

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи

Попков Александр Викторович

**Свойства активных ядер галактик, полученные из анализа
радионаблюдений их полных выборок**

Специальность 01.03.02 —
«Астрофизика и звездная астрономия»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук, член-корр. РАН
Ковалев Юрий Юрьевич

Официальные оппоненты: **Байкова Аниса Талгатовна**,
доктор физико-математических наук,
Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН (ГАО РАН),
главный научный сотрудник
Зинченко Игорь Иванович,
доктор физико-математических наук,
Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН (ИПФ РАН),
заведующий отделом радиоприемной аппаратуры и миллиметровой радиоастрономии

Ведущая организация: Крымская астрофизическая обсерватория РАН (КрАО РАН)

Защита состоится 28 сентября 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, 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».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, ФИАН (АКЦ), ученому секретарю диссертационного совета Д 002.023.01.

Автореферат разослан июля 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 002.023.01,

кандидат физико-математических наук

Н. Н. Шахворостова

Общая характеристика работы

Актуальность темы и степень ее разработанности

Активные ядра галактик (АЯГ) — одни из самых мощных источников излучения во Вселенной. Их болометрическая светимость достигает 10^{47} эрг/с [1]. Согласно современным представлениям, в центре АЯГ находится сверхмассивная чёрная дыра [2—4]; аккреция вещества на неё является источником энергии АЯГ. При определённых условиях в результате аккреции формируются релятивистские струи, или джеты, в двух противоположных направлениях [например, 5; 6]. В данной работе будут рассматриваться только АЯГ с джетами, которые также называют радиогромкими из-за их большой светимости в радиодиапазоне [7]. Джеты распространяются, оставаясь коллимированными, на расстояния до нескольких мегапарсек [8]. Состав джетов, механизм ускорения частиц в них и их излучения до сих пор являются предметами дискуссий [6], хотя с их открытия прошло более 100 лет.

Активные ядра галактик наблюдаются с очень высоким угловым разрешением с помощью радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ) [9; 10]. Это позволяет исследовать компактные (парсековых масштабов) центральные области джета, близкие к сверхмассивной чёрной дыре, в которых джет формируется, ускоряется и коллимируется. К примеру, Телескопом Горизонта Событий (ЭНТ) было получено первое изображение тени сверхмассивной чёрной дыры в центре галактики М87 на длине волны 1.3 мм с разрешением 20 угловых микросекунд [4]. С помощью наземно-космического интерферометра «Радиоастрон» построены карты джетов ряда квазаров на сантиметровых волнах с угловым разрешением до 15 микросекунд дуги и с линейным разрешением до сотых долей парсека [например, 11—13], а также проведён обзор около 250 АЯГ [14]. Массовые наземные РСДБ-обзоры тысяч АЯГ, проведённые в последние десятилетия [15, также ссылки там], позволили как создать высокоточную квазиинерциальную систему небесных координат [16], так и исследовать свойства компактных АЯГ на больших выборках.

Синхротронное излучение было предложено как механизм излучения АЯГ около полувека назад и позволило объяснить множество наблюдаемых в них феноменов [17—19]. Оптически тонкие синхротронные источники имеют круто падающий континуумный спектр, хорошо описываемый степенным законом $S \propto \nu^\alpha$, где S — плотность потока, ν — частота, α — спектральный индекс. Здесь и далее крутым будем называть спектр с $\alpha < -0.5$. У источников, в которых синхротронное самопоглощение играет существенную роль, $\alpha \geq -0.5$; будем называть такие спектры плоскими. В АЯГ протяжённые структуры, такие как джеты и радиоизлучающие области, их окружающие (т. н. «радиоуши»), являются оптически тонкими. Компактное же видимое начало джета непрозрачно из-за синхротронного самопоглощения и, как показывают и наблюдения [например, 20], и теория [например, 21], имеет плоский спектр. Таким образом,

радиоспектр источника косвенно характеризует его структуру. Однако наблюдения также показывают, что эта связь не является прямой и однозначной. С одной стороны, опыт РСДБ-обзоров подтверждает, что АЯГ с плоским радиоспектром более компактны и, как следствие, дают больший процент РСДБ-детектированных [например, 22]. Здесь и далее РСДБ-компактными, или просто компактными, будем называть источники, имеющие достаточно яркие структуры с достаточно малыми характерными угловыми размерами $\theta \lesssim 0.1''$ для детектирования в РСДБ-наблюдениях. С другой стороны, было найдено и исследовано с помощью РСДБ определённое количество компактных источников с крутым спектром [например, 23; 24], в которых на парсековых масштабах доминируют оптически тонкие джеты или «мини-радиоуши». Эти и другие работы показали, что многие из таких источников выглядят как «уменьшенные» аналоги классических радиогалактик [например, 25]. Следовательно, они либо являются ранними стадиями эволюции радиогалактик, либо находятся в повышенной плотной межгалактической среде, препятствующей распространению джетов на большие расстояния [26; 27, также ссылки там]. Это вызывает повышенный интерес к компактным источникам с крутым спектром [27].

Чтобы разобраться в обсуждавшейся выше связи спектров и структуры АЯГ, необходимы РСДБ-наблюдения достаточно большой несмещённой выборки, включающей источники независимо от типа их спектра. Это также важно для оценки степени полноты каталогов компактных источников, полученных по РСДБ-обзорам источников только с плоским спектром [например, 28; 29]. К настоящему времени опубликовано только несколько работ по статистически полным РСДБ-обзорам без отбора источников по спектральному индексу. Пирсон и Ридхэд [22; 30] наблюдали с помощью РСДБ на частоте 5 ГГц полную выборку 65 источников с интегральной плотностью потока на 5 ГГц более 1.3 Ян. Среди них авторы нашли 10 компактных источников с крутым спектром. Впоследствии в работах [31—33] эта выборка была расширена до 200 объектов снижением предела по плотности потока до 0.7 Ян, однако анализ связи структуры с радиоспектрами для расширенной выборки не был представлен. Также не анализировалась эта связь в других РСДБ-обзорах полных по плотности потока выборок: Болонской полной выборке [34; 35] и недавних глубоких обзорах mJIVE-20 [36], COSMOS [37] и GOODS-N [38]. Кроме того, в трёх последних наблюдались малые области неба, вследствие чего недостаточно полно охвачены яркие источники. Таким образом, задача проведения и анализа большого РСДБ-обзора статистически полной выборки по-прежнему актуальна. Этой задаче посвящена первая часть диссертации.

