

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

На правах рукописи

Войцик Пётр Андреевич

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

Специальность 01.03.02 —  
«Астрофизика и звёздная астрономия»

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

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

Москва — 2022

# Оглавление

	Стр.
Список рисунков . . . . .	4
Список таблиц . . . . .	6
Введение . . . . .	7
<b>Глава 1. Частотный сдвиг положения ядра в ультракомпактных радиоисточниках . . . . .</b>	<b>18</b>
1.1 Введение . . . . .	18
1.2 Наблюдения и обработка данных . . . . .	19
1.2.1 Выборка источников . . . . .	19
1.2.2 Наблюдения на Европейской РСДБ сети . . . . .	20
1.2.3 Обработка данных . . . . .	20
1.2.4 Восстановленные РСДБ карты . . . . .	22
1.2.5 Моделирование структуры источников . . . . .	33
1.2.6 Значимость сети «Квazar-КВО» для получаемых результатов измерений Европейской РСДБ сети . . . . .	33
1.3 Методика измерения сдвига ядра с частотой . . . . .	34
1.3.1 Калибровка фазы . . . . .	34
1.3.2 Относительный сдвиг ядра двух источников, связанных фазовым решением . . . . .	36
1.3.3 Измерение сдвига ядра для источников с известными направлениями струй . . . . .	37
1.3.4 Точность измерений сдвига ядра . . . . .	38
1.3.5 Сравнение методов определения сдвига ядра . . . . .	41
1.4 Результаты измерений и обсуждение . . . . .	42
1.4.1 Относительные астрометрические измерения . . . . .	42
1.4.2 Измерение сдвига ядра сопоставлением изображений источника в разных диапазонах . . . . .	46
1.4.3 Геометрия и физические параметры . . . . .	50
1.5 Выводы . . . . .	53

<b>Глава 2. Обзор активных ядер галактик на наземно-космическом интерферометре «Радиоастрон»</b>	<b>55</b>
2.1 Введение	55
2.1.1 Измерение яркостной температуры	55
2.1.2 Исследование механизма излучения релятивистских струй	57
2.2 Выборка источников и наблюдения	59
2.3 Анализ данных космического РСДБ и результаты детектирования	62
2.4 Измерения яркостной температуры индивидуальных источников в проекте «Радиоастрон»	66
2.4.1 Квазар 3C 273	66
2.4.2 Квазар B0529+483	71
2.4.3 Блазар 0235+164	74
2.5 Выводы	78
<b>Глава 3. Кинематика релятивистских струй</b>	<b>80</b>
3.1 Введение	80
3.2 Выборка источников	82
3.3 Построение изображений и моделирование	86
3.4 Видимые скорости	91
3.4.1 Методы подгонки	91
3.4.2 Разброс скоростей компонентов в источнике	103
3.4.3 Распределение максимальных скоростей компонентов и оценка Лоренц и Допплер-факторов	107
3.5 Выводы	109
<b>Заключение</b>	<b>110</b>
<b>Список цитируемой литературы</b>	<b>111</b>

## Список рисунков

1.1	Карты полной интенсивности всех наблюдаемых источников . . . . .	25
1.2	Заполнение плоскости пространственных частот для источника 0133+476 . . . . .	34
1.3	Сравнение уровня остаточного шума изображений с телескопами «Квазар-КВО» и без . . . . .	35
1.4	Уровень точности относительной астрометрии в зависимости от углового расстояния между источниками . . . . .	39
1.5	Сдвиг ядра, измеренный методом относительной астрометрии с использованием данных всех источников в триплете . . . . .	43
1.6	Сдвиг ядра, измеренный методом относительной астрометрии по парам близких источников . . . . .	47
1.7	Измеренные сдвиги ядра, показанные относительно направления релятивистского выброса источников . . . . .	49
1.8	Зависимость сдвига ядра, измеренного путём независимого сопоставления пар изображений одного источника в разных диапазонах, от разности соответствующих длин волн . . . . .	50
1.9	Сравнение результатов измерений сдвига ядра методом саморивязки и астрометрическим методом . . . . .	51
2.1	Распределение космологических красных смещений для полной выборки 163 компактных внегалактических радиоисточников, ограниченной по плотности РСДБ потока. . . . .	59
2.2	Примеры интерференционных лепестков, полученных при наблюдениях источника 0716+714 на 4.8 ГГц . . . . .	63
2.3	Доля протектированных источников в зависимости от проекции наземно-космической базы . . . . .	64
2.4	Левая часть распределения значений соотношения сигнал/шум, полученных при поиске интерференционных лепестков в данных обзора АЯГ . . . . .	65
2.5	Результаты наземных РСДБ наблюдений квазара 3C 273 на VLBA . . . .	67
2.6	Измеренная яркостная температура квазара B0529+483 в зависимости от проекции базы . . . . .	73

2.7	Оценки углового размера источника 0235+164 по наземно-космическим данным на частоте 4.8 ГГц в зависимости от проекции базы . . . . .	76
2.8	Видимая яркостная температура источника 0235+164 по наземно-космическим данным, в зависимости от проекции базы . . . . .	77
3.1	Карта источника 0003–066 по наблюдениям 29 октября 2001 года . . . . .	87
3.2	Гистограмма распределений разности между позиционным углом большой оси эллиптического ядра и позиционными углом ближайшего компонента струи . . . . .	90
3.3	Угловое расстояние центров гауссовых компонентов от ядра как функция времени . . . . .	93
3.4	Результаты нелинейной подгонки положения компонентов релятивистских струй . . . . .	97
3.5	Распределение видимых скоростей 224 компонентов релятивистских струй источников с измеренным космологическим красным смещением	103
3.6	Пример линейной подгонки $\ln \beta_{\text{app}}$ от $\ln \langle r \rangle$ для одного из источников выборки . . . . .	106
3.7	Гистограмма наклонов линейных подгонок $\ln \beta_{\text{app}}$ от $\ln \langle r \rangle$ для отдельных источников . . . . .	107
3.8	Распределение максимальных значений видимой скорости компонентов в 65 источниках в обзоре RDV . . . . .	108

## Список таблиц

1.1	Параметры РСДБ карт . . . . .	22
1.2	Угловые сдвиги ядра с частотой, измеренные астрометрическим методом . . . . .	45
1.3	Физические параметры источников . . . . .	52
2.1	Результаты оценки параметров ядра квазара 3C 273 по наземно-космическим наблюдениям в рамках обзора АЯГ . . . . .	68
2.2	Список наблюдений квазара B0529+483 в рамках обзора АЯГ в проекте «Радиоастрон» . . . . .	72
2.3	Наблюдения блазара 0235+164 в рамках обзора АЯГ в проекте «Радиоастрон» . . . . .	75
3.1	Список наблюдений, которые использовались для анализа кинематики релятивистских струй. . . . .	83
3.2	Источники в выборке RDV . . . . .	85
3.3	Результаты моделирования структуры источников набором гауссовых компонентов . . . . .	88
3.4	Результаты измерения видимой скорости компонентов релятивистских струй . . . . .	93
3.5	Результаты измерения ускорения компонентов релятивистских струй . . . . .	98

## Введение

Ядра некоторых галактик выделяют огромное количество энергии, которое иногда даже затмевает всё остальное излучение галактики. Их называют активными ядрами галактик (АЯГ) и считается, что их энерговыделение вызвано аккрецией вещества на сверхмассивную чёрную дыру [1]. Около 10 % АЯГ являются радиогромкими [2; 3], то есть они во много раз ярче в сантиметровом диапазоне длин волн, чем в видимом свете. Мощное радиоизлучение АЯГ обычно связано с релятивистскими струями — коллимированными потоками нетепловой плазмы, которые могут простираться далеко за пределы родительской галактики. Релятивистские струи в активных ядрах галактик привлекали внимание астрономов на протяжении последних ста лет с момента открытия этого явления в эллиптической галактике М87 [4]. Понимание процесса формирования релятивистских струй — одна из основных задач астрофизики высоких энергий. Более того, струи АЯГ переносят значительную часть энергии аккреции на чёрную дыру обратно в родительскую галактику и межгалактическое пространство, поэтому эти исследования также важны для понимания образования и космологической эволюции галактик.

Изучение релятивистских струй в активных ядрах галактик является сложной задачей по нескольким причинам. Во-первых, динамики струй чрезвычайно сложна. Поскольку струя состоит из релятивистских намагниченных истечений плазмы, запускаемых вблизи сверхмассивной чёрной дыры, и внутренних частей намагниченных аккреционных потоков, её генерация и распространение требуют полного рассмотрения уравнений релятивистской магнитогидродинамики, что стало возможным только в последние годы благодаря быстрому развитию численного моделирования [5; 6]. Кроме того, процессы ускорения частиц, диссипации энергии (например, ударные волны, магнитные пересоединения, турбулентность) и их расположение в струе до сих пор недостаточно изучены, что оставляет простор для множества моделей наблюдаемого широкополосного излучения [7–11]. Во-вторых, физические процессы в релятивистских струях, описанные выше,

обычно связаны с очень компактными пространственными масштабами. Согласно современной теоретическим представлениям, струя изначально создаётся сильными магнитными полями, которые усиливаются вращающейся чёрной дырой и внутренней частью аккреционного диска [12; 13]. Изначально медленный поток с преобладанием магнитного поля, затем ускорится с постепенным преобразованием магнитной энергии в кинетическую. Теория предполагает, что зона ускорения и коллимации формируется на расстоянии  $10-10^5$  гравитационных радиусов от чёрной дыры [14]. Эти пространственные масштабы соответствуют угловым размерам милли или микросекунды дуги для близких ( $z < 0.1$ ) АЯГ с массой сверхмассивной чёрной дыры  $10^8-10^9 M_{\odot}$ . Кроме того, быстрая переменность и вспышки в рентгеновском и гамма диапазонах часто свидетельствуют о том, что область излучения высоких энергий имеет размер порядка парсеков или меньше. Такие крошечные масштабы трудно напрямую разрешить с помощью оптических, рентгеновских и гамма-инструментов.

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

те 5 ГГц [21; 22]. Однако кардинально улучшить угловое разрешение позволил интерферометр «Радиоастрон», космическим элементом которого служит радиотелескоп на высокоэллиптической орбите с апогеем более 350 000 км [23]. Именно по наблюдениям «Радиоастроны» было достигнуто рекордное угловое разрешение для всей астрономии 8 мксек дуги на частоте 22 ГГц [24].

Несмотря на достижения последних десятилетий ряд аспектов физики релятивистских струй активных ядер галактик остаётся не до конца изученным, а наблюдательные результаты требуют интерпретации. Одним из актуальных остаётся вопрос о механизме излучения струй на разных длинах волн. То что излучение внегалактических источников имеет синхротронную природу стало понятно очень давно [25; 26]. Однако состав плазмы струйных выбросов и условия генерации излучения всё ещё обсуждаются. Более консервативные модели предполагают некогерентное излучение релятивистских электронов. В этих моделях предсказывается ограничение на яркостную температуру из-за обратного Комптоновского охлаждения электронов на уровне  $10^{11.5}$  К [27; 28] в системе отсчёта излучающей плазмы. При этом наблюдения межзвёздных мерцаний во многих источниках [29], а также быстрой переменности в диапазоне ТэВ некоторых квазаров [30] может косвенно свидетельствовать о яркостной температуре значительно превышающей комптоновский предел. Для объяснения высоких яркостей привлекаются модели когерентного излучения или излучения релятивистских протонов [31–33]. В пользу последней говорит недавнее обнаружение связи высокоэнергичных нейтрино с блазарами [34]. Результаты измерений яркостной температуры активных ядер на наземных интерферометрах не противоречат модели синхротронного излучения электронов, если учитывать релятивистское усиление [35]. Однако базы наземных решёток ограничены размерами Земли, что не позволяет измерять сверхвысокие яркостные температуры. Чтобы напрямую измерить размеры и яркости самых компактных излучающих областей релятивистских струй и таким образом уточнить механизм излучения, требуется наземно-космический интерферометр [36], такой как «Радиоастрон» [23].

Наблюдаемую яркостную температуру релятивистских струй нельзя интерпретировать без учёта упомянутого выше релятивистского усиления излучения, которое возникает при движении плазмы со скоростью близко к скорости света в сторону наблюдателя. Это релятивистское усиление (Допплер-фактор) зависит от скорости плазмы (Лоренц-фактора) и угла между направлением движения и

лучом зрения [37]. Эти параметры можно определить только по регулярным многолетним наблюдениям видимого сверхсветового движения деталей в большой выборке релятивистских струй [38; 39]. Такие программы мониторинга кинематики струй также позволяют изучать ускорение плазмы на парсековых масштабах, механизмы которого до конца не ясны [40].

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

## Цель работы

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

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

## **Научная новизна**

Все полученные результаты являются новыми. Отметим следующее.

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

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

## Научная и практическая значимость

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

Измерение величины видимого сдвига РСДБ ядра с частотой в ультракомпактных опорных радиоисточниках полезны не только для определения астрофизических свойств этих объектов, но и для уточнения инерциальных систем отсчёта, построенных на разных частотах в радиодиапазоне, а также при сличении систем отсчёта, построенных по радио (РСДБ) [47–49] и оптическим (космический проект GAIA) [51] наблюдениям. Разработанный метод измерения частотного сдвига ядра по наблюдениям близких радиоисточников, связанных одним фазовым решением, может применяться в будущих подобных экспериментах.

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

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

## Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов основана на использовании телескопов международного уровня, применении надёжных алгоритмов обработки и

анализа данных, а также проверке выводов современными статистическими методами.

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

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

## Апробация результатов

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

1. 11th European VLBI Network Symposium, 2012, 9–12 октября, Бордо, Франция.
2. The Innermost Regions of Relativistic Jets and Their Magnetic Fields, 2013, 10–14 июня, Гранада, Испания.
3. Всероссийская астрономическая конференция (ВАК-2013) «Многоликая Вселенная», 2013, 23–27 сентября, Санкт-Петербург, Россия.
4. 43rd Young European Radio Astronomers Conference, 2013, 30 сентября – 4 октября, Билефельд, Германия.
5. 12th European VLBI Network Symposium and Users Meeting, 2014, 7–10 октября, Кальяри, Италия.
6. Dissecting the Universe — Workshop on Results from High-Resolution VLBI, 2015, 30 ноября – 2 декабря, Бонн, Германия.
7. 13th European VLBI Network Symposium and Users Meeting, 2016, 20–23 сентября, Санкт-Петербург, Россия.
8. 46th Young European Radioastronomers Conference, 2016, 5–9 сентября, Бонн, Германия, Россия.

9. Всероссийская астрономическая конференция (ВАК-2017) «Астрономия: познание без границ», 2017, 17–22 сентября, Ялта, Крым.
10. 14th European VLBI Network Symposium and Users Meeting, 2018, 8–11 октября, Гранада, Испания.
11. 6th International Scientific Conference “Baltic Applied Astroinformatics and Space data Processing”, 2019, 21–23 августа, Вентспилс, Латвия.
12. Всероссийская астрономическая конференция (ВАК-2021) «Астрономия в эпоху многоканальных исследований», 2021, 23–28 августа, Москва, Россия.

## Публикации автора по теме диссертации

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

- A1. *Войцук П. А., Пушкарев А. Б., Ковалев Ю. Ю., Плавин А. В., Лобанов А. П., Ипатов А. В.* Сдвиг положения ядра с частотой в ультракомпактных квазарах // *Астрономический журнал*. — 2018. — Т. 95, № 11. — С. 832–858.
- A2. *Kovalev Y. Y., Kardashev N. S., Kellermann K. I., Lobanov A. P., Johnson M. D., Gurvits L. I., Voitsik P. A., Zensus J. A., Anderson J. M., Bach U., Jauncey D. L., Ghigo F., Ghosh T., Kraus A., Kovalev Y. A., Lisakov M. M., Petrov L. Y., Romney J. D., Salter C. J., Sokolovsky K. V.* RadioAstron Observations of the Quasar 3C273: A Challenge to the Brightness Temperature Limit // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2016. — Vol. 820, no. 1. — P. L9.
- A3. *Pilipenko S. V., Kovalev Y. Y., Andrianov A. S., Bach U., Buttaccio S., Casaro P., Cimò G., Edwards P. G., Gawroński M. P., Gurvits L. I., Hovatta T., Jauncey D. L., Johnson M. D., Kovalev Y. A., Kutkin A. M., Lisakov M. M., Melnikov A. E., Orlati A., Rudnitskiy A. G., Sokolovsky K. V., Stanghellini C., de Vicente P., Voitsik P. A., Wolak P., Zhekanis G. V.* The high brightness temperature of B0529+483 revealed by RadioAstron and implications for interstellar

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

## Личный вклад

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

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

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

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

## **Основные результаты, выносимые на защиту**

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

Основные результаты, выносимые на защиту, приведены в Заключение диссертации.

## **Краткое содержание работы**

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

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

В первой главе представлены результаты исследования видимого смещения положения РСДБ ядра с частотой в ультракомпактных внегалактических

радиоисточниках, входящих в список опорных источников Международной системы астрономических координат. Обсуждаются методы измерения данного эффекта с применением относительной РСДБ-астрометрии, оцениваются ошибки измерений, приводится сравнение с другими методами. На основе полученных измерений оценивается расстояние видимого ядра от центральной машины, а также величина магнитного поля.

Во второй главе представлены результаты обработки обзора активных ядер галактик, который проводился на наземно-космическом интерферометре «Радиоастрон». Приведена статистика детектирований для полной выборки 163 внегалактических радиоисточников на наземно-космических базах в диапазонах 1.7, 4.8 и 22.2 ГГц. Для источников 3C 273, B0529+483 и 0235+164 приведены результаты измерений яркостной температуры.

В третьей главе приводятся результаты измерения видимой скорости движения деталей в релятивистских струях по результатам многолетних РСДБ наблюдений активных ядер галактик на частоте 8 ГГц.

# Глава 1. Частотный сдвиг положения ядра в ультракомпактных радиоисточниках

В данной главе представлены результаты исследования видимого сдвига ядра с частотой в ультракомпактных внегалактических радиоисточниках. Обсуждаются методы измерения данного эффекта с применением относительной РСДБ-астрометрии, оцениваются ошибки измерений. Также астрометрические методы измерения сдвига ядра сравниваются с методом привязки к собственной оптически тонкой структуре источника. На основе полученных измерений оценивается расстояние видимого ядра от центральной машины, а также величина магнитного поля. Результаты данной главы, включая все рисунки и таблицы, опубликованы в работе [A1]. Личный вклад в данную работу указан во Введении к диссертации.

## 1.1 Введение

На изображениях внегалактических релятивистских струй, полученных с помощью Радиоинтерферометрии со СверхДлинными Базами (РСДБ), «ядром» обычно называют наиболее компактную и яркую деталь у видимого основания струи. Положение ядра определяется поглощением в излучающей плазме (синхротронное самопоглощение) или поглощением в окружающем веществе [41; 42; 44]. На частоте наблюдения  $\nu$  ядро находится в области струи с оптической толщиной  $\tau(\nu) \approx 1$ , что приводит к смещению абсолютного положения ядра  $r_{\text{core}}$  как  $\sim \nu^{-1/k_r}$  [44]. В случае синхротронного самопоглощения и при равномерном распределении плотности энергии частиц и магнитного поля  $k_r = 1$  [41]. Однако при наличии внешнего поглощения или градиентов плотности и давления,  $k_r$  может отличаться от единицы [44].

Эффект видимого сдвига ядра активных ядер галактик имеет непосредственные астрофизические и астрометрические приложения в исследованиях компактных внегалактических радиоисточников. Этот эффект может быть использован для оценок различных физических параметров компактных реляти-

вистских струй. С другой стороны, сдвиг ядра с частотой может влиять на измерения и оценки, основанные на многочастотных РСДБ наблюдениях: 1) построение карт спектрального индекса [44; 56]; 2) измерения фарадеевского вращения [57–59]; 3) астрометрические и геодезические измерения в диапазонах 4 и 13 см [47; 60]; 4) сопоставление радио и оптической систем координат [61–64].

Для понимания и учёта эффектов поглощения в подобных исследованиях необходимо систематическое изучение смещения ядра, которое бы охватывало репрезентативную выборку компактных радиоисточников, в частности, тех, которые используются в астрометрических приложениях [47]. Для решения этой задачи был организован пилотный эксперимент на Европейской РСДБ сети. Он преследовал следующие цели: проведение измерений сдвига ядра в ультракомпактных квазарах методом относительной астрометрии в рамках отобранных триплетов источников (исследуемый источника и два калибратора), сравнение результатов с традиционным методом привязки к оптически тонким частям струи самого источника, получение опыта для использования в организации более массовых астрометрических измерений данного эффекта в будущем, апробация участия российской системы «Квазар-КВО» в наблюдениях Европейской РСДБ сети и оценка выигрыша от такого участия.

## 1.2 Наблюдения и обработка данных

### 1.2.1 Выборка источников

Для наблюдений были отобраны восемь ультракомпактных внегалактических радиоисточников, которые соответствуют следующим критериям: 1) источник входит в список определяющих (“defining”) объектов Международного набора реперов системы астрономических координат (*англ.* International Celestial Reference Frame, ICRF) [47]; 2) структурный индекс источника равен 1 или 2 [47], то есть в его структуре доминирует ядро; 3) максимальная коррелированная спектральная плотность потока источника на частоте 8 ГГц больше 1.2 Ян. На основе этих критериев также был добавлен источник 1749+096, который являлся самым

компактным и ярким объектом из списка кандидатов в ICRF и теперь входит в список определяющих источников ICRF2 [48] и ICRF3 [49]. Для каждого выбранного источника были подобраны по два фазовых калибратора на угловом расстоянии не больше  $4^\circ$ .

## 1.2.2 Наблюдения на Европейской РСДБ сети

Наблюдения выбранных источников проводились на Европейской РСДБ-сети (European VLBI Network, EVN) в рамках трёх 12-часовых сессий в октябре 2008 года: 19–20 октября в частотных диапазонах S/X (центральная частота 2.27 и 8.38 ГГц), 22–23 октября в диапазоне C (4.97 ГГц) и 29–30 октября в диапазоне L (1.66 ГГц). В каждом диапазоне записывалось по 8 частотных каналов шириной 8 МГц каждый. В диапазонах L и C записывались правая и левая круговые поляризации, в то время как в диапазонах S и X — только правая. Суммарный поток данных составил величину 512 Мбит/с на каждом телескопе. Корреляция РСДБ данных была произведена в JIVE (Joint Institute for VLBI in Europe).

В этом эксперименте в наблюдениях EVN впервые принимали участие три 32-метровых телескопа российской РСДБ-сети «Квазар-КВО», что заметно улучшило покрытие плоскости пространственных частот в направлении восток-запад (см. раздел 1.2.6). Однако, поломка телескопа в обсерватории Hartebeesthoek в Южной Африке заметно ограничила разрешение интерферометрической сети в направлении север-юг. К сожалению, это значительно повлияло на точность астрометрических измерений данного проекта, так как именно базы интерферометра с участием антенны Hartebeesthoek должны были предоставить наиболее высокое угловое разрешение в этих наблюдениях.

## 1.2.3 Обработка данных

Первичная обработка данных проводилась в программном пакете *AIPS* [65] и включала в себя следующие этапы: исключение плохих данных на основе со-

общений с телескопов и визуальной инспекции данных; применение коррекций фазы, связанных с прохождением радиосигнала через ионосферу при помощи задачи *TECOR*; калибровка амплитуды с использованием системных температур и кривых усиления, измеренных на телескопах, при помощи задачи *APCAL*; первичная калибровка фазы при помощи процедуры глобальной подгонки лепестков (задача *FRING*). Для каждого частотного канала (IF) находилось независимое решение для групповой задержки и частоты интерференции. Форма комплексной полосы пропускания исправлялась при помощи задачи *BPASS*. Далее, с помощью задачи *SPLIT* все найденные поправки применялись к данным и, после усреднения по частоте в пределах каждого IF, интерференционные данные экспортировались в формате, пригодном для дальнейшего анализа.

Для всех источников были построены карты методом гибридного картографирования с использованием алгоритма CLEAN [66], реализованного в программе *Difmap* [67]. Для каждого частотного канала каждой антенны были получены глобальные поправки амплитуды путём сравнения полной интенсивности CLEAN модели с изначальными калиброванными данными. Полученные поправки усреднялись по всем источникам. Поправки амплитуды  $> 10\%$  затем вводились в исходные данные с помощью задачи *CLCOR* в *AIPS*. Стоит отметить, что помимо алгоритма CLEAN в интерферометрии существуют и другие методы восстановления изображения, например, метод максимальной энтропии (ММЭ) [68]. И хотя ММЭ зачастую даёт более качественное изображение для протяжённых объектов со сложной структурой [69; 70], в данной работе использовался алгоритм CLEAN, который хорошо себя показал для компактных структур.

Финальная обработка данных в *AIPS* проводилась в режиме фазовой привязки более слабых источников триплета к калибратору. Для этого в каждом триплете выбирался наиболее яркий и компактный источник в качестве фазового калибратора. Далее для каждого калибратора находилось фазовое решение с помощью задачи *FRING* с учётом его структуры, которое затем применялось как к данным самого калибратора, так и к данным двух других источников данного триплета.

## 1.2.4 Восстановленные РСДБ карты

Финальные РСДБ изображения 24 наблюдаемых источников с использованием натурального взвешивания данных приведены на рисунке 1.1. Для каждого источника представлены контурные карты на частотах 1.7, 2.3, 5.0 и 8.4 ГГц. Динамический диапазон карт, определяемый как отношение пика интенсивности изображения к уровню остаточного шума карты, варьируется от  $10^3$  для слабых источников до  $10^4$  для самых ярких на частотах 1.7, 5.0 и 8.4 ГГц. Для карт на частоте 2.3 ГГц динамический диапазон карт ниже, особенно для источников слабее 1 Ян, поскольку в наблюдениях на данной частоте не принимала участие фазированная антенная решётка Westerbork, являвшаяся одним из самых чувствительных элементов европейской РСДБ сети. Типичный уровень шума восстановленных изображений составляет 0.3 мЯн/луч.

В таблице 1.1 суммируются параметры РСДБ карт: название источника, центральная частота синтезированного изображения в ГГц, пик интенсивности в Ян/луч, уровень остаточного шума в Ян/луч, полная плотность потока с карты в мЯн как сумма потоков всех CLEAN компонентов, размеры большой и малой оси диаграммы направленности по уровню половинной мощности в миллисекундах дуги, позиционный угол большой оси диаграммы в градусах.

Таблица 1.1 — Параметры РСДБ карт.  $I_{\text{peak}}$  — пик интенсивности на карте, RMS — средне квадратичное значение остаточного шума,  $S_{\text{tot}}$  — полная плотность потока с карты,  $\theta_{\text{maj}}$  и  $\theta_{\text{min}}$  — большая и малая оси диаграммы направленности,  $PA_{\text{beam}}$  — позиционный угол большой оси диаграммы направленности.

Источник	Частота (ГГц)	$I_{\text{peak}}$ (мЯн/луч)	RMS (мЯн/луч)	$S_{\text{tot}}$ (мЯн)	$\theta_{\text{maj}}$ (мсек дуги)	$\theta_{\text{min}}$ (мсек дуги)	$PA_{\text{beam}}$ (°)
0125+487	1.66	192	0.13	262	10.25	4.84	17.8
	2.27	233	0.67	361	5.13	2.54	16.7
	4.98	314	0.12	370	3.02	1.51	16.3
	8.39	394	0.17	455	1.76	0.87	16.0
0133+476	1.66	1277	0.31	1768	9.11	4.04	17.8
	2.27	1608	0.67	2489	5.34	2.59	20.1
	4.98	2317	0.31	2959	2.70	1.25	16.4
	8.39	3039	0.43	3701	1.55	0.70	22.6
0151+474	1.66	234	0.16	308	10.86	4.98	20.3
	2.27	380	0.68	455	5.28	2.64	22.0
	4.98	550	0.11	603	2.94	1.48	18.6
	8.39	638	0.22	702	1.71	0.83	24.5

Продолжение таблицы 1.1

0202+319	1.66	729	0.27	988	14.21	4.21	10.8
	2.27	1026	0.37	1331	7.33	2.45	9.5
	4.98	1820	0.25	2001	3.75	1.30	6.7
	8.39	2861	0.47	3078	2.29	0.74	9.6
0204+316	1.66	237	0.17	608	15.05	4.42	11.3
	2.27	271	0.50	662	7.42	2.44	10.9
	4.98	194	0.12	396	4.27	1.45	7.9
	8.39	164	0.20	273	2.64	0.85	13.3
0217+324	1.66	457	0.18	825	14.47	4.35	12.1
	2.27	359	0.59	765	7.14	2.47	11.6
	4.98	160	0.14	428	4.24	1.42	8.8
	8.39	131	0.14	320	2.51	0.82	14.4
0229+131	1.66	1117	0.50	1508	20.10	4.14	9.3
	2.27	1693	0.85	1996	9.39	2.54	8.6
	4.98	1679	0.29	2029	4.87	1.23	6.3
	8.39	1398	0.39	1954	3.30	0.69	10.0
0235+164	1.66	2038	1.16	2088	18.05	3.98	10.4
	2.27	2906	0.78	3037	8.97	2.54	10.6
	4.98	4751	0.48	4930	4.27	1.20	7.0
	8.39	6552	0.58	6849	2.75	0.63	10.6
0239+175	1.66	154	0.06	180	21.30	4.71	10.3
	2.27	183	0.67	251	9.07	2.51	11.2
	4.98	187	0.10	229	5.52	1.43	7.3
	8.39	257	0.16	283	3.50	0.82	10.8
0440-003	1.66	2551	1.27	2655	25.53	4.21	6.1
	2.27	3023	0.92	3343	11.80	2.43	7.3
	4.98	1676	0.36	2190	6.24	1.17	4.4
	8.39	1095	0.45	2017	4.09	0.71	7.2
0445+097	1.66	186	0.63	366	30.15	4.73	6.1
	2.27	207	0.62	324	10.63	2.39	7.0
	4.98	260	0.31	324	6.23	1.49	4.1
	8.39	399	0.24	469	3.98	0.89	7.6
0446+112	1.66	726	0.62	1174	23.51	4.04	5.8
	2.27	861	0.49	1348	10.33	2.40	7.3
	4.98	735	0.17	1000	5.75	1.26	4.3
	8.39	907	0.22	1232	3.79	0.78	7.8
0446+113	1.66	125	0.06	267	24.27	4.27	5.9
	2.27	151	0.54	299	10.53	2.39	6.9
	4.98	313	0.15	414	5.91	1.45	3.9
	8.39	309	0.24	356	3.98	0.86	7.8
0447-010	1.66	146	0.09	180	31.45	4.77	6.2
	2.27	162	0.60	218	11.94	2.38	7.5
	4.98	115	0.09	159	7.20	1.50	4.5
	8.39	144	0.17	178	4.47	0.89	6.7

Продолжение таблицы 1.1

0450+013	1.66	62	0.03	90	29.94	4.82	6.3
	2.27	123	0.62	156	11.93	2.46	7.2
	4.98	143	0.09	161	7.14	1.52	4.5
	8.39	174	0.18	197	4.58	0.89	7.2
1745+085	1.66	82	0.06	246	28.69	5.80	2.3
	2.27	75	0.57	300	10.59	2.89	2.2
	4.98	96	0.12	211	6.94	1.97	2.2
	8.39	127	0.12	209	4.18	1.04	4.6
1749+062	1.66	377	0.37	460	28.07	5.61	3.4
	2.27	386	0.52	588	10.32	3.10	2.1
	4.98	289	0.21	395	6.99	1.86	3.5
	8.39	264	0.17	341	4.23	1.07	5.1
1749+096	1.66	996	0.56	1127	24.01	5.43	2.5
	2.27	1928	0.52	2123	10.20	2.97	1.3
	4.98	3346	0.38	3532	5.60	1.52	1.4
	8.39	5736	1.22	5941	3.18	0.93	2.4
2136+141	1.66	1632	0.56	1767	19.37	4.34	8.8
	2.27	2134	0.70	2536	9.13	2.60	7.2
	4.98	2418	0.40	3095	4.82	1.19	5.8
	8.39	2255	0.55	3580	3.09	0.67	9.6
2137+130	1.66	151	0.05	155	23.13	5.16	8.9
	2.27	215	0.64	241	9.33	2.57	7.4
	4.98	155	0.11	175	5.81	1.63	5.6
	8.39	151	0.18	171	3.59	0.92	9.0
2141+175	1.66	344	0.16	449	20.04	4.85	10.8
	2.27	357	0.53	423	8.75	2.59	7.7
	4.98	505	0.15	564	4.93	1.53	6.3
	8.39	608	0.25	686	3.18	0.85	9.2
2144+092	1.66	482	0.16	630	23.77	4.42	8.5
	2.27	551	0.61	740	10.09	2.50	6.6
	4.98	641	0.14	764	5.83	1.40	5.5
	8.39	785	0.28	918	3.72	0.88	8.3
2145+067	1.66	2146	0.38	3705	21.38	3.70	8.6
	2.27	3519	1.65	4962	10.30	2.41	7.1
	4.98	4108	0.51	6175	5.43	1.01	6.2
	8.39	4101	1.34	6847	3.42	0.62	8.8
2149+056	1.66	695	0.23	900	24.97	4.47	7.8
	2.27	926	0.82	1240	10.42	2.46	6.5
	4.98	724	0.19	907	6.22	1.35	5.7
	8.39	552	0.31	702	4.03	0.87	8.8

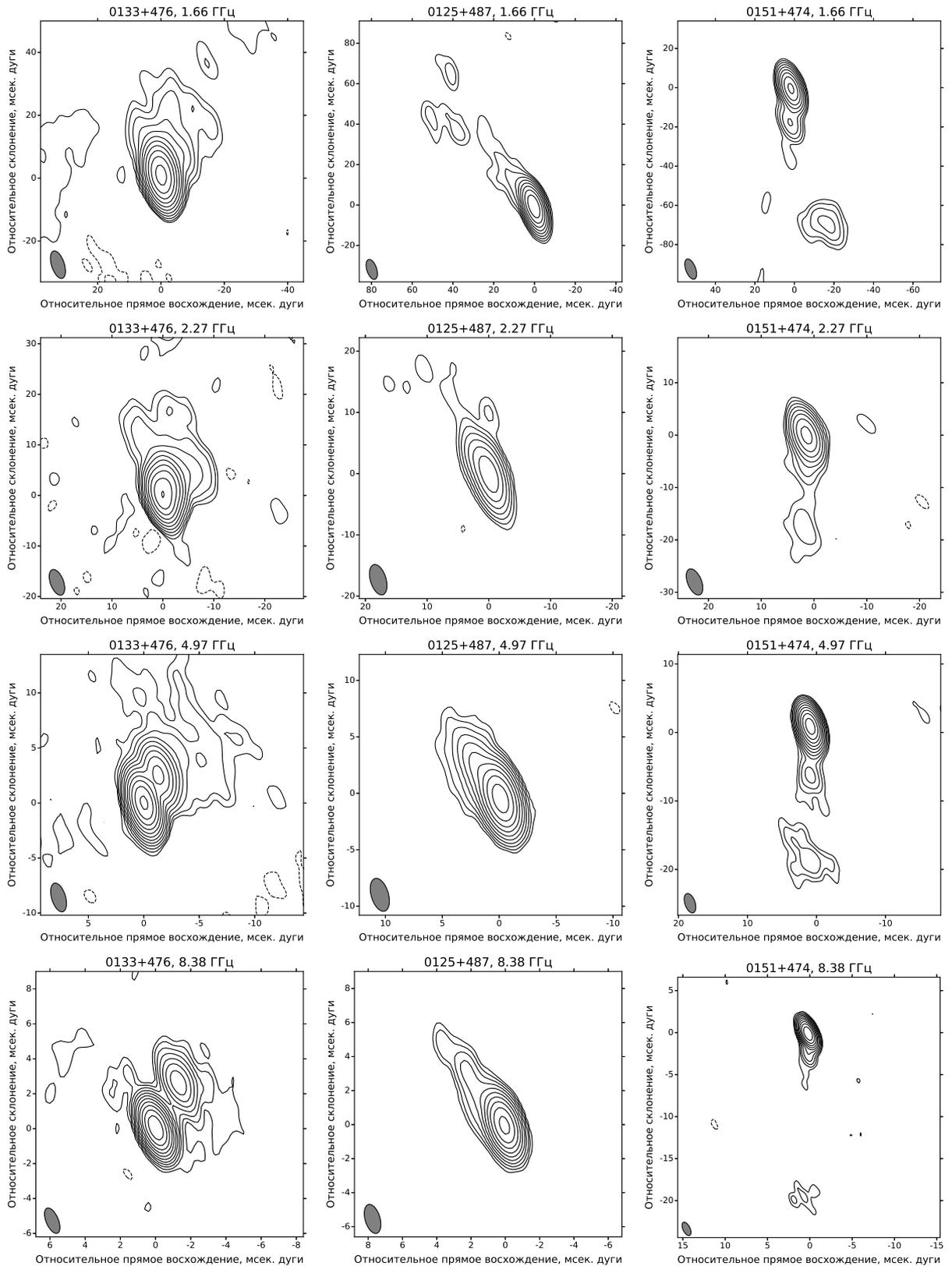


Рисунок 1.1 — Карты полной интенсивности всех наблюдаемых источников с натуральным взвешиванием данных. Первый контур проведён по уровню в 3 раза выше среднеквадратичного значения (RMS) остаточного шума. Размеры диаграммы направленности по половине мощности показаны в левом нижнем углу серым цветом.

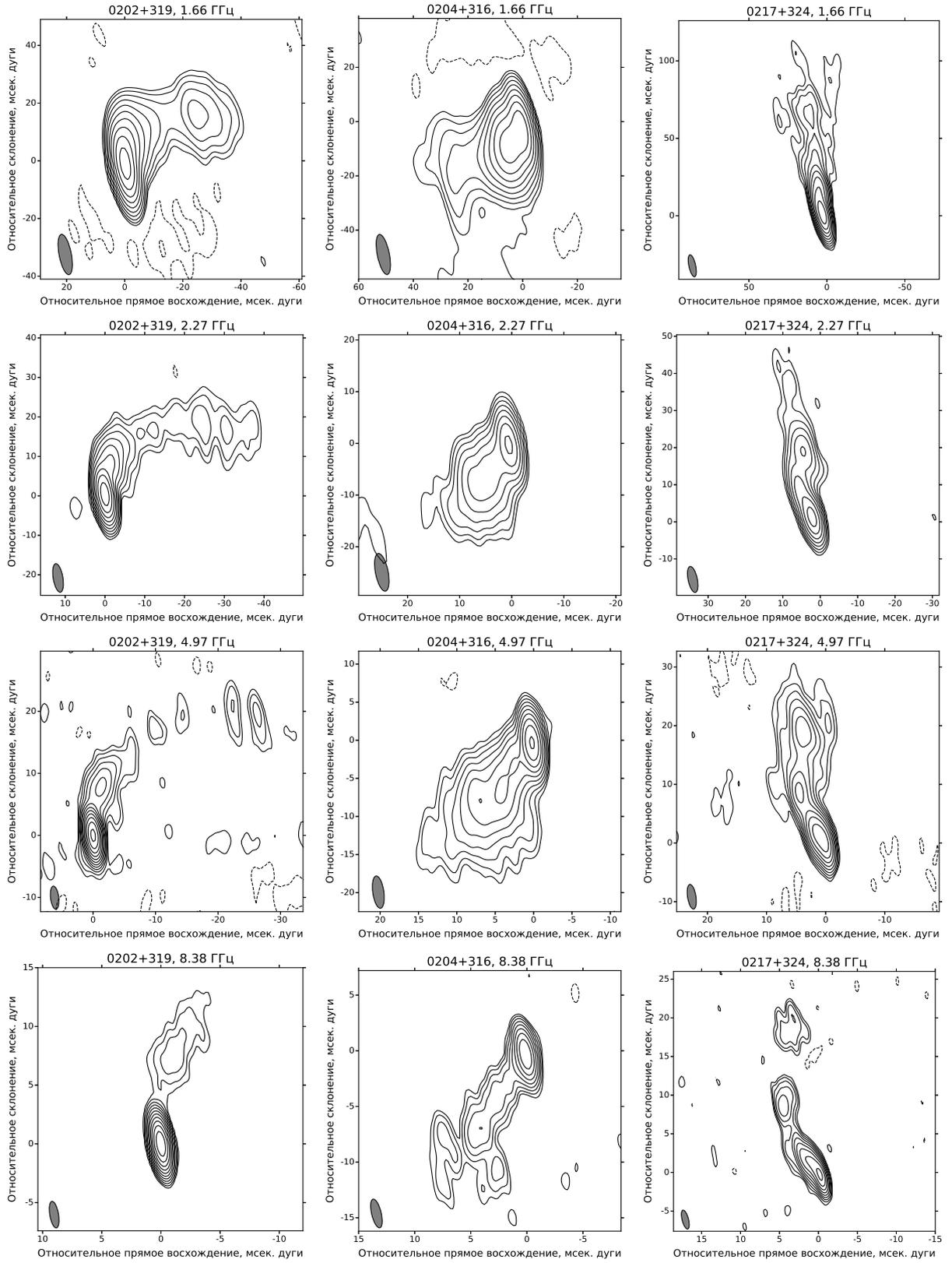


Рисунок 1.1 — продолжение.

