

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

На правах рукописи

Ковалев Юрий Юрьевич

**Релятивистские струи в активных ядрах галактик**

Специальность 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва — 2011

Работа выполнена в Астрокосмическом центре Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии наук.

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук, профессор Бескин Василий Семенович (Отделение теоретической физики им. И.Е. Тамма Физического института им. П.Н. Лебедева РАН),

доктор физико-математических наук, профессор Гнедин Юрий Николаевич (Главная Астрономическая Обсерватория РАН),

доктор физико-математических наук, профессор Матвеевко Леонид Иванович (Институт Космических Исследований РАН)

**Ведущая организация:**

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского Государственного Университета им. М.В. Ломоносова (ГАИШ МГУ)

Защита состоится 14 ноября 2011 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д002.023.01 Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН) в конференц-зале Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) по адресу: г. Москва, улица Профсоюзная, дом 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН по адресу: г. Москва, Ленинский проспект, дом 53.

Отзывы направлять по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, дом 53, ФИАН (АКЦ), Диссертационный совет Д002.023.01.

Автореферат разослан 1 октября 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.ф.-м.н.

Ю.А. Ковалев

# Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Изучение галактик позволило выявить следующие основные процессы их активности: активность в ядре, обусловленная наличием сверхмассивной черной дыры, вспышка звездообразования в галактике, взаимодействие галактик. Работа связана с изучением первого процесса.

Современные представления об активных ядрах галактик предполагают наличие сверхмассивной черной дыры массой в миллиарды солнечных масс, которая подпитывается веществом и энергией из аккреционного диска (Rees 1984). Часть материи из диска преобразуется в коллимированные релятивистские выбросы, излучающие синхротронным механизмом в длинноволновой области электромагнитного спектра, высокоэнергичные фотоны генерируются механизмом обратного Комpton-эффекта.

Радиоастрономические исследования структуры ядер активных галактик и их переменности начались около 45-ти лет назад, но только в последние годы стало возможным получение полноценных, подробных и высококачественных радиоспектров и радиоизображений с высоким угловым разрешением для сотен внегалактических источников. Это произошло, в основном, по двум причинам: из-за улучшения чувствительности и углового разрешения новых радиотелескопов и создания многоантенных систем апертурного синтеза, включая VLBA NRAO (Very Long Baseline Array, США) и EVN (European VLBI Network, Европейская РСДБ сеть). Роль радиоастрономии в исследовании компактных объектов невозможно переоценить, так как именно методика радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ, Матвеевко, Кардашев, Шоломицкий 1965) позволяет достигать предельное угловое разрешение на Земле до долей миллисекунды дуги, а разработка и запуск космических радиотелескопов (VSOP/Halca, Радиоастрон/Спектр-Р) делает следующий качественный скачок в угловом разрешении.

Характеристики нетеплового спектра компактных ядер активных галактик, их переменность и наблюдаемые сверхсветовые движения в релятивистских струях успешно объясняются синхротронным механизмом излучения релятивистских частиц, ускоряемых в магнитном поле в окрестностях сверхмассивной черной дыры. Под релятивистской струей понимается узкий поток релятивистской плазмы, физические параметры которой, в общем случае, меняются во времени и пространстве. Представляет интерес выбор между конкретными физическими моделями возникновения и излучения релятивистских струй, исследование феномена быстрой переменности в радиодиапазоне, массово зарегистрированного в последние годы (см., например, Lovell et al. 2003). Комплексные многочастотные исследования структуры и спектров, использующие наблюдения на РСДБ сетях и на одиночных антеннах, позволяют сделать количественные и качественные выводы о физике процессов в этих компактных

объектах. Сейчас становится возможным проводить полноценный, значимый статистический анализ характеристик большого количества внегалактических объектов, наблюдаемых на одиночных антеннах и интерферометрах: спектров, компактной и протяженной радиоструктуры, их переменности и поляризации. Таким образом, астрономы получают возможность пользоваться мощным методом при комплексном изучении внегалактических объектов разных типов — статистически исследовать ранее недоступные большие выборки объектов на многих частотах и с высоким угловым разрешением.

Качественный скачок в исследовании природы релятивистских струй в активных ядрах галактик обязан осуществлению многодиапазонного подхода — изучению электромагнитного спектра синхро-комптоновского излучения струй в диапазоне от радио до  $\gamma$ . Это происходит благодаря появлению телескопов нового поколения, обладающих необходимой чувствительностью в малоизученных диапазонах — ультрафиолетовом, рентгеновском, гамма, ТэВ. Многие из этих новых инструментов — космические.

В настоящее время открываются новые увлекательные возможности для изучения феномена активных ядер галактик. С одной стороны, опубликованы массовые результаты космического телескопа  $\gamma$ -диапазона *Fermi* по наблюдениям активных ядер галактик. В диссертации представлены результаты анализа этих уникальных данных. С другой стороны, 18 июля 2011 г. произведен успешный запуск космического радиотелескопа Спектр-Р проекта наземно-космического радиоинтерферометра Радиоастрон (Kardashev 1997). Этот проект даст возможность исследовать тонкую структуру ядер активных галактик с небывалым угловым разрешением до десяти микросекунд дуги. Большой наблюдательный материал и анализ наземных РСДБ исследований, представленные в настоящей диссертации, будут использоваться для эффективного планирования миссии. Заметим также, что результаты диссертации будут полезны и для будущих новых миссий наземно-космических радиоинтерферометров.

**Целью работы** является комплексное многоволновое исследование релятивистских струй в ядрах активных галактик. Основу исследований образуют новые данные наблюдений, полученные с участием автора на радиотелескопе РАТАН-600, РСДБ системе апертурного синтеза VLBA, глобальной РСДБ сети, а также результаты наблюдений других авторов в различных диапазонах электромагнитного спектра. Наблюдаемые свойства исследуются с помощью статистического анализа и сравнения с численными и аналитическими предсказаниями известных моделей релятивистских струй.

**Научная новизна.** Новизна работы определяется тем, что все основные результаты, вынесенные на защиту, получены либо впервые вообще, либо впервые по столь большому количеству объектов в изученных выборках. В частности, получен долговременный ряд измерений суб-миллисекундной структуры более 200 внегалактических объектов на 15 ГГц с помощью системы VLBA.

Более 1300 внегалактических объектов были впервые успешно продетектированы методами РСДБ. Была измерена их миллисекундная структура и коррелированный поток излучения. На одиночном радиотелескопе РАТАН-600 проведены измерения мгновенных широкополосных спектров в диапазоне 1–22 ГГц на шести частотах для более 500 компактных внегалактических радиоисточников. Каждый спектр на всех частотах измерен практически одновременно — в течение нескольких минут. На данный момент это наиболее короткий временной интервал шести-частотных измерений, использованный для наиболее полного массового обзора широкополосных спектров компактных внегалактических объектов. Систематически для полной выборки струй измерены на 15 ГГц яркостная температура, кинематика и ускорение видимого движения. Метод оценки величины потока излучения РСДБ компактных областей по результатам анализа интегрального потока на одиночных антеннах предложен и апробирован в настоящей работе. Используя этот метод и измерения мгновенных спектров на РАТАН-600, в результате проведенного РСДБ обзора на 2 и 8 ГГц плотность покрытия неба фазовыми калибраторами достигла величины, позволяющей проводить массовые эксперименты с применением относительной РСДБ астрометрии. Предложен метод идентификации  $\gamma$ -ярких объектов с использованием РСДБ каталогов. Найдена прямая статистически значимая корреляция фотонного  $\gamma$ -потока активных ядер галактик с плотностью радиопотока излучения их компактных струй. Статистически значимо локализована область генерации вспышек в  $\gamma$ -диапазоне. Продетектирована рекордная (40%) амплитуда быстрой переменности потока излучения компактного внегалактического объекта на 15 ГГц. Найдена прямая связь между свойствами быстрой переменности и РСДБ компактностью. Измерен эффект видимого сдвига РСДБ ядра с частотой для выборки 29 внегалактических объектов и показана важность его приложения для астрофизических и астрометрических РСДБ исследований. Уверенно продетектирован “контр-джет” в галактике Дева А (M87) и достигнут рекордный динамический диапазон РСДБ изображения на 15 ГГц — 15000:1. Получены массовые квазиодновременные спектры излучения активных ядер галактик от радио- до  $\gamma$ -диапазонов.

**Научная и практическая ценность.** Полученные результаты наблюдений и анализа ядер активных галактик могут быть использованы в дальнейших теоретических и экспериментальных исследованиях в области внегалактической астрофизики. Полученный список источников, для которых обнаружена незначительная разница между интегральным потоком излучения с площади диаметром в миллисекунды дуги по данным VLBA и потоком, регистрируемым одиночными антеннами по данным РАТАН-600, рекомендуется к использованию для амплитудной калибровки и/или её проверки в рамках обработки РСДБ наблюдений. Обнаруженные РСДБ-компактные внегалактические объекты уже использованы для построения новой более точной инерциальной

системы отсчета (ICRF2, см. IERS Technical Note 35<sup>1</sup>), а также как опорные источники при геодезических РСДБ сеансах и фазовые калибраторы РСДБ наблюдений. Те из них, которые оказываются достаточно яркими в оптическом диапазоне, будут использоваться для привязки и независимой оценки ошибок радио (РСДБ – ICRF2) и будущей высокоточной оптической (по результатам астрометрического спутника GAIA) систем отсчета. Этот же список активно используется для идентификации *Fermi* объектов. Увеличение видимой плотности на небе открытых РСДБ-компактных объектов привело к увеличению точности РСДБ экспериментов относительной астрометрии. Измеренная величина видимого сдвига РСДБ ядра с частотой, а также метод по её учету, будут полезны для многочастотного РСДБ анализа релятивистских струй и для увеличения точности сравнения инерциальных систем отсчета, построенных на разных частотах в радиодиапазоне, а также при сличении радио (РСДБ) и оптических (космический проект GAIA) систем отсчета. Таблица с параметрами компактных источников на многих частотах на парсековых и суб-парсековых масштабах используется при подготовке списков внегалактических объектов для наблюдений и калибровки РСДБ экспериментов, в частности, в рамках проекта космического интерферометра Радиоастрон — как для подготовки тестов, так и научной программы миссии. Данные наблюдений широкодиапазонных спектров на РАТАН-600 используются для проверки и/или калибровки наблюдений на одиночных антеннах, для отбора кандидатов в предельно компактные объекты с целью дальнейших измерений их в РСДБ-обзорах и для совместного анализа с данными, полученными на РСДБ-сетях и в многоволновых экспериментах от радио- до ТЭВ-диапазона.