Значение широкополосных радиоспектров для исследований АЯГ не исчерпывается возможностью предсказывать по ним структуру источников. Регулярные наблюдения радиоспектров позволяют наиболее надёжно отслеживать переменность АЯГ, которая, за очень редкими исключениями, непериодична и имеет вспышечный характер. Поиск связи между вспышками в разных диапазонах излучения — важный метод многоволновой астрономии. В последние

годы стали доступны новые каналы информации об астрофизических объектах, помимо электромагнитного излучения. В частности, активно развивается нейтринная астрофизика. В 2018 году было объявлено об отождествлении источника высокоэнергетичных нейтрино с блазаром TXS 0506+056 [39; 40]. Так как в данном отождествлении большую роль сыграло наличие вспышки в гамма-диапазоне, одновременной с IceCube-170922A, последовали работы, имевшие целью выяснить, может ли популяция гамма-ярких блазаров обеспечить наблюдаемый поток нейтрино высоких энергий. В результате было показано, что вклад этой популяции может объяснить только малую часть регистрируемого потока этих частиц [41; 42]. Этот факт в сочетании с трудностями в объяснении совокупности данных по нейтрино и по электромагнитному излучению от TXS 0506+056 с помощью имеющихся теоретических моделей [43, также ссылки там] привёл многих исследователей к выводу об уникальности данного источника [например, 44]. В связи с этим, актуальной является задача дальнейшего наблюдательного исследования TXS 0506+056 и сравнения его характеристик с типичными характеристиками блазаров. Для этого хорошо подходит радиодиапазон электромагнитного излучения, в котором блазары являются яркими за счёт синхротронного излучения релятивистских джетов, усиленного эффектом Доплера, подробнее о котором говорится ниже. При этом, выборки по плотности радиопотока являются более представительными для класса блазаров как целого, так как только часть блазаров детектируются в гамма-диапазоне [например, 45].

Так как частицы в джетах АЯГ движутся с ультрарелятивистскими скоростями, на их наблюдаемое излучение значительно влияет релятивистский эффект Доплера. Величина, его характеризующая — Доплер-фактор δ . Знание этой величины необходимо, во-первых, для оценки истинной скорости течения вещества в джете. Она, в свою очередь, является важным параметром теоретических моделей АЯГ, таких как обсуждавшиеся выше в связи с TXS 0506+056. Во-вторых, информация о Доплер-факторе необходима для сравнения наблюдаемых характеристик джетов с теоретическими оценками. К примеру, «Радиоастрон» обнаружил у ряда АЯГ экстремальные яркостные температуры более 10^{13} К [например, 11; 46; 47]. Они на два-три порядка превышают значение $10^{11.5}$ К, при котором наступает так называемая «комптоновская катастрофа» [48; 49] — быстрое высвечивание энергии релятивистских частиц вследствие эффекта обратного комптоновского рассеяния. Чтобы объяснить наличие столь высоких яркостных температур у значительного количества источников, было выдвинуто несколько предположений [например, 46]. Одно из них заключается в том, что характерное значение Доплер-фактора джетов АЯГ $\delta \sim 100$ и более. В то же время, различные методы определения Доплер-фактора из наблюдений дают на порядок меньшие характерные значения [45; 50—53]. При этом их результаты значительно расходятся друг с другом. В связи с этим, важно понять, какие методы дают самые достоверные результаты. Среди наиболее массово используемых в настоящее время методов следует отметить, во-первых, основанный на наблюдении обсуждавшейся выше переменности радиоизлучения и анализе

вспышек [50—52]. Во-вторых, существует метод оценки Доплер-фактора по времени затухания ярких деталей джета с кажущимся сверхсветовым движением [53]. Третий метод использует РСДБ-измерения яркостной температуры [54] и предположения о величине яркостной температуры в собственной системе отсчёта излучающей области. В работе [55] был предложен способ определения собственной яркостной температуры непосредственно из измерений видимой яркостной температуры и скорости джета для достаточно большой и статистически полной по плотности потока выборки АЯГ. В сочетании с третьим методом это даёт возможность оценить по РСДБ-наблюдениям полной выборки источников их Доплер-факторы без априорных предположений о величине собственной яркостной температуры, что является важным достоинством данного подхода.

Целями данной работы являются исследование свойств компактных джетов АЯГ и физики происходящих в них процессов, а также уточнение долей различных классов объектов в популяции АЯГ с помощью анализа РСДБ-наблюдений с высоким угловым разрешением и широкополосных радиоспектров для статистически полных выборок АЯГ.

Для достижения поставленных целей были решены следующие **задачи**:

- На основе совместного анализа наблюдений на РСДБ-сети Very Long Baseline Array (VLBA) статистически полной по интегральной плотности радиопотока выборки 482 активных ядер галактик и широкополосных радиоспектров этих источников определить количество и исследовать свойства РСДБ-компактных объектов с крутым и плоским радиоспектром.
- Изучить особенности активности блазара TXS 0506+056 — кандидата в источники нейтрино высоких энергий — и сравнить его характеристики в радиодиапазоне с характеристиками других источников полной выборки блазаров.
- Получить несмещённые оценки Доплер-факторов джетов АЯГ путём сравнения значений, определённых по РСДБ-наблюдениям яркостной температуры радиоядра для полной по плотности РСДБ-потока выборки, со значениями, даваемыми другими методами.

Научная новизна

Научная новизна первой части работы состоит в том, что впервые с помощью РСДБ была исследована статистически полная, отобранная исключительно по интегральной плотности радиопотока выборка активных ядер галактик столь большого объёма (482 объекта), охватывающая большую область неба (примерно 700 квадратных градусов). Это позволило получить несмещённые оценки долей компактных объектов с крутым и плоским спектрами в популяции радиогромких АЯГ. В результате было подтверждено, что практически 100% источников с плоским радиоспектром компактны — их характерный угловой размер, согласно проведённым измерениям, менее $0.01''$. Также в результате было открыто несколько десятков новых компактных объектов с крутым спектром.

Было показано, что около половины компактных источников, протектированных РСДБ на 2 ГГц, имеют крутой радиоспектр, что говорит о доминировании в их радиоизлучении оптически тонких структур, таких как внешние части джета или радиоизлучающие облака плазмы. Это меняет ранее распространённое представление о популяции РСДБ-компактных АЯГ как состоящей практически исключительно из блазаров.

В работе представлены результаты многолетних наблюдений широкополосного радиоспектра источника TXS 0506+056 — первого блазара, отождествлённого с высокой достоверностью с источником нейтрино высоких энергий [39; 40]. Впервые было показано, что в радиодиапазоне данный источник является типичным переменным блазаром, что ставит под сомнение выдвигавшиеся ранее [44] утверждения о его уникальности.

Впервые получены выводы о том, какие оценки Доплер-фактора джетов АЯГ надёжны, обоснованные согласием в пределах погрешностей результатов принципиально различных, независимых методов для большой выборки объектов. Это решило проблему расхождения оценок данной величины различными методами, существовавшую много лет.

Теоретическая и практическая значимость

Определение доли компактных источников с крутым спектром в полной выборке позволяет оценить степень неполноты РСДБ-каталогов, составленных по наблюдениям только источников с плоским спектром. Так, на частоте 8.6 ГГц каталог РСДБ-компактных источников, не включающий источники с крутым спектром, будет полон для плотностей потока выше 200 мЯн примерно на 80%, а среди более слабых источников уровень полноты будет значительно меньше. Полученные в данной работе корреляции между свойствами радиоспектра и параметрами парсековой структуры АЯГ позволят оценивать вероятность РСДБ-детектирования источника по его спектру и оптимально планировать новые РСДБ-обзоры. В частности, включение в РСДБ-обзоры источников с крутым радиоспектром позволит и уже позволило значительно улучшить полноту РСДБ-каталогов внегалактических радиоисточников [например, 15]. С теоретической точки зрения, полнота РСДБ-каталогов важна для различных статистических исследований, в том числе в области многоканальной астрономии — см., например, недавние работы, показавшие статистически значимую корреляцию между направлениями прихода космических нейтрино и направлениями на компактные АЯГ [56; 57]. С практической точки зрения, увеличение количества известных компактных внегалактических радиоисточников означает уплотнение сетки опорных источников квазиинерциальной системы небесных координат.