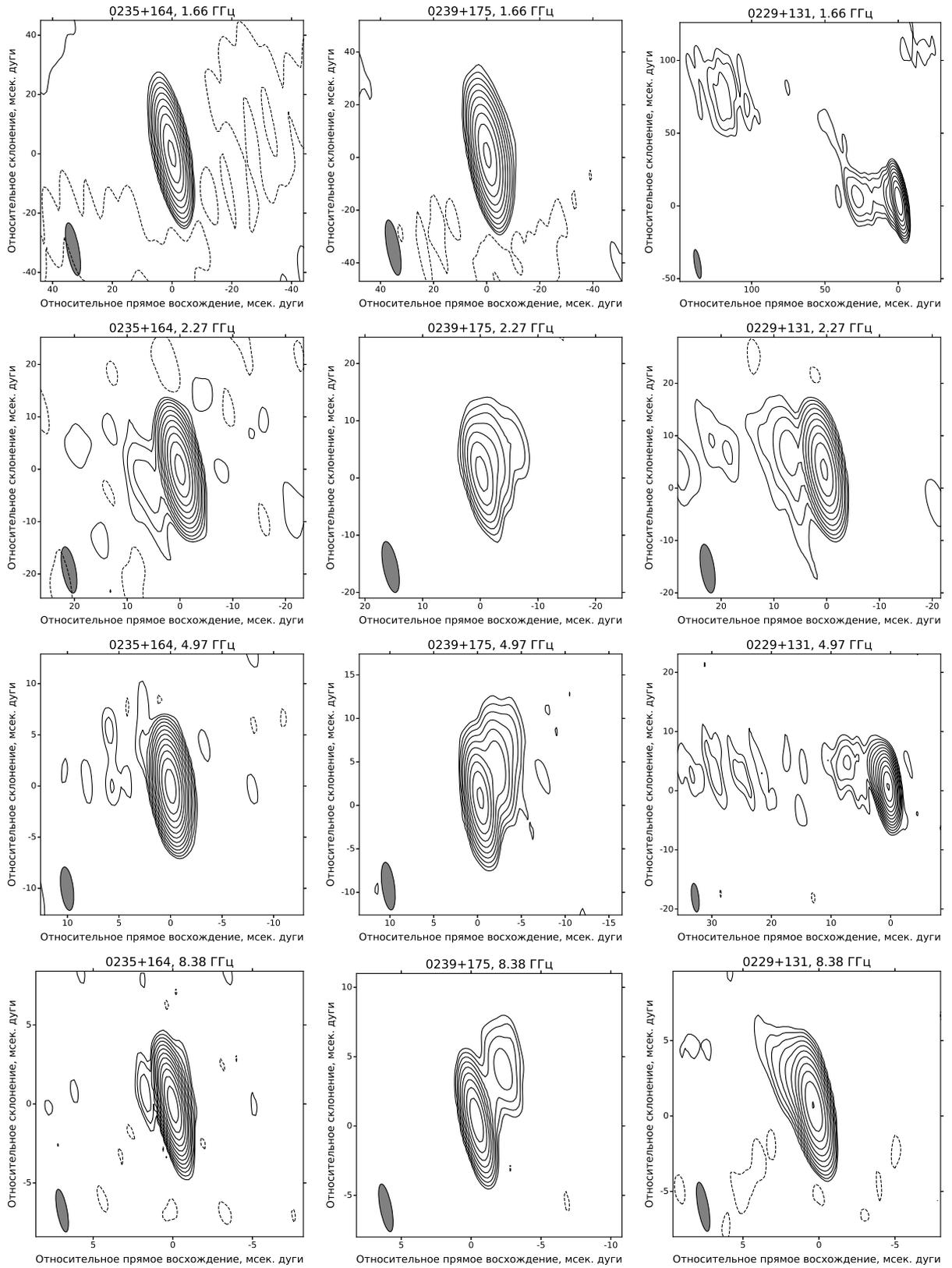


Рисунок 1.1 — продолжение.

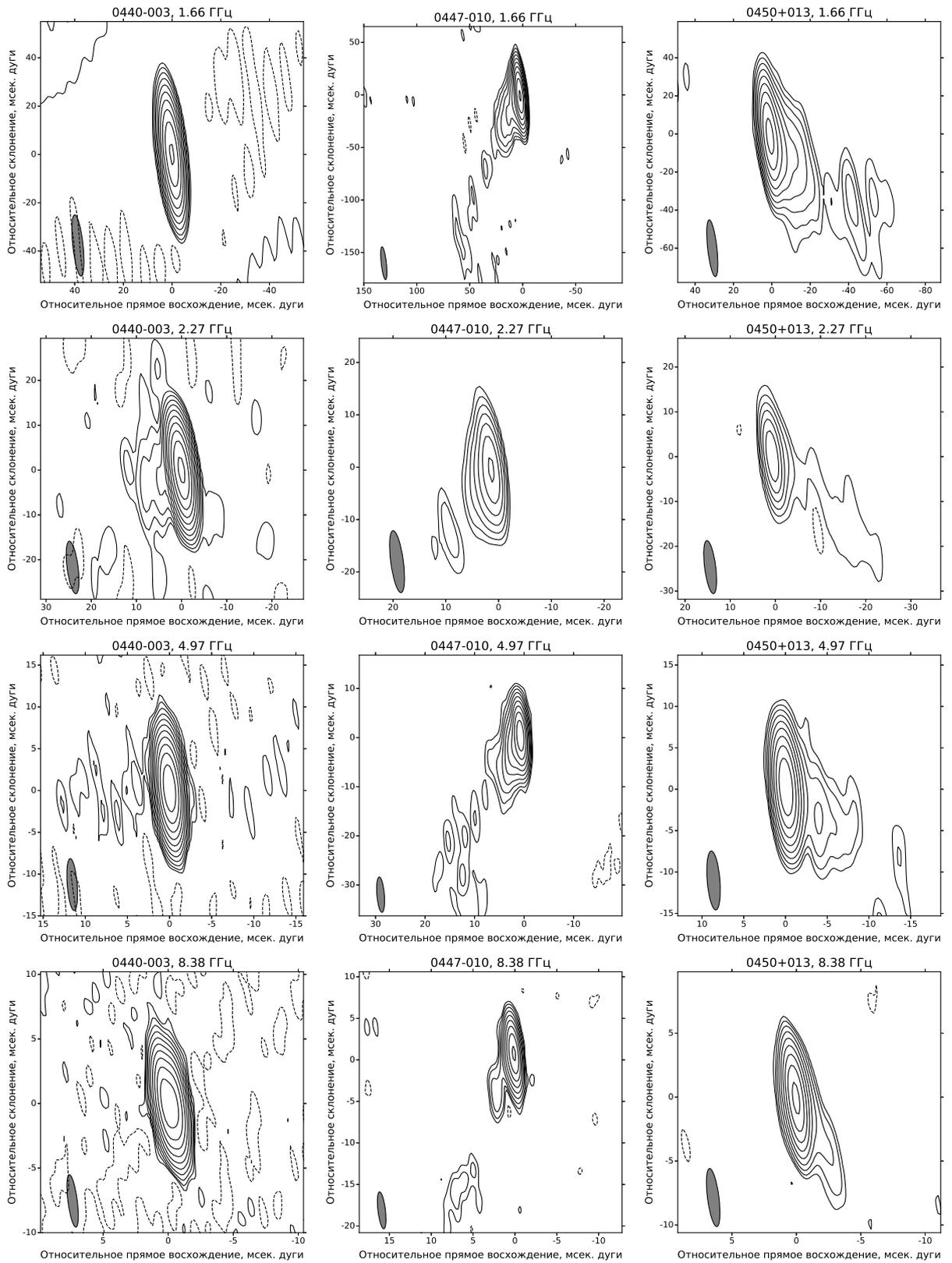


Рисунок 1.1 — продолжение.

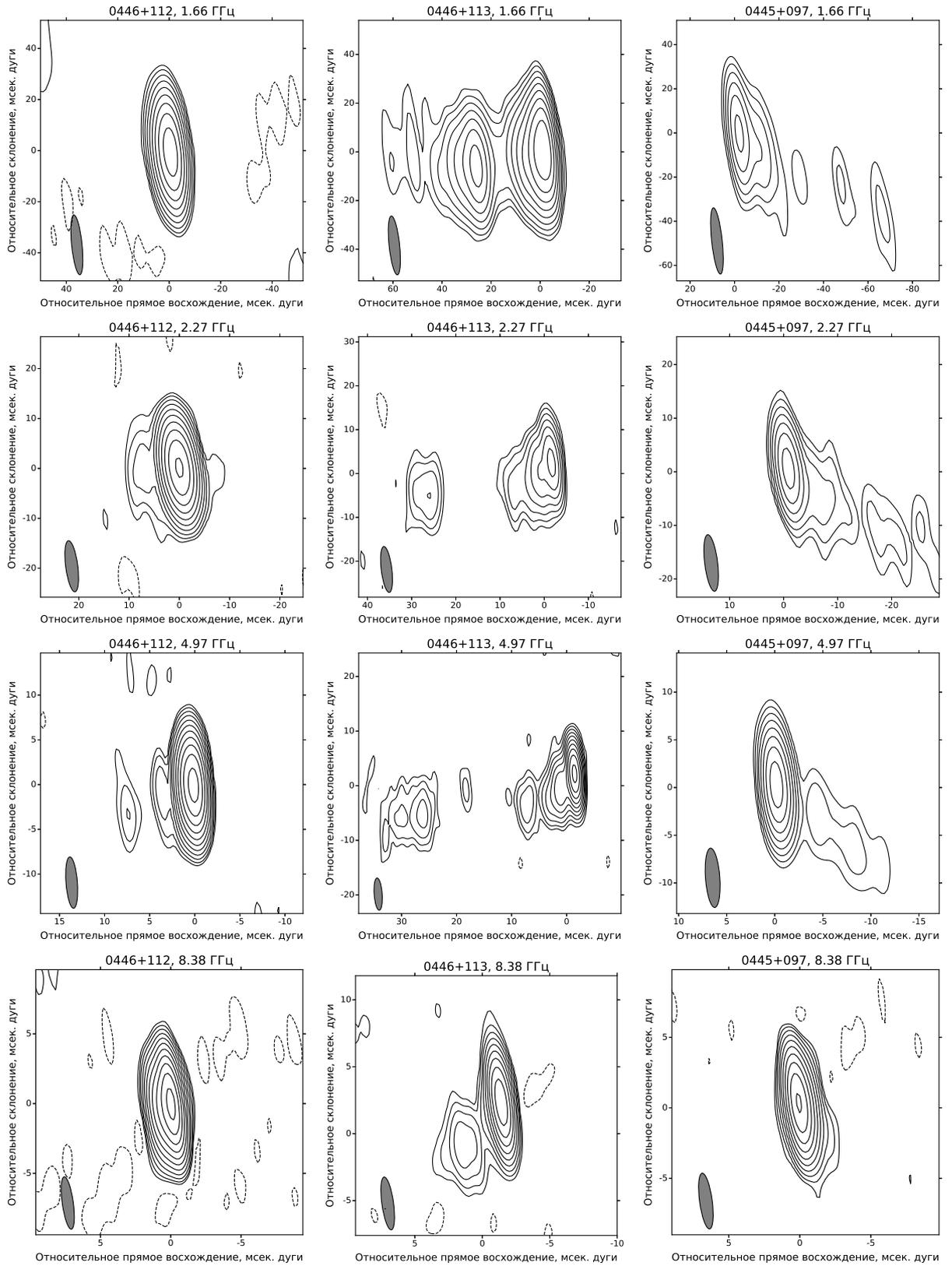


Рисунок 1.1 — продолжение.

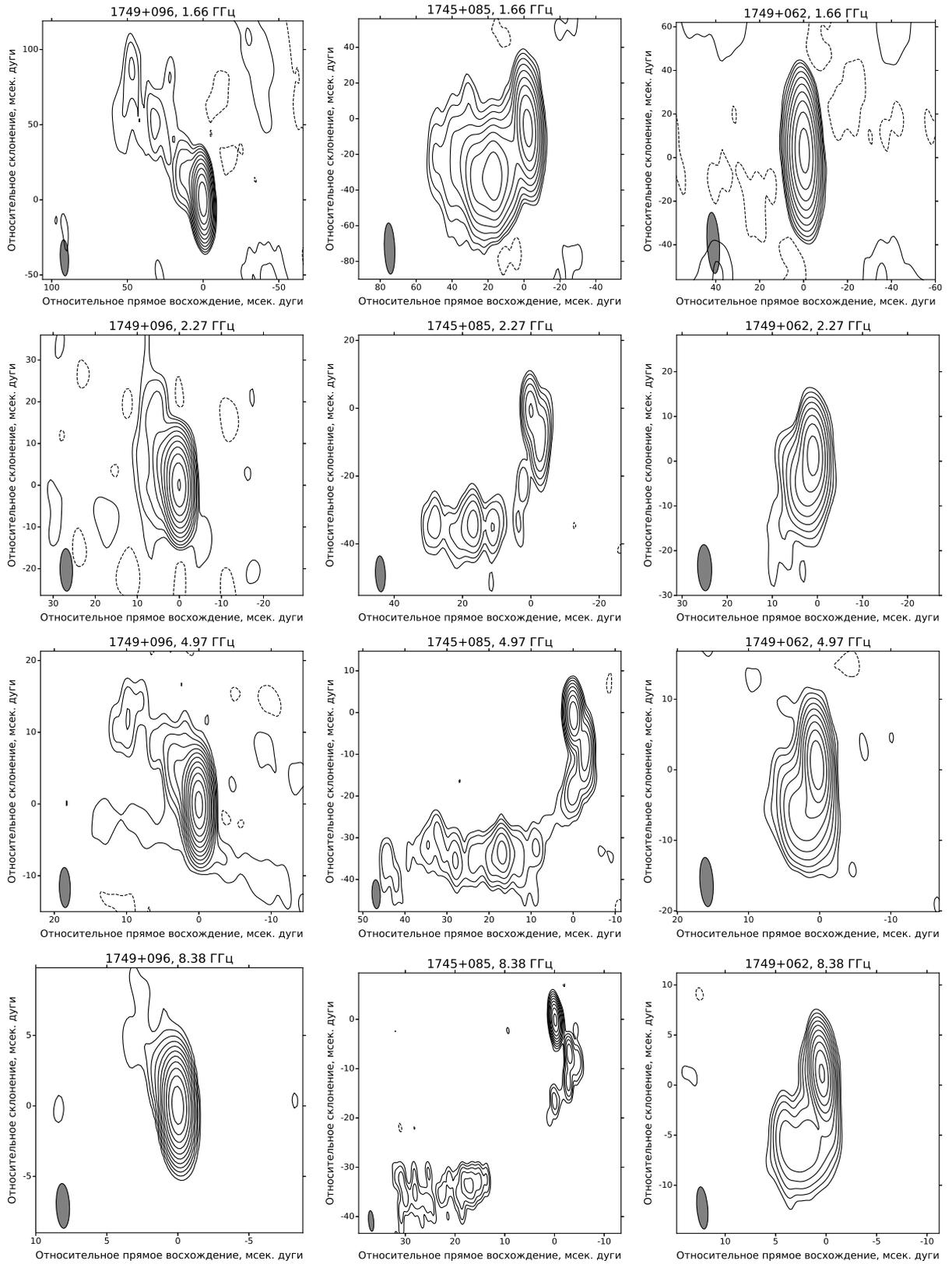


Рисунок 1.1 — продолжение.

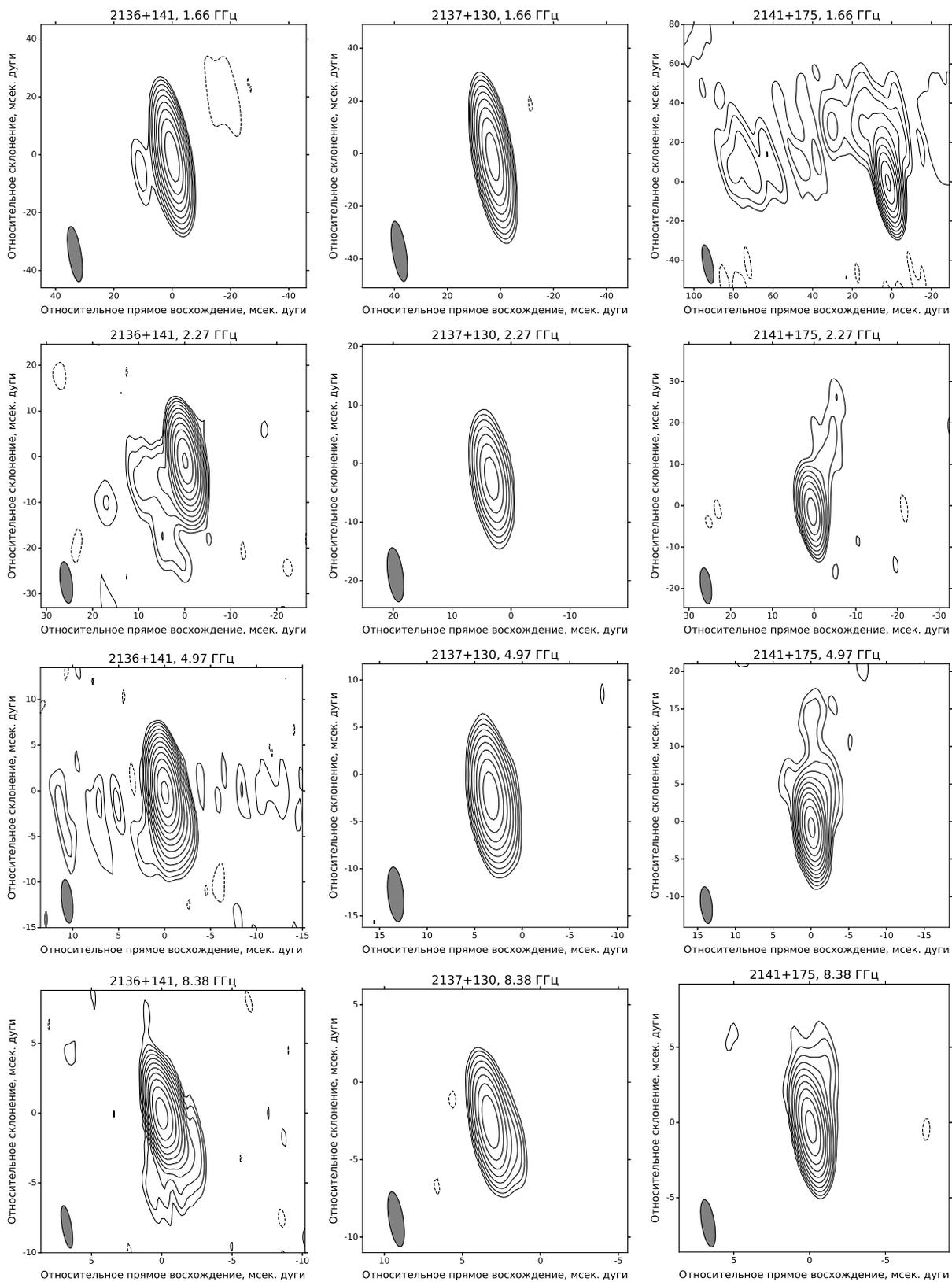


Рисунок 1.1 — продолжение.

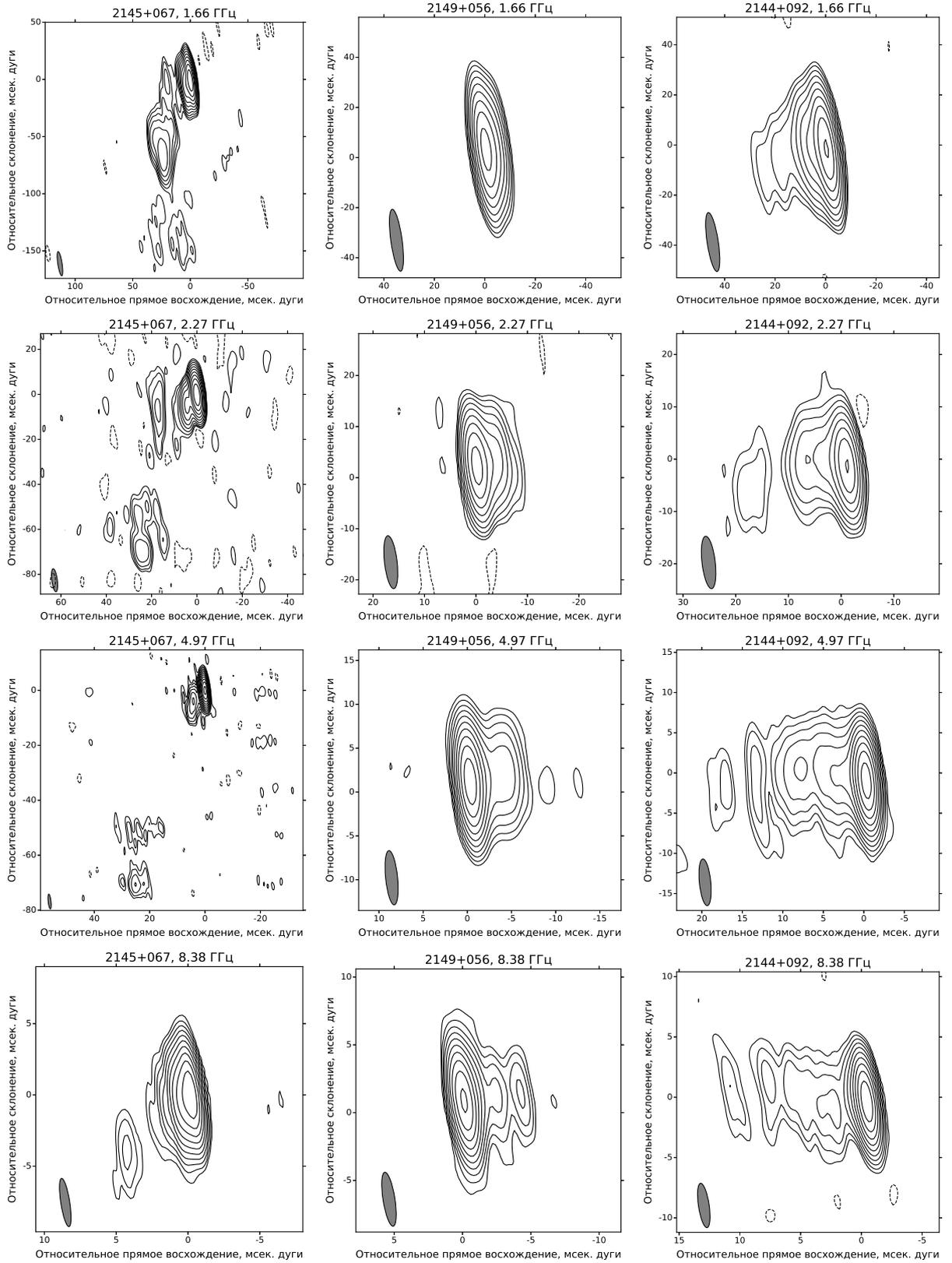


Рисунок 1.1 — окончание.

## 1.2.5 Моделирование структуры источников

Для того чтобы определить положение ядра на карте, было проведено моделирование распределения яркости каждого источника набором круговых гауссовых компонентов. Подгонка модели к данным производилась в области пространственных частот в программе *Difmap* путём минимизации  $\chi^2$ . Количество компонентов выбиралось минимально достаточным (обычно 3–6) для описания всех значимо протектированных элементов структуры источника на данной частоте. В дальнейшем анализе ядром считался наиболее яркий и компактный компонент.

## 1.2.6 Значимость сети «Квazar-КВО» для получаемых результатов измерений Европейской РСДБ сети

Как показано на рисунке 1.2, телескопы российского радиоинтерферометрического комплекса «Квazar-КВО» значительно улучшают заполнение плоскости пространственных частот (UV-плоскости) сети EVN, особенно на средних базах. Участие трёх антенн сети «Квazar» в дополнение к восьми EVN-станциям увеличивает количество баз интерферометра примерно в два раза, что повышает надёжность восстанавливаемого изображения и значимо уменьшает уровень шума.

Чтобы оценить, какой вклад вносят данные телескопов сети «Квazar», была проведена полная переобработка данных, без телескопов Бадары, Зеленчук и Светлое, и построены карты трёх источников 0125+487, 0133+476 и 0151+474 на всех частотах. Для данного анализа были выбраны источники с высоким склонением, чтобы уменьшить влияние плохого заполнения UV-плоскости в направлении север-юг. На рисунке 1.3 приведён график, который позволяет сравнить уровень остаточного шума изображений, восстановленных с использованием данных телескопов сети «Квazar» и без них. Во втором случае уровень остаточного шума изображений оказывается в среднем выше на 30%. В тоже время, остаточный шум изображений источника 0151+474 в диапазонах L, C и X

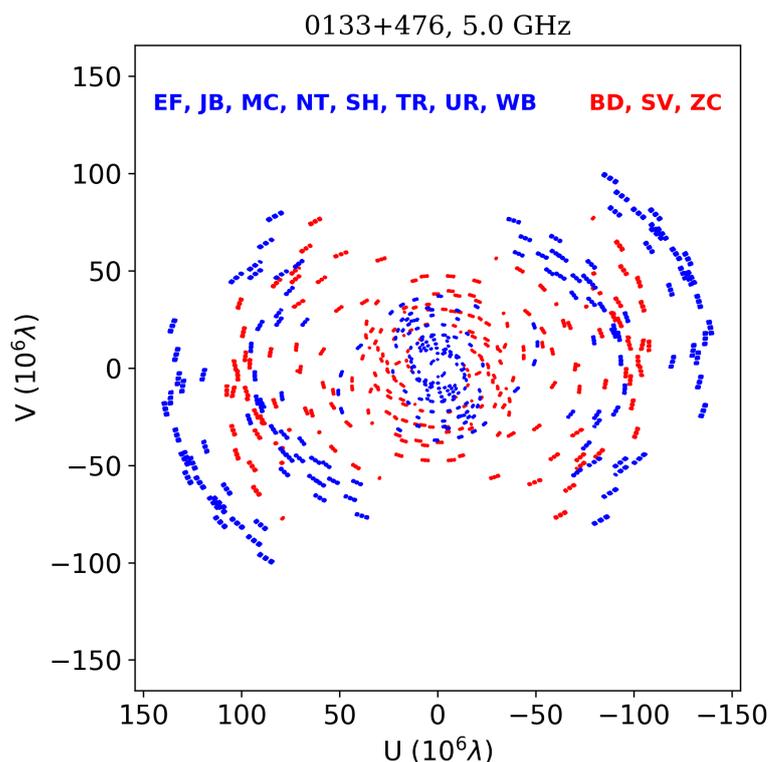


Рисунок 1.2 — Заполнение плоскости пространственных частот для источника 0133+476 на частоте 5 ГГц. По осям отложены  $U$  и  $V$  координаты в миллионах длин волн. Красными точками обозначены проекции баз с телескопами сети «Квazar-КВО», синими — остальные базы.

остался практически неизменным. Отсутствие дополнительных интерферометрических баз особенно критически может сказаться на восстановлении изображений слабых источников, протяжённая структура которых не будет протектирована из-за недостаточной чувствительности интерферометра.

## 1.3 Методика измерения сдвига ядра с частотой

### 1.3.1 Калибровка фазы

Фаза функции видности на выходе коррелятора представляет собой сумму вкладов различных эффектов:

$$\varphi = \varphi_{\text{struct}} + \varphi_{\text{pos}} + \varphi_{\text{atmo}} + \varphi_{\text{inst}}, \quad (1.1)$$

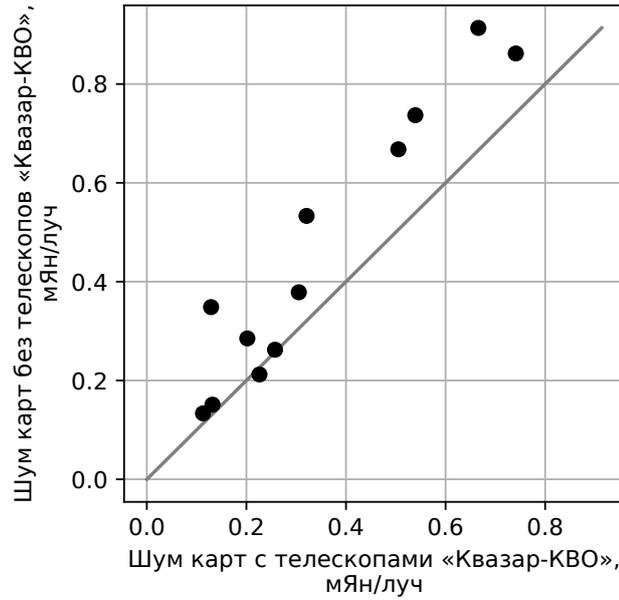


Рисунок 1.3 — Сравнение уровня остаточного шума изображений, восстановленных с использованием данных с телескопов сети «Квазар-КВО» и без них. Медианное значение шума составляет величину 0.28 и 0.36 Ян/луч, соответственно.

где  $\varphi_{\text{struct}}$  — фаза, связанная со структурой источника;  $\varphi_{\text{pos}}$  — фаза, связанная с несовпадением координат источника и фазового центра;  $\varphi_{\text{atmo}}$  — влияние атмосферы (ионосфера и тропосфера);  $\varphi_{\text{inst}}$  — фаза, связанная с задержками в аппаратуре и неидеальностью стандартов частоты.

Слагаемые  $\varphi_{\text{struct}}$  и  $\varphi_{\text{pos}}$  определяются источником, в то время как слагаемые  $\varphi_{\text{atmo}}$  и  $\varphi_{\text{inst}}$  связаны с телескопами. Процедура глобальной подгонки лепестков минимизирует фазу, вводя глобальные поправки для антенн. Таким образом определяется сумма  $\varphi_{\text{atmo}} + \varphi_{\text{inst}} + \varphi_{\text{pos}}$ . Остаётся только слагаемое, которое зависит от проекции интерференционной базы (UV координат) —  $\varphi_{\text{struct}}$ .

После калибровки с фазовым калибратором, фаза целевого источника будет следующей:

$$\varphi^t = \varphi_{\text{struct}}^t + (\varphi_{\text{pos}}^t - \varphi_{\text{pos}}^c) + (\varphi_{\text{atmo}}^t - \varphi_{\text{atmo}}^c) + (\varphi_{\text{inst}}^t - \varphi_{\text{inst}}^c). \quad (1.2)$$

Здесь величины с индексом ‘с’ относятся к калибратору, а с индексом ‘t’ — к целевому источнику. При этом, слагаемое  $\varphi_{\text{struct}}^c$  учитывается моделью калибратора, полученной при картографировании. Слагаемое  $\varphi_{\text{inst}}^t - \varphi_{\text{inst}}^c \approx 0$ , поскольку инструментальная задержка не зависит от источника и слабо меняется со времени;  $\varphi_{\text{atmo}}^t - \varphi_{\text{atmo}}^c \approx 0$  для проекционно близких источников на достаточно коротких интервалах времени. Тогда

$$\varphi^t \approx \varphi_{\text{struct}}^t + (\varphi_{\text{pos}}^t - \varphi_{\text{pos}}^c). \quad (1.3)$$

Таким образом, после применения решения, полученного для калибратора, фаза целевого источника содержит информацию только о структуре источника и относительном положении калибратора и источника.

### 1.3.2 Относительный сдвиг ядра двух источников, связанных фазовым решением

Введём следующие векторные величины:  $\mathbf{S}_{ph.c.}$  — координаты фазового центра с которыми проводилась корреляция данных;  $\mathbf{S}_{core}$  — координаты РСДБ ядра источника на небе;  $\mathbf{S}_{center}$  — координаты центра карты после применения фазового решения;  $\mathbf{X}_{core}$  — относительные координаты РСДБ ядра на карте. Координаты ядра и центра карты могут быть связаны нетривиальным образом, и только для точечного калибратора  $\mathbf{S}_{core} = \mathbf{S}_{center}$ .

Из определения введённых величин, для координат ядра калибратора можно записать следующее соотношение:

$$\mathbf{X}_{core}^c = \mathbf{S}_{core}^c - \mathbf{S}_{center}^c. \quad (1.4)$$

С учётом того, что к калибратору и целевому источнику применяется одно фазовое решение, относительные координаты ядра на карте целевого источника будут:

$$\mathbf{X}_{core}^t = [\mathbf{S}_{core}^t - \mathbf{S}_{ph.c.}^t] - [\mathbf{S}_{center}^c - \mathbf{S}_{ph.c.}^c]. \quad (1.5)$$

Разность относительных координат ядра целевого источника на частотах  $\nu_1$  и  $\nu_2$ :

$$\mathbf{X}_{core}^t(\nu_2) - \mathbf{X}_{core}^t(\nu_1) = [\mathbf{S}_{core}^t(\nu_2) - \mathbf{S}_{core}^t(\nu_1)] - [\mathbf{S}_{center}^c(\nu_2) - \mathbf{S}_{center}^c(\nu_1)]. \quad (1.6)$$

Координаты фазового центра ( $\mathbf{S}_{ph.c.}$ ) сократились, поскольку они не зависят от частоты наблюдения. Используя уравнение (1.4), последнее выражение в квадратных скобках в (1.6) можно переписать так:

$$\mathbf{S}_{center}^c(\nu_2) - \mathbf{S}_{center}^c(\nu_1) = \mathbf{S}_{core}^c(\nu_2) - \mathbf{S}_{core}^c(\nu_1) - [\mathbf{X}_{core}^c(\nu_2) - \mathbf{X}_{core}^c(\nu_1)]. \quad (1.7)$$

Тогда уравнение (1.6) приобретает вид:

$$\begin{aligned} [\mathbf{X}_{core}^t(\nu_2) - \mathbf{X}_{core}^t(\nu_1)] - [\mathbf{X}_{core}^c(\nu_2) - \mathbf{X}_{core}^c(\nu_1)] &= \\ &= [\mathbf{S}_{core}^t(\nu_2) - \mathbf{S}_{core}^t(\nu_1)] - [\mathbf{S}_{core}^c(\nu_2) - \mathbf{S}_{core}^c(\nu_1)]. \end{aligned} \quad (1.8)$$

Таким образом, в левой части уравнения (1.8) стоят непосредственно измеряемые величины, а в правой — искомое изменение координат РСДБ ядра с частотой. Из уравнения (1.8) следует, что невозможно напрямую разделить эффекты сдвига ядра с частотой калибратора и целевого источника, не имея дополнительной априорной информации.

### 1.3.3 Измерение сдвига ядра для источников с известными направлениями струй

Исследования показывают, что сдвиг РСДБ ядра с частотой обычно происходит вдоль направления релятивистской струи источника [45]. Это предположение даёт возможность измерить сдвиг ядра независимо для каждого источника в триплете. Для расчёта была использована следующую модель:

$$\mathbf{X}_{\text{core},i}^j = ((\mathbf{S}_{\text{apex}} - \mathbf{S}_{\text{ph.c.}})_i + \Delta r_{\text{core},i}^j \mathbf{d}_i) - (\mathbf{S}_{\text{center}} - \mathbf{S}_{\text{ph.c.}})^j, \quad (1.9)$$

где индекс  $i \in \{1, 2, 3\}$  — номер источника в триплете,  $j \in \{L, S, C, X\}$  — частотный диапазон,  $\mathbf{S}_{\text{apex}}$  — истинное положение начала струи (не зависит от частоты),  $\mathbf{d}$  — единичный вектор направления струи,  $\Delta r_{\text{core}}$  — интересующий нас сдвиг ядра. Имея для данного триплета измеренные значения векторов  $\mathbf{X}_{\text{core},i}^j$  и априорную оценку векторов  $\mathbf{d}_i$ , было получено апостериорное распределение плотности вероятности векторов  $(\mathbf{S}_{\text{apex}} - \mathbf{S}_{\text{ph.c.}})_i$  и  $(\mathbf{S}_{\text{center}} - \mathbf{S}_{\text{ph.c.}})^j$ , а также искомой величины  $\Delta r_{\text{core},i}^j$ . Для расчетов использовался метод Монте-Карло на марковских цепях (Markov Chain Monte Carlo, МСМС), реализованный в библиотеке PyMC3 [71]. При этом сдвиг ядра  $\Delta r_{\text{core}}$  считался относительно диапазона X. Данный подход позволяет оценить сдвиг ядра даже для источников с неизвестным направлением струи, предполагая равномерное априорное распределение  $\mathbf{d}$ .

Также был разработан метод измерения сдвига ядра для пары проекционно близких источников. Как показано в предыдущем разделе (формула (1.8)), для двух источников с привязкой фазы напрямую можно измерить только разностный вектор частотного смещения РСДБ ядра  $\mathbf{CS}_{\text{rel}} = \mathbf{CS}_1 - \mathbf{CS}_2$ . Зная направления выброса, можно однозначно разложить разностный вектор как  $\mathbf{CS}_{\text{rel}} = \Delta r_{\text{core},1} \mathbf{d}_1 - \Delta r_{\text{core},2} \mathbf{d}_2$ , где  $\mathbf{d}_1$  и  $\mathbf{d}_2$  — это единичные векторы направления выброса первого

и второго источника, соответственно. Величины  $\Delta r_{\text{core},1}$  и  $\Delta r_{\text{core},2}$  представляют собой искомый сдвиг ядра для двух источников.

Направление струи вычислялись как среднее значение позиционного угла внутренних гауссовых компонентов модели источника относительно ядра на частоте 8.4 ГГц. Для самого компактного объекта из выборки, блазара 0235+164, определить направления выброса по данным этого эксперимента не удалось. Для него было взято значение позиционного угла выброса из работы [A4], полученное по множественным наблюдениям на частоте 43 ГГц на системе апертурного синтеза VLBA. Для другого компактного источника 0440–003 были использованы данные обзора MOJAVE на 15 ГГц [72; 73] для отождествления РСДБ-ядра и определения направления выброса, поскольку разрешения интерферометра на 8.4 ГГц оказалось недостаточным.