**Личный вклад** автора в совместные работы. Все работы из приведенного Списка публикаций по теме диссертации представляют результаты экспериментов и их анализа. Все, кроме работ [7,32,37], выполнены в соавторстве, в период с 1997 по 2011 год. В основном, это РСДБ и широкодиапазонные спектральные радиоизмерения, в которых автор принимал активное непосредственное участие на всех или ключевых этапах эксперимента: РСДБ-измерения с помощью международных многоантенных систем апертурного синтеза в США и Европе, и многочастотные спектральные наблюдения на радиотелескопе РАТАН-600 САО РАН (ст. Зеленчукская, КЧР, Россия). На защиту выносятся те результаты, в которых вклад автора диссертации был определяющим или сравнимым со вкладом соавторов. Конкретизация вклада:

Вклад диссертанта в РСДБ исследования состоял в определяющем или равном участии в постановке задачи, планировании эксперимента, калибровке данных для получения астрофизической информации, включая картографирование, анализе РСДБ результатов в области пространственных частот, статисти-

---

<sup>1</sup><http://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn35.html>



ческом анализе результатов, интерпретации и выводах, написании статей.

Во всех работах на РАТАН-600 автор: готовил и представлял в Комитет по тематике больших телескопов научные заявки на наблюдательное время; составлял круглосуточные расписания наблюдений и электронные задания на установки радиотелескопа; участвовал в наблюдениях; обрабатывал измерения всех источников, кроме калибровочных; строил мгновенные спектры по результатам обработки и калибровки измерений; участвовал с соавторами в анализе и интерпретации результатов и в написании статей.

Участие в работах по совместным многодиапазонным исследованиям (в том числе с орбитальной  $\gamma$ -обсерваторией *Fermi*, WEBT и другими телескопами во всем диапазоне электромагнитных волн — от радио до ТэВ): представление новых результатов наблюдений и анализа по избранным исследуемым источникам, выполненных на РСДБ-сетках и на РАТАН-600, обсуждение многодиапазонного анализа всех данных и его результатов, участие в написании статей. Определяющее или равное участие на всех этапах работ по радио- $\gamma$  анализу больших выборок (более сотни) “радио-громких” активных ядер галактик.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из Введения, пяти Глав и Заключения. Общий объем составляет 260 страниц, включая рисунки, таблицы и библиографию.

**Апробация результатов.** Результаты, изложенные в диссертации, обсуждались автором на семинарах Астрокосмического центра ФИАН (Россия), Отделения теоретической физики им. И.Е. Тамма ФИАН (Россия), Специальной Астрофизической Обсерватории РАН (Россия), Главной Пулковской Астрономической Обсерватории (Россия), Национальной Радиоастрономической Обсерватории (Грин Бэнк и Шарлоттесвилл, США), Национального Аэрокосмического Агентства (NASA, Годдард, США), Физического факультета университета Purdue (США), ASTRON (Нидерланды), института Макса Планка по радиоастрономии (Германия), университета Тюбингена (Германия), Национальной Астрономической Обсерватории Японии (Япония), Космического Агентства Японии (JAXA, Япония), университета Ямагучи (Япония), университета Кагошима (Япония), университета Валенсии (Испания), на более 20 научных конференциях в СНГ и России, а также на более 40 международных научных конференциях, включая шесть конференций с приглашенными обзорными докладами. В частности, результаты диссертации обсуждались на следующих конференциях:

1. Всероссийские астрономические конференции, Санкт-Петербург (2001), Москва (2004), Казань (2007), Нижний Архыз (2010).
2. “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, Пуццино (2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009).
3. “International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS) 2008 General Meeting”, Санкт-Петербург, Россия (2008).

4. EVN Symposium, Бонн, Германия (2002), Болонья, Италия (2008)
5. 202-ая конференция Американского Астрономического Общества, Нэшвилль, США (2003).
6. “Blazar Variability workshop”, Майами, США (2005).
7. “Challenges of Relativistic jets”, Краков, Польша (2006).
8. “Extragalactic Jets: Theory and Observation from Radio to Gamma Ray”, Гирвуд, Аляска (2007).
9. IAU Symposium 248, “A Giant Step: from Milli- to Micro-arcsecond Astrometry”, Шанхай, Китай (2007).
10. “Reaching Micro-Arcsecond Resolution with VSOP-2: Astrophysics and Technology”, Токио, Япония (2007).
11. “The Fourth Workshop on Compact Steep Spectrum and GHz-Peaked Spectrum”, Ричионе, Италия (2008).
12. “Радиовселенная с экстремальным угловым разрешением”, Москва, Россия (2008).
13. “The Central Kiloparsec: Active Galactic Nuclei and Their Hosts”, Иэрапетра, Крит, Греция (2008).
14. “Accretion and ejection in AGN: a global view”, Комо, Италия (2009).
15. Fermi symposium II (2009: Вашингтон, США) и III (2011: Рим, Италия).
16. “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра”, Москва (2010).
17. Региональная конференция МАС Азиатско-Тихоокеанского региона, Чан Май, Таиланд (2011).

Опубликованные статьи, содержащие основные результаты диссертации, признаны, подтверждены независимыми исследованиями, часто цитируются в мире (более 1600 цитирований). Индекс Хирша (Hirsch 2005) на июль 2011 г. равен 26. Эта статистика приведена по данным базы астрофизических публикаций NASA ADS (Kurtz et al. 2000).

## Основные результаты, выносимые на защиту

Данная научно-квалификационная работа суммирует результаты по изучению природы релятивистских струй в активных ядрах галактик, полученные при качественном изменении подхода — от исследований отдельных объектов особого интереса к глубокому изучению больших статистически полных выборок компактных внегалактических объектов на многих частотах с линейным разрешением вплоть до суб-парсеков.

1. Проведены многолетние РСДБ-наблюдения, калибровка, картографирование и анализ угловой структуры более 250 ярких внегалактических объектов на 10-антенной системе апертурного синтеза VLBA на частоте 15 ГГц. Показано, что полученная РСДБ структура практически всех исследованных объек-



тов представляет собой изображение высоко коллимированной релятивистской струи на масштабах парсеков. Сформирована статистически полная выборка самых ярких из них — 135 объектов со склонениями  $\delta > -20^\circ$  и коррелированной плотностью потока на 15 ГГц более 1.5 Ян. Измерены видимые скорости движения деталей в струях, с величинами в интервале от 0 до 50 скоростей света  $c$ , с медианным значением около  $10c$ . Определена яркостная температура РСДБ ядер струй, которая превысила комптоновский предел в  $10^{12}$  К для многих объектов выборки. Показано, что стандартная модель синхротронно излучающих релятивистских электронов может объяснить полученные значения при доплеровском усилении направленного излучения, согласующимся с измеренной кинематикой. Моделирование результатов методом Монте-Карло приводит к ограничению сверху в  $\Gamma \approx 50$  на Лоренц-фактор релятивистских струй. Найдено, что видимые обратные движения являются крайне редким явлением; этот результат является сильным ограничением на модели, которые их предсказывают. Для примерно одной трети выделенных деталей структуры продетектировано изменение скорости движения. В результате найдено, что положительное продольное ускорение превалирует в областях, близких к основанию струи. Сделан вывод, что процесс формирования струй все еще виден на масштабах парсеков.

2. Впервые на богатой статистике совместных VLBA и PATAN-600 измерений экспериментально установлена надежная взаимосвязь РСДБ структуры и широкодиапазонных спектров излучения внегалактических объектов. Обнаружено заметное, часто доминирующее, присутствие компоненты излучения микроструктуры в полном спектре излучения активных ядер галактик, измеренном одиночным радиотелескопом. По этим результатам предложен, апробирован, подтвержден и успешно внедрен метод поиска РСДБ-компактных релятивистских струй с предсказываемым по широкодиапазонным спектрам коррелированным потоком их радиоизлучения. Метод позволил существенно увеличить эффективность поисковых РСДБ обзоров — примерно до 90%. Используя этот метод и данные PATAN-600, проведен поисковый РСДБ обзор активных ядер галактик на системе апертурного синтеза VLBA на 2 и 8 ГГц Севернее склонения  $\delta = -45^\circ$ . Продетектировано на масштабах парсеков более 1300 новых объектов, проведено их картографирование на обеих частотах. Построен каталог радиоизображений и величин коррелированного потока. Подавляющее большинство найденных объектов имеют детали, излучающие на суб-миллисекундных угловых масштабах. Полное количество объектов с продетектированным коррелированным РСДБ потоком, превышающим 60 мЯн, составило более 4000. Найдены практически все объекты с коррелированной плотностью потока на 8 ГГц более 200 мЯн и  $\delta > -30^\circ$ .

