

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

На правах рукописи

Войцик Пётр Андреевич

**Исследование центральных областей активных ядер
галактик с экстремальным угловым разрешением**

Специальность 01.03.02 —
«Астрофизика и звёздная астрономия»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2022

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник ФИАН
Ковалев Юрий Юрьевич

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

Зинченко Игорь Иванович,
доктор физико-математических наук, заведующий отделом радиоприемной аппаратуры и миллиметровой радиоастрономии, Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН (ИПФ РАН)

Ведущая организация: Крымская астрофизическая обсерватория РАН (КрАО РАН)

Защита состоится 7 апреля 2022 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.01 Физического института им. П. Н. Лебедева по адресу: г. Москва, улица Профсоюзная, дом 84/32, подъезд А2, Институт космических исследований РАН, зал семинаров — к. 707.

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

Автореферат разослан 28 января 2022 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Н. Н. Шахворостова

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Ядра некоторых галактик выделяют огромное количество энергии, которое иногда даже затмевает всё остальное излучение галактики. Их называют активными ядрами галактик (АЯГ) и считается, что их энерговыделение вызвано аккрецией вещества на сверхмассивную чёрную дыру [1]. Около 10 % АЯГ являются радиогромкими [2; 3], то есть они во много раз ярче в сантиметровом диапазоне длин волн, чем в видимом свете. Мощное радиоизлучение АЯГ обычно связано с релятивистскими струями — коллимированными потоками нетепловой плазмы, которые могут простираются далеко за пределы родительской галактики. Релятивистские струи в активных ядрах галактик привлекали внимание астрономов на протяжении последних ста лет с момента открытия этого явления в эллиптической галактике M87 [4]. Понимание процесса формирования релятивистских струй — одна из основных задач астрофизики высоких энергий. Более того, струи АЯГ переносят значительную часть энергии аккреции на чёрную дыру обратно в родительскую галактику и межгалактическое пространство, поэтому эти исследования также важны для понимания образования и космологической эволюции галактик.

Изучение релятивистских струй в активных ядрах галактик является сложной задачей по нескольким причинам. Во-первых, динамики струй чрезвычайно сложна. Поскольку струя состоит из релятивистских намагниченных истечений плазмы, запускаемых вблизи сверхмассивной чёрной дыры, и внутренних частей намагниченных аккреционных потоков, её генерация и распространение требуют полного рассмотрения уравнений релятивистской магнитогидродинамики, что стало возможным только в последние годы благодаря быстрому развитию численного моделирования [5; 6]. Кроме того, процессы ускорения частиц, диссипации энергии (например, ударные волны, магнитные пересоединения, турбулентность) и их расположение в струе до сих пор недостаточно изучены, что оставляет простор для множества моделей наблюдаемого широкополосного излучения [7–11]. Во-вторых, физические процессы в релятивистских струях, описанные выше, обычно связаны с очень компактными пространственными масштабами. Согласно современной теоретическим представлениям, струя изначально создаётся сильными магнитными полями, которые усиливаются вращающейся чёрной дырой и внутренней частью аккреционного диска [12; 13]. Изначально медленный поток с преобладанием магнитного поля, затем ускоряется с постепенным преобразованием магнитной энергии в кинетическую. Теория предполагает, что зона ускорения и коллимации формируется на расстоянии $10-10^5$ гравитационных радиусов от чёрной дыры [14]. Эти пространственные масштабы соответствуют угловым размерам милли или микросекунды дуги для близких ($z < 0.1$) АЯГ с массой сверхмассивной чёрной дыры $10^8-10^9 M_{\odot}$. Кроме того, быстрая переменность и вспышки в рентгеновском и гамма диапазонах часто свидетельствуют о том,

что область излучения высоких энергий имеет размер порядка парсеков или меньше. Такие крошечные масштабы трудно напрямую разрешить с помощью оптических, рентгеновских и гамма-инструментов.

Напрямую исследовать такие компактные области позволяет радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ). Метод РСДБ был предложен ещё в 1960-е годы советскими учёными Л. И. Матвеевко, Н. С. Кардашевым и Г. Б. Шоломицким [15] и продолжает активно развиваться вот уже более 50 лет. Ранние РСДБ наблюдения показали наличие структуры с морфологией ядра-выброс на масштабах парсеков в некоторых ярких внегалактических радиоисточниках [16; 17]. Тогда же в этих объектах было открыто видимое сверхсветовое движение деталей [18; 19], которое теперь наблюдается на регулярной основе в нескольких сотнях релятивистских струй. В 1994 году в Национальной радиоастрономической обсерватории США была введена в эксплуатацию первая антенная решётка, созданная специально для РСДБ наблюдений — антенная решётка со сверхдлинными базами (*англ.* Very Long Baseline Array, VLBA), что значительно расширило возможности изучение АЯГ с высоким угловым разрешением. Релятивистские струи активно изучаются и на других РСДБ системах, таких как Европейская РСДБ сеть (*англ.* European VLBI Network, EVN), решётка с длинными базами (*англ.* Long Baseline Array, LBA) в Австралии и восточноазиатская РСДБ сеть (*англ.* East Asian VLBI Network, EAVN). Дальнейшее увеличение углового разрешения в сантиметровом диапазоне длин волн стало возможно благодаря выводу одного из радиотелескопов на орбиту Земли. Первым долгосрочным проектом космического РСДБ стала миссия VSOP (*англ.* Space Observatory Programme) [20], в рамках которой был проведён обзор АЯГ на частоте 5 ГГц [21; 22]. Однако кардинально улучшить угловое разрешение позволил интерферометр «Радиоастрон», космическим элементом которого служит радиотелескоп на высокоэллиптической орбите с апогеем более 350 000 км [23]. Именно по наблюдениям «Радиоастроны» было достигнуто рекордное угловое разрешение для всей астрономии 8 мсек дуги на частоте 22 ГГц [24].

Несмотря на достижения последних десятилетий ряд аспектов физики релятивистских струй активных ядер галактик остаётся не до конца изученным, а наблюдательные результаты требуют интерпретации. Одним из актуальных остаётся вопрос о механизме излучения струй на разных длинах волн. То что излучение внегалактических источников имеет синхротронную природу стало понятно очень давно [25; 26]. Однако состав плазмы струйных выбросов и условия генерации излучения всё ещё обсуждаются. Более консервативные модели предполагают некогерентное излучение релятивистских электронов. В этих моделях предсказывается ограничение на яркостную температуру из-за обратного Комптоновского охлаждения электронов на уровне $10^{11.5}$ К [27; 28] в системе отсчёта излучающей плазмы. При этом наблюдения межзвёздных мерцаний во многих источниках [29], а также быстрой переменности в диапазоне ТЭВ

некоторых квазаров [30] может косвенно свидетельствовать о яркостной температуре значительно превышающей комптоновский предел. Для объяснения высоких яркостей привлекаются модели когерентного излучения или излучения релятивистских протонов [31–33]. В пользу последней говорит недавнее обнаружение связи высокоэнергичных нейтрино с блазарами [34]. Результаты измерений яркостной температуры активных ядер на наземных интерферометрах не противоречат модели синхротронного излучения электронов, если учитывать релятивистское усиление [35]. Однако базы наземных решёток ограничены размерами Земли, что не позволяет измерять сверхвысокие яркостные температуры. Чтобы напрямую измерить размеры и яркости самых компактных излучающих областей релятивистских струй и таким образом уточнить механизм излучения, требуется наземно-космический интерферометр [36], такой как «Радиоастрон» [23].