### 1.3.4 Точность измерений сдвига ядра

Вопрос точности относительной радиоастрометрии впервые был рассмотрен в работе [74] для пары ярких и близких квазаров 3C 345 и NRAO 512 при квазиодновременных РСДБ наблюдениях на одной базе. В этой пионерской работе было показано, что ошибка измерений относительных координат источников может составлять лишь малые доли миллисекунды дуги. Для современных многоэлементных систем апертурного синтеза, таких как VLBA или EVN, точность астрометрических измерений не может быть вычислена аналитически, но известно, что ее определяют нескомпенсированные эффекты распространения сигнала в тропосфере и ионосфере [75]. Таким образом, среди множества факторов, влияющих на точность относительной астрометрии, основными являются разрешение интерферометра  $\lambda/D_{\text{max}}$ , количество составляющих его элементов и точность положения каждого из них, угловое расстояние от целевого источника до калибратора  $\Delta\Theta$ , общая продолжительность эксперимента, стабильности тропосферы и ионосферы, определяющие время цикла источник-калибратор, а также отношение сигнал-шум целевого источника. Доминирующим источником систематической ошибки может быть большой зенитный угол  $z$ , поскольку нескомпенсированная тропосферная задержка растет как  $\sec z$ . Поэтому при наблюдениях следует избе-

гать больших зенитных углов, но также учитывать, что ограничиваясь малыми зенитными углами, можно существенно снизить качество заполнения плоскости пространственных частот и соответственно надежность восстанавливаемого изображения источника.

Для оценки астрометрической точности наблюдений с опорными фазами применялся также метод компьютерного моделирования искусственных наборов данных РСДБ наблюдений на VLBA и EVN на частоте 8.4 ГГц [76]. Было показано, что типичные ошибки относительной астрометрии минимальны для ярких точечных источников на средних склонениях и составляют около 50 микросекунд дуги для  $\Delta\Theta = 1^\circ$  и растут в сторону высоких и низких склонений, достигая значений до 300 микросекунд дуги. Для очень близких источников на средних склонениях величина ошибки выходит на плато в 14 микросекунд дуги.

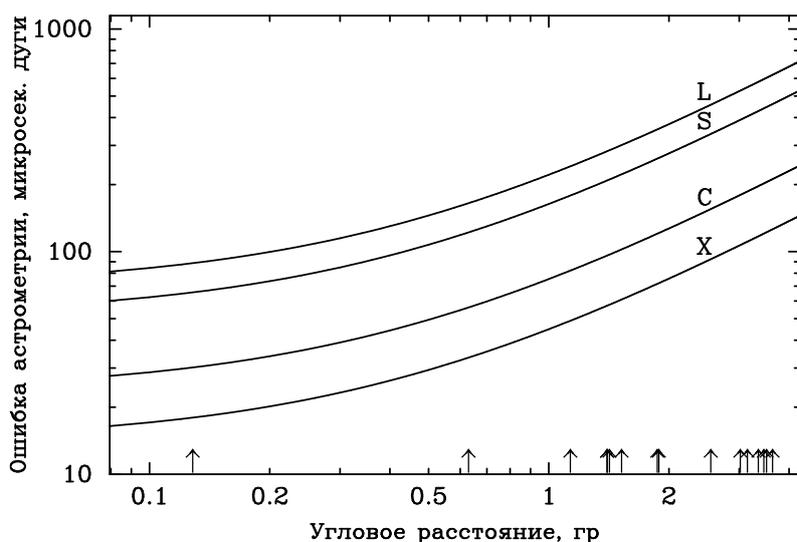


Рисунок 1.4 — Уровень точности относительной астрометрии в диапазонах 1.7 (L), 2.3 (S), 5.0 (C), 8.4 (X) ГГц в зависимости от углового расстояния между источниками. Стрелками показаны угловые расстояния между источниками в триплетах.

В данной работе для оценки точности относительной астрометрии  $\sigma_a$  применялось часто используемое на практике соотношение  $2\Delta\Theta(\lambda/D_{\max})$  [75], где  $\Delta\Theta$  измеряется в радианах. Чтобы учесть ненулевой уровень ошибок для очень близких источников [76], оно было модифицировано следующим образом:

$$\sigma_a = 2\Delta\Theta(\lambda/D_{\max}) + 14\lambda/\lambda_{3.6\text{cm}}. \quad (1.10)$$

Оценки ошибок астрометрии, полученные с помощью этого соотношения для разных диапазонов длин волн в зависимости от углового расстояния между источниками в триплетах нашей выборки и типичного значения  $D_{\max} = 8300$  км, реализуемого между пунктами Shanghai и Jodrell Bank или Shanghai и Noto, показаны на рис. 1.4. Несмотря на то, что исследуемые в данной работе объекты имеют средние склонения, реальные ошибки относительной астрометрии могут быть выше, поскольку наблюдаемые нами источники, будучи высококомпактными, все же не являются точечными. Из-за специфики используемого нами метода измерения сдвига РСДБ ядра, в дополнение к ошибке относительной астрометрии нужно еще учитывать неопределенность в направлении выброса

$$\sigma_{\varphi} = \frac{\sqrt{\sigma_{r,\text{core}}^2 + \sigma_{r,\text{jet}}^2}}{r}, \quad (1.11)$$

где  $r$  — расстояние от ядра до ближайшего компонента на самой высокой частоте (8.4 ГГц),  $\sigma_{r,\text{jet}}$  и  $\sigma_{r,\text{core}}$  — ошибки положения ближайшего компонента струи и ядра, соответственно, на 8.4 ГГц. Заметим, что формальные ошибки положения гауссовых компонентов обычно очень малы и поэтому не отражают реальную точность определения направления выброса. Направление выброса вычислялось как среднее значение позиционного угла нескольких внутренних компонентов струи относительно ядра, а в качестве  $\sigma_{\varphi}$  бралась ошибка среднего. Для источников с одним компонентом струи использовалась консервативная оценка ошибки направления  $10^\circ$ . Медианное значение  $\sigma_{\varphi}$  составило величину  $6^\circ$ .

Ошибку измерения сдвига ядра методом разложения вектора разности  $\mathbf{CS}_{\text{rel}}$  по базису можно оценить аналитически. Она существенно зависит от угла между компонентами базиса (направлениями струй)  $\Delta\varphi$  и складывается из двух частей:

$$\sigma_1 \sim \frac{\sigma_{\varphi} |\mathbf{CS}_{\text{rel}}|}{\sin^2 \Delta\varphi} \quad (1.12)$$

из-за неопределенности в направлениях струй, и

$$\sigma_2 = \frac{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_{r,\text{core}}^2}}{|\sin \Delta\varphi|} \approx \frac{\sigma_a}{|\sin \Delta\varphi|} \quad (1.13)$$

из-за неопределенности самого вектора разности  $\mathbf{CS}_{\text{rel}}$ , которая зависит от астрометрической ошибки

$$\sigma_a = \left( \frac{2\Delta\Theta}{D} + \frac{14}{\lambda_{3.6\text{cm}}} \right) (\lambda_1^2 + \lambda_2^2)^{1/2} \quad (1.14)$$

и суммарной ошибки положения ядер источников на картах

$$\sigma_{r,\text{core}} = \sqrt{\sigma_{r,\text{core}_1,\nu_1}^2 + \sigma_{r,\text{core}_2,\nu_1}^2 + \sigma_{r,\text{core}_1,\nu_2}^2 + \sigma_{r,\text{core}_2,\nu_2}^2}. \quad (1.15)$$

В данном анализе не учитывались ошибки в определении координат компонентов  $\sigma_{r,\text{core}}$ , так как они пренебрежимо малы по сравнению с  $\sigma_a$ . Таким образом, ошибка измеренного сдвига ядра быстро растет при малых углах  $\Delta\varphi$  между выбросами, что делает метод триплетов довольно чувствительным к условию ортогональности направлений выбросов для проведения высокоточных измерений.

### 1.3.5 Сравнение методов определения сдвига ядра

Основная трудность в измерении эффекта сдвига положения ядра состоит в аккуратном наложении карт распределения радиояркости, полученных на разных частотах. Эта проблема возникает из-за потери информации об абсолютной координатной привязке в процессе стандартной обработки РСДБ данных, а именно на этапе картографирования, включающего процедуру фазовой самокалибровки.

Один из способов, позволяющих преодолеть эту особенность, основан на методе самопривязки [44; 56; 77], в котором совмещение изображений на разных частотах выполняется по яркому компоненту струи, излучение которого является оптически-тонким, а следовательно его положение — ахроматичным. Существует и более универсальный подход в реализации метода самопривязки. В нем совмещение изображений может быть достигнуто при помощи двумерной кросс-корреляции оптически-тонких областей выброса [78]. Этот метод, совместно с моделированием структуры источника рядом гауссовых компонент, был успешно применён для определения сдвигов РСДБ ядер четырёх объектов типа VL Lac [79], а также для более многочисленных измерений сдвига в выборке 190 источников [45], и наконец для массовых измерений эффекта [46]. Недостатками данного метода являются определённая систематика в измерениях в случае сильных градиентов спектрального индекса вдоль струи, наличие модельных предположений о координатах РСДБ ядра, а также ограниченность применения метода источниками с достаточно богатой структурой для выполнения кросс-корреляции.

Другой метод измерения сдвига ядра, используемый в данной работе, основан на относительной РСДБ астрометрии [43]. Его основные преимущества

состоят в том, что он имеет меньше модельных предположений и работает, в том числе, и для компактных источников с минимумом структуры, где метод самoprивязки бессилён. Но недостатки есть и у этого метода: фазовый калибратор, относительно которого измеряется положение исследуемого источника, также подвержен эффекту сдвига, и это надо учитывать, что ограничивает точность измерений. От данного недостатка свободны лишь те пары источников, направления внутренних струй которых не сонаправлены. Также метод требователен к качеству заполнения плоскости пространственных частот и высокому угловому разрешению системы апертурного синтеза.

## 1.4 Результаты измерений и обсуждение

### 1.4.1 Относительные астрометрические измерения

Результаты измерения смещения РСДБ ядра с частотой, полученные относительным астрометрическим методом при одновременном использовании триплета источников, представлены в таблице 1.2. Для каждого источника в таблице приведены величины сдвигов в миллисекундах дуги для диапазонов L (1.7 ГГц), S (2.3 ГГц) и C (5.0 ГГц) относительно самого высокочастотного диапазона X (8.4 ГГц). Положительное значение соответствует смещению ядра вниз по струе с уменьшением частоты наблюдения, которое и предсказывается теорией. Эти же значения в виде графиков зависимости величины сдвига ядра от частоты приведены на рисунке 1.5.

Из теории ожидается, что величина сдвига  $r_{\text{core}} \sim \nu^{-1/k_r}$  [44], однако значительные ошибки измерений не позволили оценить значение  $k_r$ , поэтому в данной работе подгонялась зависимость  $\Delta r_{\text{core}} = a + b/\nu$ , полагая  $k_r = 1$ , что является обоснованным приближением для большинства источников [77]. Для многих источников выборки оценённые ошибки превышают измеряемый эффект. В то же время, у источников **0133+476**, **0202+319**, **0217+324**, **0235+164**, **0440-003**, **0446+112**, **0446+113**, **0447-010** и **2149+056** измеренный сдвиг ядра хорошо согласуется с зависимостью  $\sim \nu^{-1}$ . Для этих источников медианные значения сдвига

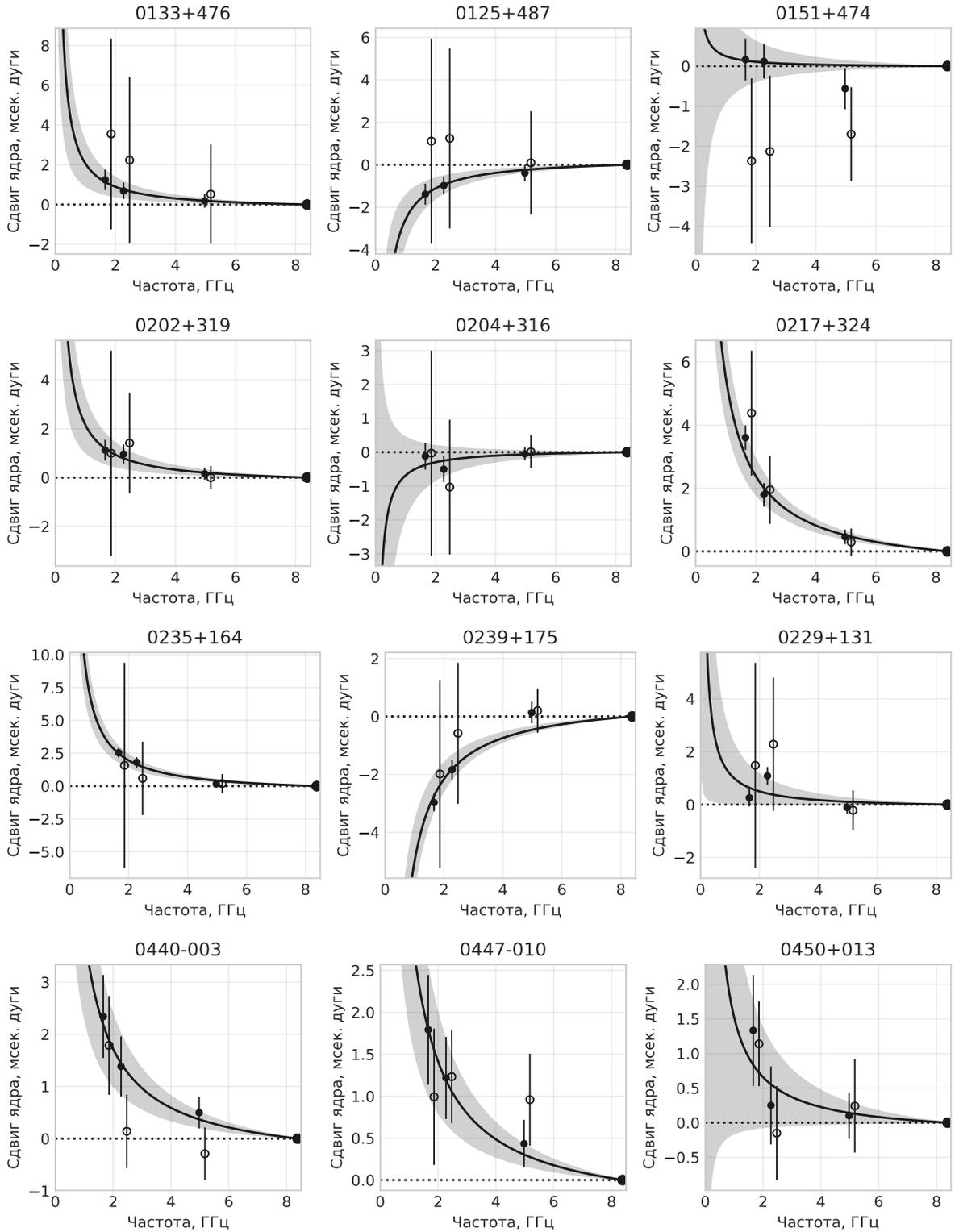


Рисунок 1.5 — Зависимость сдвига ядра от частоты относительно диапазона X, измеренного для проекционно близких триплетов источников. Закрашенными кружками показаны результаты с использованием информации о направлениях выбросов, а незакрашенными — без учета этой информации. Изображена проекция вектора сдвига ядра на направление выброса. Проведенная линия и закрашенная область соответствует зависимости  $\Delta r_{\text{core}} = a + b/\nu$ , построенной по закрашенным кружкам, и 68% доверительным интервалам для нее. Результаты получены методом относительной астрометрии.

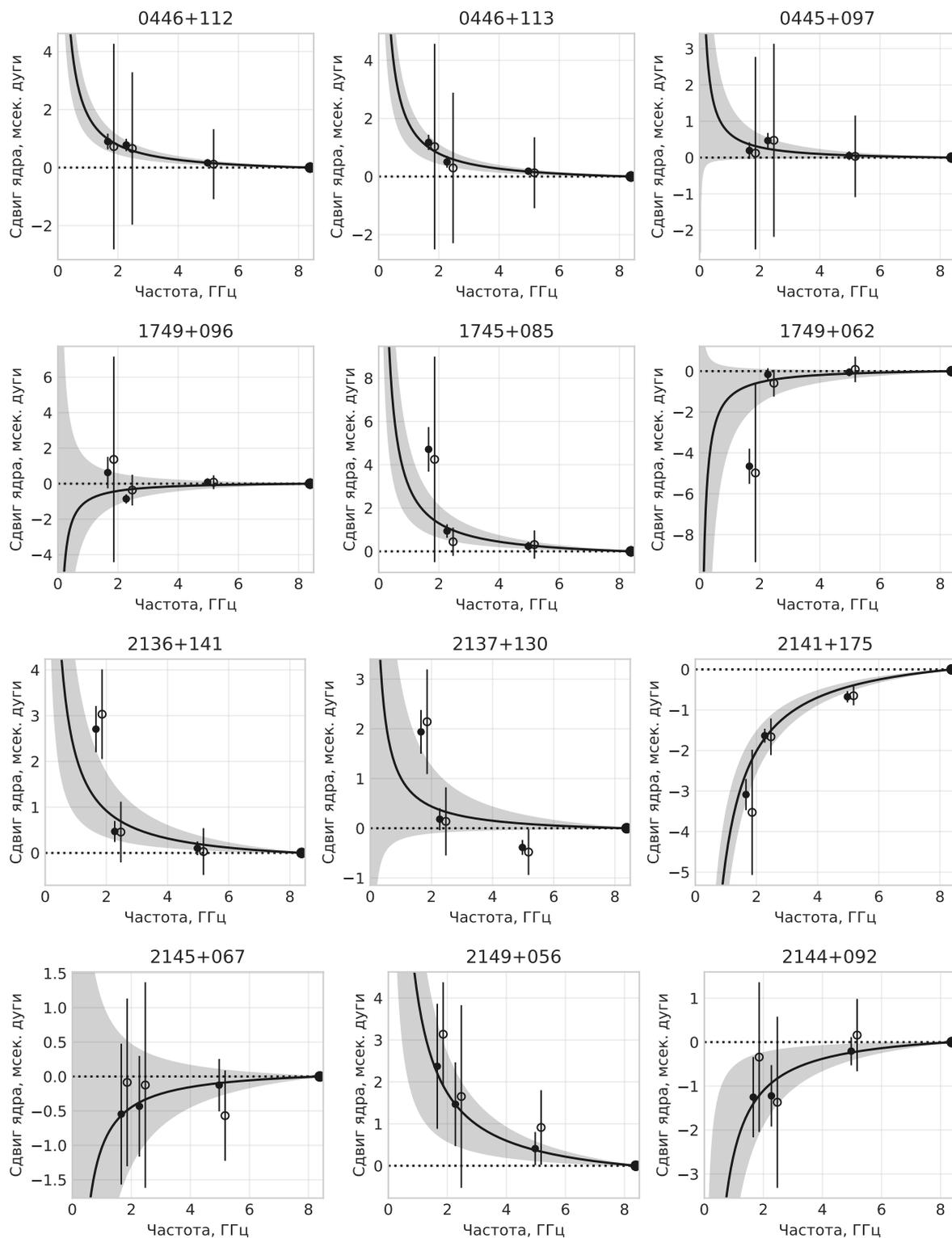


Рисунок 1.5 — продолжение.

Таблица 1.2 — Угловые сдвиги ядра с частотой относительно диапазона X (8.4 ГГц), измеренные астрометрическим методом (см. раздел 1.3.3). Также приведены значения коэффициента  $b$  в предположении зависимости  $r_{\text{core}}(\nu) = b/\nu$ . Жирным шрифтом отмечены источники из ICRF.

Источник	Сдвиг ядра (мсек дуги)			$b$ (мсек дуги · ГГц)
	X → L	X → S	X → C	
<b>0133+476</b>	1.25 ± 0.50	0.69 ± 0.40	0.18 ± 0.30	2.34 ± 1.30
0125+487	-1.39 ± 0.50	-0.98 ± 0.40	-0.39 ± 0.40	-2.92 ± 1.30
0151+474	0.16 ± 0.50	0.12 ± 0.40	-0.56 ± 0.50	0.28 ± 1.30
<b>0202+319</b>	1.12 ± 0.40	0.96 ± 0.40	0.15 ± 0.20	2.45 ± 1.30
0204+316	-0.12 ± 0.40	-0.50 ± 0.40	-0.05 ± 0.20	-0.78 ± 1.30
0217+324	3.60 ± 0.40	1.79 ± 0.40	0.46 ± 0.20	6.26 ± 1.50
<b>0235+164</b>	2.54 ± 0.30	1.81 ± 0.40	0.17 ± 0.30	5.13 ± 1.20
0239+175	-2.97 ± 0.30	-1.84 ± 0.40	0.13 ± 0.30	-5.67 ± 1.30
0229+131	0.26 ± 0.40	1.09 ± 0.30	-0.11 ± 0.20	1.32 ± 1.50
<b>0440-003</b>	2.34 ± 0.80	1.38 ± 0.60	0.50 ± 0.40	4.51 ± 1.80
0447-010	1.79 ± 0.60	1.22 ± 0.50	0.43 ± 0.40	3.71 ± 1.60
0450+013	1.33 ± 0.80	0.25 ± 0.60	0.10 ± 0.30	1.73 ± 1.90
<b>0446+112</b>	0.90 ± 0.30	0.78 ± 0.20	0.16 ± 0.10	2.04 ± 0.80
0446+113	1.17 ± 0.20	0.50 ± 0.20	0.18 ± 0.10	2.07 ± 0.80
0445+097	0.19 ± 0.20	0.47 ± 0.20	0.05 ± 0.10	0.75 ± 0.80
<b>1749+096</b>	0.63 ± 1.00	-0.86 ± 0.30	0.08 ± 0.20	-1.07 ± 2.20
1745+085	4.71 ± 1.00	0.94 ± 0.30	0.24 ± 0.20	3.41 ± 1.90
1749+062	-4.65 ± 0.80	-0.16 ± 0.30	-0.05 ± 0.20	-1.44 ± 2.10
<b>2136+141</b>	2.71 ± 0.50	0.47 ± 0.20	0.10 ± 0.20	2.42 ± 1.80
2137+130	1.94 ± 0.40	0.18 ± 0.20	-0.39 ± 0.20	1.15 ± 1.70
2141+175	-3.09 ± 0.40	-1.64 ± 0.20	-0.68 ± 0.20	-5.29 ± 1.30
<b>2145+067</b>	-0.55 ± 1.10	-0.43 ± 0.80	-0.13 ± 0.40	-1.17 ± 2.30
2149+056	2.37 ± 1.30	1.47 ± 0.90	0.41 ± 0.40	4.56 ± 2.70
2144+092	-1.25 ± 1.00	-1.22 ± 0.70	-0.21 ± 0.30	-2.90 ± 2.10

ядра составили величину 1.79, 1.22 и 0.18 мсек дуги для диапазонов L, S и C, соответственно, относительно диапазона X. Причём 5 из этих 9 источников входят в список определяющих объектов ICRF и выделены жирным шрифтом.

Обращаем внимание на обнаруженный в ряде источников обратный сдвиг ядра. Пока нет однозначного понимания его причин. Важно разобраться, это истинный астрофизический эффект или результат неучтенной специфики метода измерения. Ранее подобный эффект не регистрировался в рамках массовых измерений частотного сдвига ядра, использующих относительный метод самопривязки [45; 46]. Возможно, только астрометрический метод измерений чувствителен к этому эффекту, либо же в данных присутствует неучтенная систематика. Для дальнейшего исследования этого эффекта нужны новые, более качественные, чувствительные и массовые измерения сдвига положения ядра. Необходимо будет

начать, прежде всего, с источников, в которых эффект обратного сдвига проявил себя в наблюдениях, представленных в данной работе.

Для сравнения был измерен сдвиг ядра относительным астрометрическим методом, когда вектор относительного сдвига  $CS_{\text{rel}}$  для пары источников раскладывался по направлениям релятивистских выбросов. Результаты этого метода представлены на рисунке 1.6. Поскольку наблюдались триплеты близких источников, связанных одним фазовым решением, были получены по два измерения для каждого объекта. Как видно из графиков, для одного и того же источника измерения и их ошибки могут сильно зависеть от того, с каким источником в паре проводились измерения. Это связано с разным расстоянием между источниками и углом между направлениями выбросов. Тем не менее, результаты попарного измерения сдвига ядра в большинстве случаев согласуются с результатами, полученными по триплетам в целом.

## 1.4.2 Измерение сдвига ядра сопоставлением изображений источника в разных диапазонах

Для источников с достаточно протяжённой структурой сдвиг ядра был также измерен методом выравнивания изображений каждого источника независимо для всех пар частот, как описано в работе [46]. Восстановленные изображения были свёрнуты с одинаковой диаграммой направленности, равной средней между всеми частотами. При этом определение положения ядра проводилось с помощью моделирования структуры источника как набора круговых гауссовых компонентов (см. раздел 1.2.5). Таким образом удалось успешно определить сдвиг ядра для одной и более пар частот для 15 источников (в сумме 41 пара частот). Как видно на рисунке 1.7, измеренный таким образом сдвиг хорошо согласуется с предположением, что он направлен вдоль выброса.

Так как для 12 объектов сдвиг успешно измерен более, чем для одной пары частот, есть возможность изучить его зависимость от частоты. Считая, что она имеет вид  $r_{\text{core}} \sim \nu^{-1/k_r}$ , была построена такая модель для полученных измерений, и оказалось, что она почти не накладывает ограничений на показатель степени  $k_r$  в диапазоне от 0.6 до  $\infty$ . Поэтому для дальнейшего анализа использовалось

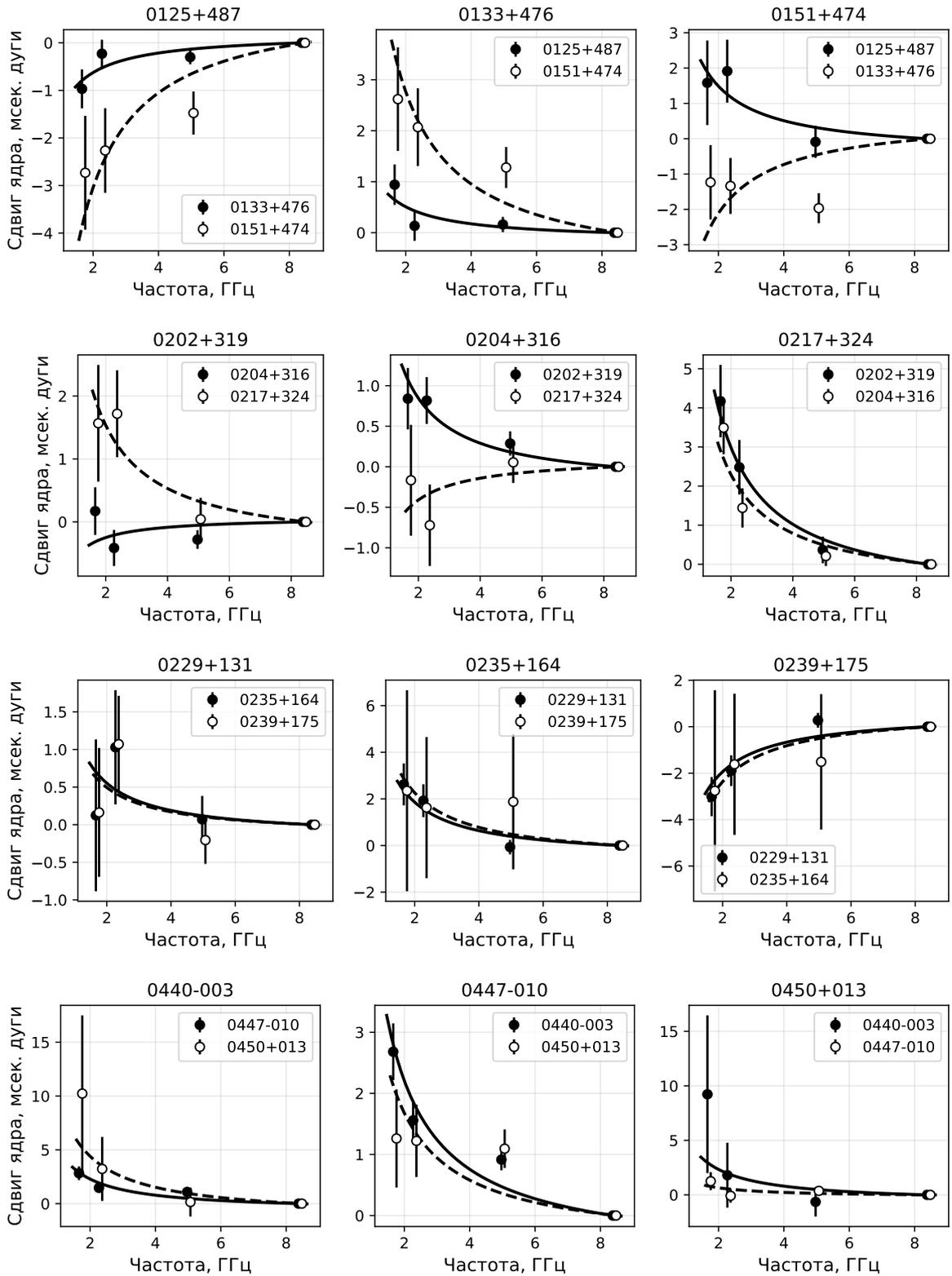


Рисунок 1.6 — Зависимость сдвига ядра от частоты относительно диапазона X, измеренного путём разложения вектора относительного сдвига на направления выбросов проекционно близких источников, рассматриваемых попарно. Сплошная и пунктирная линии — зависимости  $\Delta r_{\text{core}} = a + b/\nu$ , подогнанные к закрашенным и незакрашенным точкам, соответственно. Результаты получены методом относительной астрометрии.

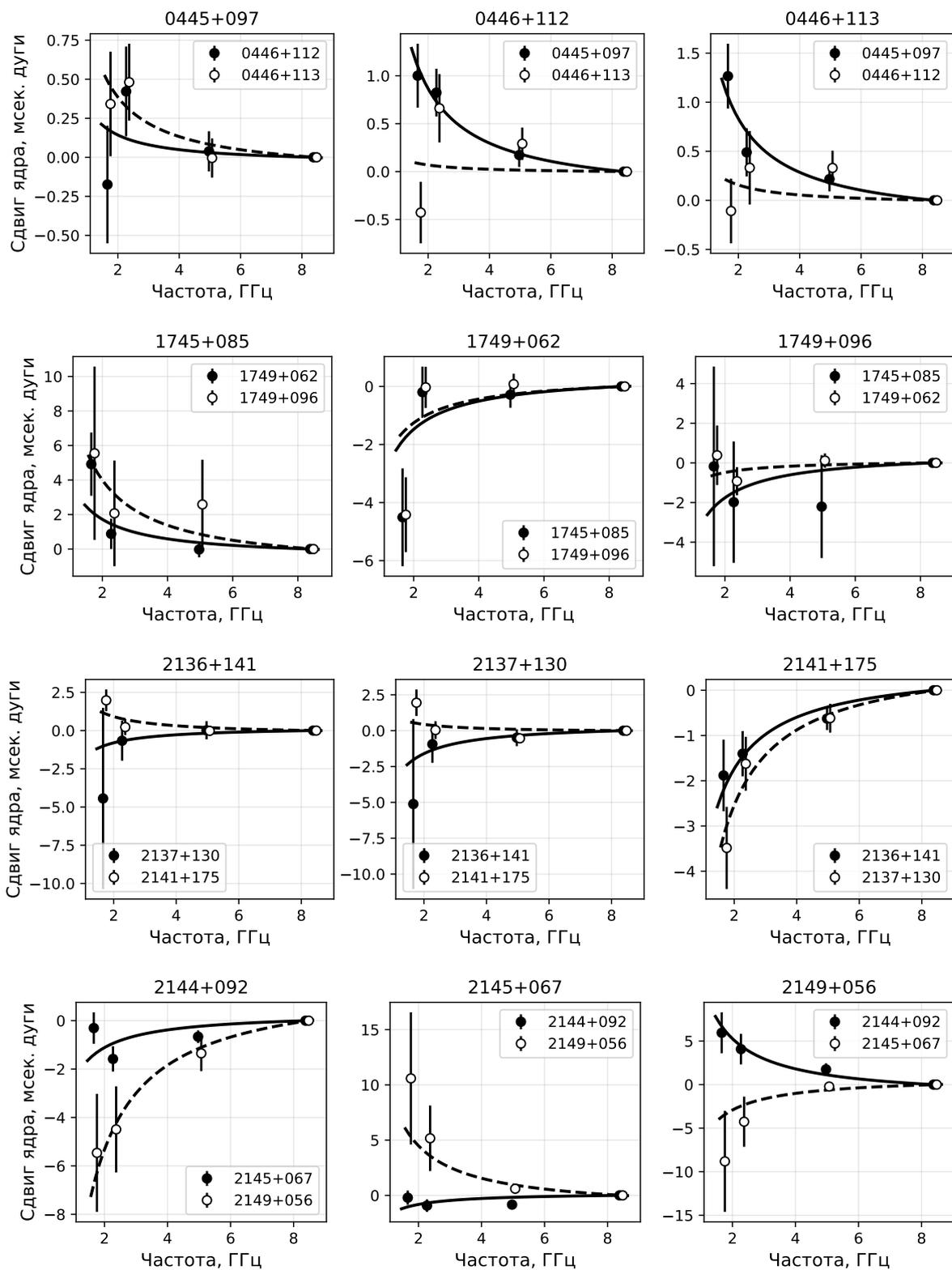


Рисунок 1.6 — продолжение.

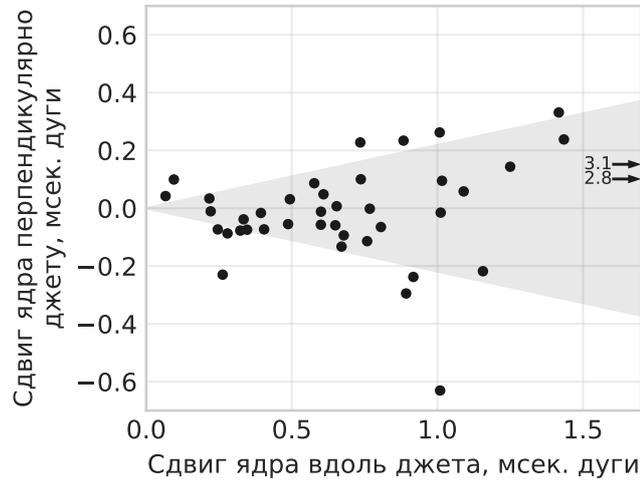


Рисунок 1.7 — Измеренные сдвиги ядра, показанные относительно направления релятивистского выброса источников. Стрелками показаны два измерения, которые существенно превышают остальные; числа у стрелок обозначают их положение по горизонтальной оси. В закрашенную область с углом  $12^\circ$  попадаю 68 % сдвигов. Оценка типичной ошибки составляет 0.3 мсек дуги.

значение  $k_r = 1$ , согласующееся с предыдущими работами [77]:  $r_{\text{core}} \sim v^{-1} \sim \lambda$  и  $\Delta r_{\text{core}} \sim \lambda_2 - \lambda_1$ . На рисунке 1.8 показана зависимость сдвига ядра от разницы длин волн, между которым он измерен.

Сравнение типичного сдвига ядра между диапазонами X и S (8 и 2 ГГц), которое составляет для источников данной работы 0.65 мсек дуги, хорошо согласуется с результатами [46; 56; 77]: в них оценки на медианный сдвиг  $X \rightarrow S$  составляют величину 0.44, 0.71 и 0.53 мсек дуги, соответственно.

Следует отметить, что сдвиг между диапазонами S и L (2.3 и 1.7 ГГц) удалось измерить только для одного объекта. Это можно объяснить тем, что эти частоты достаточно близкие, а разрешение достигаемое на них в 3–4 раза хуже, чем для пары X и S. Два измерения, существенно превышающие типичное значение сдвига ядра, равны 2.8 и 3.1 мсек дуги для пар  $S \rightarrow L$  и  $X \rightarrow L$ , соответственно. Они показаны стрелками на рисунке 1.7, и относятся к источнику 0217+324. Сравнение его изображения в диапазоне L с другими показывает, что никакой методологической ошибки в измерениях допущено не было. Таким образом, в случае этого источника можно утверждать, что в диапазоне L видна некая существенно более удалённая область релятивистской струи, более яркая, чем ядро. Этот эффект требует отдельного изучения, с использованием наблюдений с большей чувствительностью.

Сравнение результатов двух рассмотренных методов приведено на рисунке 1.9. Как видно, при хорошем покрытии UV-плоскости, то есть для источников с

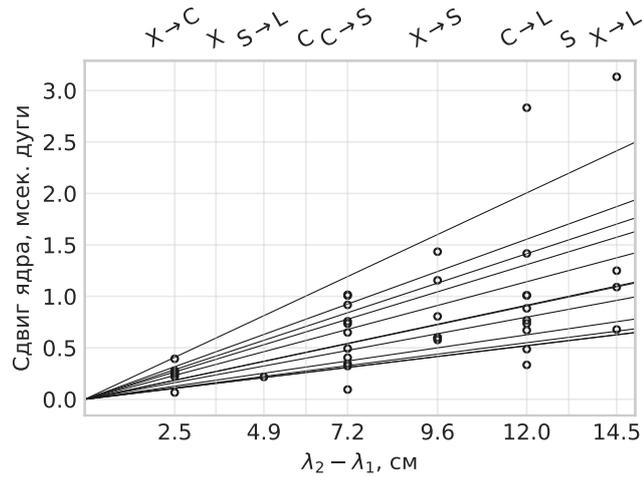


Рисунок 1.8 — Зависимость сдвига ядра, измеренного путём независимого сопоставления пар изображений одного источника в разных диапазонах, от разности соответствующих длин волн. В предположении  $r_{\text{core}} \propto \nu^{-1} \propto \lambda$  эта зависимость для каждого источника описывается прямой. Приведены только те источники, у которых сдвиг измерен более чем для одной пары частот. Изображены отдельные измерения и наилучшее линейное приближение для каждого источника. Ошибки на графике не приведены, их типичное значение составляет 0.3 мсек дуги. Отдельными символами диапазонов X, C, S отмечены значения  $\lambda_2 - \lambda_1$ , соответствующие сдвигу от указанного диапазона до истинного начала струи (т.е.  $\lambda_1 = 0$ ). Линии соответствуют источникам (снизу вверх): 0202+319, 0151+474, 0446+113, 2145+067, 0229+131, 2144+092, 1745+085, 0445+097, 0133+476, 0204+316, 0447-010.

высоким склонением (первые пять объектов на рисунке имеют склонение  $> 30^\circ$ ), для трёх из пяти объектов результаты методов достаточно близки и показывают близкую зависимость от частоты. В остальных случаях встречаются разные ситуации: от хорошего согласия (например, 1745+085) до полностью противоположного результата, то есть сдвига направленного в обратную сторону (например, 2144+092).

