал, что рассеивающие экраны

сосредоточены в галактической плоскости, но распределены в ней крайне неравномерно. Было показано, что на высоких широтах рассеяние практически отсутствует, что указывает на малую распространённость неоднородностей плазмы в гало Галактики и межгалактическом пространстве.

Был обнаружен и исследован редкий случай формирования вторичных изображений квазара 2005+403. Анализ диссертантом кривых блеска этого квазара, полученных на радиотелескопах OVRO и PATAH-600 привёл к обнаружению переменности на различных временных масштабах, в том числе и на очень малых. Было показано, что переменность на этих малых масштабах была вызвана влиянием экстремального рассеяния и были оценены физические параметры линзы, вызвавшей эффект.

Результаты диссертации опубликованы в 3 статьях в ведущем международном рецензируемом журнале и имеют на данный момент 27 цитирований, что указывает на научный и практический интерес в астрономическом сообществе.

Автореферат диссертации правильно и адекватно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Корюковой Татьяны Андреевны «Влияние эффектов распространения радиоволн в межзвездной среде Г алактики на наблюдаемые свойства струй активных ядер галактик» соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «1.3.1 – Физика космоса, астрономия».

Отзыв принят на заседании Координационного Совета по астрофизике Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ имени М.В. Ломоносова. На заседании присутствовало 24 члена Совета из

26. Результаты голосования: «за» – 24; «против» – 0; «воздержалось» – 0.  
Протокол № 5 от «25» февраля 2026 г.

Отзыв составил

зав. отделом радиоастрономии ГАИШ МГУ, доктор физико-математических наук, профессор РАН М.С. Пширков.

Председатель Координационного совета  
по астрофизике ГАИШ МГУ  
доктор физико-математических наук

А.С. Гусев

Директор ГАИШ МГУ  
доктор физико-математических наук,  
член-корреспондент РАН

К.А. Постнов