Наблюдаемую яркостную температуру релятивистских струй нельзя интерпретировать без учёта упомянутого выше релятивистского усиления излучения, которое возникает при движении плазмы со скоростью близко к скорости света в сторону наблюдателя. Это релятивистское усиление (Допплер-фактор) зависит от скорости плазмы (Лоренц-фактора) и угла между направлением движения и лучом зрения [37]. Эти параметры можно определить только по регулярным многолетним наблюдениям видимого сверхсветового движения деталей в большой выборке релятивистских струй [38; 39]. Такие программы мониторинга кинематики струй также позволяют изучать ускорение плазмы на парсековых масштабах, механизмы которого до конца не ясны [40].

Ещё одно наблюдательное свойство релятивистских струй связано с синхротронным самопоглощением. Дело в том, что яркая и компактная деталь у основания струи на РСДБ картах, которую часто называют РСДБ-ядром или радио-ядром, является фотосферой, то есть областью с оптической толщиной $\tau \approx 1$. Поскольку оптическая толщина синхротронного излучения зависит от частоты, абсолютное положение РСДБ-ядра также будет меняться с частотой наблюдения. Это явление, видимый сдвиг ядра с частотой, было предсказано теоретически [41; 42], а затем обнаружено по результатам многочастотных наблюдений [43]. Эффект сдвига ядра позволяет оценивать параметры релятивистских струй, такие как величина магнитного поля и расстояние видимого ядра от центральной машины [44; 45]. Недавние исследования показывают, что величина частотного сдвига переменна во времени для большинства струй [46]. Помимо астрофизических приложений, частотный сдвиг ядра может влиять и на высокоточные астрометрические и геодезические измерения, поскольку компактные внегалактические радиоисточники используются для построения современных инерциальных систем отсчёта [47–49]. Учёт переменности структуры источников с частотой и во времени особенно важен для геодезических систем нового поколения, таких как VGOS (VLBI Global Observing System) [50].

Цель работы

Целью данной диссертационной работы является исследование физических свойств и механизма излучения релятивистских струй в активных ядрах галактик на парсековых масштабах методами радиоинтерферометрии с сверхдлинными базами. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- исследование физических условий и свойств синхротронного самопоглощения в релятивистских струях АЯГ с помощью многочастотных РСДБ наблюдений;
- измерение типичных размеров и яркостных температур большой выборки активных ядер галактик с использованием наземно-космического интерферометра «Радиоастрон» для проверки существующих моделей излучения релятивистских струй;
- оценка типичных значений доплеровского усиления излучения АЯГ по многолетним наблюдениям движения деталей в релятивистских струях.

Научная новизна

Все полученные результаты являются новыми. Отметим следующее.

Впервые проведены измерения эффекта частотного сдвига РСДБ ядра сразу для нескольких компактных внегалактических радиоисточников из каталога опорных объектов международной системы астрономических координат методом относительной астрометрии. Предложен метод измерения сдвига ядра относительно группы близких фазовых калибраторов с учётом того, что калибраторы подвержены данному эффекту в той же мере, как и исследуемый объект.

Впервые получены результаты массовых наблюдений активных ядер галактик на радиоинтерферометре с проекцией базы много больше диаметра Земли. Более 150 внегалактических источников было успешно протектировано на наземно-космических базах. Показано, что многие активные ядра галактик имеют значительно более компактное и яркое РСДБ ядро, чем было известно ранее по наблюдениям на наземных и наземно-космических интерферометрах.

Научная и практическая значимость

Полученные в работе результаты наблюдений активных ядер галактик могут быть использованы для дальнейших теоретических и экспериментальных исследованиях в области внегалактической астрофизики.

Измерение величины видимого сдвига РСДБ ядра с частотой в ультракомпактных опорных радиоисточниках полезны не только для определения астрофизических свойств этих объектов, но и для уточнения инерциальных систем отсчёта, построенных на разных частотах в радиодиапазоне, а также

при сличении систем отсчёта, построенных по радио (РСДБ) [47–49] и оптическим (космический проект GAIA) [51] наблюдениям. Разработанный метод измерения частотного сдвига ядра по наблюдениям близких радиоисточников, связанных одним фазовым решением, может применяться в будущих подобных экспериментах.

Видимая яркостная температура многих объектов, наблюдавшихся в обзоре АЯГ проекта «Радиоастрон», превосходит Комптоновский предел $10^{11.5}$ К [28] даже с учётом релятивистского усиления излучения $\delta \approx 5–10$. Это накладывает существенные ограничения на модели излучения и ускорения релятивистских струй на парсековых масштабах.

По результатам обработки обзора АЯГ в проекте «Радиоастрон» оценена точность восстановления орбиты космического радиотелескопа (КРТ) [52]. Так в начале работы проекта среднеквадратичное отклонение (СКО) остаточной неучтенной скорости КРТ составляло величину 3.3 см/с. После применения улучшенного алгоритма восстановления орбиты было показано, что СКО остаточной скорости уменьшилось до 0.7 см/с. Аналогичный подход может быть использован в будущих миссиях наземно-космических интерферометров.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов основана на использовании телескопов международного уровня, применении надёжных алгоритмов обработки и анализа данных, а также проверке выводов современными статистическими методами.

В частности, для подтверждения значимости результатов обзора активных ядер галактик в проекте «Радиоастрон» оценивалась вероятность ложного детектирования для каждого интерферометрического измерения. Кроме того, часть интерферометрических данных обзора была обработана в программном корреляторе DiFX [53; 54] в дополнение к основному коррелятору, разработанному в Астрокосмическом центре ФИАН [55], чтобы убедиться, что результаты совпадают.

Достоверность представленных результатов также подтверждается апробацией на российских и зарубежных международных конференциях и семинарах.

Апробация результатов

Основные результаты диссертации докладывались на научных семинарах и отчётных сессиях Астрокосмического центра ФИАН, а также на российских и международных научных конференциях:

1. 11th European VLBI Network Symposium, 2012, 9–12 октября, Бордо, Франция.
2. The Innermost Regions of Relativistic Jets and Their Magnetic Fields, 2013, 10–14 июня, Гранада, Испания.