### 1.4.3 Геометрия и физические параметры

Все выводы о физическом строении релятивистских струй в данном разделе производились по измерениям сдвига ядра, полученным сопоставлением изображений на разных частотах (раздел 1.4.2). Астрометрический метод (раздел 1.3.3) иногда даёт результаты, которые не согласуются с базовым предположением о

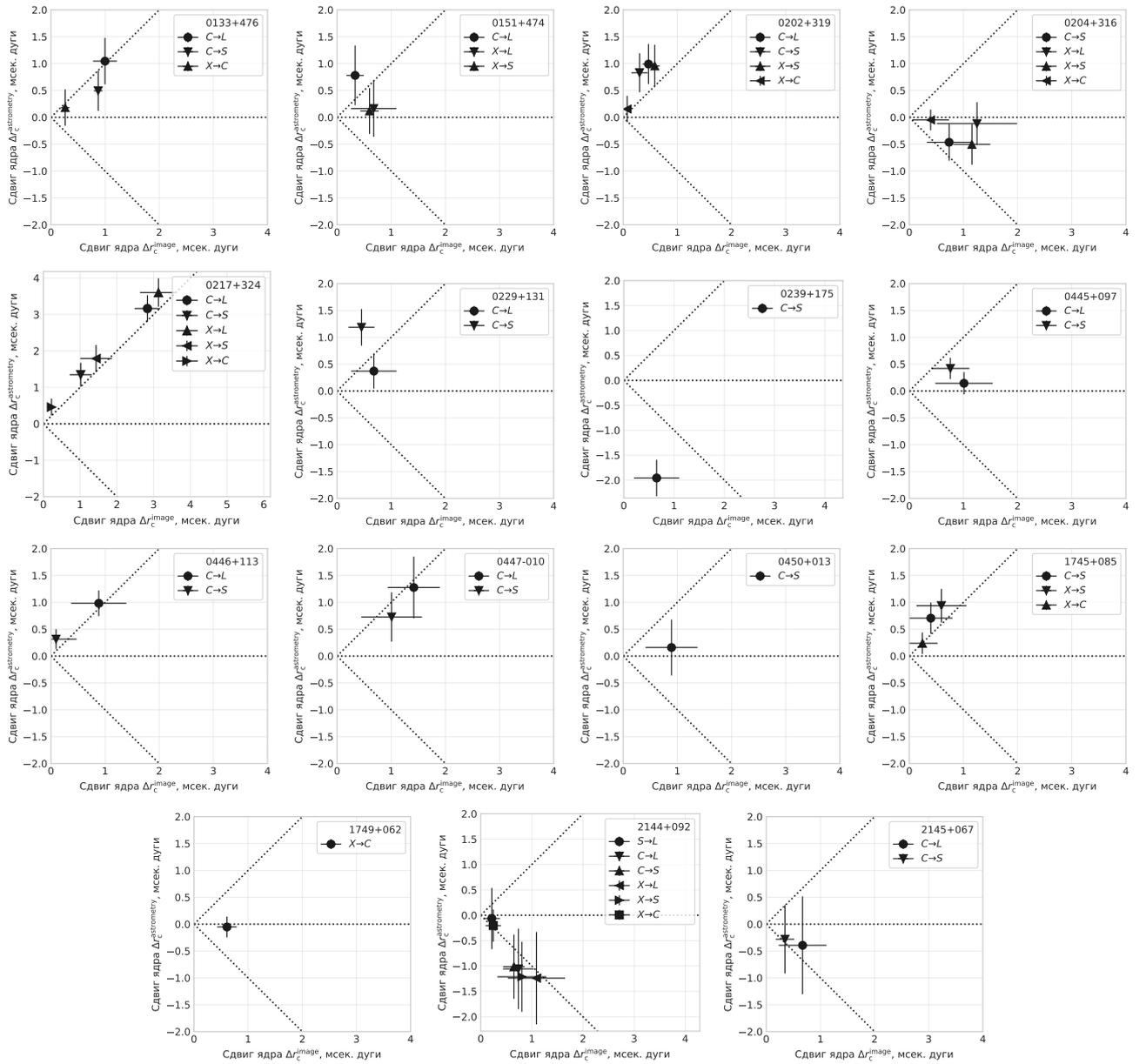


Рисунок 1.9 — Сравнение результатов измерений сдвига ядра двумя методами: основанном на сопоставлении изображений на разных частотах  $\Delta r_c^{\text{image}}$  (раздел 1.4.2) и астрометрическим  $\Delta r_c^{\text{astrometry}}$  (раздел 1.3.3, рис. 1.5). Пунктирными линиями показаны  $\Delta r_c^{\text{astrometry}} = \pm \Delta r_c^{\text{image}}$  и  $\Delta r_c^{\text{astrometry}} = 0$ .

синхротронном самопоглощении в основании выбросов. Для них необходимо будет провести дополнительные измерения и проверки.

Считая, что зависимость положения ядра от длины волны  $r_{\text{core}} \sim \lambda$  в среднем выполняется, можно оценить расстояние от истинного начала струи (соответствует  $\lambda_1 = 0$  в формулах выше) до ядра, наблюдаемого на некоторой частоте. На рисунке 1.8 отмечено соответствующее положение для диапазонов X, C и S. Типичное расстояние от истинного начала струи до 8 ГГц-ядра составляет величину 0.27 мсек дуги или 2.1 пк в проекции на небо. Истинное расстояние

от начала струи до 8 ГГц-ядра составляет  $\approx 20$  пк для выброса с типичным углом к лучу зрения  $\theta \approx 6^\circ$  [80].

Таблица 1.3 — Физические параметры источников (см. раздел 1.4.3). Здесь  $r_X$  — расстояние от начала релятивистской струи до видимого ядра в диапазоне X (8 ГГц) в проекции на небо,  $B_1$  — напряженность магнитного поля на расстоянии 1 пк от начала струи. Жирным шрифтом отмечены источники из ICRF.

Источник	$r_X$		$B_1$ (Гс)
	(мсек дуги)	(пк)	
<b>0133+476</b>	0.39	3.0	1.5
0151+474	0.16	1.3	0.7
<b>0202+319</b>	0.15	1.3	0.9
0204+316	0.42	3.6	2.1
0217+324	0.59		
0229+131	0.24	2.0	1.5
0445+097	0.34	2.9	2.2
0446+113	0.15	1.3	0.8
0447-010	0.46	2.8	1.0
1745+085	0.27		
2144+092	0.27	2.3	1.3
<b>2145+067</b>	0.19	1.5	0.8

На основе измеренного частотного сдвига ядра можно оценить величину магнитного поля вблизи начала струи. А именно, предполагая равномерное распределение плотности энергии магнитного поля и частиц и считая, что спектральный индекс струи  $\alpha = -0.5$  ( $S \sim \nu^\alpha$ ) и она наблюдается под углом близким к критическому (при котором видимая скорость движения деталей струи  $\beta_{\text{app}}$  максимальна), можно получить оценку напряжённости магнитного поля в Гс на расстоянии 1 пк от истинного начала струи:

$$B_1 \approx 0.042 \Omega_{\text{rv}}^{3/4} (1+z)^{1/2} (1 + \beta_{\text{app}}^2)^{1/8}, \quad (1.16)$$

где  $\beta_{\text{app}}$  — видимая скорость струи, а  $\Omega_{\text{rv}}$  — мера сдвига ядра, измеряемая в пк·ГГц [45]. Так как зависимость получаемого значения  $B_1$  от  $\beta_{\text{app}}$  слабая (так, при изменении  $\beta_{\text{app}}$  от 0 до 10  $B_1$  увеличивается лишь в 1.8 раза), использовалось фиксированное значение множителя  $(1 + \beta_{\text{app}}^2)^{1/8} = 1.5$ , что соответствует  $\beta_{\text{app}} = 5$  (это типичное значение  $\beta_{\text{app}}$  для внегалактических релятивистских струй, см. главу 3). Среднее значение магнитного поля на расстоянии 1 пк от истинного начала струи, оценённого таким образом, составило  $B_1 = 1.2$  Гс, а величины для

отдельных источников приведены в таблице 1.3. Предположение о равномерном распределении плотности энергии магнитного поля и частиц, по-видимому, справедливо для большинства АЯГ в спокойном состоянии [35].

## 1.5 Выводы

В данной главе исследовался эффект сдвига РСДБ-ядра с частотой в ультракомпактных внегалактических радиоисточниках из каталога реперов международной системы астрономических координат. Поскольку у этих источников отсутствует или слабо выражена протяжённая структура, эффект сдвига ядра измерялся методом относительной астрометрии. Для этого для каждого из 8 целевых источников были подобраны по 2 близких фазовых калибратора. Таким образом, получены результаты всего для 24 источников:

1. Разработаны два подхода, которые позволяют измерить эффект сдвига ядер АЯГ с частотой для каждого объекта в группе близких источников, связанных одним фазовым решением метода относительной РСДБ-астрометрии. Один подход заключается в разложении разности сдвигов ядра для пары источников по направлениям релятивистских струй этих источников, предполагая, что сдвиг происходит вдоль них. Другой позволяет объединить измерения произвольного количества близких источников для оценки эффекта сдвига ядра с учётом априорной информации о направлении струй для всех или только для части источников.
2. В наблюдениях впервые участвовали телескопы российской сети «Квазар-КВО» как часть европейской РСДБ сети. Их участие в наблюдениях улучшило результирующую точность измерений, чувствительность и качество восстановленных изображений.
3. Получены оценки сдвига ядра с частотой для 24 исследованных объектов. У 9 из них измеренный эффект значим. Для этих источников медианное значение сдвига РСДБ-ядра на частоте наблюдения 1.7, 2.3 и 5.0 ГГц относительно самой высокой частоты 8.4 ГГц составило величину 1.79, 1.22 и 0.18 мсек дуги, соответственно.

4. Для ряда источников удалось независимо измерить сдвиг ядра, используя метод привязки к протяжённой оптически тонкой структуре. Для них было оценено расстояние от видимого РСДБ-ядра на 8.4 ГГц до истинного начала релятивистской струи и напряжённость магнитного поля на расстоянии 1 пк. Типичные значения этих величин для исследованной выборки оказались равны 2 пк в проекции на небо и около 1 Гс, соответственно.
5. У 5 источников, которые входят в список «определяющих» объектов ICRF, обнаружен значимый частотный сдвиг ядра методом относительной астрометрии. Это источники 0133+476, 0202+319, 0235+164, 0440–003 и 0446+112. Также для 3 источников из списка ICRF, 0133+476, 0202+319 и 2145+067, сдвиг ядра был измерен методом привязки к оптически тонкой структуре. Таким образом, у 6 из 8 исследованных «определяющих» радиисточников ICRF был обнаружен и измерен значимый эффект сдвига ядра с частотой, который необходимо учитывать при решении высокоточных астрометрических задач.

## Глава 2. Обзор активных ядер галактик на наземно-космическом интерферометре «Радиоастрон»

В данной главе представлены результаты обработки обзора активных ядер галактик, который проводился на наземно-космическом интерферометре «Радиоастрон». Приведена статистика детектирований для полной выборки по потоку 163 внегалактических радиоисточников на наземно-космических базах на частоте 1.7, 4.8 и 22.2 ГГц. Показано, что многие источники дают значимый интерференционный отклик на проекциях баз до 345 000 км, что говорит об очень малых размерах излучающей области. Для источников 3C 273, B0529+483 и 0235+164 приведены результаты измерений размера и яркостной температуры ядра. Основные результаты, включая все рисунки и таблицы данной главы опубликованы в работах [A2–A5]. Личный вклад в данные работы указан во Введении к диссертации.

### 2.1 Введение

#### 2.1.1 Измерение яркостной температуры

Для характеристики интенсивности излучения радиоисточников часто используется такая величина как яркостная температура. По определению яркостная температура  $T_b$  — это температура такого абсолютно чёрного тела, интенсивность излучения которого равна интенсивности наблюдаемого объекта на данной частоте. В случае приближения Рэлея-Джинса, когда  $h\nu \ll kT$ , для источника с интенсивностью излучения  $I_\nu$

$$T_b = \frac{c^2}{2\nu^2 k} I_\nu, \quad (2.1)$$

где  $\nu$  — частота излучения,  $h$  и  $k$  — постоянные Планка и Больцмана соответственно,  $c$  — скорость света. Непосредственно измеряемые величины, спектральная плотность потока  $S_\nu$  и размер излучающей области  $\Omega$ , используются для вычисления интенсивности  $I_\nu = S_\nu/\Omega$ . Так для равномерно излучающего кружка с угловым размером  $\theta$  интенсивность будет равна  $I_\nu \approx S_\nu/(\pi\theta^2)$ . При отсутствии достаточной информации об истинном распределении яркости в компактной частично разрешённой излучающей области, часто в качестве приближения используется двумерное гауссово распределение, которое характеризуется плотностью потока  $S_g$  и большой и малой полуосями  $\theta_{\text{maj}}$  и  $\theta_{\text{min}}$  [36]. В этом случае яркостная температура при наблюдении на длине волны  $\lambda$  записывается как

$$T_b = \frac{2 \ln 2}{\pi k} \frac{S_g \lambda^2}{\theta_{\text{maj}} \theta_{\text{min}}}. \quad (2.2)$$

С другой стороны, разрешающая способность интерферометра определяется его максимальной базой  $D_{\text{max}}$ , и для неразрешенной излучающей детали можно определить только верхний предел её размера  $\theta_{\text{lim}} \sim \lambda/D_{\text{max}}$ , который также зависит от чувствительности инструмента [81]. Если подставить  $\theta_{\text{lim}}$  в выражение (2.2), то  $\lambda^2$  сократится и получится выражение для максимальной яркостной температуры к которой чувствителен данный интерферометр

$$T_b^{\text{lim}} \sim S_g D_{\text{max}}^2. \quad (2.3)$$

Таким образом, самая высокая яркостная температура, которую можно измерить с помощью радиоинтерферометра, не зависит от частоты наблюдения, а только от физической длины базы и точности измерения функции видности (см., например, [36]). Переход к более коротким длинам волн не помогает измерять более высокие яркостные температуры.

В экстремальных случаях интерферометрических наблюдений, например при наблюдениях космического интерферометра, данных может оказываться недостаточно для построения карты или даже надёжной подгонки модели источника. В этом случае можно оценить яркостную температуру по отдельным измерениям функции видности [82]. При отсутствии априорной информации о форме излучающей области разумно предположить её круговую симметрию. Тогда для оценки углового размера достаточно измерения амплитуды видности  $V_0$  на нулевой базе и  $V_q$  на базе  $q = D/\lambda$ . Например, для гауссова распределения

интенсивности излучения выражение для размера будет следующим:

$$\theta = \frac{2\sqrt{\ln 2} \lambda}{\pi} \frac{1}{D} \sqrt{\ln(V_0/V_q)}. \quad (2.4)$$

Отсюда может быть оценена яркостная температура:

$$T_b = \frac{\pi}{2k} \frac{D^2 V_0}{\ln(V_0/V_q)}. \quad (2.5)$$

Яркостная температура, посчитанная по формуле (2.5), имеет минимум при  $V_0 = eV_q$ , что даёт оценку на нижний предел яркостной температуры [82]:

$$T_{b,\min} = \frac{\pi e}{2k} D^2 V_q \approx 3.09 \left( \frac{D}{\text{км}} \right)^2 \left( \frac{V_q}{\text{МЯн}} \right) [\text{К}]. \quad (2.6)$$

Таким образом можно оценить минимальную яркостную температура всего по одному измерению амплитуды функции видности при отсутствии информации о полной плотности потока излучающей детали.

## 2.1.2 Исследование механизма излучения релятивистских струй

По современным представлениям активные галактические ядра излучают за счёт синхротронного механизма при движении релятивистских электронов в магнитном поле. В этой модели яркостная температура излучения в системе отсчёта релятивистской плазмы не может превышать  $10^{11.5}$  К [27; 28]. Так согласно расчётам [28], если яркостная температура превысит данный предел, например, из-за нестационарного впрыска очень высокоэнергичных электронов, то за время порядка часов или дней электроны потеряют свою энергию за счёт обратного Комптоновского эффекта (так называемая «Комптоновская катастрофа») и яркостная температура опустится ниже данного предела. Однако наблюдаемое излучение релятивистских струй может казаться более ярким из-за усиления Доплера за счёт движения излучающей плазмы в сторону наблюдателя (например, [83]). Кинематические исследования релятивистских струй с помощью РСДБ показывают, что Лоренц-фактор излучающей плазмы имеет типичные значения  $\Gamma \approx 10$  [84], так что доплеровское усиление не может увеличить видимую яркость

струй более чем в 100. Как показано в главе 3 данной работы, типичное усиление излучения в релятивистских струях блазаров находится на уровне  $\delta \approx 5-10$ .

В тоже время, на гамма-телескопе *Fermi* LAT и черенковских телескопах от блазаров наблюдается быстропеременное гамма-излучение высоких энергий. Комптоновские модели, которые описывают эту высокоэнергичную часть спектра, в том числе короткие вспышки в диапазоне ТэВ [85; 86], требуют гораздо более высоких значений Допплер-фактора, которые должны приводить к наблюдаемым яркостным температурам радио ядер выше  $10^{14}$  К.

Самые высокие яркостные температуры, измеренные в ядрах активных галактик на наземных интерферометрах, имеют величину около  $10^{13}$  К [35; 36]. Этот вывод согласуется с более ранними РСДБ наблюдениями из космоса, проведёнными во время экспериментов TDRSS [87–89] и в рамках программы космической обсерватории VSOP [21; 22; 90]. Эти наблюдения проводились на базах в 2.4 раза превышающие диаметр Земли, но обладали более низкой чувствительностью по сравнению с более поздними наземными наблюдениями. Дальнейшее увеличение интерферометрической базы является единственным практическим способом измерения значительно более высоких яркостных температур и, следовательно, проверки проблемы Комптоновской катастрофы. Наземно-космический интерферометр «Радиоастрон» [23] позволяет наблюдать на проекциях базы до 28 диаметров Земли, что обеспечивает чувствительность к яркостным температурам до  $10^{15}-10^{16}$  К. Это позволяет наложить строгие наблюдательные ограничения на физику наиболее энергичных релятивистских выбросов. Следует подчеркнуть, что до запуска проекта «Радиоастрон» было неизвестно, существуют ли компактные и достаточно яркие активные ядра, которые можно обнаружить с помощью космической РСДБ на базах, во много раз превышающих диаметр Земли. Косвенным доказательством того, что АЯГ содержат области с угловыми размерами порядка 10–50 мксек дуги, является результаты измерений внутрисуточной переменности (IDV) (например, [29]).

Одной из ключевых научных программ проекта «Радиоастрон» является обзор активных ядер галактик. Задача обзора — измерить и исследовать яркостную температуру центральных областей активных ядер галактик с целью лучше понять природу их излучения.

## 2.2 Выборка источников и наблюдения

Объекты, которые наблюдались в обзоре активных галактических ядер в проекте «Радиоастрон», включают в себя полную выборку из 163 источников с коррелированной плотностью потока  $S_c > 600$  мЯн, измеренной на самых больших проекциях баз наземных интерферометров на частоте 8 ГГц по данным каталога RFC (Radio Fundamental Catalog)<sup>1</sup> в 2012 году на момент составления выборки. На рисунке 2.1 представлено распределение космологических красных смещений этих активных ядер. Список источников был дополнен АЯГ с релятивистскими струями, показывающими максимальную скорость [72], источниками с сильными мерцаниями, отобранными по результатам исследований внутрисуточной переменности (IDV) (например, [29]), АЯГ с высоким красным смещением, близкими АЯГ и квазарами с широкими линиями поглощения. В данной работе обсуждаются только результаты, относящиеся к выборке с плотностью РСДБ потока  $S_c > 600$  мЯн.

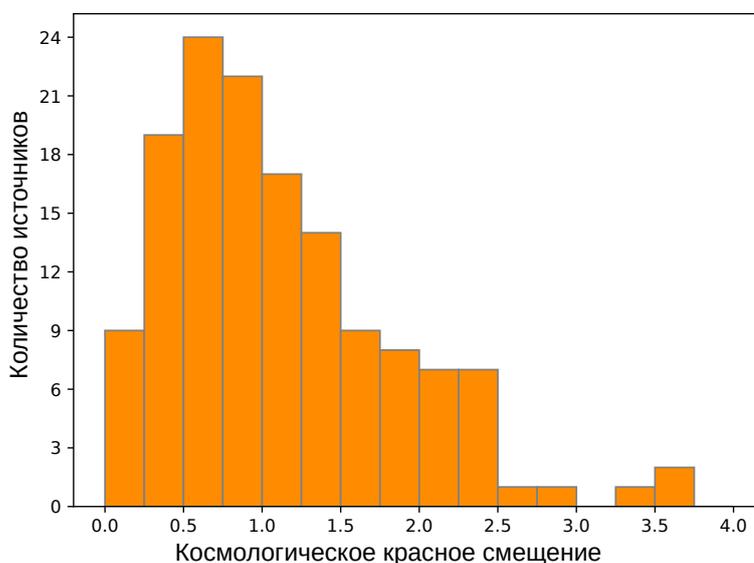


Рисунок 2.1 — Распределение космологических красных смещений для полной выборки 163 компактных внегалактических радиоисточников, ограниченной по плотности РСДБ потока.

Космическим элементом интерферометра «Радиоастрон» является радиотелескоп диаметром 10 метров на борту космического аппарата «Спектр-Р», который был запущен 18 июля 2011 года с космодрома Байконур [91]. «Спектр-Р»

<sup>1</sup><http://astrogeo.org/rfc/>

движется по высокоэллиптической орбите, параметры которой существенно эволюционируют под воздействием гравитационных возмущений от Солнца, Луны и нецентральности гравитационного поля Земли [92]. За время работы миссии апогей орбиты менялся в пределах от 280 000 км до 351 000 км, перигей от 650 км до 80 000 км, а орбитальный период от 8.1 до 10.2 дней [52]. Космический радиотелескоп (КРТ) имеет четыре приёмника, работающих в стандартных радиоастрономических диапазонах частот: 18–25 ГГц (диапазон К), 4.8 ГГц (С), 1.7 ГГц (L) и 324 МГц (Р). Облучатели приёмников расположены коаксиально (один внутри другого), что позволяет проводить наблюдения одновременно на любых двух доступных диапазонах частот. Каждый приёмник имеет независимый канал для записи левой и правой круговой поляризации. Селектор позволяет выбирать два канала промежуточных частот (либо две поляризации одного приёмника, либо два диапазона с разными поляризациями) для дальнейшей оцифровки сигнала в формате и передачи данных через остронаправленную антенну на наземную станцию слежения. Более подробное описание миссии «Радиоастрон» и космического радиотелескопа, включая его калибровку, представлено в работах [23; 93].

Обзор активных галактических ядер проводился независимо в трёх диапазонах с центральной частотой 22.2 ГГц (К), 4.8 ГГц (С) и 1.7 ГГц (L). Обзор был поддержан следующими наземными радиотелескопами, с которыми были получены интерференционные лепестки на базе с КРТ: Arecibo 305 м, фазированная решётка Australia Telescope Compact Array (ATCA), Бадары 32 м, Ceduna 30 м, Effelsberg 100 м, Евпатория 70 м, Green Bank Telescope (GBT) 100 м, Hartebeesthoek 26 м, Hobart 26 м, Irbene 32 м, Jodrell Bank 76 м, Калязин 64 м, Medicina 32 м, Мопра 22 м, Noto 32 м, Parkes 64 м, Robledo 70 м, Sheshan 25 м, Светлое 32 м, Tianma 65 м, Torun 32 м, Usuda 64 м, фазированная решётка Karl G. Jansky Very Large Array (VLA), фазированный радиотелескоп Westerbork Synthesis Radio Telescope (WSRT), Yebes 40 м и Зеленчукская 32 м. Обзор АЯГ также поддерживался долгосрочным многочастотным мониторингом полной плотности потока на радиотелескопах PATAH-600 (1–22 ГГц) и OVRO (15 ГГц), а также измерениями внутрисуточной переменности в обсерваториях Effelsberg [94], ATCA, WSRT и Urumqi. Скорость записи интерферометрических данных КРТ составляла величину 128 Мбит/с с дискретизацией 1 бит, наземные телескопы использовали 2-битную оцифровку сигнала с общей скоростью 256 Мбит/с. Все телескопы записывали по два канала шириной 16 МГц каждый на каждую поляризацию.

Чувствительность наземно-космического интерферометра зависит от чувствительности наземных телескопов, а также от времени когерентности, за которое можно интегрировать данные без существенных потерь. Типичное время интегрирования (непрерывной регистрации данных) для диапазонов 1.7 и 4.8 ГГц было выбрано равным 15–20 минутам, в то время как на 22.2 ГГц использовались 10-минутные сканы. Результирующая чувствительность на уровне  $7\sigma$  с самыми большими наземными телескопами составляла величину до 6 мЯн на 1.7 и 4.8 ГГц и 60 мЯн на 22.2 ГГц.

Обзорные наблюдения начались в рамках ранней научной программы проекта «Радиоастрон» и продолжались как одна из ключевых научных программ, охватывая период с мая 2012 по июнь 2016 года включительно. Каждая наблюдательная сессия наземно-космического интерферометра обычно длилась 40–60 минут и была разбита на сканы продолжительностью 10–20 минут. В рамках одной сессии в большинстве случаев наблюдался один источник, наземную поддержку обеспечивали типично от двух до пяти телескопов на частотный диапазон.

Во время сеанса интерферометрических наблюдений накладывались определённые ограничения на ориентацию КРТ и положение наблюдаемых объектов относительно небесных тел. Во-первых, поскольку интерферометрические данные передаются с КРТ на Землю в режиме реального времени, станция слежения должна быть видна для поворотной остронаправленной антенны спутника во время проведения наблюдений. Во-вторых, угол между электрической осью КРТ и направлением на Солнце должен быть больше  $90^\circ$  и меньше  $165^\circ$ . Также, наблюдаемый источник не должен находиться ближе  $5^\circ$  от края диска Земли или Луны. В-третьих, для охлаждения привода остронаправленной антенны, наблюдательные сеансы должны быть разделены промежутками не менее трёх часов. Для моделирования ограничений, связанных с КРТ, использовался программный пакет *Fakerat* [95] на основе кода *Fakesat* [96–98], а для вычисления видимости источников и генерации контрольных *vex*-файлов для наземных телескопов — пакет *SCHED*. Станция слежения в Пушино функционировала с самого начала обзора [23], а станция слежения в Green Bank [99] присоединилась к миссии в августе 2013 года. Учитывая вышеуказанные ограничения, была предпринята попытка наблюдать каждый источник несколько раз, чтобы охватить весь диапазон доступных наземно-космических баз. За счёт быстрой эволюции орбиты КРТ, длина и позиционный угол базы существенно менялись для данного источника за годы проведения обзора [52].

К июню 2016 года были проведены наблюдения около 90 % источников всей выборки. Оставшиеся источники это объекты с низким склонением, которые труднее планировать из-за ограниченной доступности телескопов в Южном полушарии и более жёстких ограничений видимости КРТ из-за отсутствия станции слежения на юге.

Поскольку задачей обзора было измерение коррелированной плотности потока с целью оценки размеров и яркостей источников, запись двух круговых поляризаций не была обязательной. Чтобы повысить результативность наблюдений, была выбрана следующая схема. КРТ проводил наблюдения в режиме одной поляризации в двух диапазонах. Как правило, это была комбинация диапазонов L и C или C и K. Важным преимуществом этого режима наблюдения является возможность использовать остаточную задержку и её производные, найденную на более низкой частоте, для корреляции и поиска лепестков на более высокой. При этом часть наземных телескопов наблюдала в одном диапазоне, а часть в другом, с записью двух круговых поляризаций. Некоторые телескопы переключались между частотами наблюдения во время сеанса.

## 2.3 Анализ данных космического РСДБ и результаты детектирования

Корреляция интерферометрических данных проводилась на программном корреляторе в Астрокосмическом центре ФИАН в Москве [55]. Посткорреляционный анализ был проведён в пакете *PIMA*<sup>2</sup> [100]. Данный программный пакет позволяет достаточно легко автоматизировать процесс обработки с помощью скриптов, что важно для обзора АЯГ, поскольку он включает более трёх тысяч наблюдательных сеансов. Для наблюдений, в которых был получен значимый интерференционный сигнал, обработка включала следующие этапы: а) фазовая калибровка (подгонка интерференционных лепестков); б) калибровка комплексной полосы пропускания; в) амплитудная калибровка с использованием системных температур и коэффициентов усиления, измеренных на телескопах. Непосредственным результатом обработки является коррелированная плотность

---

<sup>2</sup><http://astrogeo.org/pima/>

потока в Янских на той или иной проекции базы. Все результаты посткорреляционной обработки записывались в базу данных для дальнейшего анализа.

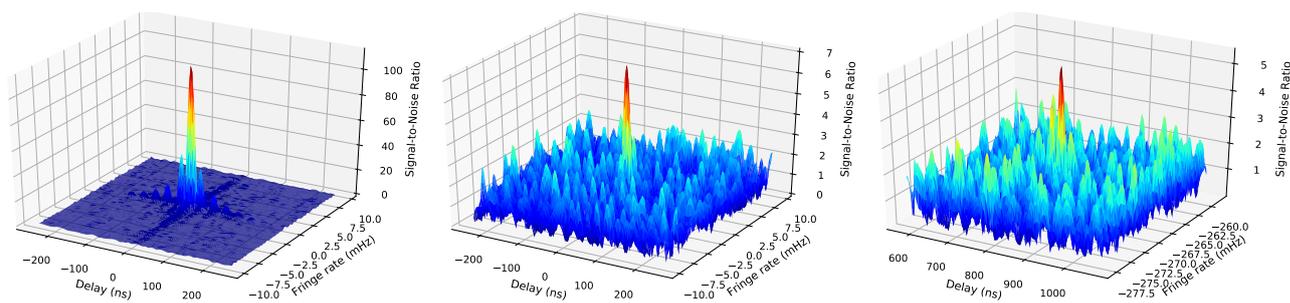


Рисунок 2.2 — Примеры интерференционных лепестков, полученных при наблюдениях источника 0716+714 на 4.8 ГГц. По горизонтальным осям отложены остаточная задержка (нс) и частота интерференции (мГц), по вертикальной — соотношение сигнал/шум. Слева: детектирование с  $\text{PFD} < 10^{-100}$  на проекции базы 7.0 ED, KPT–Effelsberg,  $\text{SNR} = 138$ ; по центру: детектирование с  $\text{PFD} = 10^{-8}$  на проекции базы 21.9 ED, KPT–Effelsberg,  $\text{SNR} = 7.3$ ; справа: недетектирование (шумовой отклик) с  $\text{PFD} = 0.07$  на проекции базы 22.0 ED, KPT–Noto,  $\text{SNR} = 5.3$ .

Распределение доли источников, от которых получен значимый интерференционный отклик, в зависимости от проекции наземно-космической базы представлено на рисунке 2.3 для трёх частот наблюдения. Детектирование считалось значимым, если вероятность ложного детектирования (*англ.* Probability of False Detection, PFD) составляет величину менее 0.01 %. Примеры интерференционных лепестков с разными значениями PFD показаны на рисунке 2.2. Чтобы определить соответствие между полученным отношением сигнал/шум (*англ.* Signal-to-Noise Ratio, SNR) и PFD для каждого скана наблюдения, был использован подход, предложенный в работе [100]. По результатам поиска лепестков были построены гистограммы распределения соотношений сигнал/шум. Левая часть этого распределения, с низким значениями SNR, представляет собой результаты наблюдений, где источник не был продетектирован, то есть случайные шумовые отклики интерферометра. Подгонка теоретической функции (раздел 9.3.4 в [101]) в полученное распределение позволяет определить вероятность ложного детектирования для любого значения SNR (рис. 2.4). Распределение шумовых SNR зависит от параметров корреляции данных, а именно: количества спектральных каналов в частотном канале шириной 16 МГц, времени интегрирования в корреляторе и длины скана (то есть интервала поиска лепестков). Для каждого используемого набора этих параметров находилось своё теоретическое распределение, которое использовалось для расчёта значения PFD для каждого скана наблюдений. Пример эмпирического распределения SNR и подгонки теоретической кривой показан на рисунке 2.4.

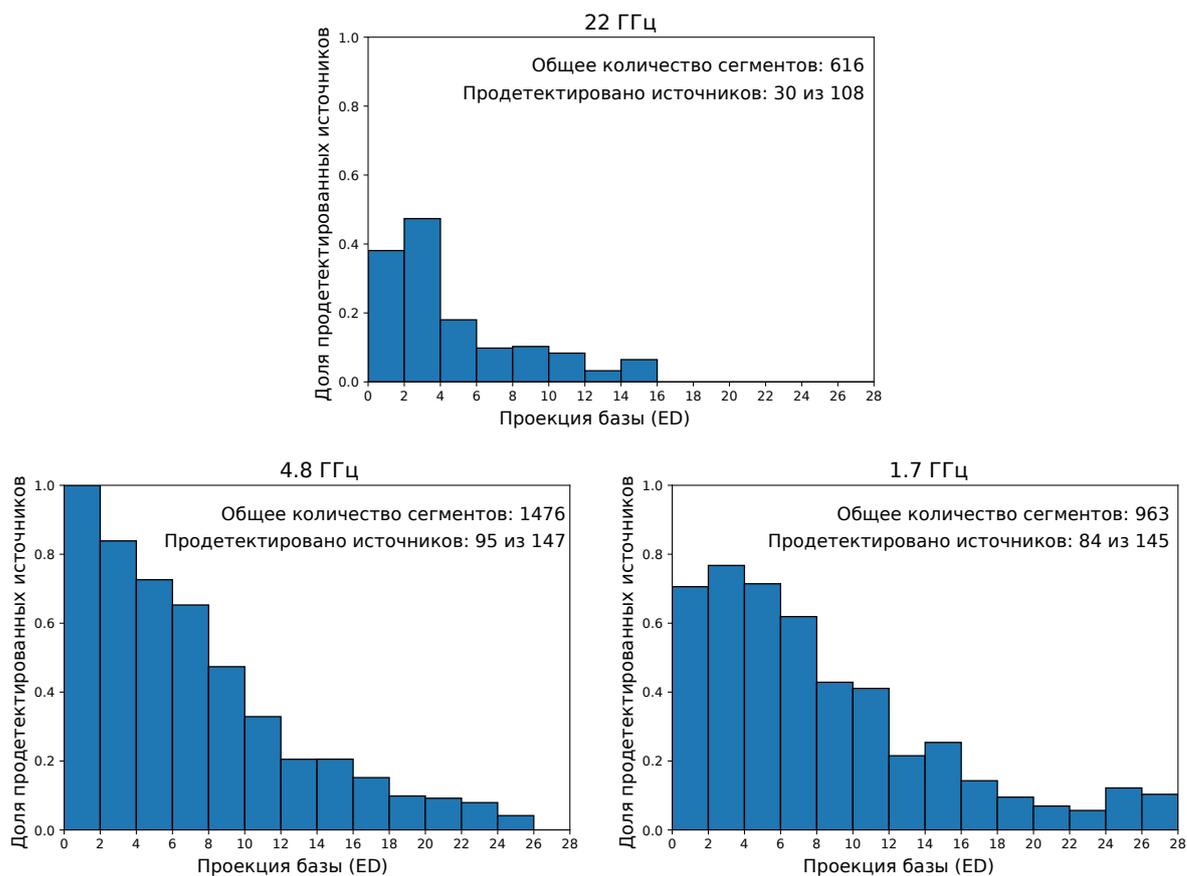


Рисунок 2.3 — Доля продетектированных источников в зависимости от проекции наземно-космической базы (в диаметрах Земли, ED) при наблюдениях на 22.2 (K-band), 4.8 (C-band) и 1.7 ГГц (L-band).

В целом, значимый интерференционный сигнал на наземно-космических базах был найден в чуть более чем одной трети сеансах наблюдений обзора. Приоритет наблюдений на коротких наземно-космических базах отдавался программам картографирование активных ядер, наблюдения пульсаров, мазеров и гравитационного красного смещения. Сеансы обзора АЯГ проводились на этих базах по остаточному принципу. Это несколько снизило процент детектирований на проекциях меньше 2 диаметров Земли в диапазонах 1.7 ГГц и 22 ГГц (рис. 2.3). Более сильная статистика для наблюдений в диапазоне 4.8 ГГц приводит к лучшему, несмещенному первому бину гистограммы.

Около двух третей источников из полной выборки были продетектированы на наземно-космических базах. Это означает, что во многих релятивистских струях АЯГ, скорее всего в их ядрах [36], есть чрезвычайно компактные области очень яркого синхротронного излучения. Активные ядра галактик, которые были продетектированы на максимальных проекциях баз 25 диаметров Земли или больше, это 0048–019, 0106+013, 0119+115, 0235+164, 0716+714, 1253–055 на ча-

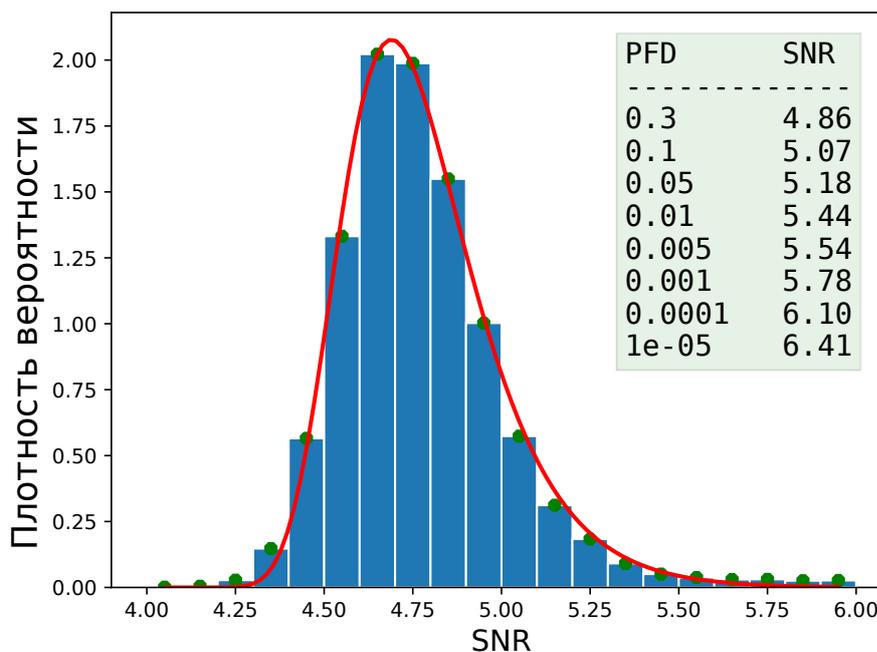


Рисунок 2.4 — Левая часть распределения значений соотношения сигнал/шум (SNR), полученных при поиске интерференционных лепестков в данных обзора АЯГ. Распределение, представленное на рисунке, получено по данным на 4.8 ГГц, скоррелированным со следующими параметрами: 64 спектральных канала на 16-МГц полосу, время интегрирования в корреляторе — 0.5 с, интервал поиска лепестков — 10 мин. Красная кривая — это теоретическое распределение [101], вписанное в пик распределения малых SNR, соответствующих случаю отсутствия сигнала. На врезка показано соответствие между PFD и SNR для данного набора параметров корреляции.

стоте 1.7 ГГц и 0235+164, 1124–186 на 4.8 ГГц. На частоте 22.2 ГГц на проекциях баз около 15 диаметров Земли или 14 Гл и более сигнал получен от источников 0235+164, 0716+714 и 0851+202. Оказалось, что многие релятивистские струи АЯГ, протектированные в обзоре, имеют яркостную температуру, значительно превышающую предел Комптоновской катастрофы, на расстоянии парсеков от центральной машины (см. главу 1). Для большинства из них яркостная температура намного превышает значение температуры при равномерном распределении плотности энергии магнитного поля и частиц [27; 28].

Постепенный спад доли протектированных источников на гистограммах говорит о том, что источники разрешаются на больших проекциях баз. Различия гистограмм на разных частотах наблюдения в первую очередь связано с различной чувствительностью интерферометра. В то время как наблюдения в диапазонах С и L имеют сопоставимый уровень чувствительности, в диапазоне К чувствительность интерферометра значительно ниже по следующим трём причинам: ниже эффективность как наземных, так и космического телескопов, выше их

системная температура, время когерентного накопления на 22.2 ГГц значительно меньше, чем на 4.6 и 1.7 ГГц из-за тропосферы Земли.

Так же стоит отметить возможное превышение доли детектирований на самых больших проекциях наземно-космических баз на 1.7 ГГц по сравнению с результатами на 4.6 ГГц при сравнимой чувствительности (рис. 2.3). Это может быть признаком субструктуры рассеяния, первоначально обнаруженной по наблюдениям пульсаров на «Радиоастрон» [102; 103] и позднее подтверждённой наземными наблюдениями Sgr A\* [104; 105], а также наблюдениями некоторых квазаров на «Радиоастроне» (см. подразделы 2.4.1 и 2.4.2).