Подтверждение радиовспышки блазара TXS 0506+056, начало которой совпало с моментом регистрации нейтрино в направлении от этого источника, а также сделанный вывод о распространённости подобных источников в популяции блазаров дали толчок работам по отождествлению источников космических нейтрино с радиояркими блазарами, в том числе упомянутым выше [56—58], и

поставили ограничения на модели генерации нейтрино, т. к. требуют связи процессов, отвечающих за генерацию нейтрино и синхротронного радиоизлучения джета.

Полученные в результате проведённого анализа несмещённые оценки Доплер-фактора могут быть использованы в широком круге исследований джетов АЯГ для перевода наблюдаемых параметров джета в параметры в собственной системе отсчёта движущейся плазмы. В частности, эти оценки показывают, что доплеровское усиление само по себе не может объяснить экстремально высокие яркостные температуры, открытые «Радиоастроном», что сужает круг их возможных объяснений.

Методология и методы исследования

В работе применялся метод радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ) [9; 10]. Для обработки РСДБ-наблюдений применялись общепринятые методы: априорная калибровка в программных пакетах AIPS [59] и PIMA [60], а также гибридное картографирование с использованием метода CLEAN [61] в пакете Difmap [62]. Характерные размеры и яркостные температуры источников определялись путём подгонки под интерферометрические данные моделей распределения яркости источника методом максимального правдоподобия. Для определения яркостной температуры радиоядер джетов АЯГ в системе покоя излучающей области применялось сравнение результатов популяционного моделирования с наблюдаемой зависимостью между яркостной температурой и видимой скоростью джета. Широкополосные радиоспектры наблюдались с помощью радиотелескопа РАТАН-600 [63; 64], а также были взяты из литературы. Диссертантом была разработана программа автоматической генерации расписаний наблюдений на РАТАН-600, минимизирующая время на переустановку антенны и облучателя путём распределения источников по суточным спискам с учётом их склонения. В работе использовались различные статистические методы: бутстрэппинг, корреляционный тест Кендалла и др.

Основные положения, выносимые на защиту

1. В статистически полной выборке 482 активных ядер галактик с интегральной плотностью потока на частоте 1.4 ГГц более 200 мЯн и склонением $\geq +75^\circ$ исследована связь между структурой и широкополосным радиоспектром. Компактные структуры масштабов сотен парсек и менее были обнаружены в 100% источников с пиковой формой спектра, 98% источников с плоским спектром и 27% источников с круто падающим спектром. Продемонстрировано, что РСДБ-компактные внегалактические радиоисточники состоят из двух классов объектов примерно равной численности: блазаров, у которых в радиоизлучении доминирует оптически непрозрачное радиоядро джета, и компактных источников с круто падающим РСДБ-спектром, у которых доминируют оптически прозрачные джеты или облака плазмы парсековых масштабов. Это подтверждается обнаруженными статистически значимыми отрицательной корреляцией углового размера компактных компонент

со спектральным индексом и положительной корреляцией яркостной температуры со спектральным индексом.

2. На основании многолетних многочастотных наблюдений на РАТАН-600 блазара TXS 0506+056, ассоциированного ранее с источником нейтрино высоких энергий, найдено, что его широкополосный радиоспектр относится к классу плоских и является типичным для переменных АЯГ. Нейтринные события в 2014-2015 и в 2017 годах, отождествлённые с этим блазаром, пришлись на период начала и развития в нём сильной вспышки на сантиметровых длинах волн. Это независимо подтверждает, что данный блазар является вероятным источником высокоэнергичных нейтрино, и указывает на связь процессов генерации нейтрино и вспышек синхротронного радиоизлучения в ядрах блазаров.
3. Определено, что значения Доплер-фактора джетов АЯГ, полученные для большой статистически полной выборки по РСДБ-измерениям яркостной температуры их ядер, согласуются со значениями, независимо определёнными ранее из анализа вспышек радиоизлучения, в пределах погрешностей методов. Типичное значение Доплер-фактора составляет около 10. Это соответствует независимым оценкам, полученным из анализа РСДБ-кинематики джетов. Делается вывод о достоверности полученных оценок Доплер-фактора.

Достоверность результатов обеспечивается использованием наблюдений ведущих современных отечественных и зарубежных радиотелескопов и радиоинтерферометров, выверенных и хорошо себя зарекомендовавших методов обработки и анализа данных, оценки достоверности статистических гипотез, а также проведением анализа по статистически полным выборкам. РСДБ-данные по первой части работы (обзор несмещённой выборки) были обработаны независимо в двух программных пакетах, AIPS и PIMA; результаты обработки согласуются в пределах погрешностей. Был проведён глубокий анализ с целью поиска оптимальных параметров самокалибровки РСДБ-данных для избежания внесения ошибок в коррелированную плотность потока на этапе обработки. Точность амплитудной калибровки наблюдений на РАТАН-600 контролировалась путём сравнения независимых измерений на двух секторах антенны [65; 66].

Апробация работы

Результаты были опубликованы в ведущих международных научных журналах, а также доложены на семинарах Астрокосмического центра и Отдела теоретической физики ФИАН им. П. Н. Лебедева, на 8 российских и 4 международных научных конференциях, включая:

- 48th Young European Radio Astronomers Conference (48-я европейская конференция молодых радиоастрономов), 4–6 сентября 2018 г., Двингелоо, Нидерланды.
- 14th European VLBI Network Symposium (14-й симпозиум Европейской РСДБ-сети), 8–11 октября 2018 г., Гранада, Испания.

- Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра — 2018». 18–21 декабря 2018 г., Москва.
- «Актуальные проблемы внегалактической астрономии», 24–26 апреля 2019 г., Пущино, Московская обл.
- «A Centenary of Astrophysical Jets: Observation, Theory, and Future Prospects» («Сто лет с открытия астрофизических джетов: наблюдения, теория и перспективы на будущее»), 23–26 июля 2019 г., Обсерватория Джодрелл-Бэнк, Великобритания.
- Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра — 2019», 17–20 декабря 2019 г., Москва.
- 6th Workshop on Compact Steep Spectrum and GHz-Peaked Spectrum Sources (6-й семинар по компактным радиоисточникам с крутым спектром и радиоисточникам с гигагерцовым пиком спектра), 10–14 мая 2021 г., Торунь, Польша (дистанционно).

Публикации автора по теме диссертации

Основные результаты диссертационной работы изложены в 3 научных статьях [A1–A3], опубликованных в рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК.