3. Всероссийская астрономическая конференция (ВАК-2013) «Многоликая Вселенная», 2013, 23–27 сентября, Санкт-Петербург, Россия.
4. 43rd Young European Radio Astronomers Conference, 2013, 30 сентября – 4 октября, Билефельд, Германия.
5. 12th European VLBI Network Symposium and Users Meeting, 2014, 7–10 октября, Кальяри, Италия.
6. Dissecting the Universe — Workshop on Results from High-Resolution VLBI, 2015, 30 ноября – 2 декабря, Бонн, Германия.
7. 13th European VLBI Network Symposium and Users Meeting, 2016, 20–23 сентября, Санкт-Петербург, Россия.
8. 46th Young European Radioastronomers Conference, 2016, 5–9 сентября, Бонн, Германия, Россия.
9. Всероссийская астрономическая конференция (ВАК-2017) «Астрономия: познание без границ», 2017, 17–22 сентября, Ялта, Крым.
10. 14th European VLBI Network Symposium and Users Meeting, 2018, 8–11 октября, Гранада, Испания.
11. 6th International Scientific Conference “Baltic Applied Astroinformatics and Space data Processing”, 2019, 21–23 августа, Вентспилс, Латвия.
12. Всероссийская астрономическая конференция (ВАК-2021) «Астрономия в эпоху многоканальных исследований», 2021, 23–28 августа, Москва, Россия.

Публикации автора по теме диссертации

Основные результаты диссертационной работы изложены в 6 научных статьях [A1–A6], опубликованных в рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК.

- A1. *Войцик П. А., Пушкарев А. Б., Ковалев Ю. Ю., Плавин А. В., Лобанов А. П., Ипатов А. В.* Сдвиг положения ядра с частотой в ультракомпактных квазарах // *Астрономический журнал*. — 2018. — Т. 95, № 11. — С. 832–858.
- A2. *Kovalev Y. Y., Kardashev N. S., Kellermann K. I., Lobanov A. P., Johnson M. D., Gurvits L. I., Voitsik P. A., Zensus J. A., Anderson J. M., Bach U., Jauncey D. L., Ghigo F., Ghosh T., Kraus A., Kovalev Y. A., Lisakov M. M., Petrov L. Y., Romney J. D., Salter C. J., Sokolovsky K. V.* RadioAstron Observations of the Quasar 3C273: A Challenge to the Brightness Temperature Limit // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2016. — Vol. 820, no. 1. — P. L9.

- A3. *Pilipenko S. V., Kovalev Y. Y., Andrianov A. S., Bach U., Buttaccio S., Casaro P., Cimò G., Edwards P. G., Gawroński M. P., Gurvits L. I., Hovatta T., Jauncey D. L., Johnson M. D., Kovalev Y. A., Kutkin A. M., Lisakov M. M., Melnikov A. E., Orlati A., Rudnitskiy A. G., Sokolovsky K. V., Stanghellini C., de Vicente P., Voitsik P. A., Wolak P., Zhekanis G. V.* The high brightness temperature of B0529+483 revealed by RadioAstron and implications for interstellar scattering // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2018. — Vol. 474, no. 3. — P. 3523–3534.
- A4. *Kutkin A. M., Pashchenko I. N., Lisakov M. M., Voytsik P. A., Sokolovsky K. V., Kovalev Y. Y., Lobanov A. P., Ipatov A. V., Aller M. F., Aller H. D., Lahteenmaki A., Tornikoski M., Gurvits L. I.* The extreme blazar AO 0235+164 as seen by extensive ground and space radio observations // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2018. — Vol. 475. — P. 4994–5009.
- A5. *Kovalev Y. Y., Kardashev N. S., Sokolovsky K. V., Voitsik P. A., An T., Anderson J. M., Andrianov A. S., Avdeev V. Y., Bartel N., Bignall H. E., Burgin M. S., Edwards P. G., Ellingsen S. P., Frey S., García-Miró C., Gawroński M. P., Ghigo F. D., Ghosh T., Giovannini G., Girin I. A., Giroletti M., Gurvits L. I., Jauncey D. L., Horiuchi S., Ivanov D. V., Kharinonov M. A., Koay J. Y., Kostenko V. I., Kovalenko A. V., Kovalev Y. A., Kravchenko E. V., Kunert-Bajraszewska M., Kutkin A. M., Likhachev S. F., Lisakov M. M., Litovchenko I. D., McCallum J. N., Melis A., Melnikov A. E., Migoni C., Nair D. G., Pashchenko I. N., Phillips C. J., Polatidis A., Pushkarev A. B., Quick J. F. H., Rakhimov I. A., Reynolds C., Rizzo J. R., Rudnitskiy A. G., Savolainen T., Shakhvorostova N. N., Shatskaya M. V., Shen Z.-Q., Shchurov M. A., Vermeulen R. C., de Vicente P., Wolak P., Zensus J. A., Zuga V. A.* Detection statistics of the RadioAstron AGN survey // *Advances in Space Research*. — 2020. — Vol. 65, no. 2. — P. 705–711.
- A6. *Piner B. G., Pushkarev A. B., Kovalev Y. Y., Marvin C. J., Arenson J. G., Charlot P., Fey A. L., Collioud A., Voitsik P. A.* Relativistic Jets in the Radio Reference Frame Image Database. II. Blazar Jet Accelerations from the First 10 Years of Data (1994–2003) // *The Astrophysical Journal*. — 2012. — Vol. 758, no. 2. — P. 84.

Личный вклад

Во всех основных результатах, выносимых на защиту, личный вклад автора является основным или равным вкладу соавторов. А именно:

В работе [A1] вклад диссертанта определяющий в обработку и анализ данных, основной в обсуждение результатов и подготовку текста статьи.

В работах [A2–A5] вклад диссертанта основной в посткорреляционную обработку данных обзора АЯГ в проекте «Радиоастрон» и оценку угловых размеров и яркостных температур ядер квазаров, равный с остальными соавторами в анализ и обсуждение результатов, подготовку публикаций.

В работе [A6] вклад диссертанта равен вкладу остальных соавторов в подгонку моделей компонентов струй в калиброванные данные комплексной функции видности, измерение кинематики релятивистских струй и анализ результатов.

Основные результаты, выносимые на защиту

В данной диссертационной работе представлены результаты исследования физических свойств, механизма излучения и кинематики релятивистских струй в активных ядрах галактик на парсековых масштабах.