3. Проведен совместный анализ наблюдательных данных PATAN-600, VLBA, глобальной РСДБ сети, *Fermi* в радио- и  $\gamma$ -диапазонах. Обнаружено, что боль-

шинство известных  $\gamma$ -ярких объектов на небе являются ультра-компактными релятивистскими струями в ядрах активных галактик. Предложен и апробирован новый способ идентификации  $\gamma$ -ярких объектов на основе данных РСДБ обзоров активных ядер галактик, особенно эффективный в плоскости Галактики. Найденная положительная корреляция свойств струй в радио- и  $\gamma$ -диапазонах говорит в пользу сильного доплеровского усиления излучения в обоих диапазонах и тесной связи синхротронного и комптоновского механизмов генерации этого излучения. Выявлена квазисовременность вспышек в радио- (15 ГГц) и  $\gamma$ -диапазонах с типичной задержкой около или менее нескольких месяцев. Это позволило локализовать источник яркого  $\gamma$ -излучения далеких галактик в окрестностях их центральных сверхмассивных черных дыр.

4. Измерено видимое смещение положения РСДБ ядра с частотой в выборке 29 ярких компактных внегалактических радиоисточников по наблюдениям на глобальной РСДБ сети (до 18 антенн) на частотах 2 и 8 ГГц. Получены величины смещений от 0 до 1.4 миллисекунды дуги (медианное значение 0.4 миллисекунды дуги). Показано, что эффект вызван синхротронным самопоглощением радиоизлучения у основания струй. Получены оценки физических параметров в окрестностях “центральной машины”. Продемонстрирована необходимость и предложены методы учета и применения этого эффекта для многочастотных астрофизических (исследование физических условий в ядрах галактик) и астрометрических (построение и сличение инерциальных систем отсчета) задач.

5. Впервые на основе РСДБ измерений обнаружена рекордная амплитуда быстрой переменности (до 40% за 3 часа на 15 ГГц) у квазара 1156+295. Этот результат является нетипичным для квазара с высокой галактической широтой. Он объясняется нами в рамках модели межзвездных мерцаний на близком турбулентном экране, параметры которого модельно оценены. Впервые показано, что быстропеременные объекты с большим потоком от самых компактных РСДБ деталей имеют тенденцию демонстрировать и большую амплитуду быстрой переменности. Это напрямую связывает “быстропеременную” составляющую излучения с детектируемыми РСДБ наиболее компактными (десятки микросекунд дуги) деталями ядер.

6. Получены новые детальные изображения струи в радиогалактике Дева А (M87) с рекордным динамическим диапазоном по яркости 15000:1 на частоте 15 ГГц на системе апертурного синтеза VLBA+Y1. Линейное разрешение карты меньше 0.1 парсека (около трех световых месяцев). Уверенно продетектирован короткий “контр-джет” размером три миллисекунды дуги. Струя разрешена поперек, зарегистрировано увеличение её яркости по краям. Модель струи с сильным поперечным градиентом скорости течения релятивистской плазмы предлагается для объяснения как этого явления, так и недавно обнаруженного излучения M87 в диапазоне ТЭВ. Исходя из большого отношения потоков излучения джета и контр-джета и отсутствия высоких скоростей разлета, делается

вывод, что центральная часть струи M87 внутренне не симметрична или малая измеренная скорость деталей не характеризует течение вещества в струе.

7. Проведены наблюдения мгновенных широкополосных спектров излучения более 500 активных ядер галактик и их долговременной переменности на 6 частотах от 1 до 22 ГГц с помощью радиотелескопа РАТАН-600 САО РАН. Выполнен статистический и модельный анализ спектральных измерений и сравнение их с данными РСДБ. Показано, что полученные на РАТАН-600 спектры в общем случае состоят из двух компонент, одна из которых является спектром излучения релятивистской струи с потоками, близкими к интегральным потокам РСДБ карт. Результаты РАТАН-600 использованы для многодиапазонного анализа, построения квазиодновременных спектров распределений энергии (SED) во всем диапазоне электромагнитного спектра от радио до  $\gamma$ /ТэВ, получения основных параметров этих распределений и тестирования моделей излучения. Синхротронно-комптоновские модели для всех наблюдаемых диапазонов спектра подтверждены на основе массового анализа квазиодновременных SED спектров. На примере PKS 0858–279 показано, что природа GPS квазаров не отличается от природы “обычных” радио-ярких квазаров с плоским радиоспектром. Получены оценки физических параметров струи этого квазара.

Экспериментальные результаты диссертации доступны в электронном виде как ASCII таблицы и несколько тысяч FITS файлов с изображениями и данными функции видности в международных открытых базах данных Virtual Observatory, NASA Extragalactic Database, SIMBAD, CDS, NRAO, astrogeo.org, а также на сайтах научных реферируемых журналов.

## Содержание работы

Диссертация состоит из Введения, пяти Глав и Заключения.

Во *Введении* кратко рассмотрены основные представления о природе активных ядер галактик, их переменности, показана важность и перспективность исследований компактных внегалактических объектов современными методами, дана общая характеристика диссертации.

*Глава 1* посвящена описанию долговременного исследования миллисекундной структуры активных ядер галактик на 15 ГГц. Переход от индивидуальных к массовым измерениям позволил использовать статистические методы анализа для изучения характеристик релятивистских выбросов в активных ядрах галактик на масштабах суб-парсеков.

Обзор более 250 ярких компактных внегалактических объектов был проведен на 10-антенной РСДБ системе апертурного синтеза NRAO VLBA (Napier 1994) на частоте 15 ГГц. Получены и представлены результаты слежения за этими объектами на протяжении многих лет в виде полностью калиброванных

карт распределения яркости и данных функции видности в полном и линейно-поляризованном излучении<sup>2</sup>.

Исследована кинематика движения плазмы в струйных выбросах активных ядер галактик на масштабах парсеков и суб-парсеков. Для этого использованы данные мониторинга, проводимого с 1994 года, всего более 2000 независимых изображений. Качество данных и временное покрытие (в среднем, по 15 эпох измерений на объект) значительно выше по сравнению с более ранними исследованиями. Во всех, кроме пяти объектов выборки радио-ярких активных галактик, джет представляется односторонним, скорее всего, в результате Доплеровского усиления. Обычно движения наблюдаются вдоль средней линии струи, в направлении от ее начала — оптически толстого видимого “ядра” (см. Главу 4, в которой подробно обсуждаются свойства видимого ядра). Хотя наблюдается определенный разброс скоростей деталей у одной и той же струи, но он в три раза меньше, чем дисперсия скоростей струйных деталей по всей выборке. Это подтверждает гипотезу о том, что каждая струя характеризуется определенной видимой скоростью, связанной со скоростью течения в ней релятивистской плазмы. Распределение максимальных скоростей для исследованной выборки джетов имеет пик на величине около  $10c$  с хвостом распределения, простирающимся примерно до  $50c$ . Исследована зависимость между наблюдаемой проекцией скорости и видимой радиосветимостью. Около половины полной выборки релятивистски усиленных струй имеет Лоренц-фактор, примерно равный наблюдаемой проекции скорости в единицах  $c$ . Уверенно подтверждается представление о струях как о направленных выбросах релятивистского вещества. Наблюдаемое распределение видимой скорости может быть получено в модели, в которой задано, что родительская популяция активных галактик с релятивистскими выбросами имеет Лоренц-фактор около или меньше  $\Gamma = 50$ .

Примерно треть компонент исследованных струй демонстрирует значимое изменение скорости или направления движения. Таким образом, отклонение видимого движения релятивистской плазмы от баллистического в виде продольного и/или поперечного ускорения/замедления носит типичный характер. Продольные ускорения обычно оказываются больше, чем поперечные. Последние отражают изменения направления движения. Наблюдаемые зависимости свидетельствуют о том, что значительная часть этих изменений связана именно с переменной истинной скоростью движения деталей, а не с изменением угла наблюдения выброса. Обнаружено, что положительное ускорение продольного движения детектируется преимущественно вблизи начала релятивистской струи, то есть нам удастся наблюдать процесс ускорения плазмы в основании джета.

На основе прямых измерений функции видности был проведен анализ мил-

---

<sup>2</sup>Открытая коллекция FITS файлов с результатами картографирования <http://www.physics.purdue.edu/astro/MOJAVE/>

лисекундной структуры компактных выбросов. Обнаружено, что у 171 источника более половины полного VLBA потока остается неразрешенным на самых длинных базах. Для 163 источников получено, что поток на максимальных базах составляет более 0.5 Ян. Эти источники наиболее перспективны для исследований с наземно-космическим радиоинтерферометром. Ядра 60 % источников оказались неразрешенными (то есть их протяженность меньше 50 микросекунд дуги) как минимум по одному направлению по крайней мере для одной эпохи наблюдения. Для ближайшего объекта выборки Дева А это соответствует линейному размеру в  $10^{16}$  см. Наземно-космические РСДБ базы необходимы для разрешения наиболее компактных областей в таких активных ядрах. Показано, что быстропеременные объекты с большим потоком от самых компактных РСДБ деталей имеют тенденцию демонстрировать большую амплитуду быстрой переменности. Это напрямую связывает “быстропеременную” составляющую излучения с детектируемыми РСДБ наиболее компактными (десятки микросекунд) деталями структуры ядер.