- A1. *Popkov A. V., Kovalev Y. Y., Petrov L. Y., Kovalev Y. A.* Parsec-scale Properties of Steep- and Flat-spectrum Extragalactic Radio Sources from a VLBA Survey of a Complete North Polar Cap Sample // *The Astronomical Journal*. — 2021. — Feb. — Vol. 161, no. 2. — P. 88.
- A2. *Kovalev Y. A., Kardashev N. S., Kovalev Y. Y., Sokolovsky K. V., Voitsik P. A., Edwards P. G., Popkov A. V., Zhekanis G. V., Sotnikova Y. V., Nizhelsky N. A., Tsybulev P. G., Erkenov A. K., Bursov N. N.* RATAN-600 and RadioAstron reveal the neutrino-associated blazar TXS 0506+056 as a typical variable AGN // *Advances in Space Research*. — 2020. — Jan. — Vol. 65, no. 2. — P. 745–755.
- A3. *Homan D. C., Cohen M. H., Hovatta T., Kellermann K. I., Kovalev Y. Y., Lister M. L., Popkov A. V., Pushkarev A. B., Ros E., Savolainen T.* MOJAVE. XIX. Brightness Temperatures and Intrinsic Properties of Blazar Jets // *The Astrophysical Journal*. — 2021. — Dec. — Vol. 923, no. 1. — P. 67.

Личный вклад

В работе [A1] вклад диссертанта основной и включает обработку РСДБ-данных в пакетах AIPS и Difmap, астрофизический анализ результатов, обсуждение и подготовку публикации.

В работе [A2] вклад диссертанта заключается в участии в подготовке расписаний и сопровождении наблюдений на РАТАН-600 и в участии, наравне с другими соавторами, в проведении анализа, обсуждении результатов и подготовке публикации.

В работе [A3] вклад диссертанта заключается в анализе полученных оценок Доплер-фактора для выборки АЯГ, определении величины и значимости систематических сдвигов результатов, а также в участии, наравне с другими соавторами, в обсуждении результатов и подготовке публикации.

Объём и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 126 страниц, включая 26 рисунков и 8 таблиц. Список литературы содержит 167 наименований.

Содержание работы

Во **введении** приведён обзор современного состояния наблюдательного исследования свойств радиогромких АЯГ на парсекowych масштабах и их широкополосных радиоспектров, обосновывается актуальность темы диссертации. Затем формулируются цели и задачи работы, обсуждается её научная новизна и значимость, перечисляются использованные методы исследования. Далее приводятся положения, выносимые на защиту, и сведения об апробации результатов и личном вкладе автора в процесс их получения.

Первая глава посвящена результатам совместного анализа наблюдений на Very Long Baseline Array (VLBA, Антенная решётка со сверхдлинной базой) и широкополосных радиоспектров для статистически полной выборки обзора Северной полярной шапки [A1].

В §1.1 описана выборка и её наблюдения на VLBA. В выборку вошли внегалактические радиоисточники из каталога NVSS [67], удовлетворяющие двум критериям: плотность потока $S_{NVSS} \geq 200$ мЯн на частоте каталога 1.4 ГГц и склонение $\geq +75^\circ$ — всего 482 источника. Источники выборки наблюдались на VLBA одновременно в двух диапазонах, 2.3 ГГц и 8.6 ГГц, примерно по 8 минут каждый.

В §1.2 описаны калибровка данных VLBA и процедура картографирования источников. Так как для данной работы важной величиной является доля протектированных с помощью РСДБ источников выборки, а значительное количество источников находятся вблизи предела детектирования, особое внимание было уделено калибровке данных и отсеиванию ложных детектирований. Калибровка была проведена независимо в двух программных пакетах: диссертантом в пакете AIPS [59] и соавтором работы [A1] в пакете PIMA [60]. Результаты совпали в пределах погрешности амплитудной калибровки. На этапе гибридного картографирования для слабых и/или протяжённых источников с низким отношением сигнал-шум была замечена хорошо известная проблема: неустойчивость результата картографирования относительно изменения шага временной сетки фазовой самокалибровки, особенно при малом шаге. В результате проведённого анализа для картографирования были отобраны те источники,

для которых фазовая самокалибровка устойчива. Было найдено, что для анализируемых данных оптимальный шаг временной сетки фазовой самокалибровки приблизительно равен 8 с. Для амплитудной самокалибровки также был проведён анализ на наличие или отсутствие искажений сигнала при её применении.

В §1.3 приведены результаты обзора на VLBA. Было продетектировано 162 источника выборки: 153 источника на 2.3 ГГц, 116 источников на 8.6 ГГц, из них 107 источников — в обоих диапазонах. Были определены следующие параметры источников: плотность потока S_{vlba} , продетектированная VLBA; плотность потока S_{unres} на угловых масштабах, соответствующих самым длинным базам VLBA; параметр компактности на килопарсековых масштабах C_{sd}^{vlba} , равный отношению S_{vlba} к интегральной плотности потока от всего источника S_{sd} , измеряемой одиночными антеннами; параметр компактности на парсековых масштабах $C_{vlba}^{unres} = S_{unres}/S_{vlba}$; спектральный индекс VLBA спектра α_{vlba} по двум частотам, 2.3 и 8.6 ГГц; характерный угловой размер источника θ и характерная яркостная температура T_b . Также были получены карты распределения яркости для 94 источников на 2.3 ГГц и 62 источников на 8.6 ГГц.¹

В §1.4 содержится информация о широкополосных спектрах источников выборки, взятых из литературы. Для 461 из 482 источников выборки нами были использованы спектры из работы [68], полученные на PATAH-600 на 6 частотах: 1.1, 2.3, 4.8, 7.7, 11.2 и 21.7 ГГц — в апреле-августе 2005 г., менее чем за год до наших наблюдений на VLBA. Для остальных 21 объектов широкополосные спектры были взяты из базы данных CATS² [69]. По спектрам были определены интегральные плотности потока S_{sd} на частотах 2.3 и 8.6 ГГц и спектральный индекс α_{sd} в этом интервале частот.

В §1.5 приведены результаты анализа связи параметров, полученных из РСДБ-наблюдений и из интегральных широкополосных спектров. Статистика РСДБ-детектирований различна для источников с различными типами спектра (§1.5.1): VLBA продетектировала все источники с пиком в спектре, более 95% источников с плоским спектром ($\alpha_{sd} \geq -0.5$) и около 27% источников с крутым спектром ($\alpha_{sd} < -0.5$). При этом, за счёт доминирования источников с крутым спектром в полной выборке, количество продетектированных на VLBA источников с крутым спектром почти в три раза больше количества продетектированных источников с плоским спектром. В §1.5.2 приводятся доли объектов различных типов в выборке. 37 источников (8% выборки) компактны и имеют плоский спектр как интегральной, так и VLBA-плотности потока. Это классические компактные АЯГ с плоским спектром, или блазары, которые обычно изучаются РСДБ. 30 источников (6% выборки) имеют крутой интегральный спектр, но плоский VLBA-спектр. При этом их килопарсековая компактность достаточно мала, но характерные размеры и яркостные температуры того же порядка, что и у компактных АЯГ с плоским спектром. Это позволяет сделать

¹Доступны в онлайн-версии статьи [A1]: <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-3881/abd18c>

²<https://www.sao.ru/cats/>

вывод, что в этих источниках в интегральной плотности потока доминируют протяжённые структуры, но парсековые релятивистские джеты также достаточно ярки и наблюдаются с помощью РСДБ. Суммарная доля источников выборки, показывающих наличие наблюдаемых релятивистских джетов и их непрозрачного ядра, равна 14%. Крутой VLBA-спектр имеют 86 источников (18%); из них 82, имеющие также крутой интегральный спектр, являются хорошими кандидатами в компактные источники с крутым спектром (CSS). Эти источники имеют, в среднем, меньшую яркостную температуру, чем источники с плоским спектром. Это в сочетании с крутым спектром означает, что в их излучении доминируют компактные, но оптически тонкие структуры, такие как джет или окружающие его облака плазмы («мини-радиоуши»). 66% выборки составляют протяжённые источники с крутым спектром, не продетектированные VLBA.