1. Разработан метод измерения видимого сдвига ядер квазаров с частотой по наблюдениям близких источников, связанных одним фазовым решением методом относительной РСДБ-астрометрии. Метод был применён к РСДБ наблюдениям 8 триплетов компактных внегалактических радиоисточников, в результате чего были получены оценки сдвига ядра с частотой для 24 объектов. У 9 из них измеренный эффект значим. Для этих источников медианное значение сдвига РСДБ-ядра на частоте наблюдения 1.7, 2.3 и 5.0 ГГц относительно самой высокой частоты 8.4 ГГц составило величину 1.79, 1.22 и 0.18 мсек дуги, соответственно.
2. По результатам обработки обзора активных ядер галактик в проекте «Радиоастрон» получен значимый интерферометрический сигнал от 2/3 объектов полной выборки 163 радиоисточников на проекциях наземно-космических баз до 345 000 км на частотах наблюдения 1.7, 4.8 и 22.2 ГГц. Яркостная температура многих протектированных в обзоре источников значительно превышает предел на Комптоновскую катастрофу. Для большинства из них не выполняется предположение о равномерном распределении плотности энергии частиц и магнитного поля.
3. По результатам программы мониторинга АЯГ на системе апертурного синтеза VLBA на частоте 8 ГГц измерены видимые скорости движения деталей в 66 релятивистских струях. Распределение скоростей самых быстрых деталей в каждом источнике показывает максимум $44c$ и медианное значение $8.3c$. Полученные видимые скорости соответствуют типичному доплеровскому усилению $\delta \approx 5-10$, что не достаточно для объяснения высокой яркостной температуры ядер квазаров, полученной по результатам обзора АЯГ в проекте «Радиоастрон».

Объём и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 123 страницы, включая 25 рисунков и 11 таблиц. Список литературы содержит 150 наименований.

Содержание работы

Во **введении** кратко приводятся современные представления о природе релятивистских струй в активных ядрах галактик, обосновывается актуальность исследований компактных внегалактических радиоисточников, формулируется цель и задачи работы, даётся общая характеристика диссертации.

Первая глава посвящена исследованию видимого сдвига РСДБ-ядра с частотой в сверхкомпактных внегалактических радиоисточниках. Предполагается, что наблюдаемая яркая область у основания релятивистской струи (РСДБ-ядро) на картах активных галактических ядер в сантиметровом диапазоне — это фотосфера, то есть область, где выброс становится прозрачным для собственного синхротронного излучения на частоте наблюдения [41]. При этом положение РСДБ-ядра зависит от частоты наблюдения как $r_{\text{core}} \sim \nu^{-1/k_r}$ из-за градиента напряжённости магнитного поля и концентрации частиц вдоль постепенно расширяющегося релятивистского выброса. Измерения смещения положения ядра с частотой позволяют в рамках модели установить величину и радиальное распределение напряжённости магнитного поля и концентрации излучающих частиц в релятивистской струе [44]. Эффект сдвига ядра важно учитывать и при высокоточных астрометрических и геодезических исследованиях [50; 56; 57], а так же при сопоставлении радио и оптической систем координат [56; 58; 59].

В данной главе представлены результаты обработки РСДБ наблюдений 8 компактных радиоисточников из Международного набора реперов системы астрономических координат (*англ.* International Celestial Reference Frame, ICRF) [47–49] на Европейской РСДБ сети при участии Российских телескопов системы «Квazar-КВО» на четырёх частотах: 1.7, 2.3, 5.0 и 8.4 ГГц. Каждый такой объект наблюдался вместе с двумя близкими источниками, которые использовались в качестве фазовых калибраторов.

Частотный сдвиг положения ядра часто измеряется путём совмещения оптически тонких деталей структуры источника на разных частотах и учётом разности положения ядра по отношению к ним (например, [46; 56]). Однако этот метод не применим для высоко-компактных объектов из каталога ICRF, поскольку у них практически отсутствует оптически тонкая структура. В этом случае обнаружить и измерить эффект позволяет относительная астрометрия.

Измерение частотного сдвига ядра методом относительной астрометрии усложнят тот факт, что этому эффекту подвержены в равной степени как исследуемый объект, так и калибратор, и напрямую для пары источников можно измерить только вектор относительно сдвига. Предыдущие измерения показывают, что сдвиг РСДБ ядра с частотой обычно происходит вдоль направления релятивистской струи источника [45]. Используя это предположение, было разработано два метода для измерения сдвига ядра независимо для каждого объекта в группе близких источников, связанных одним фазовым решением.

Первый метод применим для пары источников и заключается в том, что разностный вектор сдвига можно однозначно разложить на направления релятивистских струй $\mathbf{CS}_{\text{rel}} = \Delta r_{\text{core},1} \mathbf{d}_1 - \Delta r_{\text{core},2} \mathbf{d}_2$, где \mathbf{d}_1 и \mathbf{d}_2 — это единичные векторы направления выброса первого и второго источника, соответственно. Величины $\Delta r_{\text{core},1}$ и $\Delta r_{\text{core},2}$ представляют собой искомый сдвиг ядра для двух источников. Ошибка измеренных таким методом величин существенно зависит от угла между направлениями струй и минимальна, когда релятивистские струи источников ортогональны.

Второй метод может применяться для любого количества проекционно близких источников. Для расчёта использовалась система векторных уравнений:

$$\mathbf{X}_{\text{core},i}^j = ((\mathbf{S}_{\text{apex}} - \mathbf{S}_{\text{ph.c.}})_i + \Delta r_{\text{core},i}^j \mathbf{d}_i) - (\mathbf{S}_{\text{center}} - \mathbf{S}_{\text{ph.c.}})^j,$$

где индекс $i \in \{1, 2, 3\}$ — номер источника в группе, $j \in \{L, S, C, X\}$ — частотный диапазон наблюдения, $\mathbf{X}_{\text{core},i}$ — относительные координаты ядра на карте, \mathbf{S}_{apex} — истинное положение начала струи, $\mathbf{S}_{\text{ph.c.}}$ — координаты фазового центра, $\mathbf{S}_{\text{center}}$ — координаты центра карты, \mathbf{d} — единичный вектор направления струи, Δr_{core} — искомый сдвиг ядра. Имея измеренные значения векторов $\mathbf{X}_{\text{core},i}^j$ и априорную оценку \mathbf{d}_i , было получено апостериорное распределение плотности вероятности векторов $(\mathbf{S}_{\text{apex}} - \mathbf{S}_{\text{ph.c.}})_i$ и $(\mathbf{S}_{\text{center}} - \mathbf{S}_{\text{ph.c.}})^j$, а также искомой величины $\Delta r_{\text{core},i}^j$.

Используя разработанные методы, были измерены смещения РСДБ ядер с частотой для всех 24 наблюдаемых источников. Для многих объектов выборки оценённые ошибки оказались выше измеряемого эффекта. В тоже время, у внегалактических источников 0133+476, 0202+319, 0217+324, 0235+164, 0440–003, 0446+112, 0446+113, 0447–010 и 2149+056 измеренный сдвиг ядра хорошо согласуется с зависимостью $\sim \nu^{-1}$. Для этих источников медианные значения сдвига ядра, полученные вторым методом, составили величину 1.79, 1.22 и 0.18 мсек дуги для частот наблюдения 1.7, 2.3 и 5.0 ГГц, соответственно, относительно самой высокой частоты 8.4 ГГц. Измерения в парах источников первым методом дают заметно бóльшую ошибку, но в большинстве случаев согласуются с результатами, полученными вторым методом по триплетам в целом.