Видимая яркостная температура для многих объектов выборки превосходит известный Комптоновский предел  $10^{12}$  К. Наибольшие сверхсветовые скорости наблюдаются в струях с наибольшей яркостной температурой, что ожидается для релятивистского усиления направленного излучения. Мы провели оценки истинной, не искаженной усилением, яркостной температуры ядер струй в “спокойной” и “вспышечной” стадиях. Для этого использовалась простая модель компактной струи с релятивистским уярчением. В результате мы оценили величину внутренней, не искаженной релятивистским усилением, яркостной температуры в основании релятивистских струй и сравнили ее с предсказаниями модели равномерного распределения энергии между магнитным полем и излучающими релятивистскими частицами (Readhead 1994). Оказалось, что источники в нашей выборке в их спокойной стадии имеют характерную истинную внутреннюю яркостную температуру на уровне  $T_{\text{int}} \sim 3 \cdot 10^{10}$  К, что близко к яркостной температуре, получаемой в предположении равномерного распределения. При этом на вспышечной стадии истинная температура может достигать величины более  $2 \cdot 10^{11}$  К — значительно выше предсказаний для состояния равновесия. В этом случае наши оценки показывают, что плотность энергии релятивистских частиц в 100 000 раз превышает плотность энергии магнитного поля.

Проведены высокочувствительные исследования центральной части струи близкой радиогалактики M87. Временное разрешение наблюдений, проведенных на частоте 15 ГГц с системой апертурного синтеза NRAO VLBA, составило всего три световых месяца. Нами зарегистрированы уярчения по бокам струи. Также уверенно продетектирован короткий контр-джет размером три миллисекунды дуги. Наблюдаемая структура согласуется с моделью струи с сильным поперечным градиентом скорости. Эта модель также успешно объясняет недавно обнаруженное сильное излучение M87 в диапазоне TeV. Измерены типичные



скорости движения деталей струи; они оказались очень малы – всего несколько процентов от скорости света, что не согласуется с предсказанием традиционной модели несимметричной релятивистской струи. В методике апертурного синтеза РСДБ и гибридного картографирования контр-джет может оказаться артефактом обработки с замыканием фазы (см., например, Jennison 1958, Readhead & Wilkinson 1978) в рамках заданного распределения точек на  $uv$ -плоскости, особенно для источника со склонением близким к  $0^\circ$ . Мы провели специальное моделирование данных для реального реализованного покрытия  $uv$ -плоскости и доказали с большой степенью достоверности, что продетектированное излучение к Востоку от видимого яркого ядра реально. Исходя из большого отношения потоков излучения джета и контр-джета и отсутствия высоких скоростей разлета, делается следующий вывод: либо центральная часть струи M87 внутренне не симметрична, либо измеренная скорость деталей не характеризует течение вещества в струе.

В заключении данной Главы мы рассказываем о неожиданном открытии в рамках 2 см VLBA обзора экстремальной 40 %-амплитуды переменности (индекс модуляции 13 %) с характерными временем короче трех часов от компактного квазара 1156+295. Источники с быстрой (часовой) переменностью важны для исследований мелкомасштабных пространственных флуктуации межзвездной среды и структуры самих источников на масштабах микросекунд. К сожалению, количество экстремальных быстропеременных источников мало. Подчеркнем, наше открытие необычно и в том отношении, что оно было сделано в результате РСДБ эксперимента. Мы приводим доводы в пользу мерцаний как механизма, объясняющего эту переменность. В случае же внутренней переменности, оценка яркостной температуры дает величину около или более  $2 \times 10^{19}$  К, что неминуемо приводит к Комптоновской катастрофе (Kellermann & Pauliny-Toth 1969).

В *Главе 2* описан поисковый обзор компактных внегалактических объектов на 2 и 8 ГГц.

Каталог РСДБ-компактных внегалактических радиоисточников, включающий в себя как их высокоточные координаты, так и основные наблюдательные характеристики их структуры, важен для большого количества приложений астрофизики, астрометрии и геофизики. В качестве примеров таких приложений перечислим исследование статистических свойств полных выборок активных ядер галактик с релятивистскими струями, картографирование слабых объектов при помощи компактных калибраторов фазы, относительная и абсолютная РСДБ астрометрия, построение высокоточной инерциальной системы отсчета, мониторинг параметров вращения Земли, космическая геодезия, космическая навигация.

Метод радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами позволяет определять положения источников с нанорадианной точностью ( $1 \text{ nrad} \approx 0.2 \text{ mas}$ ).

Первый каталог координат объектов, определенных с помощью РСДБ, содержал 35 источников (Cohen & Shaffer 1971). Для решения задач, описанных выше, представляется крайне желательным иметь намного большее количество источников. В 1998 году был опубликован первый ICRF каталог с 667 источниками (Ma et al. 1998), сформированный в рамках геодезической РСДБ программы. Через шесть лет было опубликовано его расширение ICRF-Ext2 (Fey et al. 2004), содержавшее еще 109 источников. Однако покрытие неба этим каталогом было все еще недостаточно для некоторых приложений. Например, фазовая калибровка РСДБ эксперимента возможна при условии нахождения фазового калибратора на расстоянии около или меньше  $4^\circ$  от исследуемого объекта. Вероятность найти такой калибратор в ICRF-Ext2 со склонением  $\delta > -45^\circ$  составляет всего около 50 %.

Для того, чтобы увеличить плотность известных компактных фазовых калибраторов на небесной сфере был начат так называемый VLBA Calibrator Search (VCS). Двенадцать 24-часовых наблюдательных сессий были проведены на системе апертурного синтеза NRAO VLBA в рамках первой (Beasley et al. 2002) и второй (Fomalont et al. 2003) частей обзора. Это привело к серьезному увеличению количества известных компактных источников, увеличив их общее число на 1611 объектов. Примерно 80 % из открытых компактных объектов являются удовлетворительными калибраторами. Комбинация ICRF-Ext2, VCS1 и VCS2 дала 1986 объектов, продетектированных на парсековых масштабах на склонениях  $\delta > -45^\circ$ . Однако и этого количества калибраторов недостаточно для проведения РСДБ экспериментов с калибровкой фазы. Кроме того, подчеркнем, что до исследований, описываемых в данной Главе, имевшаяся выборка продетектированных объектов РСДБ обзора S/X была самой большой из опубликованных, но свойства ее статистической полноты были неудовлетворительны и плохо изучены.

Мы организовали и провели дополнительные одиннадцать 24-часовых сессий РСДБ наблюдений на системе апертурного синтеза VLBA для решения следующих задач:

1. Проверить новый метод предсказания излучения струй на масштабах парсеков по результатам модельного анализа их широкодиапазонных радиоспектров, предложенный нами в Главе 5. Увеличить с его помощью эффективность поискового РСДБ обзора.
2. Найти практически все компактные внегалактические объекты на небе ярче 100-200 мЯн с целью их использования в качестве фазовых калибраторов.
3. Построить статистически полную по коррелированному потоку выборку компактных внегалактических объектов, пригодную для последующего астрофизического анализа.

4. Перенаблюдать некоторые объекты обзоров VCS1 и VCS2 для улучшения точности измерения их коррелированной плотности потока, РСДБ структуры и координат.

В дополнение к вышперечисленному, мы провели независимую обработку сырых РСДБ данных обзоров VCS1 и VCS2 с целью получения величин коррелированной плотности потока, данные по потокам которой отсутствуют в публикациях Beasley et al. (2002), Fomalont et al. (2003).

Все перечисленные задачи были решены в результате проведенных наблюдений в рамках обзора VCS3-6. Применение нового метода предсказания коррелированного потока, основанного на идее выделения спектра излучения компактной детали из интегрального, позволило увеличить эффективность поискового РСДБ обзора до около 90 %. Плотность покрытия неба фазовыми калибраторами севернее склонения  $-45^\circ$  достигла величины, позволяющей проводить массовые эксперименты с применением относительной РСДБ астрометрии. Новейшая инерциальная система отсчета ICRF2 в значительной мере основана на новых компактных внегалактических объектах, описанных в Главе 2. Построены карты распределения радиояркости на 2.3 и 8.6 ГГц, а также получены калиброванные данные функции видности для всех этих объектов<sup>3</sup>. В каталоге также приведены интегральная (по карте) и неразрешенная составляющая спектральной плотности потока. Как результат, создана самая большая и статистически полная выборка компактных внегалактических радиоисточников до глубины интегрального РСДБ потока в 200 мЯн для объектов севернее склонения  $-30^\circ$ . Очевидно, что подобная статистически полная выборка компактных внегалактических объектов, вкуче с информацией о точных положениях объектов и их свойствах на парсековых масштабах, будет крайне ценной для многочисленных астрофизических приложений. Например, её применение описано в Главе 3. Данный каталог стал основой при отборе внегалактических объектов для предполетных РСДБ тестов и подготовки программы наблюдений наземно-космического интерферометра Радиоастрон в диапазонах L (1.6 ГГц) и S (5 ГГц).

Глава 3 посвящена совместному анализу данных наблюдений в радио- (РСДБ и одиночные антенны) и  $\gamma$ - (*Fermi*) диапазонах.

Первые массовые исследования внегалактических объектов в  $\gamma$ -диапазоне с помощью телескопа EGRET на борту космической обсерватории *Compton* (см., например, Hartman et al. 1999, Casandjian & Grenier 2008) позволили уверенно обнаружить фотоны высоких энергий от некоторых блазаров. Однако слабая чувствительность и малое поле зрения EGRET серьезно ограничили возможность проведения полноценного глубокого исследования галактик в этом диа-

---

<sup>3</sup>Открытая коллекция FITS файлов с результатами картографирования: <http://astrogeo.org/vcs/>

пазоне электромагнитного спектра. Ситуация драматически изменилась после успешного запуска в космос в июне 2008 года  $\gamma$ -обсерватории *Fermi*. Основной телескоп на борту – камера громадного поля зрения LAT (LAT, Atwood et al. 2009), работающая в диапазоне энергий от 20 МэВ до 300 ГэВ. За шесть часов наблюдений эта камера обзорекает все небо. Соответственно, стало возможным практически непрерывное слежение за всеми  $\gamma$ -яркими объектами на небесной сфере.