## 2.4 Измерения яркостной температуры индивидуальных источников в проекте «Радиоастрон»

Перейдём к детальному рассмотрению наблюдений некоторых объектов из обзора, представляющих отдельный интерес. Это источники 3C 273, B0529+483 и 0235+164, от которых был получен значимый интерференционный отклик на больших проекциях наземно-космических баз во всех трёх диапазонах, что свидетельствует об их высокой яркостной температуре.

### 2.4.1 Квазар 3C 273

3C 273 — первый радиоисточник, который был отождествлён с классом объектов, которые теперь называются квазары [106; 107]. Он имеет космологическое красное смещение  $z = 0.158$ , что соответствует фотометрическому расстоянию 750 Мпк. Квазар 3C 273 регулярно картографируется на радиоинтерферометрах на протяжении последних четырёх десятилетий. В частности он включён в программу мониторинга MOJAVE на частоте 15 ГГц на системе апертурного синтеза VLBA [108]. Как видно на рисунке 2.5, релятивистская струя быстро становится хорошо разрешённой. Тем не менее, амплитуда функции видности остаётся на уровне нескольких Янских вплоть до максимальных наземных баз, что со-

ответствует яркой детали в видимом основании струи, где оптическая толщина приближается к единице. Предыдущие оценки яркостной температуры для ядра 3C 273 включают  $5 \times 10^{11}$  К из космических [22] и до  $6 \times 10^{12}$  К из наземных [36] РСДБ экспериментов.

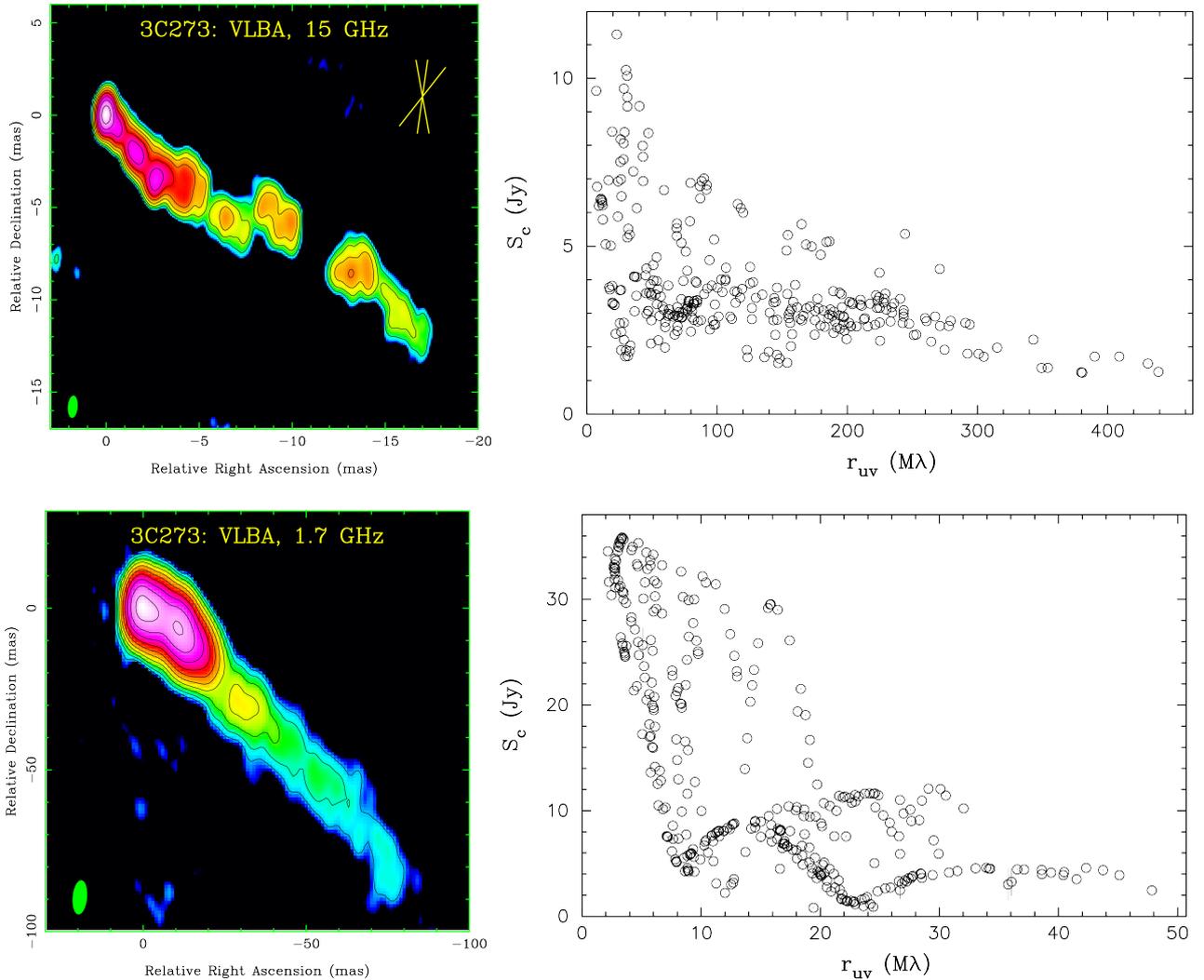


Рисунок 2.5 — Результаты наземных РСДБ наблюдений на VLBA квазара 3C 273 на 15 ГГц (вверху, 10 февраля 2013 г., пик интенсивности 3.2 Ян/луч, уровень шума 1.4 мЯн/луч, размер диаграммы направленности  $1.21 \times 0.53$  мсек дуги) и 1.7 ГГц (внизу, 18 августа 2011 г., пик интенсивности 9.6 Ян/луч, уровень шума 2.2 мЯн/луч, размер диаграммы направленности  $10.6 \times 4.4$  мсек дуги). Слева: изображение полной интенсивности в условных цветах и контурах, диаграмма направленности на уровне половины мощности обозначена зелёным эллипсом, по осям отложены относительные прямое восхождение и склонение в мсек дуги. Жёлтые линии на изображении 15 ГГц показывают диапазон позиционных углов наземно-космических баз при наблюдениях в рамках обзора:  $10^\circ$ ,  $-8^\circ$ ,  $-38^\circ$ . Справа: соответствующая амплитуда функции видности (коррелированная плотность потока, Ян) в зависимости от проекции базы (в миллионах длин волн).

## Наблюдения

Квазар 3C 273 неоднократно наблюдался в обзоре АЯГ в проекте «Радио-астрон» и был протестирован во всех диапазонах частот на проекциях наземно-космических баз до 13 диаметров Земли. В таблице 2.1 представлен список наблюдений в которых был получен значимый отклик на наземно-космических базах в период с декабря 2012 по февраль 2013 года. Интерференционные лепестки были получены с крупнейшими радиотелескопами, такими как 100-м телескопом NRAO в Грин-Бэнк (GBT), фазированным VLA, 100-м радиотелескоп в Эффельсберге и 305-м Аресибо. В этих наблюдениях проекции баз интерферометра доходили до 170 000 км и 7.6 Гλ.

Таблица 2.1 — Результаты оценки параметров ядра квазара 3C 273 по наземно-космическим наблюдениям в рамках обзора АЯГ. Здесь GRT — наземные телескопы с которыми были получены лепестки,  $D$  — длина проекции базы в тыс. км и длина волн, P.A. — позиционный угол базы, SNR — соотношение сигнал/шум лепестка,  $S_t$  — полная плотность потока ядра,  $S_c$  — максимальная коррелированная плотность потока на наземно-космических базах,  $\theta$  — оценка углового размера излучающей детали,  $T_b$  — оценка яркостной температуры в системе отсчёта источника,  $T_{b,min}$  — нижний предел яркостной температуры в системе отсчёта источника.

Частота (ГГц)	Дата	GRT	$D$ ( $10^3$ км; Гλ)	P.A. (°)	SNR	$S_t$ (Ян)	$S_c$ (мЯн)	$\theta$ (мксек дуги)	$T_b$ ( $10^{12}$ К)	$T_{b,min}$ ( $10^{12}$ К)
22.2	2013-02-02	Gb, VLA	103; 7.6	-7	9.8	3.4	$125 \pm 22$	26	14	5.3
4.8	2012-12-30	Ar, Ef	90; 1.45	10	18.6	4.3	$125 \pm 17$	142	13	4.5
4.8	2013-02-02	Ar	103; 1.69	-8	11.6	4.3	$123 \pm 19$	122	17	5.2
1.7	2013-01-08	Gb	157; 0.87	-32	8.9	5.0	$42 \pm 7$	275	34	4.0
1.7	2013-01-25	Ar, Gb	171; 0.95	-38	12.0	5.0	$52 \pm 9$	246	42	6.3

## Оценка яркостной температуры

Для оценки яркостной температуры ядра было использовано предположение, что излучающая область имеет форму круглой Гауссианы (см. подраздел 2.1.1). Полная плотность потока компактной детали бралась из наземных интерферометрических измерений. Так из наблюдений MOJAVE в феврале 2013 года на 15 ГГц (рис. 2.5) полная плотности потока ядра равна  $S_t = 3.4$  Ян. Эта

оценка согласуется с измерениями на базе VLA–GBT на частоте 22 ГГц из наблюдений «Радиоастрона». На 1.7 ГГц плотность потока ядра  $S_t = 5$  Ян была оценена из моделирования данных VLBA (рис. 2.5) в предположении, что плотность потока значимо не изменилась за 1.5 года с момента наблюдений VLBA. Оценка плотности потока ядра на 4.8 ГГц  $S_t = 4.3$  Ян была получена путём интерполяции между значениями на 1.7 и 22 ГГц, считая спектральный индекс равным  $\alpha \approx -0.15$ .

По наблюдениями 2 февраля 2013 г. на частоте 22 ГГц получено два интерферометрических лепестка с SNR около 10 на наземно-космических базах между КРТ и телескопами GBT и VLA. Оба лепестка получены на проекциях базы примерно 8 Гλ, что соответствует формальному угловому разрешению 27 мсек дуги. Измеренная коррелированная плотность потока на этих базах близка к 0.1 Ян. Это соответствует круглой Гауссовой детали с угловым размером около 26 мсек дуги или 2.7 световых месяца в линейном масштабе. Стоит подчеркнуть, что оценки размера и яркостной температуры, представленные в таблице 2.1, мало чувствительны к неопределённости плотности потока на нулевой базе и к ошибкам измеренной амплитуде лепестков.

Наибольшая физическая длина проекции базы, на которой получены интерференционные лепестки, достигнута в наблюдениях 25 января 2013 г. на 1.7 ГГц между КРТ и телескопами GBT и Arecibo и равна 171 000 км. Поскольку способность интерферометра измерять яркостную температуру определяется физическими размерами базы и не зависит от частоты, в этих наблюдениях была измерена максимальная яркостная температура. Коррелированная плотность потока на этих базах составила величину около 50 мЯн, а соответствующая яркостная температура  $4 \times 10^{13}$  К. Позиционный угол наземно-космических баз в этих наблюдениях был  $-35^\circ$ , что примерно соответствует направлению поперёк релятивистской струи. Таким образом, если ядро вытянуто вдоль направления струи, оно будет иметь меньшую яркостную температуру, чем в предположении круглой детали. Однако, моделирование наземных данных VLBA на 1.7 ГГц показывает, что размер самой компактной детали вдоль струи не может превышать 0.7 мсек дуги. Соответственно, оценка яркостной температуры на 1.7 ГГц может уменьшиться не больше, чем в два раза.

В последней колонке таблицы 2.1 приведены оценки нижнего предела яркостной температуры 3С 273 в предположении, что излучающая область имеет форму круглой Гауссианы. Эти оценки не зависят от предположения полной плот-

ности потока компактной детали и определяются только амплитудой сигнала на больших проекциях баз (формула (2.6)). По результатам этих измерений можно сказать, что яркостная температура излучения, которое было продетектировано на наземно-космических базах не может быть меньше, чем  $5 \times 10^{12}$  К.

## Обсуждение

Самые высокие значения яркостной температуры  $T_b > 4 \times 10^{13}$  К были получены по измерениями на 1.7 ГГц. На этой частоте видимый размер источника может быть увеличен из-за рассеяния. С другой стороны, открытие рефракционной субструктуры в Sgr A\* [104] позволяет предположить, что рассеяние в турбулентной межзвёздной среде может приводить к переоценке коррелированной плотности потока на длинных наземно-космических базах с соответствующей переоценкой видимой яркостной температуры [109] на 1.7 ГГц. Даже если этот эффект присутствует в рассматриваемых данных, нужно подчеркнуть, что на более высоких частотах, где рассеяние слабое, а влияние субструктуры незначительно, оценки дают значения до  $2 \times 10^{13}$  К. Подробный анализ этого эффекта представлен в работе [110], где даётся оценка  $T_b = 7 \times 10^{12}$  К для частоты 1.7 ГГц. Таким образом можно заключить, что яркостная температура ядра 3C 273 близка к значению  $10^{13}$  К на всех трёх частотах.

Полученные высокие значения видимой яркостной температуры 3C 273 трудно объяснить. Многолетние наблюдения 3C 273 на VLBA показывает максимальную наблюдаемую скорость деталей струи  $\beta_{\text{app}} \approx 15c$  [108], что соответствует релятивистскому усилению  $\delta \lesssim 13$  [111; 112].

Учитывая комптоновский предел  $10^{11.5}$  К или значение яркостное температуры при равномерном распределении  $5 \times 10^{10}$  К, это усиление как минимум в 10–60 меньше, чем требуется, чтобы получить наблюдаемую яркостную температуру на 1.7 ГГц, и в 3–20 меньше, чтобы объяснить результаты 22 ГГц. Это говорит о том, что радиоизлучение 3C 273 не может быть адекватно описано некогерентным синхротронным излучением релятивистских электронов [31].

## 2.4.2 Квazar B0529+483

Квazar 87GB 0529+483 (J0533+4822, далее B0529+483) занесён в каталог 87GB как имеющий плотность потока  $(619 \pm 70)$  мЯн на 4.9 ГГц со спектральным индексом между 80 и 6 см  $\alpha = -0.1$  [113; 114]. Плоский спектр указывает на компактную структуру, которая в сочетании с расположением источника на галактической широте  $b = +8^\circ$  повышает вероятность того, что на источник может влиять рассеяние. Космологическое красное смещение B0529+483 равно  $z = 1.162$  [115].

### Наблюдения

Квazar B0529+483 наблюдался в 29 сессиях в рамках обзора АЯГ в проекте «Радиоастрон», значимый интерферометрический отклик был получен на проекциях базы до 19 диаметров Земли. Список наблюдательных сессий источника приведён в таблице 2.2. Значимые детектирования интерференционных лепестков на наземно-космических базах сгруппированы примерно в 5 месяцев с октября 2012 года по февраль 2013 года.

Корреляция всех экспериментов была выполнена на программном корреляторе в Астрокосмическом центре [55]. При этом данные экспериментов gaes03kg, gaes03kj, gaes03kk и gaes03kn также были скоррелированы с помощью специальной версии [54] коррелятора DiFX [53]. Сравнение выходных данных двух корреляторов показало, что они дают аналогичные результаты.

### Яркостная температура

Как уже обсуждалось в этой главе, нижний предел яркостной температуры может быть оценён на основе одного измерения амплитуды функции видности на большой проекции базы в предположении кругового гауссова распределения

Таблица 2.2 — Список наблюдений квазара B0529+483 в рамках обзора АЯГ в проекте «Радиоастрон». Наземные телескопы, с которыми был получен значимый сигнал на наземно-космических базах, подчеркнуты. Проекция баз приведена в диаметрах Земли (ED).

Код наблюдения	Дата ГГГГ-ММ-ДД	Частота (ГГц) и наземные телескопы	База (ED)
raes03dk	2012-09-29	4.8: <u>Wb</u> , <u>Ys</u> ; 22: Nt, Gb, Ro	7
raes03el	2012-10-25	1.7: <u>Zc</u> , Ev; 4.8: <u>Bd</u>	3.5
raes03en	2012-10-16	1.7: <u>Zc</u> , <u>Ro</u> ; 4.8: <u>Bd</u> , <u>Ev</u>	4.5
raes03eo	2012-10-16	1.7: <u>Zc</u> ; 4.8: <u>Bd</u> , <u>Ev</u>	5.5
raes03er	2012-10-24	1.7: Ro	3.5
raes03eu	2012-10-24	4.8: <u>Ys</u>	2.5
raes03hk	2012-12-09	4.8: Ys; 22: Gb, Nt, Ro	16
raes03hm	2012-12-10	4.8: Bd; 22: Gb, Zc	18
raes03hv	2012-12-15	4.8: <u>Ys</u> , <u>Mc</u> ; 22: <u>Gb</u>	5
raes03ia	2012-12-16	4.8: <u>Ef</u> , <u>Mc</u> ; 22: Ef, Ys	15
raes03kg	2013-01-25	1.7: Ev; 4.8: <u>Ef</u>	5
raes03kj	2013-01-26	4.8: <u>Ef</u>	11
raes03kk	2013-01-27	1.7: <u>Gb</u> , <u>Wb</u> ; 4.8: Ef	16
raes03kn	2013-01-28	1.7: <u>Wb</u> ; 4.8: <u>Ef</u> , <u>Mc</u>	19
raes03kr	2013-02-02	1.7: <u>Wb</u> , <u>Mc</u> ; 4.8: <u>Ys</u> , Tr	3
raes03ks	2013-02-02	4.8: <u>Tr</u> ; 22: Ys	2
raes03kw	2013-02-03	1.7: <u>Tr</u>	6
raes03kz	2013-02-03	1.7: <u>Tr</u> , Ev, Ro	8
raes03lb	2013-02-04	1.7: <u>Wb</u> , <u>Bd</u> , <u>Tr</u> ; 4.8: <u>Sv</u> , Zc, Ys	12
raks01ct	2013-09-23	1.7: Gb, Tr; 4.8: Gb, Ys	16
raks01cx	2013-09-24	1.7: Zc, Bd, Gb, Tr; 4.8: Sv, Ef, Ys	19
raks01da	2013-09-24	1.7: Bd, Tr; 4.8: Sv, Ys	20
raks01dq	2013-10-01	1.7: Bd, <u>Wb</u> , Zc, <u>Gb</u> ; 4.8: <u>Ef</u> , Ys, Sv	12
raks01ea	2013-10-03	1.7: Bd, Gb, Nt, Tr; 4.8: Sv, Ev, Ef, Ys	21
raks01ex	2013-10-11	1.7: Zc, Gb, Tr; 4.8: Sv, Ev, Wb	21
raks08cx	2014-10-15	1.7: Kl, Bd, Tr, Ro; 4.8: Sv, Zc, Nt	20
raks08dc	2014-10-17	4.8: Ef, Wb, Ys, Kl, Zc, Tr; 22: Gb, Ef, Ys, Tr	15
raks08fv	2014-11-13	1.7: Kl, Sv, Tr; 4.8: Ys, Kl, Bd	13
raks08gq	2014-11-20	1.7: Gb, Kl, Sv, Zc, Tr; 4.8: Ys, Kl, Nt, Tr	17

интенсивности излучения источника. Эти пределы яркостной температуры для В0529+483 показаны на рисунке 2.6. Проекция баз  $> 10^4$  км относятся к наземно-космическим измерениям. Получены следующие максимальные нижние пределы:  $5 \times 10^{12}$  К на частоте 1.7 ГГц,  $1.2 \times 10^{13}$  К на 4.8 ГГц и  $5 \times 10^{12}$  К на 22 ГГц.

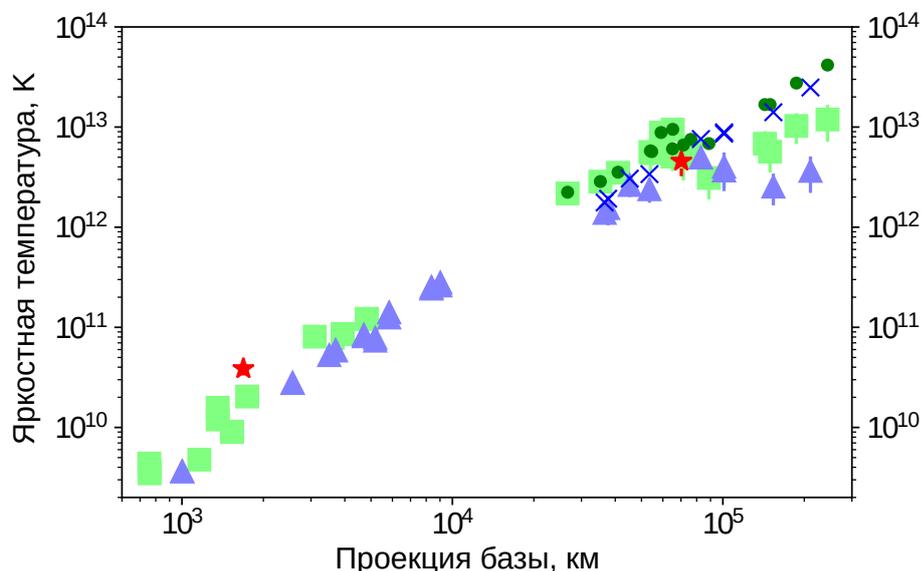


Рисунок 2.6 — Измеренная яркостная температура квазара В0529+483 в зависимости от проекции базы. Нижние пределы обозначены как синие треугольники (1.7 ГГц), зелёные квадраты (4.8 ГГц) и красные звёздочки (22 ГГц). Оценки яркостной температуры по отдельным наблюдениям обозначены синими крестиками (1.7 ГГц) и тёмно-зелёными кружками (4.8 ГГц).

Как видно из таблицы 2.2, во многих наблюдательных сессиях не было обнаружено значимого сигнала на наземно-космических базах. Для этих наблюдений были оценены верхние пределы на коррелированную плотность потока. По ним так же была оценена минимальная яркостная температура: от  $3.5 \times 10^{12}$  до  $2.3 \times 10^{13}$  К на 1.7 ГГц, от  $1.8 \times 10^{12}$  до  $1.9 \times 10^{13}$  К на 4.8 ГГц и от  $0.8 \times 10^{12}$  до  $2.4 \times 10^{13}$  К на 22 ГГц. Этот разброс значений может отражать переменность источника В0529+483.

Можно также оценить яркостную температуру компактной детали источника, предполагая, что излучающая область имеет форму круглой Гауссианы, и принимая среднее значение амплитуды функции видностей на наземных базах в качестве полной плотности потока детали. Результаты таких оценок также показаны на рисунке 2.6. Максимальные значения яркостной температуры, оценённой таким образом:  $3 \times 10^{13}$  К на частоте 1.7 ГГц и  $5 \times 10^{13}$  К на 4.8 ГГц.

Следует отметить, что оба указанных метода могут несколько переоценить яркостную температуру источника, при наличии рефракционной субструктуры рассеяния [109; 110].

### 2.4.3 Блазар 0235+164

Радиоисточник АО 0235+164 (далее 0235+164) был классифицирован как объект типа BL Lac [116] на основе его переменности и оптического спектра, в котором не видны детали при низком спектральном разрешении. В работе [117] 0235+164 классифицирован как квазар на основе его абсолютной звёздной величины. В работе [118] было измерено космологическое красное смещение объекта  $z = 0.94$ , по линиям Mg II, [Ne V] и [O II]. Также были обнаружены промежуточные линии поглощения и излучения на меньших красных смещениях.

РСДБ наблюдения показывают, что источник частично разрешён в большинстве радиодиапазонов, однако его протяжённая структура слаба и очень изменчива во времени. В работе [119] сообщается об отсутствии структуры на масштабе миллисекунд дуги, в то время как в других работах сообщается о некоторых намёках на струйную морфологию (см., например, [120–122]). В работе [123] была обнаружена струя к северо-западу от ядра на частоте 43 ГГц и измерена видимая сверхсветовая скорость двух компонентов. Позднее мониторинг VLBA на 43 ГГц показал временное появление компонента, расположенного к юго-юго-востоку от ядра [A4; 124].

Блазар 0235+164 — один из самых ярких и компактных источников, протектированных в рамках наблюдений космической РСДБ миссии VSOP. По результатам измерений VSOP, его яркостная температура достигает  $T_b \approx 10^{13.8}$  К [90], что превышает обратный комптоновский предел даже с учётом релятивистского усиления излучения с чрезвычайно высокими Допплер-факторами.

Источник демонстрирует сильную переменность по всему электромагнитному спектру на масштабах времени от часов до лет (например, [125]). Наблюдаемая плотность потока на сантиметровых длинах волн 0235+164 увеличивается в 6–7 раз во время вспышек. Быстрая переменность на более низких частотах может быть вызвана межзвёздной сцинтилляцией (ISS) ультракомпактных РСДБ компонентов с размером около 10 мксек дуги, которые рождаются в источнике [126]. Эти детали, в свою очередь, могут быть ответственны за чрезвычайно высокие яркостные температуры в источнике.

## Наблюдения

Блазар 0235+164 неоднократно наблюдался в рамках обзора АЯГ в проекте «Радиоастрон» во всех трёх диапазонах частот 1.7, 4.8 и 22.2 ГГц. Здесь приводятся результаты анализа 11 наблюдательных сеансов с декабря 2012 по январь 2016 года в которых был получен значимый интерференционный отклик. Список дат сеансов представлен в таблице 2.3.

Таблица 2.3 — Наблюдения блазара 0235+164 в рамках обзора АЯГ в проекте «Радиоастрон». База — проекция наземно-космической базы в диаметрах Земли (ED).  $T_{b,\min}$  — нижний предел яркостной температуры.  $T_b$  — оценка яркостной температуры в системе отсчёта источника в модели круглой Гауссианы.  $\theta$  — оценка размера излучающей области в модели круглой Гауссианы.

Дата	Частота (ГГц)	База (ED)	$T_{b,\min}$ (К)	$T_b$ (К)	$\theta$ (мксек дуги)
2012-12-13	4.8	7.7	$3.6 \times 10^{12}$	$6.9 \times 10^{12}$	111.8
2012-12-15	4.8	14.9	$3.8 \times 10^{12}$	$1.9 \times 10^{13}$	71.4
2012-12-15	22.2	14.9	$1.6 \times 10^{13}$	$3.8 \times 10^{13}$	13.3
2012-12-16	4.8	18.7	$8.4 \times 10^{12}$	$3.2 \times 10^{13}$	54.4
2013-08-27	4.8	2.2	$6.9 \times 10^{11}$	$1.0 \times 10^{12}$	376.2
2013-08-27	1.7	2.8	$2.3 \times 10^{12}$	$2.4 \times 10^{12}$	457.3
2015-01-15	1.7	19.8	$2.9 \times 10^{12}$	$2.0 \times 10^{13}$	164.4
2015-12-16	4.8	8.7	$1.1 \times 10^{13}$	$1.8 \times 10^{13}$	95.7
2015-12-17	4.8	16.4	$1.4 \times 10^{13}$	$5.9 \times 10^{13}$	63.1
2015-12-29	4.8	25.5	$1.4 \times 10^{13}$	$9.2 \times 10^{13}$	43.3
2016-01-09	4.8	14.5	$1.8 \times 10^{13}$	$4.1 \times 10^{13}$	62.0
2016-01-29	4.8	8.9	$6.4 \times 10^{12}$	$1.8 \times 10^{13}$	104.6

## Яркостная температура

Как и для других источников, для 0235+164 оценивался нижний предел яркостной температуры в предположении, что распределение интенсивности излучающей области имеет круговой гауссов профиль (см. подраздел 2.1.1). Неопределённость амплитуды функции видности оценивалась на основе статистического (теплового) шума данных, а также ошибок калибровки амплиту-

ды для которых принималось типичное значение 10% [93]. Кроме того, были получены оценки размера путём подгонки модели одиночной круглой гауссовой детали к амплитудам функции видности, измеренным на наземных и наземно-космических базах. Из полученных размеров также оценивалась соответствующая яркостная температура. Нижний предел  $T_{b,\min}$ , оценка  $T_b$  и размер  $\theta$  представлены в таблице 2.3.

Самая высокая оценка яркостной температуры получена по измерению на базе 26 диаметров Земли на частоте 4.8 ГГц (рис. 2.8). Самая длинная проекция базы в единицах длин волн 14 Гλ была достигнута на 22 ГГц. В среднем видимая яркостная температура, измеренная по наземно-космическим данным, примерно на порядок выше, чем измеренная на VLBA. Оценки  $T_b$  и даже консервативные значения нижних пределов  $T_{b,\min}$  плохо согласуются с обратным комптоновским пределом даже после учёта высокого значения релятивистского усиления  $\delta \approx 20$ .

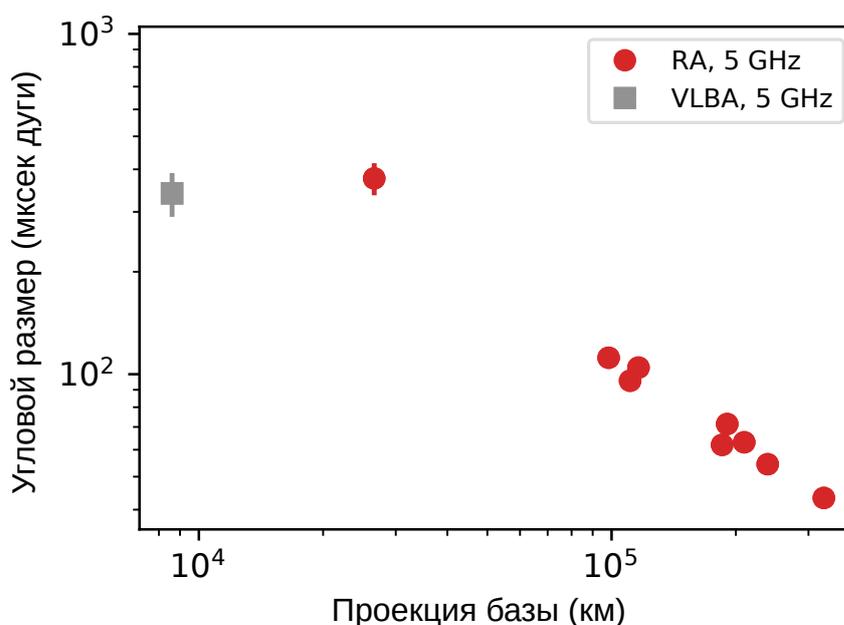


Рисунок 2.7 — Оценки углового размера источника 0235+164 по наземно-космическим данным на частоте 4.8 ГГц в зависимости от проекции базы ( $\theta$  из таблицы 2.3). Серым квадратом обозначено измерение на 5 ГГц из наземных наблюдений на VLBA.

Оценки размера, измеренные по наземно-космическим данным на частоте 4.8 ГГц показаны на рисунке 2.7. Так же на рисунке приведён размер ядра, полученный при моделировании данных VLBA на 5 ГГц. На графике видно плато на базах менее двух диаметров Земли, что возможно свидетельствует о наличии двух масштабов во внутренней компактной структуре источника. Первый — это

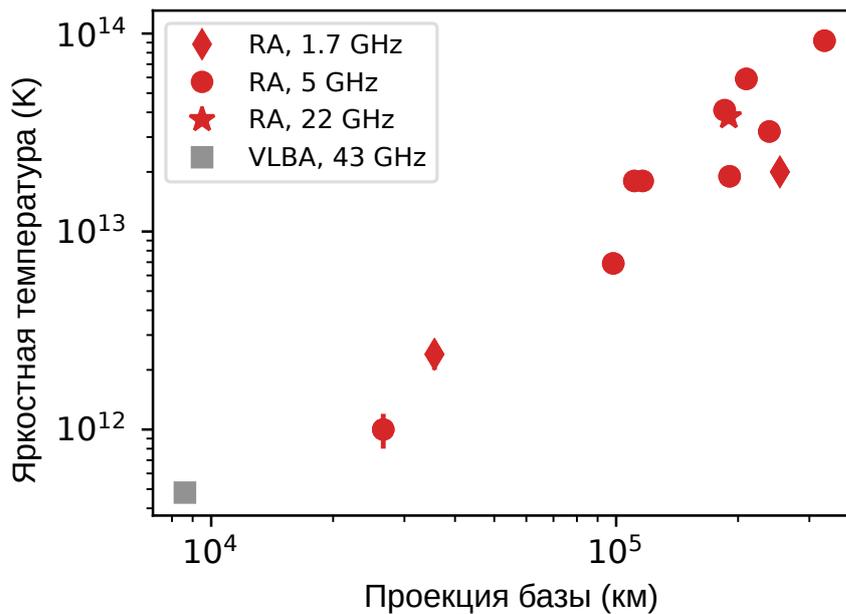


Рисунок 2.8 — Видимая яркостная температура источника 0235+164 по наземно-космическим данным, в зависимости от проекции базы ( $T_b$  из таблицы 2.3). Ромбиками, кружками и звёздочками обозначены значения, измеренные на частоте 1.7, 4.8 и 22 ГГц, соответственно. Серым квадратом обозначено медианное значение яркостной температуры ядра, измеренной по данным VLBA на 43 ГГц.

«ядро». Оно разрешается наземным РСДБ и имеет внутреннюю яркостную температуру, близкую к значению при равномерном распределении энергии магнитного поля и частиц, которую можно рассматривать как среднее значение по всей области ядра. Второй — сверхкомпактный, менее 10 мксек дуги или 0.1 пк, который остаётся неразрешённым даже на самых больших наземно-космических базах. Яркостная температура,  $T_b$ , измеренная по наземно-космическим данным и по наземным измерениям VLBA, в зависимости от проекции базы показаны на рисунке 2.8. Значения яркостной температуры возрастают с проекцией базы, что соответствует уменьшению размера на рисунке 2.7. Это поведение явно указывает на то, что измеренные яркостные температуры являются де-факто только нижними пределами, а оценки размеров, соответственно, верхними.

Причиной очень высокой наблюдаемой яркостной температуры на сантиметровых длинах волн может быть субструктура рассеяния на межзвёздной плазме [110]. Однако на частоте 22 ГГц она не играет существенной роли в наблюдаемой структуре источника. Так что значение  $T_b > 10^{13}$  К на этой частоте должно иметь внутреннюю природу. Так же стоит отметить, что в сеансе 15 декабря 2012 г. оценки яркостной температуры превышают  $10^{13}$  К как на частоте

22 ГГц, так и на 4.8 ГГц, что является дополнительным аргументом в пользу внутреннего сценария экстремальной яркости даже на 5 ГГц.

## 2.5 Выводы

В данной главе представлены результаты обзора активных ядер галактик, который проводился на наземно-космическом интерферометре «Радиоастрон».

1. По результатам посткорреляционного анализа данных обзора АЯГ получена статистика детектирований для полной выборки 163 источников с коррелированной плотностью потока на больших наземных базах  $> 600$  мЯн. Для разделения значимого и незначимого интерференционного отклика для каждого измерения вычислялось значение вероятности ложного детектирования. Отклик считался значимым, если эта вероятность была меньше  $10^{-4}$ . Всего на наземно-космических базах было продетектировано около  $2/3$  источников выборки.
2. Значимый интерференционный отклик в обзоре АЯГ получен на проекциях баз до 345 000 км или 27 диаметров Земли. Активные ядра галактик, которые были продетектированы на максимальных проекциях баз 25 диаметров Земли или больше: 0048–019, 0106+013, 0119+115, 0235+164, 0716+714, 1253–055 (3C 279) на частоте 1.7 ГГц и 0235+164, 1124–186 на 4.8 ГГц. На частоте 22.2 ГГц на проекциях баз около 15 диаметров Земли или 14 Гλ и более сигнал получен от источников 0235+164, 0716+714 и 0851+202 (OJ 287).
3. Для источников 3C 273, B0529+483 и 0235+164 по результатам обзора измерены яркостные температуры и их нижние пределы во всех частотных диапазонах. Все три источника показывают значения  $\gtrsim 10^{13}$  К, что на порядок больше типичных яркостных температур по наземным измерениям. В то же время экстремальные яркости на уровне  $10^{15}$ – $10^{16}$  К не обнаружены.
4. Высокие яркостные температуры противоречат предположению о равномерном распределении плотности энергии частиц и магнитного поля в релятивистских струях блазаров на расстоянии парсеков от центральной

машины. Более того, полученные яркостные температуры превышают предел на комптоновскую катастрофу даже с учётом релятивистского усиления. Для объяснения таких яркостей необходимо привлекать другие возможные механизмы, такие как постоянное ре-ускорение частиц, магнитные пересоединения, релятивистские протоны или когерентное излучение.

## Глава 3. Кинематика релятивистских струй

В данной главе приводятся результаты измерений кинематики релятивистских струй, полученные по многолетним РСДБ наблюдениям активных ядер галактик на частоте 8 ГГц. Основные результаты, включая все рисунки и таблицы данной главы опубликованы в работе [A6]. Личный вклад в данную работу обсуждается во Введении к диссертации. Полные версии таблицы 3.3 и рисунков 3.3 и 3.4 доступны на сайте публикации в электронном виде.

### 3.1 Введение

Характерным наблюдательным свойством релятивистских струй во многих внегалактических радиоисточниках является видимое (кажущееся) сверхсветовое движение деталей. Этот эффект проявляется при движении излучающей плазмы с большим Лоренц-фактором в сторону наблюдателя под малым углом к лучу зрения. Измерения видимого сверхсветового движения с помощью РСДБ наблюдений позволяют изучать процессы ускорения и коллимации релятивистских струй [40], получать их статистические свойства [39]. Кроме того, как отмечалось в главе 2, для измерения яркостных температур активных ядер необходимо знать величину релятивистского усиления (Допплер-фактор), которую также можно оценить по измерениям кинематики деталей в релятивистских струях [35; 39].

Плазма релятивистских струй должна ускоряться на масштабах расстояний примерно от  $10^3$  гравитационных радиусов от центральной чёрной дыры и до парсеков, где они непосредственно наблюдаются с помощью РСДБ [127; 128] (см. также результаты главы 1). Хотя наблюдательные проявления истечений с высокими Лоренц-факторами хорошо изучены, теоретический механизм ускорения плазмы и пространственные масштабы на которых он работает, до конца не поняты. Предполагается, что в процессе ускорения релятивистских струй сначала доминирует магнитная энергия, или поток вектора Пойнтинга, которая затем переходит в объёмную кинетическую энергию во время фазы ускорения и, наконец, в кинетическую энергию частиц в ударных волнах, которая может перейти в излу-

чение [127]. Магнитное ускорение было исследовано методами релятивистского магнитогидродинамического моделирования (например, [5]). Теория магнитного ускорения релятивистских струй суммирована в работах [129; 130].

Необходимо уточнить ряд важных деталей в этой общей модели ускорения: создаётся ли струя в устойчивом состоянии или ускорение является импульсным [131; 132], и завершается ли ускорение на масштабах, наблюдаемых на РСДБ, или все ещё происходит на парсековых масштабах? Даже если ускорение на расстоянии парсеков от центральной машины — типичное явление, это не обязательно доказывает прямое наблюдение преобразования потока Пойнтинга в кинетическую энергию, поскольку также могут быть гидродинамические механизмы ускорения в струях с доминированием вещества [133; 134].

Прямые наблюдения внутреннего ускорения с помощью РСДБ картографирования затруднены. Необходимы точные измерения положения компонентов на многих эпохах, чтобы надёжно измерить вторую производную на графике положения от времени. Для отдельных компонентов струи видимая скорость определяется по известной формуле:

$$\beta_{\text{app}} = \frac{\beta \sin \theta}{1 - \beta \cos \theta}, \quad (3.1)$$

где  $\beta c$  — собственная скорость, а  $\theta$  — угол между направлением движения и лучом зрения. Изменение видимой скорости отдельного компонента может быть вызвано либо изменением собственной скорости, либо угла к лучу зрения. Для статистического разделения этих двух случаев необходимы наблюдения многих компонентов с видимым ускорением.