Для источников с достаточно протяжённой структурой сдвиг ядра был также измерен методом выравнивания изображений относительно оптически тонких деталей [46] независимо для всех пар частот. Этим методом удалось успешно измерить сдвиг ядра у 12 объектов для более, чем одной пары частот, что дало возможность изучить его зависимость от частоты. При хорошем заполнении плоскости пространственных частот, то есть для источников с высоким склонением, для трёх из пяти объектов результаты методов относительной астрометрии и привязки к оптически тонкой структуре достаточно близки и показывают аналогичную зависимость от частоты.

По результатам измерений частотного сдвига ядра были оценены некоторые геометрические и физические параметры релятивистских струй. Оказалось, что типичное расстояние от истинного начала струи до 8.4 ГГц-ядра составляет величину 0.3 мсек дуги или 2 пк в проекции на небо. Истинное расстояние от начала струи до 8 ГГц-ядра составляет величину около 20 пк. В предположении равномерного распределения энергии магнитного поля и частиц была получена оценка напряжённости магнитного поля на расстоянии 1 пк от истинного начала струи. Среднее значение составило величину около 1 Гс.

Вторая глава посвящена обзору активных ядер галактик на наземно-космическом интерферометре «Радиоастрон». Для характеристики наблюдаемого нетеплового излучения релятивистских струй активных ядер галактик удобно использовать яркостную температуру (T_b), поскольку эта величина отражает физические свойства излучающей плазмы. Теория предсказывает, что для синхротронного излучения электронов существует предел на яркостную температуру $10^{11.5}$ К [28; 60], который определяется охлаждением релятивистских электронов за счёт обратного Комптоновского рассеяния. В случае равномерного распределения плотности энергии магнитного поля и частиц в плазме ограничение на порядок ниже, $10^{10.5}$ К [28]. При этом релятивистское усиление излучения может увеличить наблюдаемую яркостную температуру при движении излучающего вещества в сторону наблюдателя в Допплер-фактор раз. По РСДБ наблюдениям сверхсветового движения деталей в релятивистских струях типичное доплеровское усиление оценивается на уровне $\delta \approx 10$ [61–63] (см. также главу 3).

Предельная яркостная температура, которая может быть измерена на интерферометре, зависит от физической длины проекции базы [36]. Так для интерферометра, ограниченного размерами Земли, предельная измеряемая яркостная температура равна примерно $10^{12.5}$ К для типичного значения плотности потока 1 Ян. Для прямого измерения более высоких яркостных температур требуется интерферометр с базами больше диаметра Земли, то есть один из телескопов которого находится на орбите.

Наземно-космический интерферометр «Радиоастрон» включает в себя 10-м космический радиотелескоп (КРТ), который находится на высокоэллиптической орбите с апогеем до 370 000 км [23], а также сеть телескопов на Земле. «Радиоастрон» позволяет напрямую измерять яркостные температуры до 10^{15} – 10^{16} К, что даёт возможность проверить существующие модели излучения плазмы в релятивистских струях АЯГ.

Обзор активных ядер галактик является одной из ключевых научных программ проекта «Радиоастрон». Задача обзора — измерить и исследовать яркостную температуру центральных областей активных ядер галактик с целью лучше понять физику их излучения. Объекты, которые наблюдались в обзоре АЯГ, включают полную выборку из 163 внегалактических радиисточников с коррелированной плотностью потока больше 600 мЯн на 8 ГГц по наземным РСДБ измерениям. Обзор проводился с мая 2012 по июнь 2016 года на трёх

частотах: 22.2 ГГц, 4.8 ГГц и 1.7 ГГц. Один сеанс наблюдений обычно длился 40–60 минут и был разбит на сканы длительностью от 10 до 20 минут. Чтобы повысить результативность наблюдений КРТ проводил наблюдения в режиме одной поляризации в двух частотных диапазонах одновременно. Наземные телескопы при этом обычно наблюдали в двух поляризациях на одной из частот. Количество наземных телескопов, участвовавших в одном наблюдательном сеансе, варьировалось от 2 до 5 на частотный диапазон. Расписание наблюдений составлялось так, чтобы по возможности каждый источник наблюдался несколько раз на разных длинах и позиционных углах проекции наземно-космических баз интерферометра.

Корреляционная обработка данных обзора АЯГ проводилась на программном корреляторе в Астрокосмическом центре ФИАН [55]. Проскорреляционный анализ проводился с помощью программного пакета PIMA [64]. Для наблюдений, в которых был получен значимый интерференционный сигнал, обработка включала следующие этапы: а) фазовая калибровка (подгонка интерференционных лепестков); б) калибровка комплексной полосы пропускания; в) амплитудная калибровка с использованием системных температур и коэффициентов усиления, измеренных на телескопах. Непосредственным результатом обработки является коррелированная плотность потока в Янских на той или иной проекции базы.

По результатам поскорреляционной обработки обзора АЯГ получена статистика детектирования источников в зависимости от проекции наземно-космической базы на трёх частотах наблюдений. Чтобы определить значимость интерференционного отклика, для каждого измерения оценивалась вероятность ложного детектирования (*англ.* Probability of False Detection, PFD). Для этого строилось распределение значений соотношения сигнал/шум (*англ.* Signal-to-Noise Ratio, SNR) полученных интерференционных лепестков в левую часть которого вписывалось теоретическое распределение SNR для случая отсутствия сигнала [64]. По полученным параметрам распределения вычислялось значение PFD для любого значения SNR. Сигнал считался значимым если вероятность ложного детектирования для него меньше 10^{-4} .

Всего было протектировано на наземно-космических базах около двух третей источников из полной выборки 163 АЯГ, что свидетельствует о наличии во многих релятивистских струях очень компактных областей яркого синхротронного излучения. Активные ядра галактик, которые были протектированы на максимальных проекциях баз 25 диаметров Земли или больше, это 0048–019, 0106+013, 0119+115, 0235+164, 0716+714, 1253–055 на частоте 1.7 ГГц и 0235+164, 1124–186 на 4.8 ГГц. На самой высокой частоте 22.2 ГГц на проекциях баз около 15 диаметров Земли или 14 Гл и более сигнал получен от источников 0235+164, 0716+714 и 0851+202. Многие релятивистские струи АЯГ, протектированные в обзоре, имеют яркостную температуру, значительно превышающую предел Комптоновской катастрофы, на расстоянии парсеков

от центральной машины. Для большинства из них яркостная температура намного превышает значение температуры при равномерном распределении плотности энергии магнитного поля и частиц.

Для ряда источников, наблюдавшихся в обзоре АЯГ проекта «Радиоастрон», была оценена величина яркостной температуры ядра, а также её нижний предел, в каждом наблюдательном сеансе. Яркостная температура оценивалась в предположении, что компактная излучающая область имеет гауссово распределение яркости. Полная плотность потока ядра оценивалась либо по коррелированной плотности потока на малых наземных базах, либо из моделирования структуры источника по измерениям на наземных РСДБ сетях. Нижний предел на яркостную температуру оценивался методом, предложенным в работе [65], когда оценка не зависит от полного потока излучающей детали. Ниже приведены результаты для этих источников.