Однако даже современный  $\gamma$ -телескоп LAT на борту *Fermi* имеет ограниченное угловое разрешение: типичная точность локализации составляет  $3'–20'$  (Abdo et al. 2010). Это рождает очевидные сложности при отождествлении  $\gamma$ -источников. Большое количество  $\gamma$ -объектов, продетектированных телескопом EGRET (Hartman et al. 1999), было идентифицировано с блазарами (см., например, Mattox et al. 2001, Sowards-Emmerd et al. 2003, 2004), хотя многие из этих отождествлений были позднее не подтверждены (Casandjian & Grenier 2008). Несмотря на очевидные проблемы, факт успешной ассоциации некоторых EGRET-объектов с блазарами критически помогает задаче идентифицирования *Fermi* LAT источников. Группа *Fermi* собрала вместе несколько больших выборок блазаров (Healey et al. 2007, 2008, Massaro et al. 2009). Они содержат многие тысячи объектов и были использованы вместе с некоторыми другими каталогами для идентификации первого LAT-каталога 0FGL (Abdo et al. 2009), построенного по первым трем месяцам наблюдений *Fermi*. РСДБ каталоги в процессе идентификации использованы не были (Abdo et al. 2009). Однако использование РСДБ каталогов дает важную дополнительную информацию и существенно увеличивает вероятность корректной идентификации, так как РСДБ “отфильтровывает” объекты без компактных ядер на парсековых масштабах.

Компактные ядра являются типичной характеристикой радио-яркого блазара. Критически важно использование информации РСДБ для источников в области плоскости Галактики, где покрытие обычными каталогами крайне бедно из-за Галактического поглощения. За последние несколько десятилетий были проведены около десяти больших РСДБ обзоров. Самый большой по количеству источников — РСДБ обзор на 2 и 8 ГГц, результаты которого представлены в Главе 2. В Главе 3 мы используем этот обзор для проведения независимой идентификации источников раннего каталога *Fermi*, оцениваем вероятность ложного (случайного) отождествления, — она оказывается равна нескольким процентам, — и подтверждаем наше предположение о высокой эффективности применения РСДБ данных в этом процессе. Найдено, что большинство объектов LAT ассоциируются с блазарами, обладающими яркими струями на масштабах парсеков. Заметим, что, следуя нашему предложению (номер 37 в списке основных публикаций по теме диссертации), группа *Fermi* LAT успешно включила РСДБ каталоги в последующие процедуры отождествления для каталогов

1FGL (Abdo et al. 2010) и 2FGL (Abdo et al. 2011, послано в печать в ApJS)<sup>4</sup>.

Благодаря очень большому полю зрения, *Fermi* LAT дает возможность измерения излучения от большого количества объектов, регистрации практически всех вспышек в  $\gamma$ -диапазоне, предоставляя богатую статистику для значимого анализа. В Главе 3 мы проводим совместный анализ радио- и  $\gamma$ -свойств внегалактических объектов на основе данных наблюдений *Fermi* LAT за первые три месяца, VLBA и PATAH-600. Этот анализ показал тесную связь между характеристиками активных ядер галактик в  $\gamma$ -диапазоне и многими свойствами их релятивистских струй в радио. В частности, найдена положительная корреляция между фотонным  $\gamma$ -поток и спектральной плотностью радиопотока излучения компактных струй, измеренных квази-одновременно. Струи в  $\gamma$ -ярких блазарах оказались более яркими, более компактными, с большими видимыми сверхсветовыми скоростями движения вещества, чем в  $\gamma$ -слабых блазарах. У них также наблюдаются преимущественно большие углы раскрыва. Это указывает на преимущественно меньшие углы наблюдения струй и большее Доплеровское релятивистское усиление, которое должно играть значительную роль как в усилении синхротронного излучения (радиодиапазон), так и Комптоновского ( $\gamma$ -диапазон). Прямые оценки Доплер-фактора и углов наблюдения струй, проведенные на основе информации по переменности в радиодиапазоне и РСДБ кинематики, подтвердили эти выводы. По данным первых трех месяцев обнаружено, что вспышки в  $\gamma$  и радиодиапазонах происходят квази-одновременно в районе РСДБ-ядер в окрестности сверхмассивных черных дыр, с задержкой обычно не более нескольких месяцев. Далее, используя данные первого года работы телескопа *Fermi* LAT (Abdo et al. 2010), нами были измерены задержки между радио- и  $\gamma$ -излучением от ядер активных галактик. Всплески радиоизлучения на частоте 15 ГГц, зарегистрированные от компактных областей, близких к центральной сверхмассивной черной дыре, поступают с задержкой от 1 до 8 месяцев по отношению к вспышкам, обнаруженным в  $\gamma$ -диапазоне. Совместный анализ радио- и  $\gamma$ -данных позволил уточнить положение участка, где происходит генерация  $\gamma$ -излучения, и связать его с зоной ускорения частиц в выбросах: он расположен между черной дырой и областью, от которой зарегистрировано радиоизлучение. Эта область, однако, непрозрачна для радиоволн, и поэтому возмущению, вызвавшему  $\gamma$ -вспышку и распространяющемуся вдоль выброса, требуется значительное время, чтобы достичь области прозрачности для радиоволн. Основными причинами широкого диапазона наблюдаемых задержек являются большой разброс космологических расстояний до исследуемых объектов, а также различное релятивистское замедление времени в струях.

Заметим, что даже в случае внегалактических объектов неблазарного типа вспышечное  $\gamma$  и ТэВ-излучение локализуется в околядерной области. Это

---

<sup>4</sup>[http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/2yr\\_catalog/](http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/2yr_catalog/)



было убедительно продемонстрировано Acciari et al. (2009) для M87 (см. также обсуждение природы области HST1 в Главе 1 диссертации) и нами в Главе 3 для 3C 84.

В заключении Главы, на примере двух объектов, 1510–089 и J0948+0022, обсуждается связь между вспышками в радио- и  $\gamma$ -диапазонах и переменностью позиционного угла линейной поляризации (EVPA) радиоизлучения видимого начала релятивистской струи. Эти два источника демонстрируют указания на скачкообразное изменение EVPA на  $90^\circ$  близко по времени к мощным вспышкам  $\gamma$ -излучения, объясняемое значительным изменением характеристик синхротронного самопоглощения в этой области.

Глава 4 посвящена исследованию эффектов поглощения синхротронного излучения в ядрах струй активных галактик.

Релятивистские струи в галактиках формируются в непосредственной близости от центральной черной дыры, на расстояниях порядка 100 гравитационных радиусов, а становятся наблюдаемыми в радиодиапазоне на расстояниях приблизительно 1000 гравитационных радиусов (Lobanov & Zensus 2007). Это видимое положение радиоструй называется обычно “ядром”. На радиокартах струй галактик ядро располагается в области, характеризующейся оптической толщиной  $\tau_s \approx 1$ . Это приводит к зависимости абсолютного положения ядра  $r_{\text{core}}$  от частоты наблюдения  $\nu$ :  $r_{\text{core}} \propto \nu^{-1/k_r}$ , поскольку профиль оптической толщины вдоль струи меняется с частотой  $\nu$  (см, например, модель конической струи Blandford & Königl 1979).

Высокоточное сопоставление систем отсчета, построенных на базе радио и оптических наблюдений, требует детального понимания физических факторов, которые могут привести к сдвигу видимого положения одного и того же объекта, измеренного в разных спектральных диапазонах. Поглощение в струях компактных внегалактических объектов (синхротронное самопоглощение и свободно-свободное поглощение) — один из ключевых эффектов, приводящих к такому сдвигу. Этот эффект хорошо известен в радиоастрономии. Измерения сдвига ядер проводились до настоящего времени в отношении малого числа объектов (см., например, Marcaide et al. 1994, Lara et al. 1994, Porcas & Rioja 1997, Lobanov 1996, 1998, Paragi et al. 2000, Ros & Lobanov 2001, Bietenholz et al. 2004, Kadler et al. 2004). Мы измерили сдвиг РСДБ ядра в выборке 29 ярких компактных внегалактических радиоисточниках на основе глобальных РСДБ наблюдений на 2 и 8 ГГц. Теоретически оценен ожидаемый сдвиг между радио и оптическим диапазоном для полной выборки внегалактических струй. Его среднее значение оказалось порядка 0.1-0.2 миллисекунды дуги. Эта величина превосходит точности измерений координат РСДБ и оптических космических миссий GAIA и SIM. Мы предлагаем два подхода для аккуратного исследования этого эффекта и проведения соответствующей коррекции координат при сравнении радио и оптических положений. Оба подхода предполагают постро-

ение и использование опорной выборки источников для сопоставления систем отсчета.

Заметим, что результаты измерений сдвига ядра между 2 и 8 ГГц, представленные в Главе 4, были позднее подтверждены независимыми измерениями Sokolovsky et al. (2011).