На практике, для измерения вариаций собственных скоростей необходимы многолетние наблюдения многих источников, насчитывающие тысячи РСДБ изображений. Хотя наблюдения отдельных компонентов с видимым ускорением (например, [135; 136]) или наблюдения видимого ускорения в небольших выборках блазаров (например, [111; 137]) проводились уже давно, обзор MOJAVE с тысячами изображений был первым, в котором исследовались ускорения струй блазаров на большой статистической выборке [40; 138].

В этой главе представлены результаты исследования кинематики релятивистских струй блазаров по наблюдениям серии экспериментов RDV (Research & Development — VLBA) на решётке апертурного синтеза VLBA [60]. Наблюдения в рамках программы RDV проводятся в основном для целей астрометрии и

геодезии, но поскольку они проводятся примерно каждые два месяца с момента открытия VLBA и дают качественные изображения, они также полезны для астрофизики блазаров (например, [56; 139]). Это только второе крупномасштабное исследование кинематики внегалактических релятивистских струй помимо MOJAVE [39; 40; 138; 140]. Также изучение кинематики релятивистских струй, в том числе анализ ускорения, проводится на 43 ГГц в Бостонском университете [38]. Преимуществом обзора RDV на 8 ГГц по сравнению с наблюдениями на более высоких частотах является большая чувствительность к протяжённой структуре струи, что даёт возможность проследить движение деталей дальше от ядра в течение более длительного времени.

В данной работе проводится результаты анализа 50 РСДБ экспериментов за 10-летний период с 1994 по 2003 год. Изучается кинематика всех источников, которые наблюдались 20 или более раз в этих 50 экспериментах. Для анализа использовались 2753 РСДБ изображения 68 источников. Медианное значение количества эпох наблюдения на один источник равно 43. Количество изображений приблизительно в три раза больше, чем в работе [141], и немного превышает количество изображений в работе [142].

## 3.2 Выборка источников

Выборка источников для этой работы основана на выборке астрометрических и геодезических РСДБ экспериментов RDV. Эксперименты RDV проводятся с использованием 10 антенн VLBA Национальной радиоастрономической обсерватории, которые дополняются несколькими (до 10) геодезическими РСДБ антеннами как в северном, так и в южном полушариях, что обеспечивает глобальное покрытие. Наблюдения проводятся в двухчастотном режиме одновременно в диапазонах S (2 ГГц) и X (8 ГГц). Результаты точной геодезии и астрометрии, полученные по этим наблюдениям, представлены в других работах (например, [143; 144]). Наблюдения в этом режиме позволяют получать изображения одновременно на двух частотах 8 и 2 ГГц, однако для получения результатов данной работы использовались только 8 ГГц изображения.

В анализе, представленном в этой работе, используются результаты картографирования только на частоте 8 ГГц, поскольку для точных измерений ки-

Таблица 3.1 — Список наблюдений, которые использовались для анализа кинематики релятивистских струй.

Дата	Дата в долях года	Код наблюдения	Антенны <sup>a</sup>
1994-07-08	1994.52	BR005	VLBA
1995-04-12	1995.28	BR025	VLBA
1995-07-24	1995.56	RDGEO2	VLBA
1995-10-02	1995.75	RDGEO3	VLBA
1995-10-12	1995.78	BF012	VLBA
1996-04-23	1996.31	BE010A	VLBA
1997-01-10	1997.03	BF025A	VLBA
1997-01-11	1997.03	BF025B	VLBA
1997-01-30	1997.08	RDV01	VLBA+GcGnKkMcOnWf
1997-03-31	1997.25	RDV02	VLBA+GcGnKkMcOnWf
1997-05-19	1997.38	RDV03	VLBA+GcGnKkMcOnWf
1997-07-24	1997.56	RDV04	VLBA+GcGnKkMcOnWf
1997-09-08	1997.69	RDV05	VLBA+GcGnKkOnWf
1997-12-17	1997.96	RDV06	VLBA+GcGnKkMcOnWf
1998-02-09	1998.11	RDV07	VLBA+GcGnKkMcNyOnWf
1998-04-15	1998.29	RDV08	VLBA+GcGnKkMcNyOnWf
1998-06-24	1998.48	RDV09	VLBA+GcGnKkMcNyOnWf
1998-08-10	1998.61	RDV10	VLBA+GcGnKkMcNyOn
1998-10-01	1998.75	RDV11	VLBA+GcGnKkMcNyOnWf
1998-12-21	1998.97	RDV12	VLBA+GcGnKkMcNyWf
1999-03-08	1999.18	RDV13	VLBA+GcGnHhKkMcNyOnWfWz
1999-04-15	1999.29	RDV14	VLBA+GcHhKkMcNyOnTsWfWz
1999-05-10	1999.36	RDV15	VLBA+GcHhKkMcNyOnTsWfWz
1999-06-22	1999.47	RDV16	VLBA+GcHhKkMcNyOnTsWfWz
1999-08-02	1999.59	RDV17	VLBA+GcHhKkMcNyOnWfWz
1999-12-20	1999.97	RDV18	VLBA+GcGnHhKkMcNyOnTsWfWz
2000-01-31	2000.08	RDV19	VLBA+GcHhKkMaMcNyOnTsWfWz
2000-03-13	2000.20	RDV20	VLBA+GcHhKkMaMcNyOnTsWfWz
2000-05-22	2000.39	RDV21	VLBA+GcHhKkMaMcNyTsWfWz
2000-07-06	2000.51	RDV22	VLBA+GcHhKkMaNyTsWfWz
2000-10-23	2000.81	RDV23	VLBA+GcHhKkMaMcNyTsWfWz
2000-12-04	2000.93	RDV24	VLBA+GcHhKkMaMcNyTsWfWz
2001-01-29	2001.08	RDV25	VLBA+GcHhKkMaMcNyOnTsWfWz
2001-03-12	2001.19	RDV26	VLBA+HhKkMaMcNyOnTsWz
2001-04-09	2001.27	RDV27	VLBA+GcHhKkMaMcNyTsWfWz
2001-05-09	2001.35	RDV28	VLBA+GcHhKkMaMcNyOnTsWfWz
2001-07-05	2001.51	RDV29	VLBA+GcHhKkMaMcNyTsWfWz
2001-10-29	2001.83	RDV30	VLBA+GcHhKkMaMcNyTsWfWz
2002-01-16	2002.04	RDV31	VLBA+GcKkMaMcNyOnTsWfWz
2002-03-06	2002.18	RDV32	VLBA+GcKkMaMcNtOnTsWfWz
2002-05-08	2002.35	RDV33	VLBA+ApGcGgHhKkMaMcOnWfWz
2002-07-24	2002.56	RDV34	VLBA+GcKkMaMcNyOnTcWfWz
2002-09-25	2002.73	RDV35	VLBA+GcKkMaMcOnTcTsWfWz
2002-12-11	2002.95	RDV36	VLBA+GcKkMaMcNyOnTcWfWz
2003-03-12	2003.19	RDV37	VLBA+KkMaMcOnTcTsWfWz
2003-05-07	2003.35	RDV38	VLBA+KkMaMcOnTcTsWfWz
2003-06-19	2003.47	RDV39	VLBA+KkMaNyOnTcTsWfWz
2003-07-09	2003.52	RDV40	VLBA+GcMaNyOnTcTsWfWz
2003-09-17	2003.71	RDV41	VLBA+GcKkMaMcNyOnTsWfWz
2003-12-17	2003.96	RDV42	VLBA+GcMaMcNyOnTcTsWfWz

**Примечания:** <sup>a</sup>: Антенны, которые не входят в VLBA, обозначены двухбуквенными кодами. Размеры и местонахождения не VLBA антенн следующие: Ap: 46 м, Algonquin Park, Ontario, Канада; Gc: 26 м, Gilmore Creek, Fairbanks, АК, США; Gg: 5 м, Greenbelt, MD, США; Gn: 20 м, Green Bank, WV, США; Hh: 26 м, Hartebeesthoek, Южная Африка; Kk: 20 м, Kokee Park, HI, США; Ma: 20 м, Matera, Италия; Mc: 32 м, Medicina, Италия; Ny: 20 м, Ny Alesund, Норвегия; On: 20 м, Onsala, Швеция; Tc: 6 м, Concepcion, Чили; Ts: 32 м, Tsukuba, Япония; Wf: 18 м, Westford, MA, США; Wz: 20 м, Wettzell, Германия

нематики релятивистских струи требуется более высокое угловое разрешение, обеспечиваемое наблюдениями на более высокой частоте. Наблюдения RDV на 8 ГГц, которые проводились после 1997 года, имеют угловое разрешение сопоставимое с разрешением наблюдений обзора MOJAVE [72], поскольку в них используются базы глобального РСДБ на частоте 8 ГГц (см. таблицу 3.1), в то время как в обзоре MOJAVE используются только базы VLBA на частоте 15 ГГц. Медианный размер диаграммы направленности в обзоре RDV, взятый по большим и малым осям диаграммам всех 2753 изображений, составляет величину 0.9 мсек дуги, что соответствует линейному размеру около 7 пк на  $z = 1$ .

Эксперименты RDV проводятся примерно каждые два месяца, поэтому обычно источники наблюдаются около шести раз в год. В одном 24-часовом эксперименте проводятся наблюдения около 100 источников, при этом среднее время на одном источнике составляет около 15 минут. Это время на источнике делится на сканы продолжительностью от одной до нескольких минут, которые распределяются в течение 24-часового периода наблюдения. Типичное наблюдение с 10–20 антеннами, даёт среднеквадратичный уровень шума изображения типичного источника на средних склонениях около 1 мЯн/луч. Записывается только правая круговая поляризация, поэтому интенсивность линейной поляризации и позиционный угол электрического вектора не доступны в этих наблюдениях.

Для этих измерений использовались 42 эксперимента RDV, которые проводились с 1997 по конец 2003 года (RDV с 1 по 42), а также 8 аналогичных геодезических РСДБ экспериментов, которые были проведены на VLBA до начала серии RDV. Это дало в общей сложности 50 РСДБ экспериментов, проводившихся в течение 10 лет с 1994 по 2003 год. Список этих 50 экспериментов приведён в таблице 3.1.

Для анализа в этой работе были выбраны все источники, которые наблюдались в 20 или более эпохах за серию из 50 РСДБ экспериментов, перечисленных в таблице 3.1. Это дало выборку из 72 источников, из которых были исключены два со склонением ниже  $-50^\circ$  (0208–512 и 1815–553), то есть слишком южных, чтобы можно было адекватно построить их изображение с помощью имеющихся антенн. Два других источника (0238–084 и 1404+286) имели на частоте 8 ГГц структуру, которая не позволяла надёжно отслеживать компоненты от эпохи к эпохе наблюдения. Остальные 68 источников в окончательной выборке RDV перечислены в таблице 3.2. Общее количество наблюдений всех 68 источников составляет 2753, и медиана составляет 43 эпохи наблюдения на источник.

Таблица 3.2 — Источники в выборке RDV

Источник <sup>a</sup>	Альтернативное имя	Количество эпох	Оптический класс <sup>b</sup>	$z^b$	MOJAVE <sup>c</sup>
0003–066	NRAO 5	39	B	0.35	Y
0014+813	S5 0014+813	43	Q	3.39	Y
0048–097 <sup>d</sup>	PKS 0048-09	42	B(HP)	0.63	Y
0059+581	TXS 0059+581	45	Q	0.64	Y
0104–408		37	Q	0.58	
0119+041	PKS 0119+041	41	Q(HP)	0.64	Y
0119+115	PKS 0119+11	42	Q(HP)	0.57	Y
0133+476	DA 55	44	Q(HP)	0.86	Y
0201+113		41	Q	3.61	
0202+149	4C +15.05	43	G	0.41	Y
0229+131	4C +13.14	43	Q	2.07	Y
0234+285	4C +28.07	43	Q(HP)	1.21	Y
0235+164	PKS 0235+164	25	Q(HP)	0.94	Y
0336–019	CTA 26	44	Q(HP)	0.85	Y
0402–362		39	Q	1.42	
0430+052	3C 120	42	G	0.03	Y
0454–234	PKS 0454-234	45	Q(HP)	1.00	Y
0458–020	S3 0458-02	41	Q(HP)	2.29	Y
0528+134	PKS 0528+134	44	Q	2.07	Y
0537–441		34	Q(HP)	0.89	
0552+398	DA 193	49	Q	2.36	Y
0642+449	OH 471	43	Q	3.41	Y
0727–115	PKS 0727-11	50	Q	1.59	Y
0804+499	OJ 508	44	Q(HP)	1.43	Y
0823+033	PKS 0823+033	45	B(HP)	0.51	Y
0851+202	OJ 287	45	B(HP)	0.31	Y
0919–260		42	Q	2.30	
0920–397		39	Q	0.59	
0923+392	4C +39.25	45	Q	0.70	Y
0955+476	OK 492	45	Q	1.87	Y
1034–293	PKS 1034-293	36	Q(HP)	0.31	Y
1044+719	S5 1044+71	45	Q	1.15	Y
1101+384	Mrk 421	43	B(HP)	0.03	Y
1124–186	PKS 1124-186	42	Q	1.05	Y
1128+385	IVS B1128+385	46	Q	1.73	Y
1144–379		34	Q(HP)	1.05	
1145–071	PKS 1145-071	40	Q	1.34	Y
1156+295	4C +29.45	43	Q(HP)	0.73	Y
1228+126	M87	43	G	0.004	Y
1308+326	OP 313	43	Q(HP)	1.00	Y
1313–333		42	Q	1.21	
1334–127	PKS 1335-127	40	Q(HP)	0.54	Y
1357+769 <sup>e</sup>		45	Q	1.59	
1424–418		36	Q(HP)	1.52	
1448+762		24	G	0.90	
1451–375		33	Q	0.31	
1514–241	AP Librae	41	B(HP)	0.05	Y
1606+106	4C +10.45	45	Q	1.23	Y
1611+343	DA 406	44	Q	1.40	Y
1622–253	PKS 1622-253	39	Q	0.79	Y
1638+398	NRAO 512	45	Q(HP)	1.67	Y
1642+690	4C +69.21	25	Q(HP)	0.75	Y
1657–261		22	U	...	
1726+455	S4 1726+45	20	Q	0.71	Y
1739+522	OT 566	45	Q(HP)	1.38	
1741–038	PKS 1741-03	46	Q(HP)	1.06	Y
1745+624	4C +62.29	43	Q	3.89	
1749+096	OT 081	50	Q(HP)	0.32	Y
1803+784	S5 1803+784	43	Q(HP)	0.68	Y
1908–201	PKS B1908-201	41	Q	1.12	Y
1921–293	OV –236	43	Q(HP)	0.35	Y
1954–388		36	Q(HP)	0.63	
2052–474		21	Q	1.49	
2145+067	4C +06.69	50	Q	1.00	Y
2200+420	BL Lac	43	B(HP)	0.07	Y
2223–052	3C 446	26	Q(HP)	1.40	Y
2234+282	CTD 135	45	Q(HP)	0.80	Y
2243–123	PKS 2243-123	41	Q(HP)	0.63	Y

**Примечания:** *a:* Имя источника В1950. *b:* Оптический класс и красное смещение из [117], если не указано иное: Q=кварзар, B=объект BL Lac, G=галактика, HP=высокая поляризация, U=не известно. *c:* входит ли источник в обзор MOJAVE по данным таблицы 1 из [145] (Y=Да). *d:* Красное смещение из NED. *e:* Оптический класс и красное смещение из [146].

Большинство источников в выборке RDV являются квазарами. С точки зрения оптического отождествления по данным работы [117] 56 источников это квазары, 7 — объекты BL Lac, 4 — галактики и 1 объект неидентифицирован. Большая часть источников также входят в обзор MOJAVE: сравнение таблицы 3.2 со списком источников MOJAVE из [145], показывает, что 51 из 68 источник включён в обзор MOJAVE, а 17 — нет. Особенно примечательно включение в выборку RDV значительного числа южных источников, которых нет в MOJAVE, благодаря использованию телескопов южного полушария в эксперименты RDV (см. таблицу 3.1).

В некоторых источниках из таблицы 3.2 не удалось измерить кинематику струи. Из 68 источников два (0235+164 и 2052–474) оказались очень компактными и их модель представляла собой единственный компонент практически во все наблюдательные эпохи, что не позволило измерить собственные движения. Кроме того, один источник (1657–261) не имел измеренного красного смещения, поэтому угловые скорости компонентов не могли быть преобразованы в видимые линейные скорости. Это даёт в общей сложности 66 источников с измеренными угловыми скоростями и 65 источников с измеренными видимыми линейными скоростями.

### 3.3 Построение изображений и моделирование

Все РСДБ эксперименты были прокалиброваны с использованием стандартных процедур из пакета NRAO *AIPS* [65], а самокалибровка, картографирование и моделирование были выполнены в программном пакете Caltech *Difmap* [67]. Процедуры калибровки и картографирования RDV экспериментов подробно описаны в работах [141] и [139]. Для примера на рисунке 3.1 показана карта источника 0003–066 по наблюдениям 29 октября 2001 г. Другие примеры изображений, полученных по наблюдениям RDV, можно найти в работе [139].

После самокалибровки и построения изображений, проводилось моделирование структуры источника набором гауссовых компонентов. Подгонка моделей проводилась в программе *Difmap* с помощью задачи *modelfit* в области пространственных частот. Такие гауссовы модели дают простое математическое описание

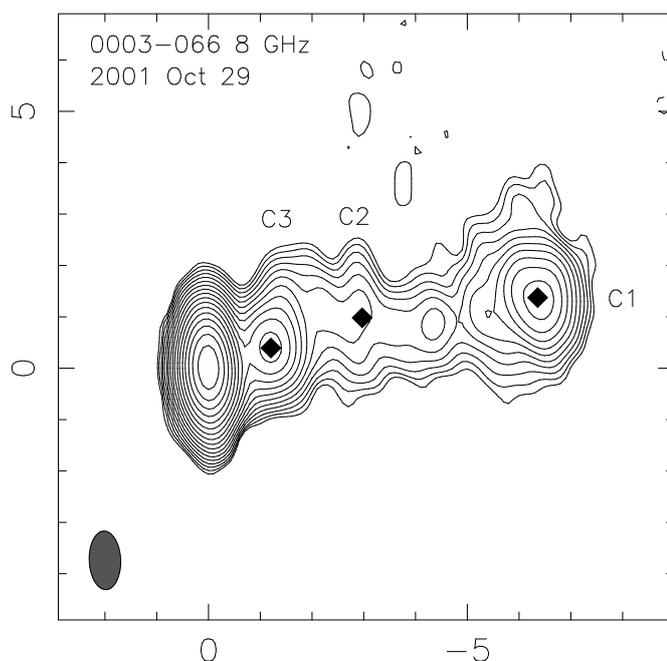


Рисунок 3.1 — Карта источника 0003–066 по наблюдениям 29 октября 2001 года. По осям отложены относительное прямое восхождение и склонение в мсек дуги. Первый контур имеет уровень в три раза превышающий уровень шума 0.9 мЯн/луч, а каждый следующий контур в корень из двух раз больше. Пиковая плотность потока составляет 0.96 Ян/луч. Размер диаграммы направленности равен 1.14 на 0.61 мсек дуги при позиционном угле  $2.3^\circ$  и показан в левом нижнем углу изображения. Три чёрных ромба указывают на детали струи, полученные при моделировании структуры источника набором Гауссиан (таблица 3.3).

положения и свойств компонентов релятивистской струи на каждом изображении. Подгонка моделей в области пространственных частот позволяет достичь более высокого углового разрешения, чем размер диаграммы направленности, в случае высокого соотношения сигнал/шум [36].

В большинстве случаев сложно однозначно определить точное количество гауссовых компонентов, необходимое для описания структуры источника. Выбиралась более простая модель и по возможности согласованная с моделями данного источника на другие эпохи наблюдения. Эллиптические компоненты использовались редко, и только для ядра или яркой детали струи, когда остаточное излучение на карте после подгонки кругового гауссового компонента, было настолько велико, что препятствовало дальнейшей подгонке модели. Чтобы сохранить согласованность от эпохи к эпохе, часто финальная модель из предыдущей или более поздней эпохи использовалась в качестве нулевого приближения для рассматриваемой эпохи. Для части источников процедура моделирования была проведена независимо несколькими соавторами публикации [A6] для проверки согласованности результатов. В подавляющем большинстве ( $\sim 95\%$ ) случаев

были получены согласованные результаты кинематики. Однако, несмотря на все меры предосторожности, подгонка РСДБ модели не является уникальной и представляет только одну из возможных математических реализаций сложной структуры источника (см., например, сравнение результатов RDV и 2-см обзора из работы [141]).

Таблица 3.3 — Результаты моделирования структуры источников набором гауссовых компонентов.  $S$  — плотность потока компонента в Янских.  $r$  и PA (позиционный угол) — полярные координаты центра компонента.  $a$  и  $b$  — ширина на половине максимума (FWHM) большой и малой оси гауссового компонента, а PA<sub>maj</sub> — позиционный угол большой оси. Для круглого компонента ( $b/a$ ) и PA<sub>maj</sub> равны 1.0 и 0.0, соответственно. Тип — обозначение типа компонента при моделировании в *Difmap*, Тип 1 обозначает гауссовый компонент, Тип 0 — дельта-функцию. Эпоха — дата наблюдения в долях года. Компонент — номер детали: ‘0’ обозначает ядро, ‘1’–‘11’ — номера компонентов релятивистской струи, ‘99’ — компонент, не используемый в анализе. Полная версия таблицы в машиночитаемом формате доступна по ссылке <https://doi.org/10.1088/0004-637X/758/2/84>.

Источник	$S$ (Ян)	$r$ (мсек дуги)	PA (°)	$a$ (мсек дуги)	$(b/a)$	PA <sub>maj</sub> (°)	Тип	Эпоха	Компонент
0003–066	1.599	0.079	148.3	0.633	0.387	-16.3	1	1995.78	0
	0.645	1.040	-60.5	1.384	1.000	0.0	1		99
	0.156	5.145	-74.5	3.222	1.000	0.0	1	1	
	1.209	0.032	114.2	0.529	0.000	21.2	1	1997.08	0
	0.225	0.786	-48.9	0.520	1.000	0.0	1		3
	0.194	2.131	-71.1	1.416	1.000	0.0	1		2
	0.083	5.586	-75.2	2.455	1.000	0.0	1		1

Пример моделирования структуры источника 0003–066 для двух эпох наблюдения представлены в таблице 3.3. Полная версия таблицы в машиночитаемом формате доступна в сети интернет на сайте публикации [A6]<sup>1</sup> и содержит в общей сложности 8571 гауссов компонент, подогаанный к 2753 изображениям, или в среднем около 3 компонента на изображение (ядро и два компонента струи). Столбцы 2–8 таблицы 3.3 непосредственно получены в результате работы *modelfit* в программе *Difmap*. Положение компонентов не были смещены, чтобы поместить ядро в начало координат, так что координаты в таблице 3.3 непосредственно соответствуют положениям на общедоступных изображениях<sup>2</sup>. Стоит обратить внимание, что измерения плотности потока во втором столбце не очень точны в случае относительно близко расположенных компонентов, когда разделение плотности потока между компонентами может быть неоднозначным.

После моделирования всех эпох наблюдения данного источника, компоненты релятивистской струи должны быть отождествлены на разных картах, чтобы

<sup>1</sup><https://doi.org/10.1088/0004-637X/758/2/84>

<sup>2</sup>[http://astrogeo.org/vlbi\\_images/](http://astrogeo.org/vlbi_images/)

изучить их кинематику. Каждому компоненту струи источника присваивался уникальный номер, который сохранялся от эпохи к эпохе. Этот номер приведён в последнем столбце таблицы 3.3. Компонент '0' указывает на предполагаемое ядро. Другие компоненты пронумерованы от '1' до '11', от самого внешнего компонента к ядру. Идентификатор '99' указывает на неопознанный компонент, который в дальнейшем исключается из анализа. За ядро в каждом источнике принимается компактный компонент в основании одностороннего выброса, часто, но не всегда, это также самый яркий компонент. Как отмечалось выше, источники, которые имеют двустороннюю РСДБ структуру на этих масштабах, были исключены. Отождествление компонентов струй было сделано на основе согласованности плотности потока, расстояния, позиционного угла и размера от эпохи к эпохе. Ожидается, что при таком большом количестве наблюдений каждого источника и малом интервале времени между наблюдениями, такое отождествление будет надёжным. В тех случаях, когда компонент модели не мог быть непосредственно соотнесён ни с какими компонентами, наблюдавшимися в другие эпохи, ему присваивался номер '99', чтобы пометить его, как компонент модели, не используемый в анализе. Обычно такое происходило, когда на изображении с более низким угловым разрешением две детали, которые были видны на других картах, сливались в вместе или когда слабый компонент проявлялся только на некоторых изображениях с более высокой чувствительностью.

Ниже приведена общая статистика результатов подгонки гауссовых моделей структуры источников. Всего был определён 8571 компонент из которых 2753 являются ядрами, а 5818 — компонентами релятивистских струй. Около 84 % компонентов (7205) являются круговыми Гауссианами, в то время как около 16 % (1366) — эллиптическими. Из 1366 эллиптических гауссовых компонентов 1277 (около 93 %) были использованы для моделирования ядра, в то время как только 89 (около 7 %) использовались для моделирования компонентов струи. Это означает, что эллиптическими Гауссианами представлены около 46 % ядер и только около 2 % компонентов струи. Когда ядро моделируется эллиптическим компонентом, направление большой оси эллипса чаще направлено вдоль струи, как показано на рисунке 3.2. На этом рисунке показана гистограмма разницы между позиционным углом большой оси эллиптического ядра и позиционным углом ближайшего компонента струи, для 1125 эллиптических ядер со следующим компонентом струи. На гистограмме заметно увеличение количества случаев с малой разницей углов, что позволяет предположить, что эллиптические компоненты ядра моделируют

структуру вытянутого начала струи. Аналогичный результат был найден для эллиптических компонентов ядра в 2-см VLBA обзоре [36].

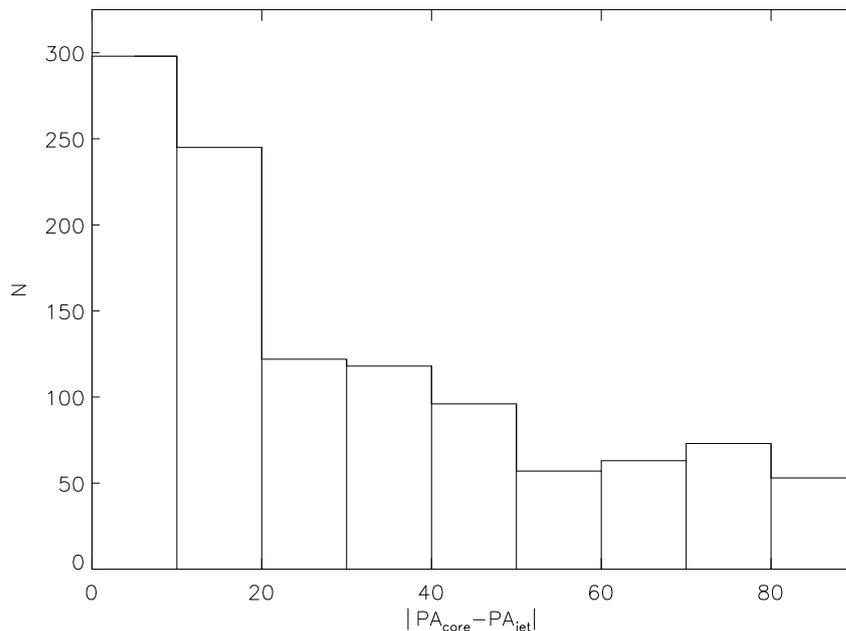


Рисунок 3.2 — Гистограмма распределений разности между позиционным углом большой оси эллиптического ядра ( $PA_{core}$ ) и позиционным углом ближайшего компонента струи ( $PA_{jet}$ ).

Из 5818 компонентов струи 5069 (около 87%) компонентам был дан определённый номер в последнем столбце таблицы 3.3, в то время как 749 (около 13%) не были отождествлены между разными эпохами (номер '99'). Всего было отождествлено 225 уникальных компонентов струи, по крайней мере, с четырьмя эпохами наблюдения (что необходимо для кинематического анализа), в 66 источниках. При общем количестве 5069 наблюдений отождествлённых компонентов струи это даёт в среднем около 23 наблюдений каждого из 225 уникальных компонентов.

## 3.4 Видимые скорости

### 3.4.1 Методы подгонки

Для изучения движения каждого из 225 компонентов со временем было использовано два подхода. В первом подходе использовалась линейная подгонка зависимости углового расстояния компонента от ядра  $r$  от времени  $t$  с двумя свободными параметрами. Эта подгонка даёт собственное движения детали как скорость изменения  $r$ , что соответствует наклону подогнанной прямой на графике углового расстояния до ядра от времени.

Второй подход использовал подгонку полиномов второго порядка к координатам  $x(t)$  и  $y(t)$  каждого компонента, что даёт информацию о видимом ускорении. Используемый метод нелинейной аппроксимации идентичен методу, описанному работе [137], который также использовался для измерения ускорения в обзоре MOJAVE [138; 140]. Ниже приводится более подробное описание метода нелинейной подгонки.

Для нелинейной подгонки используются три параметра для  $x(t)$  и  $y(t)$ , то есть в общей сложности шесть свободных параметров для каждого компонента. Вектор угловой скорости (собственного движения)  $\vec{\mu}$  определяется из средней угловой скорости в направлениях  $x$  и  $y$  ( $\mu_x$  и  $\mu_y$ ) или, что эквивалентно, вектора угловой скорости в средний момент времени  $t_{\text{mid}} = (t_i + t_f)/2$ , где  $t_i$  и  $t_f$  — времена начального и конечного наблюдения компонента, соответственно. Величина среднего вектора угловой скорости обозначается  $\mu$ , а направление этого вектора —  $\varphi$ . Величина  $\mu$  затем преобразуется в линейную видимую скорость  $\beta_{\text{app}}$ , выраженную в скоростях света. Величина  $|\text{PA} - \varphi|$  представляет собой разность между средневзвешенным позиционным углом PA компонента и направлением вектора его средней видимой скорости.

Видимое угловое ускорение вычисляется из  $\ddot{x}$  и  $\ddot{y}$  ( $\dot{\mu}_x$  и  $\dot{\mu}_y$ ). Это видимое угловое ускорение раскладывается на две составляющие, параллельную и перпендикулярную номинальному направлению скорости  $\varphi$ . Эти две составляющие обозначены  $\dot{\mu}_{\parallel}$  и  $\dot{\mu}_{\perp}$ , соответственно. Они представляют видимое угловое ускорение из-за изменений в видимой скорости и из-за изменений направления,

соответственно. Чтобы было проще сравнивать видимые ускорения быстрых и медленных релятивистских струй, вводятся относительное параллельное ускорение как

$$\dot{\eta}_{\parallel} \equiv \dot{\beta}_{\parallel\text{app}}/\beta_{\text{app}} = (1+z)\dot{\mu}_{\parallel}/\mu, \quad (3.2)$$

и относительное перпендикулярное ускорение как

$$\dot{\eta}_{\perp} \equiv \dot{\beta}_{\perp\text{app}}/\beta_{\text{app}} = (1+z)\dot{\mu}_{\perp}/\mu. \quad (3.3)$$

Таким образом, например, видимая скорость компонента с относительным параллельным ускорением 0.1 увеличивается на 10% в год. Стоит отметить, что относительное ускорение, определённое таким образом, имеет размерность обратного времени. Этот метод подгонки предполагают постоянное ускорение компонента струи, хотя нельзя исключать возможность того, что величина ускорения может вести себя более сложным образом и меняться со временем.

Для обоих методов подгонки (линейного и нелинейного) ошибки измерения положения компонентов струи определялись в соответствии с методом, описанным в работе [137], который затем использовался в работах [138; 140]. В этом методе всем измерениям положения данного компонента назначалась постоянная погрешность на основе разброса измеренных значений относительно подогнутой величины таки образом, чтобы величина  $\chi^2$  подгонки имела значение 1.0. Этот метод имеет тот недостаток, что значение  $\chi^2$  нельзя использовать для определения пригодности выбранной модели, но при условии, что модель подходит, он даёт хорошую оценку неопределённости параметров модели. Стоит отметить, что не существует метода получить надёжные и статистически точные оценки ошибок параметров каждого компонента модели, который бы учитывал как ошибки, связанные с погрешностью измерения функции видности, так и систематические эффекты, вызванные изменениями количества и формы компонентов модели, или эффекты, введённые при калибровке и построении изображения.

Результаты линейной подгонки представлены в таблице 3.4. На рисунке 3.3 приведён пример зависимости углового расстояния компонентов релятивистской струи от ядра от времени для источника 0003–066. В таблице 3.4 приведены средняя плотность потока и средневзвешенное расстояние каждого компонента, собственное радиальное движение и видимая скорость, а также экстраполированная эпоха, когда компонент отделился от ядра, для компонентов со значимостью собственного движения выше  $3\sigma$ . Полный набор 66 графиков аналогичных рисунку 3.3 для всех источников доступен на сайте публикации [A6].

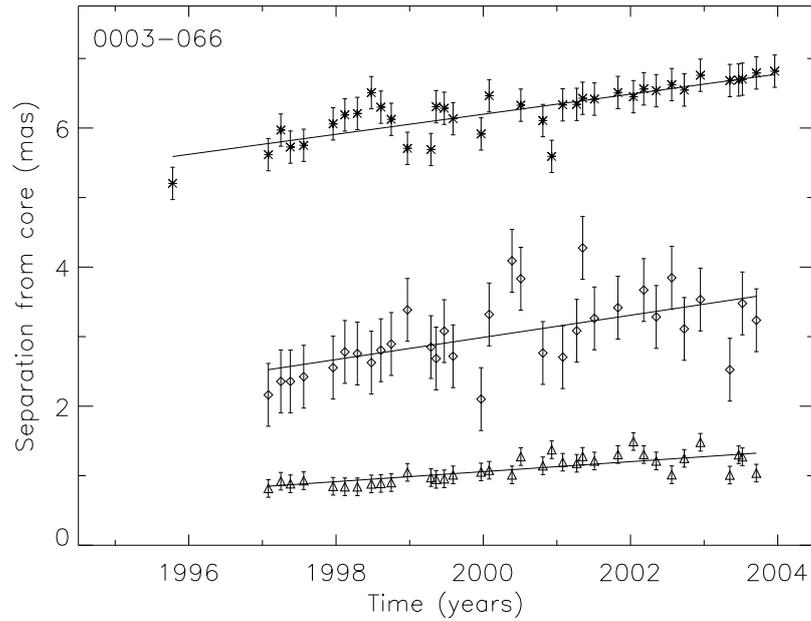


Рисунок 3.3 — Угловое расстояние центров гауссовых компонентов от ядра (мсек дуги) как функция времени (в годах). Прямые линии — линейная подгонка методом наименьших квадратов радиального движения с постоянной скоростью для компонентов, обнаруженных в четырёх или более эпохах. Звёздочками обозначен компонент 1, ромбами компонент 2, треугольниками компонент 3. Неопознанные компоненты из таблицы 3.3 не показаны. Здесь приведён пример для источника 0003–066. Полный набор 66 графиков (для каждого источника из таблицы 3.4) доступен по ссылке <https://doi.org/10.1088/0004-637X/758/2/84>.

Таблица 3.4 — Результаты измерения видимой скорости компонентов релятивистских струй. Комп. — номер компонента в источнике (как в таблице 3.3).  $\langle S \rangle$  — средняя плотность потока компонента.  $\langle r \rangle$  — средневзвешенное расстояние от ядра.  $\mu$  — собственное движение (угловая скорость).  $\beta_{\text{app}}$  — видимая скорость в скоростях света.  $t_0$  — время появления компонента (дано при значимости собственного движения больше  $3\sigma$ ).