В §1.5.3 приведены найденные корреляции параметров структуры и спектра источников. Вычислялся обобщённый коэффициент корреляции Кендалла, учитывающий не только измерения, но и верхние и нижние пределы [70]. Положительная статистически значимая корреляция имеется между параметром килопарсековой компактности C_{sd}^{vlba} и интегральным спектральным индексом α_{sd} ; между параметром парсековой компактности C_{vlba}^{unres} и спектральным индексом на VLBA α_{vlba} ; а также между яркостной температурой и спектральным индексом на обоих масштабах. Угловой размер источников и их спектральный индекс имеют значимую отрицательную корреляцию. Эти корреляции подтверждают наши изложенные выше выводы о доминировании различных структур в компактных источниках с плоским и крутым спектрами.

В §1.5.4 представлен анализ переменности интегральной плотности потока источников выборки и её связи с параметрами парсековой структуры. Для этого данные по интегральным плотностям потока на 8 ГГц, описанные в §1.4, были дополнены измерениями из работ [71; 72] и из программы мониторинга компактных АЯГ на РАТАН-600 соавторов работы [A1]. Были определены амплитуда и индекс переменности на 8 ГГц для 167 источников. Все источники со значительной переменностью были продетектированы в наших наблюдениях на VLBA, т. е., являются компактными, что и ожидалось из соображений причинности. Обратное, однако, неверно: значительная часть компактных источников не проявляет переменности, превосходящей ошибки измерений. Главным образом, это компактные источники с крутым спектром. Это является ещё одним подтверждением того, что у этих источников ядро джета не наблюдается либо даёт малый вклад в полную плотность потока излучения.

В §1.6 обсуждаются физические и практические следствия полученных результатов и их сравнение с другими работами. В §1.7 суммированы основные результаты и выводы по Главе 1.

Вторая глава посвящена результатам мониторинга на РАТАН-600 широкополосного радиоспектра блазара TXS 0506+056 — кандидата в источники нейтрино высоких энергий [A2].

В §2.1 даётся краткий обзор опубликованных данных детектора нейтрино IceCube, касающихся блазара TXS 0506+056, а также основных параметров этого источника. 22 сентября 2017 г. было зарегистрировано нейтрино IceCube-170922A с энергией около 290 ТэВ [39]. Направление его прихода совпало в пределах погрешности с направлением на блазар TXS 0506+056, у которого в этот момент наблюдалась вспышка в гамма-диапазоне. Анализ более ранних данных IceCube выявил ещё 13 ± 5 нейтрино меньших энергий, зарегистрированных в сентябре 2014 г. — марте 2015 г., которые также с высокой вероятностью имеют своим источником этот блазар [40].

§2.2 посвящён описанию радиотелескопа РАТАН-600, методики наблюдений на нём и калибровки полученных данных, а также описанию программы мониторинга выборки блазаров. РАТАН-600 — это радиотелескоп Специальной астрофизической обсерватории РАН, имеющий форму кольца диаметром примерно 600 м. РАТАН-600 главным образом работает как пассажный инструмент, наблюдая источники в верхней и/или нижней кульминации. За одно наблюдение, длящееся менее 5 минут, измеряется широкополосный радиоспектр объекта. Это делает РАТАН-600 инструментом, прекрасно подходящим для обзоров больших выборок ярких источников на большом количестве частот. Эффективность массовых обзоров с помощью РАТАН-600 как пассажного инструмента во многом зависит от оптимизации расписания наблюдений. Диссертантом была разработана и использована программа для автоматизированного составления расписаний наблюдений, минимизирующая потери времени на переустановку антенны и позволяющая отнаблюдать максимально возможное в рамках ограничений телескопа число источников.

На РАТАН-600 более 20 лет проводится мониторинг более 500 компактных АЯГ (его первые результаты см. в [73; 74]). В выборку объектов мониторинга входит блазар TXS 0506+056. В §2.3 представлен анализ кривых блеска и широкополосных радиоспектров этого блазара на 6 частотах от 1 до 22 ГГц, полученных на основе 72 эпох наблюдений с 1997 по 2018 г. Среди них — наблюдение 22 сентября 2017 г., в день регистрации нейтрино с энергией 290 ТэВ. После минимума в 2013 году в источнике началась сильная долговременная вспышка. Момент прихода нейтрино высокой энергии приходится на период роста плотности потока источника, а время регистрации нейтрино более низких энергий — на самое начало вспышки. Это служит косвенным подтверждением отождествления источника нейтрино с TXS 0506+056. В исследуемом диапазоне частот спектр источника в большинство эпох суперплоский, т. е. имеет спектральный индекс $|\alpha| \leq 0.1$. Форма спектра и переменность TXS 0506+056 типична, подобный спектр имеет примерно 20% АЯГ выборки. Данный результат противоречит ранее имевшему место мнению об уникальности данного блазара [например, 44]. Это указывает на возможность значительного вклада блазаров в полный поток нейтрино высоких энергий (§2.4). Следовательно, джеты квазаров могут ускорять протоны до релятивистских энергий. Синхротронное

излучение таких протонов — одно из возможных объяснений экстремальных яркостей блазаров, открытых «Радиоастроном» [11; 46; 47]. В §2.5 приведены выводы по Главе 2.

Третья глава посвящена оценке релятивистского Доплер-фактора джетов АЯГ по РСДБ-измерениям яркостной температуры их ядер [A3]. Прямое измерение величины доплеровского смещения невозможно для джетов АЯГ ввиду отсутствия в их излучении спектральных линий. Как следствие, используются различные косвенные методы, кратко охарактеризованные в §3.1.

В §3.2 описана наблюдательная программа MOJAVE (Monitoring Of Jets in Active galactic nuclei with VLBA Experiments — Мониторинг джетов активных ядер галактик с помощью экспериментов VLBA). Это программа, начавшаяся в 2002 году как продолжение проводимого с 1994 года обзора АЯГ на VLBA на длине волны 2 см, в рамках которой на этой же длине волны (частота 15 ГГц) проводятся регулярные, раз в несколько месяцев, наблюдения нескольких сотен АЯГ с помощью РСДБ-решётки VLBA и по ним строятся изображения источников в полной и поляризованной интенсивности с миллисекундным угловым разрешением. Наблюдается, во-первых, статистически полная выборка из 232 АЯГ со склонением $> -30^\circ$, достигавших хотя бы раз за время наблюдений на VLBA плотности потока более 1.5 Ян. Во-вторых, наблюдались также несколько сотен более слабых АЯГ, отобранных вследствие их высокого потока в гамма-диапазоне либо по другим причинам особого интереса.