В заключении Главы, на примере двух квазаров, 1458+718 и 0850+581, мы исследуем сдвиг на многих частотах, определяем физические и геометрические параметры в начале струй в рамках модельных предположений Blandford & Königl (1979). В частности, для 3C 309.1, используя измерения на 5, 8 и 15 ГГц, мы оцениваем расстояние от видимого РСДБ ядра на 15 ГГц до центральной сверхмассивной черной дыры в  $5 \pm 2$  пк. Величина магнитного поля на расстоянии 1 пк от центрального ядра оценивается как  $2.3 \pm 0.5$  Гс, предполагая плотность электронов  $N_e = 17,000 \text{ см}^{-3}$  Kus (1993). Эта величина сравнима с величиной магнитного поля для случая равномерного распределения энергии поля и частиц  $B_{\text{eq}} = 1.7 \pm 0.8$  Гс. Данные оценки соответствуют величине магнитного поля  $0.1 \pm 0.2$  Гс в видимом ядре на 15 ГГц. На сегодняшний день, один из самых больших видимых сдвигов ядер измерен именно для этого объекта и, естественно, данный квазар требует дополнительного всестороннего изучения. На основе данных наших наблюдений на VLBA на 5-43 ГГц получены следующие оценки параметров. Расстояние от наблюдаемого ядра струи до центральной сверхмассивной черной дыры: от 17 пк (на 5 ГГц) до 5 пк (на 24 ГГц). Величина магнитного поля на расстоянии 1 пк от центральной машины:  $B = 3.1 \pm 0.2$  Гс (в предположении плотности электронов  $N_e = 1000 \text{ см}^{-3}$ ). Это соответствует величине магнитного поля для ситуации равномерного распределения энергии поля и частиц ( $B = 2.7 \pm 0.7$  Гс). Напряженность поля в области видимого ядра на 24 ГГц составляет  $0.2 \pm 0.4$  Гс.

*Глава 5* посвящена исследованию многочастотных спектров радиоизлучения, измеренных на РАТАН-600 в интервале от 1 до 22 ГГц, и их применению в многодиапазонном анализе переменного излучения струй в активных ядрах галактик.

В начале Главы представлены результаты обзора спектров 550 внегалактических радиоисточников на шести частотах от 1 до 22 ГГц (длины волн — 31, 13, 7.7, 3.9, 2.7 и 1.38 см), выполненного в декабре 1997 года с помощью одного радиотелескопа, — РАТАН-600. Плотности потока на всех частотах измерены почти одновременно — в течение нескольких минут. Практически синхронные 6-ти частотные измерения были проведены для одного из самых больших обзоров широкополосных спектров компактных внегалактических объектов. Эти наблюдения являются частью долговременной программы АКЦ ФИАН по мониторингу мгновенных спектров компактных внегалактических объектов (Kovalev 1997), которые имеют яркие миллисекундные компоненты и исследуются РСДБ методом. В рамках данной программы осуществляются наблюдения спектров

радиоизлучения объектов для проекта Радиоастрон. Мы сравнили наши результаты с опубликованными наблюдательными данными других авторов с целью проверить остаточные систематические ошибки, используя несколько десятков сильных объектов, распределенных по склонениям и имеющих постоянный или мало меняющийся спектр. Найденное согласие представляется достаточно хорошим и находится в пределах полных ошибок.

Как и для некоторых менее полных выборок, известных ранее, из статистического и численного анализа модели активного ядра для наблюдаемых спектров РСДБ-компактных внегалактических объектов в полосе частот 1-22 ГГц мы делаем вывод, что спектры могут быть промоделированы как сумма синхротронного спектра протяженного оптически тонкого компонента (замагниченной оболочки, ‘спектр 1’), доминирующего на более низких частотах, и синхротронного спектра компактного компонента (релятивистская струя, ‘спектр 2’), доминирующего на более высоких частотах. Спектр 1 обычно имеет крутую (падающую с частотой) форму и постоянен или слабо меняется во времени. Спектр 2 может иметь любую степень переменности и практически любую форму — крутую, плоскую, пиковую или растущую — в сантиметровом диапазоне излучения. Если рассматривать нестационарные струи, комбинация этих двух спектральных компонентов может объяснить особенности спектров со сложной формой. Переменное излучение струи может вырабатываться нестационарным потоком релятивистских частиц в продольном магнитном поле или распространением релятивистских ударных волн.

Мы сравнили интегрированный поток, измеренный в рамках 2 см VLBA обзора (Глава 1), с результатами наблюдений на РАТАН-600. Получено, что обычно более 70% полного излучения на частотах выше 5 ГГц приходит с масштабов миллисекунд дуги. Этот результат подтверждает наше более раннее объяснение (1) спокойных спектров излучения струи на квази-стационарных стадиях и (2) спектральной переменности на частотах выше 1 ГГц сильно переменным спектром 2. Было сделано предложение использовать модельный анализ для выделения спектра 2 из полного спектра и предсказания величины спектральной плотности потока излучения с РСДБ масштабов. Данный метод был успешно опробован и внедрен в Главе 2, подтвердив справедливость модельной интерпретации полных широкополосных радиоспектров активных ядер галактик.

По данным РАТАН-600 уточнена истинная полнота выборки объектов, зарегистрированных космическим телескопом *WMAP*. Показано, что эта выборка является хвостом “родительской” выборки компактных внегалактических объектов, для которого свойственны более плоские и переменные радиоспектры.

Еще до запуска *Fermi*, на основе анализа переменности РАТАН-спектров  $\gamma$ -ярких объектов, протектированных EGRET, удалось найти, что последние имеют наибольший индекс переменности на высоких радиочастотах по сравнению с полной выборкой РСДБ-компактных внегалактических струй, исследу-

емой нами на РАТАН-600. Это свидетельствовало в пользу моделей, предполагающих связь между механизмами излучения в радио- и  $\gamma$ -диапазонах, что и подтвердилось позднее с высокой степенью достоверности на основе *Fermi*-радио анализа (Глава 3).

По одновременным спектрам РАТАН-600 выявлены объекты, ранее ошибочно приписанные к классу источников с пиком на гигагерцах (GPS источники) другими авторами в связи с использованием ими неодновременных измерений. Для подтвержденных GPS источников обнаружена ожидаемая зависимость частоты пика спектра синхротронного излучения от РСДБ компактности.

На РАТАН-600 обнаружена сильная переменность от далекого квазара 0858–279 (красное смещение  $z = 2.1$ ) в диапазоне 1-22 ГГц. Этот квазар характеризуется пиковой формой радиоспектра. Предварительные РСДБ наблюдения выявили сильно разрешенную иррегулярную структуру с характерным размером более 1 миллисекунды дуги. Эта величина находится в прямом противоречии с оценкой размеров переменной области, получаемой из характерного времени переменности величиной несколько месяцев и соображений причинности, — порядка 0.1 парсека или 20 микросекунд дуги. Была проведена специальная сессия многочастотных поляризационных измерений этого объекта на системе апертурного синтеза VLBA в диапазоне 2-22 ГГц. В результате а) обнаружена структура типа ядро-струи на высоких частотах; б) спектральные и поляризационные свойства доминирующей детали релятивистской струи удалось объяснить моделью однородного синхротронного источника с самопоглощением, поляризационные свойства которого указывают на однородность магнитного поля; в) сделан вывод о высокой направленности обнаруженной струи, оценка Доплер-фактора релятивистского усиления дает значение  $> 30$ , оценка магнитного поля в доминирующей области струи оказалась порядка 0.1 мГс.

Для примерно 50 блазаров и радиогалактик с использованием одновременных РАТАН-600 спектров были построены и изучены высококачественные квазиодновременные спектральные распределения энергии (SED) от радио- до ТэВ-диапазона. В основном, эти работы были координированы в рамках активностей WEBT (the Whole Earth Blazar Telescope — мировой телескоп для наблюдений блазаров) и многодиапазонных кампаний группы космической обсерватории *Fermi*. Обсуждаются возможные модели излучения для объяснения этих результатов для активных галактик как во время вспышек, так и в спокойной фазе активности.

В Заключение сформулированы основные результаты работы.

## Список публикаций по теме диссертации

Результаты автора по теме диссертации опубликованы в научных журналах и в трудах упомянутых выше конференций. Основные результаты диссертации суммированы в следующих 52 статьях. Все приведенные статьи опубликованы в изданиях, находящихся в Перечне ВАК ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, удовлетворяя достаточному условию присутствия в хотя бы одной из систем цитирования — библиографических баз Web of Science (база по естественным наукам: Science Citation Index Expanded) и Astrophysics (NASA Astrophysics Data System).

1. Kovalev, Y. Y., Nizhelsky, N. A., Kovalev, Yu. A., Berlin, A. B., Zhekanis, G. V., Mingaliev, M. G., Bogdantsov, A. V., “Survey of Instantaneous 1–22 GHz Spectra of 550 Compact Extragalactic Objects with Declinations from  $-30^\circ$  to  $+43^\circ$ ”, 1999, *A&A Suppl.*, 139, 545-554.
2. Попов, М. В., Ковалев, Ю. Ю., “Статистический анализ радиовыбросов в квазарах”, 1999, *Астрон. журн.*, 76, 643-655.
3. Kovalev, Yu. A., Kovalev, Y. Y., Nizhelsky, N. A., “Broad Band Spectra Study of 213 VSOP 5-GHz Survey Sources”, 2000, *PASJ*, 52, 1027-1036.
4. Kovalev, Y. Y., Kovalev, Yu. A., Nizhelsky, N. A., Bogdantsov, A. B., “Broad-Band Radio Spectra Variability of 550 AGNs in 1997–2001”, 2002, *PASA*, 19, 83-87.
5. Kellermann, K. I., Lister, M. L., Homan, D. C., Vermeulen, R. C., Cohen, M. H., Ros, E., Zensus, J. A., Kadler, M., & Kovalev, Y. Y., “Sub-milliarcsecond Imaging of Quasars and Active Galactic Nuclei. III. Kinematics of Parsec-Scales Radio Jets”, 2003, *ApJ*, 609, 539-563.
6. Пушкарев, А. Б., Ковалев, Ю. Ю., Молотов, И. Е., Нечаева, М. Б., Горшенков, Ю. Н., Туккари, Дж., Стангелини, К., Хонг, Ш., Куик, Дж., Доугхерти, Ш., Лю, Ш., “Квазиодновременные РСДБ и РАТАН-600 наблюдения активных ядер галактик”, 2004, *Астрон. журн.*, 81, 988-997.
7. Kovalev, Y. Y., “Temporary GPS/HFP radio sources”, 2005, *Baltic Atron.*, 14, 413-416.
8. Böttcher, M., et al. (всего 71 автор, включая Ю. Ю. Ковалева), “Coordinated Multiwavelength Observations of 3C 66A during the WEBT campaign of 2003–2004”, 2005, *ApJ*, 631, 169-186.