Источник	Комп.	$\langle S \rangle$ (Ян)	$\langle r \rangle$ (мсек дуги)	$\mu$ (мсек дуги/год)	$\beta_{\text{app}}$	$t_0$ (год)
0003–066	1	0.138	$6.25 \pm 0.04$	$144 \pm 18$	$3.1 \pm 0.4$	$1957.02 \pm 5.36$
	2	0.158	$3.03 \pm 0.08$	$159 \pm 40$	$3.5 \pm 0.9$	$1981.23 \pm 5.10$
	3	0.199	$1.09 \pm 0.02$	$72 \pm 11$	$1.6 \pm 0.2$	$1985.24 \pm 2.31$
0014+813	1	0.006	$9.39 \pm 0.07$	$45 \pm 34$	$4.9 \pm 3.6$	...
	2	0.010	$5.36 \pm 0.06$	$28 \pm 30$	$3.0 \pm 3.2$	...
	3	0.113	$0.67 \pm 0.01$	$-5 \pm 4$	$-0.6 \pm 0.4$	...
0048–097	1	0.008	$3.09 \pm 0.36$	$-79 \pm 183$	$-2.9 \pm 6.7$	...
	3	0.022	$0.60 \pm 0.04$	$32 \pm 53$	$1.2 \pm 1.9$	...
	4	0.063	$0.86 \pm 0.09$	$339 \pm 191$	$12.4 \pm 7.0$	...
0059+581	5	0.137	$0.67 \pm 0.06$	$178 \pm 70$	$6.5 \pm 2.6$	...
	1	0.026	$2.51 \pm 0.04$	$-24 \pm 20$	$-0.9 \pm 0.7$	...
	2	0.036	$1.35 \pm 0.03$	$43 \pm 16$	$1.6 \pm 0.6$	...
0104–408	3	0.091	$0.65 \pm 0.02$	$-2 \pm 16$	$-0.1 \pm 0.6$	...
	4	0.102	$0.57 \pm 0.01$	$103 \pm 8$	$3.8 \pm 0.3$	$1995.13 \pm 0.42$
	5	1.666	$0.16 \pm 0.01$	$67 \pm 59$	$2.5 \pm 2.2$	...
0119+041	1	0.076	$2.36 \pm 0.15$	$37 \pm 69$	$1.3 \pm 2.3$	...
	2	0.218	$0.53 \pm 0.05$	$78 \pm 26$	$2.6 \pm 0.9$	$1994.13 \pm 2.56$
0119+115	1	0.314	$0.73 \pm 0.02$	$39 \pm 9$	$1.5 \pm 0.3$	$1981.16 \pm 4.47$
0119+115	1	0.023	$20.33 \pm 0.11$	$284 \pm 143$	$9.5 \pm 4.8$	...
	2	0.009	$14.24 \pm 0.08$	$61 \pm 93$	$2.0 \pm 3.1$	...
	3	0.105	$1.64 \pm 0.05$	$242 \pm 23$	$8.1 \pm 0.8$	$1993.53 \pm 0.65$
	4	0.247	$1.39 \pm 0.04$	$317 \pm 43$	$10.6 \pm 1.4$	$1998.15 \pm 0.61$

Продолжение таблицы 3.4

0133+476	1	0.052	$2.61 \pm 0.04$	$-9 \pm 16$	$-0.4 \pm 0.8$	...
	2	0.087	$1.07 \pm 0.03$	$58 \pm 18$	$2.7 \pm 0.9$	$1982.36 \pm 6.50$
	3	0.176	$0.53 \pm 0.02$	$31 \pm 9$	$1.5 \pm 0.4$	$1983.58 \pm 5.38$
0201+113	1	0.034	$1.46 \pm 0.04$	$19 \pm 19$	$2.1 \pm 2.1$	...
	2	0.114	$1.21 \pm 0.01$	$31 \pm 6$	$3.4 \pm 0.7$	$1960.65 \pm 8.65$
0202+149	1	0.215	$4.81 \pm 0.02$	$-113 \pm 9$	$-2.8 \pm 0.2$	...
	2	0.462	$0.60 \pm 0.02$	$98 \pm 17$	$2.5 \pm 0.4$	$1993.01 \pm 1.07$
	3	1.234	$0.52 \pm 0.05$	$101 \pm 71$	$2.5 \pm 1.8$	...
0229+131	1	0.010	$7.46 \pm 0.24$	$132 \pm 116$	$11.2 \pm 9.8$	...
	2	0.010	$3.18 \pm 0.08$	$-193 \pm 109$	$-16.4 \pm 9.2$	...
	3	0.043	$2.78 \pm 0.11$	$327 \pm 35$	$27.8 \pm 3.0$	$1990.23 \pm 0.93$
	4	0.065	$1.77 \pm 0.04$	$55 \pm 26$	$4.6 \pm 2.2$	...
	5	0.151	$0.51 \pm 0.02$	$11 \pm 13$	$1.0 \pm 1.1$	...
	6	0.515	$0.24 \pm 0.02$	$-100 \pm 47$	$-8.5 \pm 4.0$	...
0234+285	1	0.140	$6.03 \pm 0.08$	$445 \pm 50$	$26.9 \pm 3.1$	$1985.34 \pm 1.56$
	2	0.211	$4.01 \pm 0.03$	$298 \pm 12$	$18.0 \pm 0.8$	$1986.69 \pm 0.57$
	3	0.093	$1.03 \pm 0.04$	$48 \pm 25$	$2.9 \pm 1.5$	...
	4	0.196	$0.45 \pm 0.01$	$31 \pm 14$	$1.9 \pm 0.8$	...
	5	0.816	$0.33 \pm 0.02$	$117 \pm 39$	$7.1 \pm 2.4$	$2000.55 \pm 1.06$
0336-019	1	0.024	$5.97 \pm 0.22$	$14 \pm 136$	$0.7 \pm 6.3$	...
	2	0.025	$3.63 \pm 0.09$	$85 \pm 95$	$3.9 \pm 4.4$	...
	3	0.082	$2.94 \pm 0.05$	$187 \pm 22$	$8.7 \pm 1.0$	$1984.39 \pm 1.91$
	4	0.270	$1.50 \pm 0.03$	$123 \pm 15$	$5.7 \pm 0.7$	$1987.30 \pm 1.52$
	5	0.444	$0.93 \pm 0.02$	$277 \pm 14$	$12.9 \pm 0.7$	$1998.40 \pm 0.18$
	6	0.762	$0.35 \pm 0.04$	$74 \pm 41$	$3.4 \pm 1.9$	...
0402-362	1	0.044	$2.76 \pm 0.11$	$174 \pm 69$	$11.8 \pm 4.6$	...
	2	0.304	$0.79 \pm 0.04$	$109 \pm 20$	$7.3 \pm 1.4$	$1993.05 \pm 1.41$
0430+052	1	0.272	$5.57 \pm 0.06$	$1455 \pm 83$	$2.9 \pm 0.2$	$1994.40 \pm 0.22$
	2	0.801	$2.48 \pm 0.04$	$1728 \pm 52$	$3.5 \pm 0.1$	$1996.80 \pm 0.04$
	3	0.426	$2.27 \pm 0.08$	$1835 \pm 181$	$3.7 \pm 0.4$	$1997.40 \pm 0.12$
	4	0.131	$8.76 \pm 0.12$	$2142 \pm 113$	$4.3 \pm 0.2$	$1998.07 \pm 0.22$
	5	0.373	$5.31 \pm 0.05$	$1903 \pm 62$	$3.8 \pm 0.1$	$1999.48 \pm 0.09$
0454-234	1	0.151	$0.85 \pm 0.05$	$-12 \pm 21$	$-0.7 \pm 1.1$	...
0458-020	1	0.070	$4.57 \pm 0.07$	$296 \pm 35$	$26.6 \pm 3.1$	$1984.97 \pm 1.85$
	2	0.121	$1.78 \pm 0.05$	$198 \pm 23$	$17.8 \pm 2.1$	$1991.21 \pm 1.06$
0528+134	1	0.090	$3.66 \pm 0.04$	$75 \pm 19$	$6.4 \pm 1.6$	$1951.52 \pm 13.05$
	2	0.266	$1.43 \pm 0.02$	$125 \pm 11$	$10.7 \pm 0.9$	$1989.09 \pm 0.99$
	3	0.564	$0.46 \pm 0.01$	$5 \pm 7$	$0.4 \pm 0.6$	...
	4	1.166	$0.23 \pm 0.04$	$201 \pm 133$	$17.1 \pm 11.3$	...
0537-441	1	0.186	$2.50 \pm 0.07$	$-3 \pm 27$	$-0.2 \pm 1.3$	...
	2	0.621	$0.97 \pm 0.14$	$34 \pm 262$	$1.6 \pm 12.7$	...
0552+398	1	1.076	$0.65 \pm 0.00$	$-5 \pm 1$	$-0.4 \pm 0.1$	...
0642+449	1	0.012	$3.41 \pm 0.06$	$-5 \pm 27$	$-0.5 \pm 2.9$	...
	3	0.708	$0.28 \pm 0.01$	$-8 \pm 3$	$-0.9 \pm 0.3$	...
0727-115	1	0.181	$2.21 \pm 0.05$	$37 \pm 20$	$2.7 \pm 1.5$	...
	2	0.253	$0.70 \pm 0.08$	$66 \pm 69$	$4.8 \pm 5.0$	...
	3	1.028	$0.27 \pm 0.02$	$7 \pm 10$	$0.5 \pm 0.7$	...
0804+499	1	0.011	$2.59 \pm 0.08$	$69 \pm 60$	$4.7 \pm 4.1$	...
	2	0.080	$1.12 \pm 0.02$	$55 \pm 9$	$3.7 \pm 0.6$	$1979.94 \pm 3.27$
	3	0.070	$0.30 \pm 0.02$	$-19 \pm 12$	$-1.3 \pm 0.8$	...
0823+033	1	0.015	$9.80 \pm 0.21$	$655 \pm 235$	$19.9 \pm 7.1$	...
	2	0.038	$4.05 \pm 0.08$	$122 \pm 63$	$3.7 \pm 1.9$	...
	3	0.090	$2.62 \pm 0.03$	$-13 \pm 14$	$-0.4 \pm 0.4$	...
	4	0.164	$1.02 \pm 0.02$	$59 \pm 11$	$1.8 \pm 0.3$	$1982.21 \pm 3.43$
	5	0.106	$0.59 \pm 0.03$	$131 \pm 38$	$4.0 \pm 1.1$	$1997.89 \pm 1.41$
	6	0.304	$0.33 \pm 0.02$	$-58 \pm 65$	$-1.8 \pm 2.0$	...
0851+202	1	0.023	$3.61 \pm 0.12$	$40 \pm 84$	$0.8 \pm 1.6$	...
	2	0.104	$2.55 \pm 0.07$	$344 \pm 27$	$6.7 \pm 0.5$	$1992.84 \pm 0.58$
	3	0.125	$1.21 \pm 0.03$	$230 \pm 32$	$4.5 \pm 0.6$	$1994.10 \pm 0.75$
	4	0.364	$0.92 \pm 0.03$	$199 \pm 16$	$3.9 \pm 0.3$	$1996.66 \pm 0.38$
	5	0.420	$0.67 \pm 0.03$	$258 \pm 25$	$5.0 \pm 0.5$	$1999.85 \pm 0.25$
0919-260	1	0.020	$6.14 \pm 0.09$	$146 \pm 43$	$13.2 \pm 3.9$	$1957.71 \pm 13.52$
	2	0.038	$2.02 \pm 0.21$	$-137 \pm 172$	$-12.4 \pm 15.5$	...
	3	0.118	$1.39 \pm 0.04$	$121 \pm 16$	$10.9 \pm 1.4$	$1988.74 \pm 1.57$
0920-397	1	0.058	$6.45 \pm 0.32$	$390 \pm 199$	$13.4 \pm 6.9$	...
	2	0.094	$4.08 \pm 0.13$	$256 \pm 50$	$8.8 \pm 1.7$	$1985.15 \pm 3.26$
0923+392	1	1.103	$2.52 \pm 0.05$	$6 \pm 44$	$0.2 \pm 1.7$	...
	2	7.089	$2.11 \pm 0.02$	$52 \pm 9$	$2.1 \pm 0.3$	$1959.29 \pm 7.07$
0955+476	3	1.851	$1.46 \pm 0.03$	$164 \pm 15$	$6.5 \pm 0.6$	$1991.62 \pm 0.81$
	1	0.014	$1.10 \pm 0.13$	$212 \pm 116$	$17.0 \pm 9.3$	...

Продолжение таблицы 3.4

	2	0.031	0.57 ± 0.05	84 ± 36	6.8 ± 2.9	...
	3	0.110	0.21 ± 0.02	43 ± 13	3.5 ± 1.1	1997.17 ± 1.61
1034-293	1	0.029	3.05 ± 0.23	130 ± 151	2.5 ± 2.9	...
	2	0.061	2.03 ± 0.04	212 ± 20	4.1 ± 0.4	1990.78 ± 0.92
	3	0.101	1.31 ± 0.04	158 ± 18	3.1 ± 0.3	1992.20 ± 0.96
	4	0.299	0.53 ± 0.02	45 ± 14	0.9 ± 0.3	1989.67 ± 4.20
1044+719	1	0.034	0.81 ± 0.06	176 ± 56	10.2 ± 3.3	1992.41 ± 1.63
	2	0.546	0.53 ± 0.01	79 ± 4	4.6 ± 0.3	1994.60 ± 0.38
1101+384	1	0.016	5.38 ± 0.09	-79 ± 41	-0.2 ± 0.1	...
	2	0.012	2.84 ± 0.06	-58 ± 27	-0.1 ± 0.1	...
	3	0.027	1.46 ± 0.03	23 ± 15	0.05 ± 0.03	...
	4	0.061	0.55 ± 0.02	2 ± 9	0.004 ± 0.019	...
1124-186	1	0.011	2.70 ± 0.20	500 ± 122	27.3 ± 6.7	1993.11 ± 1.40
	2	0.072	0.87 ± 0.05	41 ± 23	2.3 ± 1.3	...
1128+385	1	0.078	0.84 ± 0.02	-18 ± 9	-1.4 ± 0.7	...
	2	0.154	0.37 ± 0.01	11 ± 4	0.9 ± 0.3	...
1144-379	1	0.046	3.75 ± 0.20	-80 ± 151	-4.4 ± 8.3	...
	2	0.150	1.12 ± 0.10	218 ± 51	11.9 ± 2.8	1994.14 ± 1.27
1145-071	1	0.103	2.20 ± 0.01	52 ± 6	3.4 ± 0.4	1958.15 ± 4.55
1156+295	1	0.049	7.22 ± 0.27	-75 ± 207	-3.1 ± 8.5	...
	2	0.080	6.29 ± 0.08	636 ± 37	26.2 ± 1.5	1990.38 ± 0.58
	3	0.117	2.24 ± 0.11	494 ± 49	20.3 ± 2.0	1995.61 ± 0.46
	5	0.209	0.56 ± 0.03	50 ± 19	2.1 ± 0.8	...
1228+126	1	0.125	21.37 ± 0.29	-114 ± 142	-0.03 ± 0.04	...
	2	0.096	11.54 ± 0.24	63 ± 120	0.02 ± 0.03	...
	3	0.108	6.57 ± 0.07	88 ± 36	0.02 ± 0.01	...
	4	0.140	2.97 ± 0.08	90 ± 39	0.02 ± 0.01	...
	5	0.285	1.48 ± 0.04	-4 ± 22	-0.001 ± 0.006	...
	6	0.336	0.57 ± 0.02	6 ± 11	0.001 ± 0.003	...
1308+326	1	0.534	1.74 ± 0.02	398 ± 12	21.0 ± 0.6	1995.96 ± 0.13
	2	0.319	1.49 ± 0.01	486 ± 13	25.6 ± 0.7	1999.23 ± 0.08
1313-333	1	0.028	7.45 ± 0.07	704 ± 115	42.6 ± 7.0	1989.58 ± 1.78
	2	0.049	2.02 ± 0.05	383 ± 68	23.2 ± 4.1	1992.65 ± 0.97
	3	0.121	2.08 ± 0.07	497 ± 34	30.1 ± 2.1	1996.27 ± 0.29
1334-127	1	0.175	2.78 ± 0.04	89 ± 28	2.9 ± 0.9	1967.95 ± 10.71
	2	0.122	1.71 ± 0.04	225 ± 14	7.2 ± 0.4	1993.04 ± 0.46
	3	0.395	0.98 ± 0.04	297 ± 44	9.5 ± 1.4	1998.82 ± 0.50
1357+769	1	0.008	2.44 ± 0.20	79 ± 71	5.8 ± 5.2	...
	2	0.015	1.39 ± 0.05	104 ± 33	7.6 ± 2.4	1987.76 ± 4.74
	3	0.034	0.54 ± 0.02	93 ± 12	6.8 ± 0.9	1992.07 ± 0.75
	4	0.106	0.21 ± 0.02	5 ± 16	0.4 ± 1.2	...
1424-418	1	0.075	2.77 ± 0.09	15 ± 49	1.1 ± 3.5	...
1448+762	1	0.014	1.57 ± 0.05	-4 ± 39	-0.2 ± 1.9	...
	2	0.077	0.96 ± 0.04	-60 ± 33	-2.9 ± 1.6	...
	3	0.144	0.54 ± 0.02	-87 ± 17	-4.2 ± 0.8	...
1451-375	1	0.025	7.73 ± 0.44	337 ± 212	6.5 ± 4.1	...
	2	0.090	2.05 ± 0.16	293 ± 72	5.7 ± 1.4	1993.66 ± 1.82
1514-241	1	0.061	11.54 ± 0.49	2964 ± 1075	9.8 ± 3.6	...
	2	0.058	7.58 ± 0.21	1240 ± 285	4.1 ± 0.9	1992.08 ± 1.48
	3	0.124	9.96 ± 0.19	1651 ± 163	5.5 ± 0.5	1995.66 ± 0.60
	4	0.115	5.07 ± 0.20	1605 ± 391	5.3 ± 1.3	1998.71 ± 0.82
	5	0.405	1.77 ± 0.08	556 ± 160	1.8 ± 0.5	1995.53 ± 1.00
1606+106	1	0.015	7.63 ± 0.06	4 ± 30	0.2 ± 1.8	...
	2	0.035	2.48 ± 0.05	88 ± 22	5.4 ± 1.3	1971.60 ± 7.41
	3	0.109	1.53 ± 0.02	15 ± 10	0.9 ± 0.6	...
	4	0.250	0.53 ± 0.02	-30 ± 7	-1.9 ± 0.5	...
1611+343	1	0.573	3.59 ± 0.03	60 ± 15	4.0 ± 1.0	1940.33 ± 16.37
	2	0.204	4.03 ± 0.02	108 ± 18	7.2 ± 1.2	1963.53 ± 6.33
	3	0.350	2.84 ± 0.01	25 ± 4	1.7 ± 0.3	1886.21 ± 19.59
	4	0.099	1.38 ± 0.03	183 ± 18	12.3 ± 1.2	1992.17 ± 0.73
	5	0.386	0.73 ± 0.01	214 ± 8	14.3 ± 0.6	1997.78 ± 0.13
	6	0.730	0.49 ± 0.03	333 ± 55	22.3 ± 3.7	2001.49 ± 0.25
1622-253	1	0.039	2.69 ± 0.09	43 ± 56	1.9 ± 2.4	...
	2	0.131	1.08 ± 0.07	184 ± 38	8.1 ± 1.7	1994.30 ± 1.25
1638+398	1	0.083	0.56 ± 0.02	27 ± 9	2.0 ± 0.7	...
	2	0.118	0.40 ± 0.01	30 ± 7	2.3 ± 0.5	1987.95 ± 3.30
	3	0.238	0.17 ± 0.01	13 ± 10	1.0 ± 0.7	...
1642+690	1	0.070	9.63 ± 0.03	57 ± 23	2.4 ± 0.9	...
	2	0.016	4.84 ± 0.04	577 ± 58	24.3 ± 2.5	1993.80 ± 0.86
	3	0.041	3.82 ± 0.04	340 ± 30	14.3 ± 1.3	1990.64 ± 0.99

Продолжение таблицы 3.4

	4	0.020	$2.81 \pm 0.02$	$355 \pm 21$	$14.9 \pm 0.9$	$1994.21 \pm 0.47$
	5	0.022	$1.67 \pm 0.04$	$208 \pm 39$	$8.7 \pm 1.6$	$1993.61 \pm 1.57$
	6	0.042	$1.20 \pm 0.02$	$164 \pm 12$	$6.9 \pm 0.5$	$1994.57 \pm 0.56$
	7	0.074	$0.43 \pm 0.02$	$56 \pm 19$	$2.3 \pm 0.8$	...
1657-261	1	0.036	$0.85 \pm 0.12$	$158 \pm 95$	...	...
1726+455	1	0.057	$1.81 \pm 0.06$	$181 \pm 34$	$7.3 \pm 1.4$	$1988.65 \pm 1.92$
	2	0.095	$0.93 \pm 0.07$	$293 \pm 43$	$11.8 \pm 1.7$	$1996.35 \pm 0.47$
1739+522	1	0.101	$1.16 \pm 0.11$	$54 \pm 97$	$3.6 \pm 6.4$	...
	2	0.154	$0.37 \pm 0.02$	$58 \pm 12$	$3.9 \pm 0.8$	$1995.08 \pm 1.34$
1741-038	1	0.019	$1.82 \pm 0.12$	$-14 \pm 75$	$-0.8 \pm 4.1$	...
	2	0.065	$0.98 \pm 0.05$	$-35 \pm 54$	$-2.0 \pm 3.0$	...
	3	1.365	$0.43 \pm 0.02$	$30 \pm 6$	$1.7 \pm 0.4$	$1985.88 \pm 3.21$
1745+624	1	0.007	$2.58 \pm 0.07$	$76 \pm 30$	$8.7 \pm 3.5$	...
	2	0.015	$1.46 \pm 0.03$	$64 \pm 17$	$7.4 \pm 1.9$	$1976.72 \pm 6.44$
	3	0.018	$1.10 \pm 0.05$	$132 \pm 62$	$15.1 \pm 7.1$	...
	4	0.035	$0.55 \pm 0.05$	$70 \pm 54$	$8.1 \pm 6.3$	...
	5	0.287	$0.24 \pm 0.01$	$10 \pm 3$	$1.2 \pm 0.4$	$1977.39 \pm 7.75$
1749+096	1	0.027	$3.89 \pm 0.18$	$789 \pm 143$	$15.8 \pm 2.9$	$1991.66 \pm 0.93$
	2	0.030	$2.46 \pm 0.12$	$711 \pm 92$	$14.2 \pm 1.8$	$1993.64 \pm 0.46$
	3	0.101	$1.06 \pm 0.08$	$558 \pm 95$	$11.2 \pm 1.9$	$1996.42 \pm 0.33$
	4	0.073	$1.92 \pm 0.06$	$449 \pm 38$	$9.0 \pm 0.8$	$1996.89 \pm 0.37$
	5	0.169	$0.86 \pm 0.03$	$187 \pm 24$	$3.7 \pm 0.5$	$1997.39 \pm 0.59$
1803+784	1	0.040	$7.15 \pm 0.09$	$-56 \pm 42$	$-2.2 \pm 1.6$	...
	2	0.051	$3.45 \pm 0.08$	$80 \pm 38$	$3.1 \pm 1.5$	...
	3	0.083	$1.83 \pm 0.02$	$-38 \pm 9$	$-1.5 \pm 0.4$	...
	4	0.217	$1.44 \pm 0.01$	$-22 \pm 5$	$-0.8 \pm 0.2$	...
	5	0.118	$1.03 \pm 0.02$	$1 \pm 14$	$0.04 \pm 0.54$	...
	6	0.257	$0.47 \pm 0.01$	$22 \pm 7$	$0.9 \pm 0.3$	$1979.21 \pm 7.09$
1908-201	1	0.036	$5.41 \pm 0.21$	$342 \pm 99$	$19.6 \pm 5.7$	$1984.36 \pm 5.03$
	2	0.229	$2.85 \pm 0.04$	$193 \pm 17$	$11.0 \pm 1.0$	$1985.55 \pm 1.34$
	3	0.206	$1.27 \pm 0.07$	$249 \pm 70$	$14.3 \pm 4.0$	$1995.07 \pm 1.56$
	4	0.623	$0.82 \pm 0.04$	$187 \pm 27$	$10.7 \pm 1.5$	$1997.21 \pm 0.64$
1921-293	1	1.457	$6.20 \pm 0.07$	$176 \pm 31$	$3.8 \pm 0.7$	$1964.78 \pm 6.32$
	2	0.730	$2.99 \pm 0.19$	$142 \pm 76$	$3.1 \pm 1.6$	...
	3	0.716	$1.28 \pm 0.08$	$229 \pm 82$	$5.0 \pm 1.8$	...
1954-388	1	0.050	$2.38 \pm 0.11$	$102 \pm 50$	$3.7 \pm 1.8$	...
	2	0.341	$0.82 \pm 0.06$	$102 \pm 28$	$3.7 \pm 1.0$	$1992.33 \pm 2.35$
2145+067	1	0.041	$5.39 \pm 0.12$	$10 \pm 49$	$0.5 \pm 2.6$	...
	2	0.035	$2.51 \pm 0.06$	$-56 \pm 30$	$-3.0 \pm 1.6$	...
	3	0.426	$1.15 \pm 0.04$	$125 \pm 21$	$6.6 \pm 1.1$	$1988.91 \pm 1.55$
	4	1.633	$0.81 \pm 0.01$	$84 \pm 7$	$4.4 \pm 0.4$	$1991.13 \pm 0.85$
	5	1.735	$0.53 \pm 0.02$	$25 \pm 21$	$1.3 \pm 1.1$	...
2200+420	1	0.098	$7.71 \pm 0.17$	$993 \pm 130$	$4.6 \pm 0.6$	$1990.81 \pm 1.03$
	2	0.118	$7.47 \pm 0.11$	$572 \pm 98$	$2.6 \pm 0.5$	$1988.62 \pm 2.31$
	3	0.281	$3.93 \pm 0.08$	$666 \pm 123$	$3.1 \pm 0.6$	$1992.39 \pm 1.13$
	4	0.359	$3.06 \pm 0.08$	$807 \pm 65$	$3.7 \pm 0.3$	$1994.60 \pm 0.31$
	5	0.215	$3.98 \pm 0.06$	$822 \pm 34$	$3.8 \pm 0.2$	$1995.60 \pm 0.20$
	6	0.376	$2.82 \pm 0.04$	$562 \pm 20$	$2.6 \pm 0.1$	$1995.19 \pm 0.18$
	7	0.156	$2.11 \pm 0.03$	$599 \pm 37$	$2.8 \pm 0.2$	$1996.66 \pm 0.22$
	8	0.166	$2.23 \pm 0.06$	$611 \pm 40$	$2.8 \pm 0.2$	$1997.86 \pm 0.24$
	9	0.186	$1.97 \pm 0.05$	$662 \pm 54$	$3.1 \pm 0.2$	$1999.45 \pm 0.24$
	10	0.129	$1.28 \pm 0.04$	$200 \pm 61$	$0.9 \pm 0.3$	$1996.39 \pm 2.13$
	11	0.491	$0.34 \pm 0.01$	$-17 \pm 6$	$-0.08 \pm 0.03$	...
2223-052	1	0.072	$5.76 \pm 0.11$	$260 \pm 61$	$17.4 \pm 4.1$	$1979.08 \pm 5.49$
	2	0.151	$3.15 \pm 0.04$	$99 \pm 27$	$6.6 \pm 1.8$	$1969.64 \pm 9.28$
	3	0.073	$1.31 \pm 0.06$	$57 \pm 34$	$3.8 \pm 2.3$	...
	4	1.058	$0.47 \pm 0.02$	$105 \pm 15$	$7.0 \pm 1.0$	$1997.16 \pm 0.67$
2234+282	1	0.081	$0.84 \pm 0.04$	$14 \pm 22$	$0.6 \pm 1.0$	...
	2	0.412	$0.51 \pm 0.02$	$37 \pm 16$	$1.6 \pm 0.7$	...
	3	0.388	$0.51 \pm 0.01$	$73 \pm 6$	$3.2 \pm 0.3$	$1994.72 \pm 0.56$
2243-123	1	0.056	$10.82 \pm 0.08$	$-58 \pm 41$	$-2.1 \pm 1.5$	...
	2	0.178	$3.33 \pm 0.03$	$99 \pm 13$	$3.6 \pm 0.5$	$1966.80 \pm 4.40$
	3	0.480	$1.40 \pm 0.01$	$87 \pm 7$	$3.2 \pm 0.3$	$1984.25 \pm 1.34$

Результаты нелинейной подгонки для каждого из 225 компонентов представлены в таблице 3.5. Пример такой подгонки для одного компонента источника

0003–066 показан на рисунке 3.4 в виде полиномов второго порядка, подогнанных к координатам  $x(t)$  и  $y(t)$ . Полный набор из 225 графиков, аналогичных рисунку 3.4 доступен на сайте публикации [A6]. Если погрешность направления движения компонента  $> 90^\circ$ , то колонки 9–12 таблицы 3.5 не заполняются. Обычно это случается у почти неподвижны компонентом, для которых направление движения и, следовательно, все последующие столбцы, которые от него зависят, не определены.

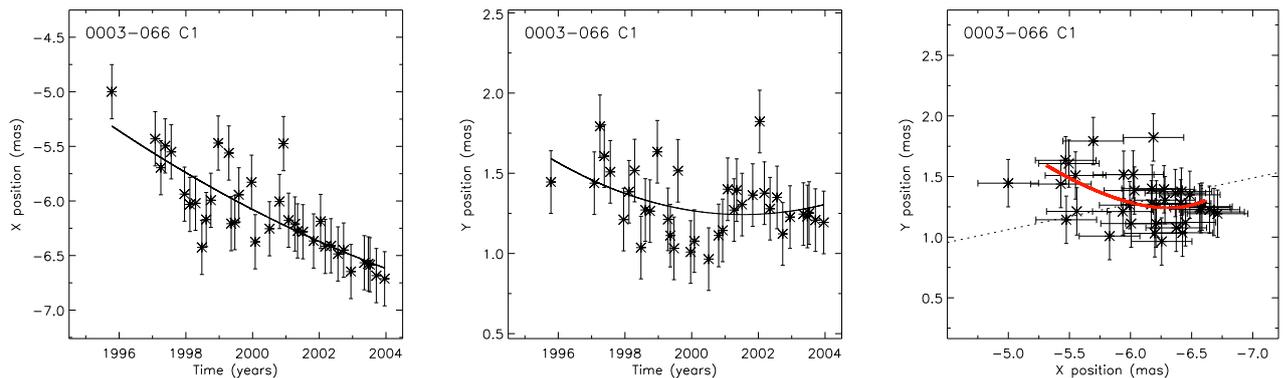


Рисунок 3.4 — Результаты нелинейной подгонки положения компонентом релятивистских струй. На левой и центральной панелях показаны координаты  $x$  и  $y$  центра гауссового компонента относительно ядра как функции времени. Кривые подогнаны методом наименьших квадратов к  $x(t)$  и  $y(t)$  в предположении движения с постоянным ускорением. На правой панели показаны координаты  $(x, y)$  центров компонента из левой и центральной панелей. Пунктирная линия показывает направление к ядру и от него для средневзвешенного позиционного угла компонента. Подогнанная траектория  $(x, y)$  изображена в виде красной кривой. Символы, обозначающие номер компонента, те же, что на рис. 3.3. Полный набор 225 рисунков (для каждого компонента из таблицы 3.5) доступен по ссылке <https://doi.org/10.1088/0004-637X/758/2/84>.

Таблица 3.5 — Результаты измерения ускорения компонентов релятивистских струй. ID — номер компонента в источнике, N — количество эпох наблюдения,  $\langle r \rangle$  — средневзвешенное угловое расстояние от ядра, PA — средневзвешенный позиционный угол,  $d_{\text{proj}}$  — средневзвешенное линейное расстояние от ядра (в проекции) в парсеках,  $\mu$  — угловая скорость,  $\beta_{\text{app}}$  — средневзвешенная видимая скорость в скоростях света,  $\varphi$  — позиционный угол направления движения компонента,  $\dot{\mu}_{\parallel}$  — угловое ускорение параллельно направлению движения,  $\dot{\mu}_{\perp}$  — угловое ускорения перпендикулярно направлению движения.  $lps$ : компоненты, соответствующие критерию стационарности (см. подраздел 3.4.2)

Источник	ID	N	$\langle r \rangle$ (мсек дуги)	PA (°)	$d_{\text{proj}}$ (пк)	$\mu$ (мксек дуги/год)	$\beta_{\text{app}}$	$\varphi$ (°)	$ \text{PA} - \varphi $ (°)	$\dot{\mu}_{\parallel}$ (мксек дуги/год <sup>2</sup> )	$\dot{\mu}_{\perp}$ (мксек дуги/год <sup>2</sup> )
0003-066	1	37	6.25	-78.0	30.82	162 ± 19	3.5 ± 0.4	-102.5 ± 5.6	24.4 ± 5.7	-15 ± 16	18 ± 15
	2	33	3.03	-74.8	14.92	153 ± 36	3.3 ± 0.8	-77.8 ± 9.3	3.0 ± 9.3	-97 ± 40	24 ± 32
	3	36	1.10	-70.3	5.41	94 ± 8	2.1 ± 0.2	-108.2 ± 7.6	37.9 ± 7.7	-38 ± 8	-3 ± 15
0014+813	1	26	9.39	-171.6	71.06	52 ± 32	5.7 ± 3.5	-138.2 ± 33.6	33.4 ± 33.6	-43 ± 39	-22 ± 49
	2	34	5.36	-166.1	40.60	40 ± 31	4.4 ± 3.4	160.4 ± 33.4	33.6 ± 33.4	20 ± 34	27 ± 34
	3	42	0.67	-179.4	5.08	13 ± 1	1.4 ± 0.2	72.4 ± 13.9	108.2 ± 13.9	-7 ± 3	9 ± 3
0048-097	1	4	3.07	9.8	21.03	195 ± 88	7.1 ± 3.2	121.9 ± 37.2	112.0 ± 37.3	250 ± 294	365 ± 284
	3	10	0.59	-81.3	4.07	112 ± 45	4.1 ± 1.7	-144.6 ± 26.1	63.3 ± 26.2	-87 ± 110	-85 ± 109
	4	7	0.86	-12.8	5.91	379 ± 166	13.8 ± 6.1	-13.2 ± 16.4	0.4 ± 16.7	-1113 ± 632	423 ± 632
	5	12	0.67	-11.8	4.57	179 ± 69	6.5 ± 2.5	-18.7 ± 9.2	6.9 ± 9.3	26 ± 129	26 ± 131
	1 <sup>lps</sup>	35	2.51	-115.1	17.31	25 ± 19	0.9 ± 0.7	70.5 ± 32.9	174.4 ± 32.9	-14 ± 16	6 ± 18
0059+581	2 <sup>lps</sup>	34	1.35	-133.5	9.32	42 ± 13	1.6 ± 0.5	-136.0 ± 19.3	2.6 ± 19.3	3 ± 15	23 ± 15
	3	9	0.65	-153.8	4.48	60 ± 43	2.2 ± 1.6	-67.6 ± 22.2	86.3 ± 22.5	-24 ± 67	-4 ± 48
	4	36	0.58	-126.1	4.03	112 ± 7	4.2 ± 0.3	-103.6 ± 5.8	22.5 ± 6.0	1 ± 9	15 ± 13
	5	5	0.16	168.5	1.11	67 ± 50	2.5 ± 1.9	-164.3 ± 26.5	27.2 ± 26.6	1001 ± 584	-127 ± 573
	1	17	2.33	18.9	15.38	60 ± 56	2.1 ± 1.9	48.2 ± 58.1	29.2 ± 58.1	84 ± 69	39 ± 119
0104-408	2	5	0.53	33.6	3.50	73 ± 21	2.5 ± 0.7	22.8 ± 15.9	10.8 ± 16.5	95 ± 53	-134 ± 46
	1	38	0.73	109.9	5.06	64 ± 4	2.4 ± 0.2	164.5 ± 6.1	54.6 ± 6.1	5 ± 5	-37 ± 6
0119+115	1	11	20.33	3.6	132.93	342 ± 137	11.5 ± 4.6	-22.6 ± 18.5	26.2 ± 18.5	-697 ± 470	326 ± 518
	2	8	14.24	2.5	93.13	83 ± 75	2.8 ± 2.5	-46.5 ± 52.9	49.1 ± 52.9	-366 ± 191	-49 ± 379
	3	41	1.65	8.3	10.77	197 ± 15	6.6 ± 0.5	12.4 ± 2.3	4.0 ± 2.4	102 ± 13	1 ± 8
	4	17	1.39	-0.1	9.08	317 ± 44	10.6 ± 1.5	-0.6 ± 1.7	0.5 ± 1.8	0 ± 116	94 ± 25
0133+476	1	39	2.61	-35.4	20.20	63 ± 12	3.0 ± 0.6	68.6 ± 11.4	104.0 ± 11.4	15 ± 15	-37 ± 13
	2	31	1.08	-29.3	8.34	61 ± 12	2.9 ± 0.6	-51.6 ± 13.0	22.3 ± 13.1	-15 ± 18	-13 ± 17
	3 <sup>lps</sup>	39	0.53	-27.9	4.07	31 ± 7	1.5 ± 0.3	-33.9 ± 11.5	6.0 ± 11.5	6 ± 7	5 ± 7
0201+113	1	22	1.46	-56.0	10.79	49 ± 22	5.5 ± 2.5	-115.4 ± 23.5	59.4 ± 23.6	-17 ± 21	-24 ± 20
	2	40	1.21	-30.4	8.97	40 ± 4	4.6 ± 0.5	-51.8 ± 6.9	21.4 ± 6.9	-17 ± 4	-16 ± 4
0202+149	1	41	4.81	-52.0	26.19	112 ± 9	2.8 ± 0.2	123.5 ± 4.9	175.5 ± 4.9	6 ± 9	25 ± 9
	2	29	0.58	-58.9	3.16	95 ± 14	2.4 ± 0.4	-71.5 ± 4.7	12.6 ± 4.8	72 ± 19	-31 ± 13
	3	10	0.52	-22.1	2.84	120 ± 67	3.0 ± 1.7	-17.2 ± 25.2	4.9 ± 25.5	-169 ± 173	-9 ± 154
0229+131	1	8	7.46	55.2	63.30	150 ± 114	12.8 ± 9.7	81.8 ± 39.2	26.6 ± 39.2	-31 ± 84	-50 ± 79
	2	4	3.17	34.3	26.89	228 ± 279	19.4 ± 23.8	-171.6 ± 27.2	154.1 ± 27.3	-219 ± 1297	777 ± 784
	3	11	2.76	42.1	23.39	323 ± 30	27.5 ± 2.6	51.5 ± 5.2	9.4 ± 5.5	53 ± 28	8 ± 26
	4	26	1.77	40.7	15.05	62 ± 22	5.3 ± 1.9	66.6 ± 20.6	25.9 ± 20.6	-34 ± 31	-36 ± 31
	5 <sup>lps</sup>	21	0.51	70.5	4.33	47 ± 10	4.0 ± 0.9	142.6 ± 13.8	72.1 ± 13.9	5 ± 11	-14 ± 12
0234+285	6	5	0.24	95.6	2.04	106 ± 47	9.1 ± 4.1	-78.5 ± 14.3	174.1 ± 14.5	-387 ± 299	-374 ± 302
	1	28	6.03	-9.0	50.63	353 ± 38	21.4 ± 2.3	-11.8 ± 2.4	2.8 ± 2.4	175 ± 31	58 ± 16
	2	43	4.01	-11.4	33.65	289 ± 13	17.5 ± 0.8	-2.7 ± 1.1	8.7 ± 1.2	18 ± 8	6 ± 5