В §3.3 описывается методика измерения яркостных температур радиоядер АЯГ по данным MOJAVE, применённая в данной работе. Производилась подгонка модели, состоящей из одной эллиптической гауссианы в области ядра и набора CLEAN-компонент (дельта-функций) в области джета, под калиброванные комплексные видности каждого наблюдения источника. За яркостную температуру ядра на момент наблюдения принималась пиковая яркостная температура подогнанной гауссианы. Затем вычислялась медианная яркостная температура за всё время наблюдений в системе покоя родительской галактики T_b^{host} .

§3.4 излагает метод оценки яркостной температуры в собственной системе отчёта излучающей области T_b^{int} . Данный метод был предложен в [55] и в данной работе применён на основе новых, более полных данных. Вводится упрощающее предположение, что в медианном состоянии все источники выборки имеют одинаковую T_b^{int} . Популяционное моделирование из [45] показывает, что у 69% источников в ограниченной плотностью потока выборке угол наклона джета к направлению на наблюдателя θ меньше критического угла $\theta_{\text{cr}} = \arccos \beta$, где β — истинная скорость течения в джете в системе покоя родительской галактики в единицах скорости света. При $\theta = \theta_{\text{cr}}$ яркостная температура в системах отчёта родительской галактики и излучающей области связаны соотношением $T_b^{\text{host}} = \sqrt{1 + \beta_{\text{app}}^2} T_b^{\text{int}}$, где β_{app} — видимая скорость течения в джете в системе покоя родительской галактики в единицах скорости света, также измеряемая по данным MOJAVE. Согласие наблюдаемой зависимости между T_b^{host} и β_{app} и результатов популяционного моделирования достигается при $T_b^{\text{int}} = (4.1 \pm 0.6) \times 10^{10}$ К.

Это означает, что в медианном состоянии радиоядра джетов находятся вблизи состояния равномерного распределения энергии между частицами и магнитным полем [49]. По соотношению $\delta = T_b^{\text{host}}/T_b^{\text{int}}$ были определены Доплер-факторы δ либо их нижние пределы для 447 джетов. Медиана распределения $\delta \approx 11$ для всех исследованных источников и $\delta \approx 17$ в статистически полной выборке источников с плотностью потока выше 1.5 Ян. По Доплер-факторам и видимым скоростям джетов были получены Лоренц-факторы и величины углов джетов к лучу зрения для 309 АЯГ. Типичные значения по выборке составили около 10 для Лоренц-фактора и несколько градусов для угла.

В §3.5 приведены результаты сравнения определённых в данной работе Доплер-факторов со значениями из литературы. Наши результаты показывают хорошее согласие с Доплер-факторами, полученными моделированием вспышек по кривым блеска, наблюдаемых радиотелескопом OVRO на 15 ГГц [52]: медиана отношения значений равна 0.87 ± 0.06 , что находится в пределах погрешностей методов, а вероятность случайной корреляции между ними мала, $p \sim 10^{-12}$. При этом принципиально различны не только методы, которыми те и другие значения получены, но и состояния активности источников, которые они используют в анализе: медианное (спокойное) в нашем методе и вспышечное в [52]. Наши значения также значимо коррелируют с результатами, полученными методом, аналогичным использованному в [52], в более ранних работах [50] и [51]. Однако значения из [50; 51] систематически занижены примерно в два раза. Причина этого различия, предположительно, в том, что в [50; 51], в отличие от [52], источники наблюдались недостаточно часто — раз в несколько недель — что не позволило адекватно измерить параметры самых быстрых вспышек, дающих наиболее высокие Доплер-факторы. Метод по времени угасания РСДБ-компонент джетов, использованный в [53], даёт Доплер-факторы того же порядка, что и наш, однако корреляция между этими значениями слаба. Возможно, это вызвано нереалистичностью предположения в [53] о том, что время угасания синхротронного излучения компонент в собственной системе отсчёта равно времени прохождения света сквозь компоненту. Наше распределение Доплер-факторов согласуется с ранее восстановленным по кинематике джетов с помощью популяционного синтеза [45]. Всё это указывает на надёжность методов, использованных в [52] и нами, и даёт основания использовать эти результаты в дальнейших исследованиях АЯГ, в том числе, для интерпретации результатов наземно-космического интерферометра «Радиоастрон» (§3.6). В таком случае, экстремальные яркостные температуры, открытые на «Радиоастроне» [11; 46; 47], нельзя объяснить одним лишь доплеровским усилением. В §3.7 изложены выводы по Главе 3.

В **заключении** подведены итоги работы, обсуждаются перспективы дальнейших исследований по данной тематике.

Список литературы

1. *Woo J.-H., Urry C. M.* Active Galactic Nucleus Black Hole Masses and Bolometric Luminosities // *ApJ*. — 2002. — Nov. — Vol. 579, no. 2. — P. 530—544.
2. *Salpeter E. E.* Accretion of Interstellar Matter by Massive Objects // *ApJ*. — 1964. — Aug. — Vol. 140. — P. 796—800.
3. *Зельдович Я. Б., Новиков И. Д.* Излучение гравитационных волн телами, движущимися в поле коллапсирующей звезды // Доклады АН СССР. — 1964. — Т. 155, № 5. — С. 1033—1036.
4. *Event Horizon Telescope Collaboration, Akiyama K., Alberdi A., [et al.]*. First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole // *ApJL*. — 2019. — Apr. — Vol. 875, no. 1. — P. L1.
5. *Blandford R. D., Znajek R. L.* Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes // *MNRAS*. — 1977. — May. — Vol. 179. — P. 433—456.
6. *Blandford R., Meier D., Readhead A.* Relativistic Jets from Active Galactic Nuclei // *ARA&A*. — 2019. — Aug. — Vol. 57. — P. 467—509.
7. *Padovani P., Alexander D. M., Assef R. J., [et al.]*. Active galactic nuclei: what's in a name? // *A&A Rev*. — 2017. — Aug. — Vol. 25, no. 1. — P. 2.
8. *Oei M. S. S. L., van Weeren R. J., Hardcastle M. J., [et al.]*. The discovery of a radio galaxy of at least 5 Mpc // *A&A*. — 2022. — Apr. — Vol. 660. — A2.
9. *Матвеевко Л. И., Кардашев Н. С., Шоломицкий Г. Б.* О радиоинтерферометре с большой базой // Известия ВУЗов. Радиофизика. — 1965. — Т. 8, № 4. — С. 651—654.
10. *Thompson A. R., Moran J. M., Swenson George W. J.* Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy, 3rd Edition. — Springer, 2017.
11. *Gómez J. L., Lobanov A. P., Bruni G., [et al.]*. Probing the Innermost Regions of AGN Jets and Their Magnetic Fields with RadioAstron. I. Imaging BL Lacertae at 21 Microarcsecond Resolution // *ApJ*. — 2016. — Feb. — Vol. 817, no. 2. — P. 96.
12. *Giovannini G., Savolainen T., Orienti M., [et al.]*. A wide and collimated radio jet in 3C84 on the scale of a few hundred gravitational radii // *Nature Astronomy*. — 2018. — Apr. — Vol. 2. — P. 472—477.
13. *Vega-García L., Lobanov A. P., Perucho M., [et al.]*. Multiband RadioAstron space VLBI imaging of the jet in quasar S5 0836+710 // *A&A*. — 2020. — Sept. — Vol. 641. — A40.
14. *Kovalev Y. Y., Kardashev N. S., Sokolovsky K. V., [et al.]*. Detection statistics of the RadioAstron AGN survey // *Advances in Space Research*. — 2020. — Jan. — Vol. 65, no. 2. — P. 705—711.
15. *Petrov L.* The Wide-field VLBA Calibrator Survey: WFCS // *AJ*. — 2021. — Jan. — Vol. 161, no. 1. — P. 14.
16. *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. — Dec. — Vol. 644. — A159.