9. Raiteri, C. M., et al. (всего 67 авторов, включая Ю. Ю. Ковалева), “The WEBT campaign to observe AO 0235+16 in the 2003-2004 observing season”, 2005, *A&A*, 438, 39-53.
10. Kovalev Y. Y., Kovalev, Yu. A., Nizhelsky N. A., “Analysis of WMAP sample of extragalactic sources at 2.3-22 GHz”, 2005, *Baltic Atron.*, 14, 389-391.
11. Petrov, L., Kovalev, Y. Y., Fomalont, E. B., & Gordon, D., “The Third VLBA Calibrator Survey”, 2005, *AJ*, 129, 1163-1170.
12. Kovalev, Y. Y., Kellermann, K. I., Lister, M. L., Homan, D. C., Vermeulen, R. C., Cohen, M. H., Ros, E., Kadler, M., Lobanov, A. P., Zensus, J. A., Kardashev, N. S., Gurvits, L. I., Aller, M. F., & Aller, H. D., “Sub-milliarcsecond Imaging of Quasars and Active Galactic Nuclei IV. Fine Scale Structure”, 2005, *AJ*, 130, 2473-2505;  
“Erratum: “Sub-Milliarcsecond Imaging of Quasars and Active Galactic Nuclei. IV. Fine-Scale Structure” (*AJ*, 130, 2473 [2005])”, 2006, *AJ*, 131, 2361.
13. Raiteri, C. M., et al. (всего 61 автор, включая Ю. Ю. Ковалева), “Multi-frequency variability of the blazar AO 0235+164. The WEBT campaign in 2004-2005 long-term SED analysis”, 2006, *A&A*, 459, 731-743.
14. Villata, M., et al. (всего 88 авторов, включая Ю. Ю. Ковалева), “The unprecedented optical outburst of the quasar 3C 454.3. The WEBT campaign of 2004-2005”, 2006, *A&A*, 453, 817-822.
15. Homan, D. C., Kovalev, Y. Y., Lister, M. L., Ros, E., Kellermann, K. I., Cohen, M. H., Vermeulen, R. C., Zensus, J. A., & Kadler, M., “Intrinsic Brightness Temperatures of AGN Jets”, 2006, *ApJ Lett.*, 642, L115-L118.
16. Petrov, L., Kovalev, Y. Y., Fomalont, E. B., & Gordon, D., “The Fourth VLBA Calibrator Survey”, 2006, *AJ*, 131, 1872-1879.
17. Böttcher, M., et al. (всего 80 авторов, включая Ю. Ю. Ковалева), “The WEBT Campaign on the Blazar 3C 279 in 2006”, 2007, *ApJ*, 670, 968-977.
18. Kellermann, K. I., Kovalev, Y. Y., Lister, M. L., Homan, D. C., Kadler, M., Cohen, M. H., Ros, E., Zensus, J. A., Vermeulen, R. C., Aller, M. F., Aller, H. D., “Doppler Boosting, Superluminal Motion, the Kinematics of AGN Jet”, 2007, *Astrophys. & Space Sci.*, 311, 231.
19. Kovalev, Y. Y., Lister, M. L., Homan, D. C., Kellermann, K. I., “The Inner Jet of the Radio Galaxy M87”, 2007, *ApJ Lett.*, 668, L27-L30.

20. Cohen, M. H., Lister, M. L., Homan, D. C., Kadler, M., Kellermann, K. I., Kovalev, Y. Y., Vermeulen, R. C., “Relativistic Beaming and the Intrinsic Properties of Extragalactic Radio Jets”, 2007, *ApJ*, 658, 232-244.
21. Raiteri, C. M., et al. (всего 76 авторов, включая Ю. Ю. Ковалева), “WEBT and XMM-Newton observations of 3C 454.3 during the post-outburst phase. Detection of the little and big blue bumps”, 2007, *A&A*, 473, 819-827.
22. Villata, M., et al. (всего 49 авторов, включая Ю. Ю. Ковалева), “The radio delay of the exceptional 3C 454.3 outburst. Follow-up WEBT observations in 2005-2006”, 2007, *A&A Lett.*, 464, L5-L9.
23. Kovalev, Y. Y., Petrov, L., Fomalont, E. B., Gordon, D., “The Fifth VLBA Calibrator Survey: VCS5”, 2007, *AJ*, 133, 1236-1242.
24. Larionov, V. M., et al. (всего 71 авторов, включая Ю. Ю. Ковалева), “Results of WEBT, VLBA and RXTE monitoring of 3C 279 during 2006-2007”, 2008, *A&A*, 492, 389-400.
25. Savolainen, T., Kovalev, Y. Y., “Serendipitous VLBI detection of rapid, large-amplitude, intraday variability in QSO 1156+295”, 2008, *A&A Lett.*, 489, L33-L36.
26. Kovalev, Y. Y., Lobanov, A. P., Pushkarev, A. B., Zensus, J. A., “Opacity in compact extragalactic radio sources and its effect on astrophysical and astrometric studies”, 2008, *A&A*, 483, 759-768.
27. Kovalev, Y. Y., Lobanov, A. P., Pushkarev, A. B., “Physics of the central region in the quasar 0850+581”, 2008, *Memorie della Societa Astronomica Italiana*, 79, 1153-1156.
28. Vollmer, B., Krichbaum, T. P., Angelakis, E., & Kovalev, Y. Y., “Quasi-simultaneous multi-frequency observations of inverted-spectrum GPS candidate sources”, 2008, *A&A*, 489, 49-55.
29. Petrov, L., Kovalev, Y. Y., Fomalont, E. B., & Gordon, D., “The Sixth VLBA Calibrator Survey”, 2008, *AJ*, 136, 580-585.
30. Kadler, M., Ros, E., Perucho, M., Kovalev, Y. T., Homan, D. C., Agudo, I., Kellermann, K. I., Aller, M. F., Aller, H. D., Lister, M. L., Zensus, J. A., “The Trails of Superluminal Jet Components in 3C 111”, 2008, *ApJ*, 680, 867-884.
31. Kataoka, J., Madejski, G., Sikora, M., Chester, M., Grupe, D., Tsubuku, Y, Sato, R., Kawai, N., Tosti, G., Impiombato, D., Kovalev, Y. Y., Edwards, P. G., Wagner, S. J., Stawarz, L., Moderski, R., Takahashi, T., Watanabe, S.,

- “Multiwavelength Observations of the Powerful  $\gamma$ -ray Quasar PKS 1510–089: Clues to Particle Content in the Jet”, 2008, *ApJ*, 672, 787-799.
32. Kovalev, Y. Y., “Parsec-scale Jet in the Distant Gigahertz-Peaked Spectrum Quasar PKS 0858–279”, 2009, *Astron. Nachr.*, 330, 141-144.
  33. Abdo, A. A. (коллорація Fermi), et al. (всього 208 авторів, включаючи Ю. Ю. Ковалева), “Multiwavelength monitoring of the enigmatic Narrow-Line Seyfert 1 PMN J0948+0022 in March-July 2009”, 2009, *ApJ*, 707, 727-737.
  34. Lister, M. L., Aller, H. D., Aller, M. F., Cohen, M. H., Homan, D. C., Kadler, M., Kellermann, K. I., Kovalev, Y. Y., Ros, E., Savolainen, T., Zensus, J. A., Vermeulen, R. C., “MOJAVE: Monitoring of Jets in AGN with VLBA Experiments. V. Multi-epoch VLBA Images”, 2009, *AJ*, 137, 3718-3729.
  35. Lister, M. L., Cohen, M. H., Homan, D. C., Kadler, M., Kellermann, K. I., Kovalev, Y. Y., Ros, E., Savolainen, T., Zensus, J. A., “MOJAVE: Monitoring of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. VI. Kinematics Analysis of a Complete Sample of Blazar Jets”, 2009, *AJ*, 138, 1874-1892.
  36. Homan, D. C., Kadler, M., Kellermann, K. I., Kovalev, Y. Y., Lister, M. L., Ros, E., Savolainen, T., Zensus, J. A., “MOJAVE: Monitoring of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. VII. Blazar Jet Acceleration”, 2009, *ApJ*, 706, 1253-1268.
  37. Kovalev, Y. Y., “Identification of the Early Fermi LAT Gamma-Ray Bright Objects with Extragalactic VLBI sources”, 2009, *ApJ Lett.*, 707, L56-L59.
  38. Villata, M., et al. (всього 56 авторів, включаючи Ю. Ю. Ковалева), “The correlated optical and radio variability of BL Lacertae. WEBT data analysis 1994-2005”, 2009, *A&A*, 501, 455-460.
  39. Abdo, A. A. (коллорація Fermi), et al. (всього 174 авторів, включаючи Ю. Ю. Ковалева), “Fermi Discovery of Gamma-Ray Emission from NGC 1275”, 2009, *ApJ*, 699, 31-39.
  40. Lister, M. L., Homan, D. C., Kadler, M., Kellermann, K. I., Kovalev, Y. Y., Ros, E., Savolainen, T., Zensus, J. A., “A Connection Between Apparent VLBA Jet Speeds and Initial AGN Detections Made by the Fermi Gamma-ray Observatory”, 2009, *ApJ Lett.*, 696, L22-L26.
  41. Kovalev, Y. Y., Aller, H. D., Aller, M. F., Homan, D. C., Kadler, M., Kellermann, K. I., Kovalev, Yu. A., Lister, M. L., McCormick, M. J., Pushkarev, A. B., Ros, E., Zensus, J. A., “The relation between AGN gamma-ray emission and parsec-scale radio jets”, 2009, *ApJ Lett.*, 696, L17-L21.