Квazar 3С 273 неоднократно наблюдался в обзоре АЯГ и был протектирован на проекциях наземно-космических баз до 13 диаметров Земли. В 5 наблюдательных сеансах, которых проводились в 2012–2013 годах, получены оценки яркостной температуры ядра $T_b \gtrsim 10^{13}$ К во всех трёх частотных диапазонах. Результаты оценки нижних пределов T_b показывают, что яркостная температура излучения ядра 3С 273, протектированного на наземно-космических базах, не может быть меньше 5×10^{12} К.

Квazar В0529+483 наблюдался в 29 сессиях обзора АЯГ, значимый интерферометрический отклик был получен на проекциях базы до 19 диаметров Земли. Получены следующие оценки нижних пределов яркостной температуры: 5×10^{12} К на частоте 1.7 ГГц, 1.2×10^{13} К на 4.8 ГГц и 5×10^{12} К на 22 ГГц. Оценки яркостной температуры с использованием измерений на наземных базах в качестве полного потока компактной детали дают следующие величины: 3×10^{13} К на частоте 1.7 ГГц и 5×10^{13} К на 4.8 ГГц.

Блазар 0235+164 — один из самых компактных объектов, наблюдавшихся в обзоре АЯГ. Значимый интерференционный отклик от этого источника был получен в 11 сеансах наблюдений. Он протектирован во всех диапазонах частот на проекциях наземно-космических баз до 26 диаметров Земли. Самая высокая оценка яркостной температуры 9×10^{13} К получена в наблюдениях 29 декабря 2015 г. на частоте 4.8 ГГц при проекции базы интерферометра 25.5 диаметров Земли. Максимальное угловое разрешение достигнуто на частоте 22 ГГц в наблюдениях 15 декабря 2012 г. при проекции базы 14 Гл, что дало оценку размера излучающей области около 13 мксек дуги. Примерно в половине наблюдений 0235+164 нижний предел на яркостную температуру превышает 10^{13} К.

Третья глава посвящена изучению кинематики релятивистских струй по данным многолетнего РСДБ мониторинга активных ядер галактик на 8 ГГц. Видимое сверхсветовое движение деталей наблюдается во многих релятивистских струях внегалактических радиоисточников. Оно связано с движением излучающей плазмы под малым углом к лучу зрения со скоростью близкой к

скорости света. Измерения движения деталей в релятивистских струях помогают понять физические свойства плазмы, механизмы её ускорения, а также оценить релятивистское усиление излучения (Допплер-фактор). Кинематика релятивистских струй исследуется несколькими группами, в том числе обзор MOJAVE на 15 ГГц [39; 40] и Бостонский мониторинг блазаров на 43 ГГц [38]. В данной работе приводятся результаты мониторинга, который проводился на VLBA на частоте 8 ГГц. Наблюдения на низкой частоте более чувствительны к протяжённой структуре струи, что даёт возможность проследить движение деталей дальше от ядра и в течение более длительного времени.

Выборка источников была основана на выборке астрометрических и геодезических РСДБ экспериментов RDV (*англ.* Research & Development — VLBA), которые проводятся на системе VLBA с добавлением нескольких геодезических РСДБ антенн. Наблюдения RDV проводятся на двух частотах, 2 и 8 ГГц, однако для получения результатов кинематики струй использовались только 8 ГГц данные. Были использованы результаты 50 экспериментов, которые проводились с середины 1994 по конец 2003 года. Всего для анализа кинематики было выбрано 66 радиоисточников, причём каждый источник наблюдался в среднем 43 раза.

Структура каждого источника в каждую эпоху наблюдения была промоделирована набором двумерных гауссовых компонентов круглой или эллиптической формы. Подгонка моделей проводилась программе Caltech *Difmap* [66] в области пространственных частот. Затем компоненты струи отождествлялись между эпохами наблюдений, чтобы проследить изменение положения компонентов со временем.

Получено распределение видимых скоростей для 224 компонентов релятивистских струй 65 источников с известным красным смещением. Средняя видимая скорость компонента составило величину $7.2c$, а медианное значение $4.5c$. Из 218 компонентов у которых измерен вектор направления движения 185 движутся от ядра, а 33 к ядру, причём только у 10 движений внутрь значимое. Скорее всего, движение компонентов к ядру связано с геометрическими эффектами и не является свидетельством движения вещества релятивистской струи в сторону центральной машины. В 19 источниках обнаружен 21 стационарный компонент, то есть компонент у которого малы как измеренная скорость (меньше 50 мсек дуги/год), так и измеренное ускорение. Более половины стационарных компонентов сгруппированы на расстоянии около 4 пк в проекции от ядра. Такие визуально стационарные детали могут быть вызваны проекционными эффектами, если струя направлена практически вдоль луча зрения, либо они могут быть внутренне стационарными деталями, такими как устойчивые реколламинационные ударные волны.

Для источников, где измерена значимая видимая скорость двух и более деталей струи, показано, что более далёкие от ядра компоненты имеют в среднем более высокую скорость, чем близкие к ядру. Это говорит о том, что

бóльшая часть компонентов имеет положительное радиальное ускорение на парсековых масштабах.

Разброс видимых скоростей разных компонентов струи каждого источника оказался значительно меньше, что разброс скоростей между источниками. Так типичный разброс скоростей компонентов для источника составил величину $3.1c$, в то время как разброс средних видимых скоростей от источника к источнику равен $7.6c$. Эти результаты показывают, что существует характерная физическая скорость, связанная с каждым источником в выборке, которая, по всей видимости, является скоростью релятивистского истечения.

Проанализировано распределение видимых скоростей самых быстрых деталей каждого источника. Это распределение имеет пик на значении видимой скорости около $5c$ и длинный хвост, простирающийся до максимального значения $44c$. Средняя видимая скорость самых быстрых деталей $11.5c$, а медианное значение $8.3c$. По результатам Монте-Карло моделирования выборки релятивистских струй блазаров в работе [39], где было получено аналогичное распределение максимальных видимых скоростей, получено распределение значений Допплер-фактора, которое имеет пик при $\delta \simeq 10$ и быстро спадает после $\delta \simeq 30$.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы, выносимые на защиту.

Список литературы

1. *Rees M. J.* Black Hole Models for Active Galactic Nuclei // *ARA&A.* — 1984. — Vol. 22. — P. 471–506.
2. *Ivezić Ž., Menou K., Knapp G. R., [et al.]*. Optical and Radio Properties of Extragalactic Sources Observed by the FIRST Survey and the Sloan Digital Sky Survey // *AJ.* — 2002. — Vol. 124, no. 5. — P. 2364–2400.
3. *Kellermann K. I., Condon J. J., Kimball A. E., [et al.]*. Radio-loud and Radio-quiet QSOs // *ApJ.* — 2016. — Vol. 831, no. 2. — P. 168.
4. *Curtis H. D.* Descriptions of 762 Nebulae and Clusters Photographed with the Crossley Reflector // *Publications of Lick Observatory.* — 1918. — Vol. 13. — P. 9–42.
5. *McKinney J. C.* General relativistic magnetohydrodynamic simulations of the jet formation and large-scale propagation from black hole accretion systems // *MNRAS.* — 2006. — Vol. 368, issue 4. — P. 1561–1582.
6. *Tchekhovskoy A., Narayan R., McKinney J. C.* Efficient generation of jets from magnetically arrested accretion on a rapidly spinning black hole // *MNRAS.* — 2011. — Vol. 418, no. 1. — P. L79–L83.