17. *Шкловский И. С.* О возможном вековом изменении потока и интенсивности радиоизлучения от некоторых дискретных источников // *Астрон. журн.* — 1960. — Т. 37, № 2. — С. 256—264.
18. *Шкловский И. С.* О возможном вековом изменении потока и спектра радиоизлучения источника 1934—63 // *Астрон. журн.* — 1965. — Т. 42, № 1. — С. 30—32.
19. *Кардашев Н. С.* Нестационарность спектров молодых источников нетеплового космического радиоизлучения // *Астрон. журн.* — 1962. — Т. 39, № 3. — С. 393—409.
20. *Hovatta T., Aller M. F., Aller H. D., [et al.].* MOJAVE: Monitoring of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. XI. Spectral Distributions // *AJ.* — 2014. — June. — Vol. 147, no. 6. — P. 143.
21. *Blandford R. D., Königl A.* Relativistic jets as compact radio sources. // *ApJ.* — 1979. — Aug. — Vol. 232. — P. 34—48.
22. *Pearson T. J., Readhead A. C. S.* The Milliarcsecond Structure of a Complete Sample of Radio Sources. II. First-Epoch Maps at 5 GHz // *ApJ.* — 1988. — May. — Vol. 328. — P. 114.
23. *Tzioumis A., King E., Morganti R., [et al.].* A sample of southern Compact Steep Spectrum radio sources: The VLBI observations // *A&A.* — 2002. — Sept. — Vol. 392. — P. 841—850.
24. *Dallacasa D., Orienti M., Fanti C., [et al.].* A sample of small-sized compact steep-spectrum radio sources: VLBI images and VLA polarization at 5 GHz // *MNRAS.* — 2013. — July. — Vol. 433, no. 1. — P. 147—161.
25. *Antonucci R. R. J.* VLA maps of 41 radio galaxies. // *ApJS.* — 1985. — Dec. — Vol. 59. — P. 499—511.
26. *O’Dea C. P.* The Compact Steep-Spectrum and Gigahertz Peaked-Spectrum Radio Sources // *PASP.* — 1998. — May. — Vol. 110, no. 747. — P. 493—532.
27. *O’Dea C. P., Saikia D. J.* Compact steep-spectrum and peaked-spectrum radio sources // *A&A Rev.* — 2021. — Dec. — Vol. 29, no. 1. — P. 3.
28. *Taylor G. B., Vermeulen R. C., Readhead A. C. S., [et al.].* A Complete Flux-Density-limited VLBI Survey of 293 Flat-Spectrum Radio Sources // *ApJS.* — 1996. — Nov. — Vol. 107. — P. 37.
29. *Kovalev Y. Y., Petrov L., Fomalont E. B., [et al.].* The Fifth VLBA Calibrator Survey: VCS5 // *AJ.* — 2007. — Apr. — Vol. 133, no. 4. — P. 1236—1242.
30. *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. — Aug. — Vol. 248. — P. 61—81.
31. *Polatidis A. G., Wilkinson P. N., Xu W., [et al.].* The First Caltech–Jodrell Bank VLBI Survey. I. $\lambda = 18$ Centimeter Observations of 87 Sources // *ApJS.* — 1995. — May. — Vol. 98. — P. 1.
32. *Thakkar D. D., Xu W., Readhead A. C. S., [et al.].* The First Caltech–Jodrell Bank VLBI Survey. II. $\lambda = 18$ Centimeter Observations of 25 Sources // *ApJS.* — 1995. — May. — Vol. 98. — P. 33.

33. *Xu W., Readhead A. C. S., Pearson T. J., [et al.]*. The First Caltech–Jodrell Bank VLBI Survey. III. VLBI and MERLIN Observations at 5 GHz and VLA Observations at 1.4 GHz // *ApJS*. — 1995. — Aug. — Vol. 99. — P. 297.
34. *Giovannini G., Taylor G. B., Feretti L., [et al.]*. The Bologna Complete Sample of Nearby Radio Sources // *ApJ*. — 2005. — Jan. — Vol. 618, no. 2. — P. 635–648.
35. *Liuzzo E., Giovannini G., Giroletti M., [et al.]*. The Bologna complete sample of nearby radio sources. II. Phase referenced observations of faint nuclear sources // *A&A*. — 2009. — Oct. — Vol. 505, no. 2. — P. 509–520.
36. *Deller A. T., Middelberg E.* mJIVE-20: A Survey for Compact mJy Radio Objects with the Very Long Baseline Array // *AJ*. — 2014. — Jan. — Vol. 147, no. 1. — P. 14.
37. *Herrera Ruiz N., Middelberg E., Deller A., [et al.]*. The faint radio sky: VLBA observations of the COSMOS field // *A&A*. — 2017. — Nov. — Vol. 607. — A132.
38. *Radcliffe J. F., Garrett M. A., Muxlow T. W. B., [et al.]*. Nowhere to Hide: Radio-faint AGN in GOODS-N field. I. Initial catalogue and radio properties // *A&A*. — 2018. — Nov. — Vol. 619. — A48.
39. *IceCube Collaboration, Aartsen M. G., Ackermann M., [et al.]*. Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A // *Science*. — 2018. — July. — Vol. 361, no. 6398. — eaat1378.
40. *IceCube Collaboration, Aartsen M. G., Ackermann M., [et al.]*. Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert // *Science*. — 2018. — July. — Vol. 361, no. 6398. — P. 147–151.
41. *Murase K., Oikonomou F., Petropoulou M.* Blazar Flares as an Origin of High-energy Cosmic Neutrinos? // *ApJ*. — 2018. — Oct. — Vol. 865, no. 2. — P. 124.
42. *Yuan C., Murase K., Mészáros P.* Complementarity of Stacking and Multiplet Constraints on the Blazar Contribution to the Cumulative High-energy Neutrino Intensity // *ApJ*. — 2020. — Feb. — Vol. 890, no. 1. — P. 25.
43. *Murase K., Stecker F. W.* High-Energy Neutrinos from Active Galactic Nuclei // *arXiv e-prints*. — 2022. — Feb. — arXiv:2202.03381.
44. *Keivani A., Murase K., Petropoulou M., [et al.]*. A Multimessenger Picture of the Flaring Blazar TXS 0506+056: Implications for High-energy Neutrino Emission and Cosmic-Ray Acceleration // *ApJ*. — 2018. — Sept. — Vol. 864, no. 1. — P. 84.
45. *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. — Mar. — Vol. 874, no. 1. — P. 43.
46. *Kovalev Y. Y., Kardashev N. S., Kellermann K. I., [et al.]*. RadioAstron Observations of the Quasar 3C273: A Challenge to the Brightness Temperature Limit // *ApJL*. — 2016. — Mar. — Vol. 820, no. 1. — P. L9.
47. *Войцук П. А.* Исследование центральных областей активных ядер галактик с экстремальным угловым разрешением : диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук, специальность 01.03.02. — М. : АКЦ ФИАН, 2022. — 123 с.