42. Pushkarev, A. B., Kovalev, Y. Y., Lister, M. L., Savolainen, T., “Jet opening angles and gamma-ray brightness of AGN”, 2009, *A&A Lett.*, 507, L33-L36.
43. Horan, D., et al. (всего 74 авторов, включая Ю. Ю. Ковалева), “Multi-wavelength Observations of Markarian 421 in 2005-2006”, 2009, *ApJ*, 695, 596-618.
44. Pushkarev, A. B., Kovalev, Y. Y., Lister, M. L., “Radio/Gamma-ray Time Delay in the Parsec-scale Cores of Active Galactic Nuclei”, 2010, *ApJ Lett.*, 722, L7-L11.
45. Chang, C.-S., Ros, E., Kovalev, Y. Y., Lister, M. L., “VLBI detection of the HST-1 feature in the M87 jet at 2 cm”, 2010, *A&A*, 515, A38 (9 страниц).
46. Hovatta, T., Lister, M. L., Kovalev, Y. Y., Pushkarev, A. B., Savolainen, T., “The Relation between Radio Polarization and Gamma-ray Emission in AGN Jets”, 2010, *International Journal of Modern Physics D*, 19, 943-948.
47. Abdo, A. A. (коллаборация Fermi), et al. (всего 257 авторов, включая Ю. Ю. Ковалева), “The Spectral Energy Distribution of Fermi bright blazars”, 2010, *ApJ*, 716, 30-70.
48. Savolainen, T., Homan, D. C., Hovatta, T., Kadler, M., Kovalev, Y. Y., Lister, M. L., Ros, E., Zensus, J. A., “Relativistic beaming and gamma-ray brightness of blazars”, 2010, *A&A*, 512, A24 (6 страниц).
49. Abdo, A. A. (коллаборация Fermi), et al. (всего 208 авторов, включая Ю. Ю. Ковалева), “PKS 1502+106: A New and Distant Gamma-ray Blazar in Outburst Discovered by the Fermi Large Area Telescope”, 2010, *ApJ*, 710, 810-827.
50. Abdo, A. A. (коллаборация Fermi), et al. (всего 368 авторов, включая Ю. Ю. Ковалева), “Fermi Large Area Telescope Observations of Markarian 421: The Missing Piece of its Spectral Energy Distribution”, 2011, *ApJ*, 736, id.131 (22 страницы).
51. Foschini, L., Ghisellini, G., Kovalev, Y. Y., et al., “The first gamma-ray outburst of a narrow-line Seyfert 1 galaxy: the case of PMN J0948+0022 in 2010 July”, 2011, *MNRAS*, 413, 1671-1677.
52. Abdo, A. A. (коллаборация Fermi), et al. (всего 454 авторов, включая Ю. Ю. Ковалева), “Insights Into the High-energy gamma-ray Emission of Markarian 501 from Extensive Multifrequency Observations in the Fermi Era”, 2011, *ApJ*, 727, id.129 (26 страниц).

## Список литературы

- Abdo, A. A., Ackermann, M., Ajello, M., et al. 2009, *ApJS*, 183, 46
- Abdo, A. A., Ackermann, M., Ajello, M., et al. 2010, *ApJS*, 188, 405
- Acciari, V. A., Aliu, E., Arlen, T., et al. 2009, *Science*, 325, 444
- Atwood, W. B., Abdo, A. A., Ackermann, M., et al. 2009, *ApJ*, 697, 1071
- Beasley, A. J., Gordon, D., Peck, A. B., Petrov, L., MacMillan, D. S., Fomalont, E. B., & Ma, C. 2002, *ApJS*, 141, 13
- Bietenholz, M. F., Bartel, N., & Rupen, M. P. 2004, *ApJ*, 615, 173
- Blandford, R. D., & Königl, A. 1979, *ApJ*, 232, 34
- Casandjian, J.-M., & Grenier, I. A. 2008, *A&A*, 489, 849
- Cohen, M. H., & Shaffer, D. B. 1971, *AJ*, 76, 91
- Fey, A. L., Ma, C., Arias, E. F., Charlot, P., Feissel-Vernier, M., Gontier, A.-M., Jacobs, C. S., Li, J., & MacMillan, D. S. 2004, *AJ*, 127, 3587
- Fomalont, E. B., Petrov, L., MacMillan, D. S., Gordon, D., & Ma, C. 2003, *AJ*, 126, 2562
- Hartman, R. C., Bertsch, D. L., Bloom, S. D., et al. 1999, *ApJS*, 123, 79
- Healey, S. E., Romani, R. W., Cotter, G., et al., L. C. 2008, *ApJS*, 175, 97
- Healey, S. E., Romani, R. W., Taylor, G. B., Sadler, E. M., Ricci, R., Murphy, T., Ulvestad, J. S., & Winn, J. N. 2007, *ApJS*, 171, 61
- Hirsch, J. E. 2005, *PNAS*, 102, 16569
- Jennison, R. C. 1958, *MNRAS*, 118, 276
- Kadler, M., Ros, E., Lobanov, A. P., Falcke, H., & Zensus, J. A. 2004, *A&A*, 426, 481
- Kardashev, N. S. 1997, *Experimental Astronomy*, 7, 329
- Kellermann, K. I., & Pauliny-Toth, I. I. K. 1969, *ApJ*, 155, L71
- Kovalev, Y. A. 1997, *Bull. Special Astrophys. Obs.*, 44, 50
- Kurtz, M. J., Eichhorn, G., Accomazzi, A., Grant, C. S., Murray, S. S., & Watson, J. M. 2000, *A&AS*, 143, 41
- Kus, A. J. 1993, in *Sub-arcsecond Radio Astronomy*, ed. R. J. Davis & R. S. Booth, 365
- Lara, L., Alberdi, A., Marcaide, J. M., & Muxlow, T. W. B. 1994, *A&A*, 285, 393
- Lobanov, A., & Zensus, J. A. 2007, in *Exploring the Cosmic Frontier, ESO Astrophysics Symposia*, ed. A. P. Lobanov, J. A. Zensus, C. Cesarsky, & P. J. Diamond, 147–162
- Lobanov, A. P. 1996, PhD thesis, New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro, NM, USA (1996)
- Lobanov, A. P. 1998, *A&A*, 330, 79
- Lovell, J. E. J., Jauncey, D. L., Bignall, H. E., Kedziora-Chudczer, L., Macquart, J.-P., Rickett, B. J., & Tzioumis, A. K. 2003, *AJ*, 126, 1699
- Ma, C., Arias, E. F., Eubanks, T. M., Fey, A. L., Gontier, A.-M., Jacobs, C. S., Sovers, O. J., Archinal, B. A., & Charlot, P. 1998, *AJ*, 116, 516
- Marcaide, J. M., Elosegui, P., & Shapiro, I. I. 1994, *AJ*, 108, 368
- Massaro, E., Giommi, P., Leto, C., Marchegiani, P., Maselli, A., Perri, M., Piranomonte, S., & Sclavi, S. 2009, *A&A*, 495, 691
- Mattox, J. R., Hartman, R. C., & Reimer, O. 2001, *ApJS*, 135, 155
- Napier, P. J. 1994, in *IAU Symp. 158: Very High Angular Resolution Imaging*, Vol. 158, 117



- Paragi, Z., Fejes, I., & Frey, S. 2000, in International VLBI Service for Geodesy and Astrometry: 2000 General Meeting Proceedings, ed. F. Takahashi, 342
- Porcas, R. W., & Rioja, M. J. 1997, in Proceedings of the 12th working meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, ed. B. R. Pettersen, 133–143
- Readhead, A. C. S. 1994, *ApJ*, 426, 51
- Readhead, A. C. S., & Wilkinson, P. N. 1978, *ApJ*, 223, 25
- Rees, M. J. 1984, *ARA&A*, 22, 471
- Ros, E., & Lobanov, A. P. 2001, in Proceedings of the 15th Workshop Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry. Institut d'Estudis Espacials de Catalunya, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Barcelona, Spain, ed. D. Behrend & A. Rius, 208
- Sokolovsky, K. V., Kovalev, Y. Y., Pushkarev, A. B., & Lobanov, A. P. 2011, *A&A*, 532, A38
- Sowards-Emmerd, D., Romani, R. W., & Michelson, P. F. 2003, *ApJ*, 590, 109
- Sowards-Emmerd, D., Romani, R. W., Michelson, P. F., & Ulvestad, J. S. 2004, *ApJ*, 609, 564
- Матвеевко, Л. И., Кардашев, Н. С., Шоломицкий, Г. Б. 1965, *Известия ВУЗов Радиофизика*, 8, 651