7. *Marscher A. P., Gear W. K.* Models for high-frequency radio outbursts in extragalactic sources, with application to the early 1983 millimeter-to-infrared flare of 3C 273. // *ApJ*. — 1985. — Vol. 298. — P. 114–127.
8. *Sikora M., Begelman M. C., Rees M. J.* Comptonization of Diffuse Ambient Radiation by a Relativistic Jet: The Source of Gamma Rays from Blazars? // *ApJ*. — 1994. — Vol. 421. — P. 153.
9. *Spada M., Ghisellini G., Lazzati D., [et al.]*. Internal shocks in the jets of radio-loud quasars // *MNRAS*. — 2001. — Vol. 325, no. 4. — P. 1559–1570.
10. *Stawarz L., Ostrowski M.* Radiation from the Relativistic Jet: A Role of the Shear Boundary Layer // *ApJ*. — 2002. — Vol. 578, no. 2. — P. 763–774.
11. *Giannios D.* Reconnection-driven plasmoids in blazars: fast flares on a slow envelope // *MNRAS*. — 2013. — Vol. 431, no. 1. — P. 355–363.
12. *Blandford R. D., Znajek R. L.* Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes. // *MNRAS*. — 1977. — Vol. 179. — P. 433–456.
13. *Blandford R. D., Payne D. G.* Hydromagnetic flows from accretion disks and the production of radio jets. // *MNRAS*. — 1982. — Vol. 199. — P. 883–903.
14. *Komissarov S. S., Barkov M. V., Vlahakis N., [et al.]*. Magnetic acceleration of relativistic active galactic nucleus jets // *MNRAS*. — 2007. — Vol. 380, no. 1. — P. 51–70.
15. *Матвеевко Л. И., Кардашев Н. С., Шоломицкий Г. Б.* О радиоинтерферометре с большой базой // *Известия ВУЗов. Радиофизика*. — 1965. — Т. 8, № 4. — С. 651–654.
16. *Readhead A. C. S., Cohen M. H., Blandford R. D.* A jet in the nucleus of NGC6251 // *Nature*. — 1978. — Vol. 272, no. 5649. — P. 131–134.
17. *Pearson T. J., Readhead A. C. S.* The milli-arcsecond structure of a complete sample of radio sources. I. VLBI maps of seven sources. // *ApJ*. — 1981. — Vol. 248. — P. 61–81.
18. *Cohen M. H., Pearson T. J., Readhead A. C. S., [et al.]*. Superluminal variations in 3C 120, 3C 273, and 3C 345. // *ApJ*. — 1979. — Vol. 231. — P. 293–298.
19. *Pearson T. J., Unwin S. C., Cohen M. H., [et al.]*. Superluminal expansion of quasar 3C273 // *Nature*. — 1981. — Vol. 290, no. 5805. — P. 365–368.
20. *Hirabayashi H., Hirosawa H., Kobayashi H., [et al.]*. Overview and Initial Results of the Very Long Baseline Interferometry Space Observatory Programme // *Science*. — 1998. — Vol. 281. — P. 1825.
21. *Horiuchi S., Fomalont E. B., Taylor W. K., [et al.]*. The VSOP 5 GHz Active Galactic Nucleus Survey. IV. The Angular Size/Brightness Temperature Distribution // *ApJ*. — 2004. — Vol. 616, no. 1. — P. 110–122.

22. *Dodson R., Fomalont E. B., Wiik K., [et al.].* The VSOP 5 GHz Active Galactic Nucleus Survey. V. Imaging Results for the Remaining 140 Sources // *Astrophysical Journal Supplement Series.* — 2008. — Vol. 175, no. 2. — P. 314–355.
23. *Кардашев Н. С., Хартов В. В., Абрамов В. В. [и др.].* «Радиоастрон» — телескоп размером 300000 км: основные параметры и первые результаты наблюдений // *Астрон. журн.* — 2013. — Т. 90, № 3. — С. 179–222.
24. *Кардашев Н. С., Алакоз А. В., Андрианов А. С. [и др.].* Основные научные результаты, полученные в проекте «РадиоАстрон» в 2016–2018 годы // *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина.* — 2018. — № 3. — С. 3–12.
25. *Шкловский И. С.* О природе излучения радиогалактики NGC 4486 // *Астрон. журн.* — 1955. — Т. 32. — С. 215–225.
26. *Burbidge G. R.* On Synchrotron Radiation from Messier 87 // *ApJ.* — 1956. — Vol. 124. — P. 416.
27. *Kellermann K. I., Pauliny-Toth I. I. K.* The Spectra of Opaque Radio Sources // *ApJL.* — 1969. — Vol. 155. — P. L71.
28. *Readhead A. C. S.* Equipartition Brightness Temperature and the Inverse Compton Catastrophe // *ApJ.* — 1994. — Vol. 426. — P. 51.
29. *Lovell J. E. J., Rickett B. J., Macquart J.-P., [et al.].* The Micro-Arcsecond Scintillation-Induced Variability (MASIV) Survey. II. The First Four Epochs // *ApJ.* — 2008. — Vol. 689, no. 1. — P. 108–126.
30. *Hinton J. A., Hofmann W.* Teraelectronvolt Astronomy // *Annual Review of Astronomy & Astrophysics.* — 2009. — Vol. 47, no. 1. — P. 523–565.
31. *Kardashev N. S.* Radio Synchrotron Emission by Protons and Electrons in Pulsars and the Nuclei of Quasars // *Astronomy Reports.* — 2000. — Vol. 44, no. 11. — P. 719–724.
32. *Kellermann K. I.* Brightness Temperature Constraints to Compact Synchrotron Source Radiation Obtained from IDV and VLBI Observations // *PASA.* — 2002. — Vol. 19, no. 1. — P. 77–82.
33. *Kellermann K. I.* Variability, Brightness Temperature, Superluminal Motion, Doppler Boosting, and Related Issues // *Radio Astronomy at the Fringe.* Vol. 300 / ed. by J. A. Zensus, M. H. Cohen, E. Ros. — 2003. — P. 185. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
34. *Plavin A. V., Kovalev Y. Y., Kovalev Y. A., [et al.].* Directional Association of TeV to PeV Astrophysical Neutrinos with Radio Blazars // *ApJ.* — 2021. — Vol. 908, no. 2. — P. 157.
35. *Homan D. C., Cohen M. H., Hovatta T., [et al.].* MOJAVE. XIX. Brightness Temperatures and Intrinsic Properties of Blazar Jets // *ApJ.* — 2021. — Vol. 923, no. 1. — P. 67.