48. *Kellermann K. I., Pauliny-Toth I. I. K.* The Spectra of Opaque Radio Sources // *ApJL*. — 1969. — Feb. — Vol. 155. — P. L71.
49. *Readhead A. C. S.* Equipartition Brightness Temperature and the Inverse Compton Catastrophe // *ApJ*. — 1994. — May. — Vol. 426. — P. 51.
50. *Hovatta T., Valtaoja E., Tornikoski M., [et al.]*. Doppler factors, Lorentz factors and viewing angles for quasars, BL Lacertae objects and radio galaxies // *A&A*. — 2009. — Feb. — Vol. 494, no. 2. — P. 527–537.
51. *Liodakis I., Marchili N., Angelakis E., [et al.]*. F-GAMMA: variability Doppler factors of blazars from multiwavelength monitoring // *MNRAS*. — 2017. — Apr. — Vol. 466, no. 4. — P. 4625–4632.
52. *Liodakis I., Hovatta T., Huppenkothen D., [et al.]*. Constraining the Limiting Brightness Temperature and Doppler Factors for the Largest Sample of Radio-bright Blazars // *ApJ*. — 2018. — Oct. — Vol. 866, no. 2. — P. 137.
53. *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. — Sept. — Vol. 846, no. 2. — P. 98.
54. *Gujosa A., Daly R. A.* Equipartition Doppler Factors for a Sample of Active Galactic Nuclei // *ApJ*. — 1996. — Apr. — Vol. 461. — P. 600.
55. *Homan D. C., Kovalev Y. Y., Lister M. L., [et al.]*. Intrinsic Brightness Temperatures of AGN Jets // *ApJL*. — 2006. — May. — Vol. 642, no. 2. — P. L115–L118.
56. *Plavin A., Kovalev Y. Y., Kovalev Y. A., [et al.]*. Observational Evidence for the Origin of High-energy Neutrinos in Parsec-scale Nuclei of Radio-bright Active Galaxies // *ApJ*. — 2020. — May. — Vol. 894, no. 2. — P. 101.
57. *Plavin A. V., Kovalev Y. Y., Kovalev Y. A., [et al.]*. Directional Association of TeV to PeV Astrophysical Neutrinos with Radio Blazars // *ApJ*. — 2021. — Feb. — Vol. 908, no. 2. — P. 157.
58. *Hovatta T., Lindfors E., Kiehlmann S., [et al.]*. Association of IceCube neutrinos with radio sources observed at Owens Valley and Metsähovi Radio Observatories // *A&A*. — 2021. — June. — Vol. 650. — A83.
59. *Greisen E. W.* AIPS, the VLA, and the VLBA // *Information Handling in Astronomy - Historical Vistas*. Vol. 285 / ed. by A. Heck. — 03/2003. — P. 109. — (Astrophysics and Space Science Library).
60. *Petrov L., Kovalev Y. Y., Fomalont E. B., [et al.]*. The Very Long Baseline Array Galactic Plane Survey—VGaPS // *AJ*. — 2011. — Aug. — Vol. 142, no. 2. — P. 35.
61. *Högbom J. A.* Aperture Synthesis with a Non-Regular Distribution of Interferometer Baselines // *A&AS*. — 1974. — June. — Vol. 15. — P. 417.
62. *Shepherd M. C., Pearson T. J., Taylor G. B.* DIFMAP: an interactive program for synthesis imaging. // *Bulletin of the American Astronomical Society*. Vol. 26. — 05/1994. — P. 987–989.
63. *Хайкин С. Э., Кайдановский Н. Л., Парийский Ю. Н. [и др.]*. Радиотелескоп РАТАН-600 // *Известия ГАО в Пулковке*. — 1972. — № 188. — С. 3–12.

64. *Parijskij Y. N.* RATAN-600 - The world's biggest reflector at the 'cross roads' // IEEE Antennas and Propagation Magazine. — 1993. — Aug. — Vol. 35, no. 4. — P. 7—12.
65. *Ковалев Ю. А., Сотникова Ю. В., Эркенов А. К., Попков А. В., Вольвач Л. Н., Васильков В. И., Лисаков М. М., Семенова Т. А., Цыбулёв П. Г.* Особенности калибровки космического радиотелескопа «РадиоАстрон» и радиотелескопа РАТАН-600 // Труды ИПА РАН. — 2018. — Вып. 47. — С. 38—42.
66. *Сотникова Ю. В., Ковалев Ю. А., Эркенов А. К.* Метод синхронной калибровки РАТАН-600 с использованием двух его секторов // Астрофиз. бюлл. — 2019. — Т. 74, № 4. — С. 535—543.
67. *Condon J. J., Cotton W. D., Greisen E. W., [et al.]*. The NRAO VLA Sky Survey // AJ. — 1998. — May. — Vol. 115, no. 5. — P. 1693—1716.
68. *Мингалиев М. Г., Сотникова Ю. В., Бурсов Н. Н. [и др.]*. Спектральные характеристики радиоисточников вблизи северного полюса Мира // Астрон. журн. — 2007. — Т. 84, № 5. — С. 343—363.
69. *Верходанов О. В., Трушкин С. А., Андернах Х. [и др.]*. Текущий статус базы данных CATS // Бюллетень САО РАН. — 2005. — Т. 58. — С. 118—131.
70. *Akritas M. G., Siebert J.* A test for partial correlation with censored astronomical data // MNRAS. — 1996. — Feb. — Vol. 278, no. 4. — P. 919—924.
71. *Mingaliev M. G., Stolyarov V. A., Davies R. D., [et al.]*. Observations of the bright radio sources in the North Celestial Pole region at the RATAN-600 radio telescope // A&A. — 2001. — Apr. — Vol. 370. — P. 78—86.
72. *Ricci R., Righini S., Verma R., [et al.]*. A 20 GHz bright sample for $\delta > 72^\circ$ - II. Multifrequency follow-up // MNRAS. — 2013. — Nov. — Vol. 435, no. 4. — P. 2793—2805.
73. *Kovalev Y. Y., Nizhelsky N. A., Kovalev Y. A., [et al.]*. Survey of instantaneous 1-22 GHz spectra of 550 compact extragalactic objects with declinations from -30° to $+43^\circ$ // A&AS. — 1999. — Nov. — Vol. 139. — P. 545—554.
74. *Kovalev Y. Y., Kovalev Y. A., Nizhelsky N. A., [et al.]*. Broad-band Radio Spectra Variability of 550 AGN in 1997-2001 // PASA. — 2002. — Jan. — Vol. 19, no. 1. — P. 83—87.

Попков Александр Викторович

Свойства активных ядер галактик, полученные из анализа радионаблюдений их полных
выборок

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Отпечатано с оригинал-макетов Заказчика
в типографии «Переплетофф».

Адрес: г. Долгопрудный, ул. Циолковского, д. 4.

Тел: 8(495) 408-66-02. www.perepletoff.ru

Формат 148x210 мм. Усл. печ. л. 1. Тираж 80 экз.

Бумага офсетная. Печать цифровая. Мягкий переплет.

Заказ № 11058. 01.07.2022 г.