36. *Kovalev Y. Y., Kellermann K. I., Lister M. L., [et al.]*. Sub-Milliarcsecond Imaging of Quasars and Active Galactic Nuclei. IV. Fine-Scale Structure // *AJ*. — 2005. — Vol. 130, no. 6. — P. 2473–2505.
37. *Böttcher M., Harris D. E., Krawczynski H.* Relativistic Jets from Active Galactic Nuclei. — Weinheim : Wiley, 2012.
38. *Jorstad S. G., Marscher A. P., Morozova D. A., [et al.]*. Kinematics of Parsec-scale Jets of Gamma-Ray Blazars at 43 GHz within the VLBA-BU-BLAZAR Program // *ApJ*. — 2017. — Vol. 846, no. 2. — P. 98.
39. *Lister M. L., Homan D. C., Hovatta T., [et al.]*. MOJAVE. XVII. Jet Kinematics and Parent Population Properties of Relativistically Beamed Radio-loud Blazars // *ApJ*. — 2019. — Vol. 874, no. 1. — P. 43.
40. *Homan D. C., Lister M. L., Kovalev Y. Y., [et al.]*. MOJAVE. XII. Acceleration and Collimation of Blazar Jets on Parsec Scales // *ApJ*. — 2015. — Vol. 798, no. 2. — P. 134.
41. *Blandford R. D., Königl A.* Relativistic jets as compact radio sources // *ApJ*. — 1979. — Vol. 232. — P. 34–48.
42. *Königl A.* Relativistic jets as X-ray and gamma-ray sources // *ApJ*. — 1981. — Vol. 243. — P. 700–709.
43. *Marcaide J. M., Shapiro I. I.* VLBI study of 1038+528A and B: discovery of wavelength dependence of peak brightness location // *ApJ*. — 1984. — Vol. 276. — P. 56–59.
44. *Lobanov A. P.* Ultracompact jets in active galactic nuclei // *A&A*. — 1998. — Vol. 330. — P. 79–89.
45. *Pushkarev A. B., Hovatta T., Kovalev Y. Y., [et al.]*. MOJAVE: Monitoring of Jets in Active galactic nuclei with VLBA Experiments. IX. Nuclear opacity // *A&A*. — 2012. — Vol. 545. — A113.
46. *Plavin A. V., Kovalev Y. Y., Pushkarev A. B., [et al.]*. Significant core shift variability in parsec-scale jets of active galactic nuclei // *MNRAS*. — 2019. — Vol. 485, no. 2. — P. 1822–1842.
47. *Ma C., Arias E. F., Eubanks T. M., [et al.]*. The International Celestial Reference Frame as Realized by Very Long Baseline Interferometry // *AJ*. — 1998. — Vol. 116. — P. 516–546.
48. *Fey A. L., Gordon D., Jacobs C. S., [et al.]*. The Second Realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry // *AJ*. — 2015. — Vol. 150, no. 2. — P. 58.
49. *Charlot P., Jacobs C. S., Gordon D., [et al.]*. The third realization of the International Celestial Reference Frame by very long baseline interferometry // *A&A*. — 2020. — Vol. 644. — A159.

50. *Xu M. H., Savolainen T., Zubko N., [et al.]*. Imaging VGOS Observations and Investigating Source Structure Effects // *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*. — 2021. — Vol. 126, no. 4. — e21238.
51. *Gaia Collaboration, Mignard F., Klioner S. A., [et al.]*. Gaia Data Release 2. The celestial reference frame (Gaia-CRF2) // *A&A*. — 2018. — Vol. 616. — A14.
52. *Zakhvatkin M. V., Andrianov A. S., Avdeev V. Y., [et al.]*. RadioAstron orbit determination and evaluation of its results using correlation of Space-VLBI observations // *Advances in Space Research*. — 2020. — Vol. 65, issue 2. — P. 798–812.
53. *Deller A. T., Brisken W. F., Phillips C. J., [et al.]*. DiFX-2: A More Flexible, Efficient, Robust, and Powerful Software Correlator // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. — 2011. — Vol. 123, no. 901. — P. 275.
54. *Bruni G., Anderson J., Alef W., [et al.]*. The RadioAstron Dedicated DiFX Distribution // *Galaxies*. — 2016. — Vol. 4, no. 4. — P. 55.
55. *Likhachev S. F., Kostenko V. I., Girin I. A., [et al.]*. Software Correlator for Radioastron Mission // *Journal of Astronomical Instrumentation*. — 2017. — Vol. 6, no. 3. — P. 1750004–131.
56. *Kovalev Y. Y., Lobanov A. P., Pushkarev A. B., [et al.]*. Opacity in compact extragalactic radio sources and its effect on astrophysical and astrometric studies // *A&A*. — 2008. — Vol. 483. — P. 759–768.
57. *Porcas R. W.* Radio astrometry with chromatic AGN core positions // *A&A*. — 2009. — Vol. 505, no. 1. — P. L1–L4.
58. *Kovalev Y. Y., Petrov L., Plavin A. V.* VLBI-Gaia offsets favor parsec-scale jet direction in active galactic nuclei // *A&A*. — 2017. — Vol. 598. — P. L1.
59. *Plavin A. V., Kovalev Y. Y., Petrov L. Y.* Dissecting the AGN Disk-Jet System with Joint VLBI-Gaia Analysis // *ApJ*. — 2019. — Vol. 871, no. 2. — P. 143.
60. *Kellermann K. I., Pauliny-Toth I. I. K.* Compact radio sources // *Annual review of astronomy and astrophysics*. — 1981. — Vol. 19. — P. 373–410.
61. *Cohen M. H., Lister M. L., Homan D. C., [et al.]*. Relativistic Beaming and the Intrinsic Properties of Extragalactic Radio Jets // *ApJ*. — 2007. — Vol. 658, issue 1. — P. 232–244.
62. *Savolainen T., Homan D. C., Hovatta T., [et al.]*. Relativistic beaming and gamma-ray brightness of blazars // *A&A*. — 2010. — Vol. 512. — A24.
63. *Lister M. L., Aller M. F., Aller H. D., [et al.]*. MOJAVE. X. Parsec-scale Jet Orientation Variations and Superluminal Motion in Active Galactic Nuclei // *AJ*. — 2013. — Vol. 146, no. 5. — P. 120.
64. *Petrov L., Kovalev Y. Y., Fomalont E. B., [et al.]*. The Very Long Baseline Array Galactic Plane Survey—VGaPS // *AJ*. — 2011. — Vol. 142, issue 2. — P. 35.

65. *Lobanov A.* Brightness temperature constraints from interferometric visibilities // *A&A.* — 2015. — Vol. 574. — A84.
66. *Shepherd M. C.* Difmap: an Interactive Program for Synthesis Imaging // *Astronomical Data Analysis Software and Systems VI.* Vol. 125 / ed. by G. Hunt, H. Payne. — 1997. — P. 77. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).