Продолжение таблицы 3.5

	$3^{lps}$	14	1.03	-15.9	8.64	$47 \pm 23$	$2.9 \pm 1.4$	$-29.0 \pm 17.8$	$13.0 \pm 17.8$	$5 \pm 19$	$3 \pm 13$
	$4^{lps}$	23	0.45	-27.4	3.81	$48 \pm 6$	$2.9 \pm 0.4$	$-77.1 \pm 16.1$	$49.7 \pm 16.2$	$-12 \pm 22$	$19 \pm 22$
		5	0.32	-27.4	2.70	$122 \pm 45$	$7.4 \pm 2.7$	$-16.3 \pm 8.0$	$11.1 \pm 8.2$	$-110 \pm 192$	$-225 \pm 180$
0336-019		1	5.88	60.5	45.33	$76 \pm 190$	$3.6 \pm 8.9$	$-23.7 \pm 75.5$	$84.3 \pm 75.5$	$67 \pm 286$	$165 \pm 208$
		2	3.62	58.1	27.94	$146 \pm 120$	$6.8 \pm 5.6$	$113.3 \pm 42.2$	$55.2 \pm 42.2$	$856 \pm 416$	$-166 \pm 719$
		3	2.94	57.5	22.67	$198 \pm 20$	$9.2 \pm 1.0$	$61.5 \pm 5.2$	$4.0 \pm 5.2$	$-41 \pm 17$	$2 \pm 15$
		4	1.50	71.2	11.55	$118 \pm 12$	$5.5 \pm 0.6$	$71.4 \pm 7.0$	$0.3 \pm 7.1$	$-17 \pm 12$	$-18 \pm 12$
		5	0.95	50.2	7.33	$290 \pm 17$	$13.5 \pm 0.8$	$68.5 \pm 4.2$	$18.3 \pm 4.4$	$37 \pm 35$	$47 \pm 34$
		6	0.34	39.8	2.60	$80 \pm 32$	$3.8 \pm 1.5$	$21.0 \pm 12.0$	$18.8 \pm 12.5$	$118 \pm 59$	$123 \pm 58$
0402-362		1	2.75	27.5	23.54	$183 \pm 53$	$12.4 \pm 3.6$	$-0.5 \pm 14.7$	$28.0 \pm 14.8$	$-247 \pm 82$	$-21 \pm 96$
		2	0.79	18.7	6.75	$111 \pm 18$	$7.5 \pm 1.2$	$20.1 \pm 5.6$	$1.4 \pm 5.7$	$26 \pm 15$	$20 \pm 16$
0430+052		1	5.57	-110.6	3.31	$1458 \pm 91$	$2.9 \pm 0.2$	$-110.3 \pm 3.3$	$0.3 \pm 3.4$	$94 \pm 300$	$501 \pm 285$
		2	2.55	-116.3	1.52	$1736 \pm 39$	$3.5 \pm 0.1$	$-112.1 \pm 1.8$	$4.2 \pm 2.0$	$85 \pm 146$	$246 \pm 153$
		3	2.24	-118.5	1.34	$1869 \pm 160$	$3.7 \pm 0.3$	$-106.7 \pm 3.8$	$11.8 \pm 4.0$	$1253 \pm 709$	$1981 \pm 714$
		4	8.66	-110.5	5.16	$2198 \pm 117$	$4.4 \pm 0.2$	$-98.0 \pm 1.1$	$12.6 \pm 1.1$	$278 \pm 222$	$628 \pm 173$
		5	5.30	-120.8	3.15	$1910 \pm 47$	$3.8 \pm 0.1$	$-115.8 \pm 1.3$	$5.0 \pm 1.3$	$332 \pm 146$	$18 \pm 127$
0454-234		1	0.85	177.7	6.85	$54 \pm 19$	$2.9 \pm 1.0$	$-71.7 \pm 22.1$	$110.6 \pm 22.3$	$-17 \pm 14$	$-2 \pm 16$
0458-020		1	4.57	-52.7	38.21	$287 \pm 28$	$25.8 \pm 2.6$	$-44.4 \pm 5.7$	$8.3 \pm 5.8$	$-74 \pm 29$	$14 \pm 29$
		2	1.77	-47.9	14.82	$196 \pm 21$	$17.7 \pm 1.9$	$-60.4 \pm 5.7$	$12.5 \pm 5.9$	$13 \pm 17$	$12 \pm 18$
0528+134		1	3.66	23.8	31.06	$78 \pm 11$	$6.7 \pm 1.0$	$56.1 \pm 11.1$	$32.4 \pm 11.1$	$17 \pm 12$	$-47 \pm 14$
		2	1.42	38.6	12.06	$127 \pm 9$	$10.8 \pm 0.8$	$27.0 \pm 3.0$	$11.6 \pm 3.1$	$-10 \pm 9$	$-15 \pm 7$
	$3^{lps}$	35	0.46	50.9	3.87	$20 \pm 5$	$1.7 \pm 0.5$	$-17.9 \pm 17.1$	$68.8 \pm 17.1$	$9 \pm 6$	$-12 \pm 6$
		4	0.22	34.6	1.90	$205 \pm 80$	$17.5 \pm 6.8$	$29.1 \pm 24.7$	$5.5 \pm 25.3$	$-1378 \pm 703$	$-135 \pm 956$
0537-441		1	2.50	55.6	19.59	$191 \pm 102$	$9.2 \pm 4.9$	$149.4 \pm 26.8$	$93.8 \pm 27.3$	$28 \pm 81$	$-36 \pm 76$
		2	0.98	65.7	7.70	$693 \pm 55$	$33.5 \pm 2.7$	$-15.5 \pm 1.8$	$81.2 \pm 2.2$	$-6474 \pm 357$	$2753 \pm 363$
0552+398		1	0.65	-71.8	5.41	$6 \pm 0$	$0.6 \pm 0.1$	$131.6 \pm 8.8$	$156.6 \pm 8.8$	$0 \pm 0$	$3 \pm 0$
0642+449		1	3.41	90.8	25.79	$17 \pm 18$	$1.9 \pm 2.0$	...	...	...	...
		3	0.28	95.2	2.15	$9 \pm 2$	$1.0 \pm 0.3$	$-57.2 \pm 12.1$	$152.4 \pm 12.1$	$-3 \pm 2$	$7 \pm 2$
0727-115		1	2.21	-45.3	18.98	$67 \pm 16$	$4.9 \pm 1.2$	$19.8 \pm 14.7$	$65.1 \pm 14.8$	$19 \pm 12$	$-13 \pm 13$
		2	0.75	-87.7	6.41	$55 \pm 137$	$4.0 \pm 10.0$	...	...	...	...
	$3^{lps}$	29	0.27	-122.5	2.30	$35 \pm 10$	$2.6 \pm 0.8$	$-32.4 \pm 13.7$	$90.0 \pm 14.2$	$10 \pm 15$	$-24 \pm 10$
0804+499		1	2.59	136.5	22.13	$98 \pm 96$	$6.7 \pm 6.5$	$104.3 \pm 50.6$	$32.2 \pm 50.7$	$-41 \pm 151$	$38 \pm 151$
		2	1.12	136.6	9.54	$61 \pm 7$	$4.2 \pm 0.5$	$144.9 \pm 6.2$	$8.3 \pm 6.3$	$-14 \pm 6$	$-9 \pm 5$
	$3^{lps}$	36	0.30	52.6	2.59	$14 \pm 10$	$1.0 \pm 0.7$	$-87.3 \pm 40.1$	$139.9 \pm 40.2$	$-18 \pm 22$	$28 \pm 17$
0823+033		1	9.80	27.4	60.49	$711 \pm 259$	$21.6 \pm 7.9$	$1.2 \pm 20.4$	$26.1 \pm 20.5$	$1076 \pm 917$	$508 \pm 971$
		2	4.05	12.7	24.99	$131 \pm 67$	$4.0 \pm 2.0$	$-11.7 \pm 18.2$	$24.4 \pm 18.2$	$53 \pm 100$	$43 \pm 95$
		3	2.61	18.8	16.10	$71 \pm 11$	$2.2 \pm 0.3$	$121.3 \pm 12.0$	$102.5 \pm 12.0$	$45 \pm 9$	$4 \pm 14$
		4	1.02	31.1	6.32	$72 \pm 7$	$2.2 \pm 0.2$	$61.9 \pm 7.2$	$30.8 \pm 7.2$	$5 \pm 6$	$-23 \pm 8$
		5	0.59	33.3	3.66	$134 \pm 29$	$4.1 \pm 0.9$	$22.1 \pm 11.4$	$11.3 \pm 11.6$	$114 \pm 73$	$45 \pm 76$
		6	0.33	17.3	2.05	$75 \pm 47$	$2.3 \pm 1.5$	$-121.1 \pm 48.5$	$138.4 \pm 48.5$	$-65 \pm 441$	$437 \pm 371$
0851+202		1	3.60	-111.6	16.37	$109 \pm 53$	$2.1 \pm 1.0$	$-160.4 \pm 24.0$	$48.8 \pm 24.1$	$-216 \pm 132$	$-251 \pm 120$
		2	2.57	-106.9	11.68	$358 \pm 24$	$7.0 \pm 0.5$	$-117.9 \pm 3.2$	$11.0 \pm 3.3$	$-2 \pm 14$	$-7 \pm 15$
		3	1.21	-103.8	5.51	$228 \pm 33$	$4.4 \pm 0.7$	$-99.6 \pm 6.6$	$4.1 \pm 6.7$	$-16 \pm 74$	$-159 \pm 58$
		4	0.93	-113.9	4.21	$203 \pm 13$	$3.9 \pm 0.3$	$-119.1 \pm 2.3$	$5.2 \pm 2.4$	$56 \pm 21$	$23 \pm 10$
		5	0.67	-121.4	3.03	$256 \pm 17$	$5.0 \pm 0.3$	$-122.8 \pm 3.1$	$1.3 \pm 3.3$	$206 \pm 90$	$88 \pm 63$
0919-260		1	6.13	-57.9	51.26	$149 \pm 52$	$13.5 \pm 4.7$	$-87.2 \pm 36.4$	$29.3 \pm 36.4$	$20 \pm 36$	$-2 \pm 64$

Продолжение таблицы 3.5

	2	4	2.02	-87.7	16.90	244 ± 127	22.0 ± 11.4	72.5 ± 32.6	160.2 ± 32.9	1371 ± 714	-535 ± 1020
	3	42	1.39	-77.1	11.62	116 ± 19	10.5 ± 1.8	-52.7 ± 10.2	24.3 ± 10.3	4 ± 13	-21 ± 13
0920-397	1	7	6.46	176.4	42.93	418 ± 197	14.4 ± 6.8	150.9 ± 18.7	25.5 ± 18.8	34 ± 230	-279 ± 128
	2	16	4.09	176.4	27.18	274 ± 47	9.5 ± 1.7	157.5 ± 8.1	18.8 ± 8.2	100 ± 56	-53 ± 59
0923+392	1	20	2.52	97.5	18.08	34 ± 28	1.4 ± 1.1	-128.2 ± 41.5	134.3 ± 41.5	197 ± 89	105 ± 147
	2 <sup>lps</sup>	44	2.11	102.4	15.16	48 ± 8	1.9 ± 0.3	106.7 ± 5.0	4.2 ± 5.0	9 ± 5	-9 ± 5
	3	41	1.45	107.0	10.41	165 ± 14	6.6 ± 0.6	101.7 ± 1.8	5.3 ± 1.8	-15 ± 12	-8 ± 11
0955+476	1	6	1.10	130.1	9.41	257 ± 71	20.6 ± 5.8	114.2 ± 17.5	15.9 ± 17.9	336 ± 178	150 ± 199
	2	15	0.57	137.7	4.87	103 ± 24	8.3 ± 2.0	142.8 ± 14.4	5.1 ± 14.7	-154 ± 51	76 ± 59
	3	22	0.21	138.4	1.76	68 ± 12	5.5 ± 1.0	103.8 ± 8.1	34.5 ± 8.9	-9 ± 21	-4 ± 20
1034-293	1	4	2.64	138.7	11.99	428 ± 510	8.3 ± 9.9	-168.2 ± 18.1	53.1 ± 20.5	-722 ± 1175	-146 ± 629
	2	17	2.01	140.9	9.15	224 ± 21	4.4 ± 0.4	156.8 ± 4.7	15.9 ± 4.9	-9 ± 24	-32 ± 23
	3	13	1.31	131.2	5.95	162 ± 20	3.2 ± 0.4	140.5 ± 7.5	9.3 ± 7.8	-38 ± 21	-14 ± 23
	4 <sup>lps</sup>	16	0.52	125.9	2.36	48 ± 24	0.9 ± 0.5	88.2 ± 15.3	37.7 ± 15.6	7 ± 29	13 ± 25
1044+719	1	7	0.76	62.0	6.37	230 ± 63	13.4 ± 3.7	31.1 ± 12.5	30.9 ± 13.3	-85 ± 103	38 ± 76
	2	32	0.52	147.0	4.36	78 ± 4	4.6 ± 0.3	156.5 ± 2.3	9.5 ± 2.3	17 ± 4	-16 ± 4
1101+384	1	29	5.38	-41.1	3.20	81 ± 41	0.2 ± 0.1	153.1 ± 23.3	165.8 ± 23.3	-31 ± 48	0 ± 40
	2	20	2.84	-39.9	1.69	47 ± 39	0.1 ± 0.1	137.7 ± 47.7	177.6 ± 47.8	44 ± 66	47 ± 64
	3	40	1.45	-35.7	0.87	78 ± 12	0.2 ± 0.0	38.1 ± 10.1	73.9 ± 10.2	34 ± 13	-20 ± 16
	4	39	0.55	-15.0	0.33	30 ± 7	0.1 ± 0.0	65.7 ± 14.8	80.8 ± 14.9	-31 ± 10	-23 ± 11
1124-186	1	9	2.67	173.9	21.79	567 ± 108	31.0 ± 5.9	-152.9 ± 7.4	33.2 ± 7.7	-62 ± 254	431 ± 202
	2	33	0.87	178.8	7.08	173 ± 22	9.5 ± 1.2	119.5 ± 7.8	59.3 ± 8.3	-60 ± 27	65 ± 27
1128+385	1	33	0.84	-153.9	7.20	20 ± 6	1.6 ± 0.5	-4.7 ± 21.0	149.3 ± 21.1	1 ± 6	8 ± 6
	2	35	0.37	-165.0	3.22	16 ± 2	1.2 ± 0.2	-120.1 ± 13.2	44.9 ± 13.2	3 ± 4	-3 ± 3
1144-379	1	5	3.75	157.5	30.64	86 ± 194	4.7 ± 10.6	...	...	...	...
	2	14	1.12	138.1	9.18	235 ± 51	12.9 ± 2.8	115.6 ± 15.4	22.5 ± 16.1	98 ± 59	-85 ± 62
1145-071	1	40	2.19	-66.9	18.64	87 ± 5	5.7 ± 0.4	-20.1 ± 2.8	46.8 ± 2.9	-22 ± 4	4 ± 4
1156+295	1	7	7.21	22.4	52.60	457 ± 131	18.9 ± 5.4	-67.7 ± 13.4	90.1 ± 13.5	-77 ± 166	399 ± 125
	2	39	6.21	20.3	45.31	688 ± 44	28.4 ± 1.9	41.6 ± 3.9	21.3 ± 4.0	28 ± 29	30 ± 30
	3	34	2.25	-5.8	16.41	503 ± 57	20.7 ± 2.4	-7.2 ± 3.0	1.4 ± 3.2	-16 ± 36	2 ± 19
	5	31	0.56	11.7	4.12	57 ± 12	2.4 ± 0.5	45.6 ± 12.3	34.0 ± 12.3	-76 ± 23	49 ± 22
1228+126	1	32	21.38	-69.2	1.75	123 ± 126	0.0 ± 0.0	98.3 ± 43.5	167.4 ± 43.5	122 ± 148	120 ± 149
	2	35	11.54	-72.4	0.94	53 ± 113	0.0 ± 0.0	-84.3 ± 80.4	11.9 ± 80.4	-158 ± 142	-65 ± 240
	3	36	6.57	-76.3	0.54	88 ± 34	0.0 ± 0.0	-92.8 ± 32.0	16.5 ± 32.0	-1 ± 37	-12 ± 51
	4	36	2.97	-80.4	0.24	114 ± 33	0.0 ± 0.0	-115.7 ± 10.2	35.3 ± 10.2	70 ± 32	56 ± 29
	5	37	1.48	-77.7	0.12	41 ± 10	0.0 ± 0.0	17.8 ± 28.9	95.5 ± 28.9	22 ± 26	-40 ± 20
	6	39	0.57	-79.6	0.05	6 ± 9	0.0 ± 0.0	-40.3 ± 86.6	39.3 ± 86.6	6 ± 12	-4 ± 13
1308+326	1	40	1.74	-73.3	14.05	398 ± 10	21.0 ± 0.5	-71.7 ± 1.2	1.6 ± 1.2	52 ± 11	-24 ± 9
	2	20	1.44	-44.6	11.62	488 ± 13	25.8 ± 0.7	-53.0 ± 1.3	8.3 ± 1.3	-77 ± 27	-23 ± 33
1313-333	1	8	7.43	-81.2	62.41	730 ± 230	44.2 ± 14.0	-66.4 ± 33.5	14.8 ± 33.5	-162 ± 662	-486 ± 1266
	2	4	2.07	-117.5	17.37	504 ± 365	30.6 ± 22.1	-47.1 ± 43.8	70.4 ± 44.6	2550 ± 1770	1143 ± 2226
	3	38	2.08	-87.1	17.49	487 ± 34	29.5 ± 2.1	-89.2 ± 3.9	2.2 ± 4.2	21 ± 37	12 ± 37
1334-127	1	22	2.78	152.7	17.68	103 ± 18	3.3 ± 0.6	122.1 ± 14.2	30.6 ± 14.2	-8 ± 25	3 ± 44
	2	22	1.66	145.6	10.59	228 ± 12	7.3 ± 0.4	151.8 ± 2.2	6.2 ± 2.3	11 ± 18	-5 ± 20
	3	17	0.98	139.9	6.23	293 ± 36	9.4 ± 1.2	141.0 ± 7.3	1.1 ± 7.6	17 ± 77	45 ± 75
1357+769	1	6	2.44	-121.8	20.97	124 ± 83	9.0 ± 6.1	-165.3 ± 35.5	43.5 ± 35.9	114 ± 91	-33 ± 108
	2	11	1.39	-119.0	11.94	115 ± 38	8.4 ± 2.8	-135.1 ± 18.9	16.2 ± 19.1	-77 ± 63	-53 ± 63

Продолжение таблицы 3.5

	3	14	0.52	-133.3	4.45	115 ± 15	8.4 ± 1.1	-106.5 ± 5.5	26.8 ± 5.8	-12 ± 14	-18 ± 14
	4 <sup>lps</sup>	26	0.21	-88.2	1.81	12 ± 8	0.9 ± 0.6	-161.0 ± 65.7	72.8 ± 65.7	14 ± 72	62 ± 29
1424-418	1	19	2.64	76.9	22.66	88 ± 50	6.3 ± 3.6	...	...	...	...
1448+762	1 <sup>lps</sup>	16	1.57	77.2	12.29	24 ± 21	1.2 ± 1.1	11.4 ± 87.1	65.9 ± 87.1	-83 ± 188	-118 ± 142
	2	18	0.96	80.5	7.52	57 ± 27	2.8 ± 1.3	-108.1 ± 11.4	171.4 ± 11.4	132 ± 60	37 ± 35
	3	20	0.54	81.9	4.26	86 ± 17	4.2 ± 0.8	-100.3 ± 3.2	177.8 ± 3.3	-16 ± 34	-2 ± 8
1451-375	1	8	7.65	-149.7	34.74	532 ± 211	10.3 ± 4.1	-108.2 ± 32.0	41.5 ± 32.2	-148 ± 594	-730 ± 531
	2	20	2.04	-132.7	9.27	279 ± 59	5.4 ± 1.2	-134.6 ± 12.3	1.9 ± 12.7	58 ± 68	100 ± 60
1514-241	1	9	11.54	158.9	11.18	2977 ± 758	9.9 ± 2.5	157.0 ± 7.5	1.9 ± 7.6	10136 ± 4015	436 ± 2345
	2	8	7.58	156.1	7.35	1341 ± 175	4.5 ± 0.6	146.4 ± 5.8	9.7 ± 5.8	1824 ± 626	1212 ± 508
	3	20	9.96	155.2	9.65	1567 ± 144	5.2 ± 0.5	154.1 ± 3.4	1.2 ± 3.4	384 ± 225	163 ± 137
	4	8	5.07	156.0	4.91	1780 ± 341	5.9 ± 1.1	142.2 ± 11.1	13.8 ± 11.3	1672 ± 1491	332 ± 1549
	5	10	1.76	160.2	1.70	579 ± 171	1.9 ± 0.6	169.6 ± 7.3	9.4 ± 7.4	-834 ± 638	889 ± 625
1606+106	1	19	7.63	-37.7	64.20	14 ± 48	0.9 ± 3.0	...	...	...	...
	2	31	2.47	-38.2	20.78	79 ± 18	4.9 ± 1.2	-43.3 ± 13.2	5.1 ± 13.2	17 ± 17	12 ± 14
	3 <sup>lps</sup>	40	1.52	-54.2	12.82	14 ± 8	0.9 ± 0.5	-47.9 ± 34.2	6.3 ± 34.2	0 ± 9	1 ± 8
	4	39	0.53	-66.1	4.43	31 ± 6	1.9 ± 0.4	128.8 ± 12.2	165.1 ± 12.2	-12 ± 7	-3 ± 7
1611+343	1	43	3.59	167.7	30.68	118 ± 17	7.9 ± 1.2	-141.1 ± 8.9	51.2 ± 9.0	-47 ± 12	-18 ± 13
	2	28	4.01	148.1	34.26	140 ± 26	9.4 ± 1.8	116.0 ± 6.3	32.1 ± 6.3	90 ± 38	-18 ± 19
	3 <sup>lps</sup>	43	2.84	174.2	24.28	36 ± 5	2.5 ± 0.3	128.4 ± 7.8	45.8 ± 7.8	3 ± 3	-4 ± 3
	4	30	1.38	168.5	11.80	183 ± 18	12.3 ± 1.2	161.9 ± 3.2	6.6 ± 3.3	0 ± 21	0 ± 16
	5	28	0.72	157.5	6.18	221 ± 6	14.8 ± 0.4	167.8 ± 1.6	10.3 ± 1.7	24 ± 8	7 ± 8
	6	11	0.49	163.6	4.20	340 ± 49	22.8 ± 3.3	157.2 ± 5.1	6.5 ± 5.4	123 ± 191	19 ± 101
1622-253	1	18	2.68	-26.1	20.17	316 ± 57	13.9 ± 2.5	-96.2 ± 11.8	70.1 ± 12.0	-93 ± 64	-133 ± 61
	2	20	1.07	-16.2	8.07	220 ± 30	9.7 ± 1.3	-8.9 ± 5.1	7.3 ± 5.5	63 ± 35	-148 ± 26
1638+398	1	10	0.55	-170.9	4.73	52 ± 18	3.9 ± 1.4	-96.0 ± 9.2	74.9 ± 10.0	34 ± 11	15 ± 9
	2 <sup>lps</sup>	15	0.40	-162.5	3.41	37 ± 8	2.8 ± 0.6	-126.7 ± 13.9	35.8 ± 14.0	7 ± 10	5 ± 11
	3	14	0.16	-104.0	1.37	72 ± 13	5.4 ± 1.0	171.0 ± 5.3	85.0 ± 6.3	176 ± 33	14 ± 22
1642+690	1	25	9.63	-165.9	71.03	60 ± 22	2.6 ± 0.9	-179.1 ± 8.4	13.2 ± 8.4	76 ± 38	25 ± 26
	2	13	4.84	-164.3	35.72	571 ± 63	24.1 ± 2.7	-163.5 ± 3.1	0.9 ± 3.1	-123 ± 183	-36 ± 141
	3	25	3.82	-161.6	28.20	342 ± 25	14.4 ± 1.1	-158.7 ± 3.0	2.8 ± 3.0	76 ± 49	-28 ± 33
	4	21	2.81	-170.1	20.73	358 ± 20	15.1 ± 0.9	-164.4 ± 2.4	5.7 ± 2.5	-8 ± 36	-29 ± 27
	5	22	1.68	-173.2	12.37	226 ± 28	9.6 ± 1.2	-165.3 ± 4.9	8.0 ± 4.9	197 ± 47	40 ± 40
	6	25	1.20	-179.1	8.84	174 ± 11	7.3 ± 0.5	-159.6 ± 1.9	19.4 ± 1.9	25 ± 18	30 ± 16
	7	25	0.43	175.2	3.15	56 ± 18	2.4 ± 0.8	-170.2 ± 7.3	14.6 ± 7.3	8 ± 32	19 ± 20
1657-261	1	11	0.80	28.5	...	236 ± 85	...	-8.7 ± 6.6	37.2 ± 7.5	125 ± 127	231 ± 110
1726+455	1	19	1.81	-87.8	13.07	204 ± 30	8.2 ± 1.2	-94.4 ± 5.6	6.6 ± 5.7	65 ± 24	-2 ± 17
	2	15	0.92	-103.3	6.63	322 ± 37	13.0 ± 1.5	-99.0 ± 3.1	4.3 ± 3.4	96 ± 37	22 ± 19
1739+522	1	9	1.15	16.5	9.84	104 ± 61	6.9 ± 4.1	-36.8 ± 28.9	53.3 ± 28.9	-201 ± 202	-334 ± 169
	2	26	0.37	32.2	3.13	73 ± 10	4.9 ± 0.7	50.3 ± 9.0	18.1 ± 9.4	3 ± 15	-52 ± 13
1741-038	1	6	1.83	-174.1	15.01	143 ± 172	7.9 ± 9.5	93.1 ± 28.7	92.7 ± 29.9	70 ± 235	-143 ± 182
	2	10	0.97	-149.0	7.91	76 ± 61	4.2 ± 3.4	-26.0 ± 28.1	123.1 ± 28.1	-26 ± 95	-62 ± 97
	3 <sup>lps</sup>	34	0.43	-178.4	3.53	33 ± 6	1.9 ± 0.4	164.6 ± 7.1	17.0 ± 7.2	-4 ± 4	3 ± 4
1745+624	1	15	2.57	-141.2	18.48	76 ± 29	8.8 ± 3.3	-140.9 ± 18.9	0.3 ± 18.9	-10 ± 29	-2 ± 35
	2	28	1.46	-145.1	10.53	60 ± 12	6.9 ± 1.4	-131.8 ± 11.7	13.2 ± 11.8	52 ± 15	-14 ± 18
	3	6	1.10	-144.9	7.94	134 ± 52	15.4 ± 6.0	-142.3 ± 23.6	2.5 ± 23.7	-59 ± 284	275 ± 253

Продолжение таблицы 3.5

	4	6	0.54	-146.7	3.91	62 ± 55	7.2 ± 6.4	-149.9 ± 43.2	3.2 ± 43.4	-108 ± 128	49 ± 127
	5	40	0.24	-135.8	1.71	11 ± 2	1.3 ± 0.3	-134.9 ± 11.6	0.9 ± 11.7	12 ± 2	3 ± 3
1749+096	1	9	3.92	28.3	18.19	812 ± 133	16.3 ± 2.7	43.3 ± 9.3	15.0 ± 9.5	110 ± 265	255 ± 232
	2	13	2.45	25.2	11.37	706 ± 83	14.1 ± 1.7	22.5 ± 5.0	2.6 ± 5.3	60 ± 111	-36 ± 91
	3	11	1.08	37.8	5.02	547 ± 49	10.9 ± 1.0	47.2 ± 5.4	9.4 ± 5.7	566 ± 158	-148 ± 140
	4	22	1.94	40.1	9.01	445 ± 37	8.9 ± 0.8	35.8 ± 5.4	4.3 ± 5.7	-141 ± 50	-64 ± 46
	5	21	0.86	7.3	3.99	188 ± 24	3.8 ± 0.5	8.6 ± 5.2	1.3 ± 5.3	21 ± 32	81 ± 23
1803+784	1	41	7.15	-96.0	50.68	19 ± 37	0.7 ± 1.5	-54.4 ± 87.1	41.6 ± 87.1	-64 ± 90	57 ± 99
	2	41	3.45	-91.8	24.44	73 ± 36	2.9 ± 1.4	-125.2 ± 20.8	33.4 ± 20.8	-7 ± 33	59 ± 15
	3	31	1.83	-93.4	12.96	39 ± 9	1.5 ± 0.4	49.3 ± 13.3	142.8 ± 13.3	17 ± 6	-7 ± 7
	4	43	1.44	-92.8	10.21	33 ± 5	1.3 ± 0.2	23.6 ± 9.1	116.4 ± 9.1	4 ± 3	6 ± 3
	5	31	1.03	-81.1	7.27	59 ± 6	2.3 ± 0.3	9.3 ± 12.2	90.4 ± 12.2	-17 ± 17	55 ± 17
	6 <sup>lps</sup>	41	0.47	-82.0	3.35	22 ± 6	0.9 ± 0.2	-77.6 ± 8.9	4.4 ± 8.9	-1 ± 6	-2 ± 4
1908-201	1	11	5.26	54.2	43.60	388 ± 119	22.3 ± 6.8	29.4 ± 11.7	24.8 ± 12.0	-130 ± 141	-155 ± 125
	2	38	2.84	39.1	23.53	200 ± 18	11.5 ± 1.1	55.1 ± 5.1	16.0 ± 5.1	-45 ± 21	-20 ± 19
	3	7	1.12	31.4	9.27	293 ± 208	16.8 ± 11.9	66.5 ± 19.1	35.1 ± 20.7	864 ± 789	315 ± 433
	4	19	0.82	-3.8	6.80	187 ± 26	10.7 ± 1.5	3.0 ± 3.3	6.8 ± 3.4	-23 ± 48	1 ± 19
1921-293	1	39	6.20	25.7	30.55	191 ± 27	4.2 ± 0.6	2.8 ± 10.1	23.0 ± 10.2	0 ± 21	0 ± 21
	2	10	2.99	21.3	14.73	142 ± 73	3.1 ± 1.6	17.1 ± 25.0	4.2 ± 25.2	83 ± 62	-5 ± 63
	3	11	1.27	13.2	6.28	268 ± 108	5.8 ± 2.3	-1.3 ± 21.7	14.6 ± 22.2	-27 ± 299	70 ± 288
1954-388	1	14	2.42	-117.5	16.62	258 ± 81	9.4 ± 3.0	-51.6 ± 21.0	65.9 ± 21.5	-177 ± 113	-49 ± 113
	2	16	0.83	-81.6	5.71	137 ± 31	5.0 ± 1.2	-121.2 ± 14.2	39.6 ± 15.0	-19 ± 39	-29 ± 37
2145+067	1 <sup>lps</sup>	28	5.39	131.7	43.52	1 ± 34	0.1 ± 1.8	...	...	...	...
	2	13	2.51	130.5	20.24	65 ± 32	3.5 ± 1.7	-73.3 ± 36.6	156.2 ± 36.7	-13 ± 30	-33 ± 28
	3	24	1.15	124.5	9.25	126 ± 20	6.7 ± 1.1	122.8 ± 8.2	1.8 ± 8.4	-13 ± 14	20 ± 15
	4	35	0.81	128.8	6.55	86 ± 5	4.6 ± 0.3	130.5 ± 3.7	1.7 ± 3.7	-12 ± 6	-4 ± 6
	5 <sup>lps</sup>	18	0.53	123.0	4.30	28 ± 15	1.5 ± 0.8	84.5 ± 23.9	38.5 ± 24.0	37 ± 43	77 ± 31
2200+420	1	6	7.74	168.1	10.26	1075 ± 82	5.0 ± 0.4	146.3 ± 3.2	21.8 ± 3.2	287 ± 143	268 ± 136
	2	21	7.48	166.2	9.92	593 ± 87	2.7 ± 0.4	149.8 ± 7.1	16.4 ± 7.2	-75 ± 149	50 ± 162
	3	13	3.93	-179.6	5.21	667 ± 129	3.1 ± 0.6	174.8 ± 5.0	5.6 ± 5.0	-53 ± 402	-699 ± 188
	4	10	3.06	-178.6	4.05	916 ± 26	4.2 ± 0.1	157.1 ± 1.6	24.3 ± 1.7	354 ± 42	-180 ± 43
	5	34	4.00	177.5	5.30	861 ± 28	4.0 ± 0.1	166.0 ± 2.5	11.5 ± 2.7	81 ± 30	-6 ± 38
	6	37	2.80	-168.9	3.72	566 ± 20	2.6 ± 0.1	-176.4 ± 1.3	7.6 ± 1.4	31 ± 21	-80 ± 17
	7	12	2.10	-159.5	2.79	596 ± 36	2.8 ± 0.2	-167.2 ± 1.7	7.7 ± 1.8	140 ± 85	-299 ± 76
	8	27	2.20	-165.1	2.92	640 ± 26	3.0 ± 0.1	-173.0 ± 1.4	8.0 ± 1.5	235 ± 41	12 ± 25
	9	17	1.96	-161.3	2.60	662 ± 47	3.1 ± 0.2	-164.2 ± 2.2	2.9 ± 2.3	-153 ± 97	-111 ± 102
	10	13	1.27	-162.1	1.69	208 ± 44	1.0 ± 0.2	-166.2 ± 6.6	4.1 ± 6.7	-417 ± 131	99 ± 85
	11	41	0.34	-163.6	0.45	23 ± 5	0.1 ± 0.0	7.3 ± 8.6	170.9 ± 8.7	-13 ± 4	6 ± 3
2223-052	1	14	5.76	97.7	49.20	282 ± 55	18.9 ± 3.7	90.6 ± 3.9	7.1 ± 3.9	-95 ± 47	-17 ± 21
	2	22	3.15	102.7	26.91	105 ± 28	7.1 ± 1.9	81.6 ± 11.7	21.1 ± 11.7	-8 ± 22	15 ± 19
	3	9	1.30	105.1	11.10	51 ± 32	3.4 ± 2.2	112.5 ± 61.8	7.4 ± 62.0	45 ± 85	-65 ± 65
	4	22	0.47	73.8	4.05	92 ± 13	6.2 ± 0.9	90.0 ± 9.1	16.2 ± 9.4	49 ± 17	38 ± 18
2234+282	1 <sup>lps</sup>	11	0.84	-122.0	6.32	20 ± 25	0.9 ± 1.1	-140.2 ± 77.5	18.2 ± 77.5	-28 ± 89	63 ± 44
	2	9	0.50	-133.2	3.78	44 ± 19	2.0 ± 0.9	-89.9 ± 14.2	43.3 ± 14.3	38 ± 22	22 ± 21
	3	26	0.51	-136.4	3.87	71 ± 4	3.2 ± 0.2	-135.3 ± 3.9	1.1 ± 4.0	14 ± 8	17 ± 8

### 3.4.2 Разброс скоростей компонентов в источнике

На рисунке 3.5 представлена гистограмма распределения видимых линейных скоростей  $\beta_{\text{app}}$  из таблицы 3.5 с подгонкой, учитывающей ускорение, для всех компонентов ( $N = 224$ ) 65 источников для которых известно космологическое красное смещение, то есть для всех источников кроме 1657–261. Средняя видимая скорость компонента на рисунке 3.5 составляет величину  $7.2c$ , а медианное значение  $4.5c$ .

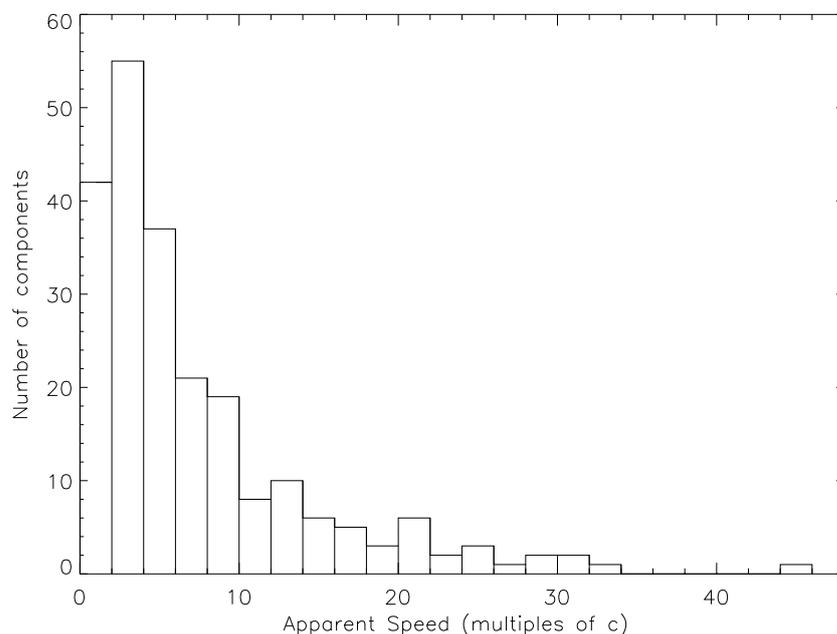


Рисунок 3.5 — Распределение видимых скоростей 224 компонентов релятивистских струй источников с измеренным космологическим красным смещением. По горизонтальной оси — видимая скорость компонента в скоростях света, по вертикальной — количество компонентов.

Результаты приведённых измерений в целом подтверждают общую тенденцию, наблюдаемую в других исследованиях распределений видимых скоростей. Хотя подавляющее большинство компонентов двигаются от ядра, существует также небольшое, но не пренебрежимо малое количество компонентов, которые показывают движение внутрь, в сторону ядра, а также почти неподвижных компонентов [39; 140; 147]. В обзоре RDV 185 из 218 компонентов в таблице 3.5 с измеренным значением  $|\text{PA} - \varphi|$  показывают движение наружу ( $|\text{PA} - \varphi| \leq 90^\circ$ ), в то время как только 33 показывают движение внутрь ( $|\text{PA} - \varphi| > 90^\circ$ ), и большинство из этих 33 измерений не являются статистически значимыми. Только 10 компонентов показывают движение в сторону ядра со значимостью  $> 3\sigma$  и, как и

ожидается, все они имеют отрицательное измеренное значение радиальной видимой скорости в таблице 3.4. В работе [140] подробно обсуждаются пять различных геометрических эффектов, которые могут привести к «иллюзии» видимого движения внутрь; ни один из них не представляет собой реальное движение вещества релятивистской струи в сторону ядра, и вполне вероятно, что некоторая комбинация этих пяти эффектов действует на это небольшое подмножество компонентов.

Также подтверждается существование подмножества медленно движущихся или почти неподвижных (*англ.* Low Pattern Speed или LPS) компонентов с тем же количеством и расстояниями от ядра, как было обнаружено в обзоре MOJAVE [140]. В таблице 3.5 всего 43 компонента с собственным движением менее 50 мксек дуги/год. Из этих 43 компонентов, 21 также соответствуют двум другим критериям для компонента LPS, используемого в работе [140]: нет значимого ускорения и скорость значительно ниже, чем у других компонентов в той же струе. Количественно эти два критерия определяются следующим образом: значения  $\dot{\eta}_{\parallel}$  и  $\dot{\eta}_{\perp}$  должно быть меньше  $2\sigma$ , а значение  $\beta_{\text{app}}$  меньше, чем средневзвешенное значение  $\beta_{\text{app}}$  для других компонентов в струе, по крайней мере, на  $2\sigma$ . 21 компонент в 19 источниках, которые соответствуют всем трём из этих критериев, отмечены как компоненты LPS в таблице 3.5.

Этим критериям стационарности соответствует примерно 9% компонентов релятивистских струй обзора, причём эти компоненты находятся ближе к ядру. Более половины (12 из 21) LPS компонентов сгруппированы на расстояниях  $\sim 4$  пк в проекции от ядра (а остальные 9 разбросаны до расстояний  $\sim 40$  пк), в то время как медианное значения проекции расстояний от ядра для не-LPS компонентов составляет 9 пк. В 8 из 19 источников с LPS компонентами, этот компонент является ближайшим к ядру. Для сравнения, в работе [140] найдено, что около 6% компонентов являются стационарными (31 из 526 компонентов), а типичные расстояния до ядра для них составляют величину менее 6 пк в проекции. Такие визуально стационарные детали могут быть вызваны проекционными эффектами, если струя направлена практически вдоль луча зрения. Либо они могут быть истинно стационарными деталями, такими как стоячие реколлимационные ударные волны, которые ожидаются из моделирования струи (например, [148]), и которые должны находиться на схожих расстояниях от ядра. В обзоре RDV около 1/6 источников (12 из 66) имеют стационарную деталь, которую можно интерпретировать как реколлимационную ударную волну в пределах  $\sim 4$  пк в проекции от ядра (несколько десятков парсек при ожидаемых малых углах к лучу зрения). Из

21 LPS-компонента 20 находятся в квазарах, 1 — в галактике, и ни один не обнаружен в объектах типа BL Lac, основываясь на оптических отождествлениях в таблице 3.2. Стоит отметить, что в выборке RDV только 7 объектов типа BL Lac.

Если плазма в релятивистских струях в среднем ускоряется или замедляется, то можно ожидать, что будет наблюдаться изменение видимых скоростей от компонента к компоненту в источнике, таким образом, что компоненты, удалённые от ядра, будут либо систематически быстрее, либо систематически медленнее, чем компоненты более близкие к ядру. Для каждого из 56 источников в таблице 3.5, которые имеют по крайней мере два нестационарных компонента со значимостью измерений видимой скорости  $\geq 1\sigma$  была выполнена линейная подгонка  $\ln \beta_{\text{app}}$  от  $\ln \langle r \rangle$ , используя измеренные значения из таблицы 3.5 (исключая все видимые скорости со значимостью  $< 1\sigma$  и все стационарные компоненты). Постоянное положительное видимое ускорение вдоль струи в источнике дало бы значение наклона прямой равное 0.5 для такой зависимости. На рисунке 3.6 показан пример одной из таких подгонок для источника 1514–241 с наклоном равным 0.5, что близко к среднему наклону для всей выборки, а на рисунке 3.7 показана гистограмма всех 56 наклонов. Из 56 отдельных подгонок, 43 дают положительный наклон, а 13 — отрицательны. При этом среднее значение наклона составляет величину 0.55 (близко к значению 0.5, ожидаемому для постоянного ускорения в источнике), а медианное значение 0.34. Биномиальная вероятность измерения 43 положительных наклонов, если они были случайным образом распределены между положительными и отрицательными значениями, составляет величину  $P = 4 \times 10^{-5}$ . Если учитывать только наклоны, имеющие значимость не менее  $2\sigma$ , чтобы быть уверенным в знаке, то найдётся 22 положительных наклона и 7 отрицательных с биномиальной вероятностью  $P = 4 \times 10^{-3}$ . Таким образом, можно сделать вывод, что в среднем по выборке компоненты, находящиеся дальше от ядра, имеют более высокие видимые скорости, чем компоненты, расположенные ближе к ядру в данном источнике, с высокой статистической значимостью. Если более далёкие компоненты движутся быстрее, чем более близкие, то отдельные компоненты должны в среднем испытывать положительные видимые ускорения вдоль направления движения.

Результаты данного исследования также подтверждают важный результат, полученный в ряде предыдущих работ (например, [140; 141; 149]): разброс видимых скоростей от компонента к компоненту в отдельно взятом источнике значительно меньше, чем разброс видимых скоростей от источника к источнику.

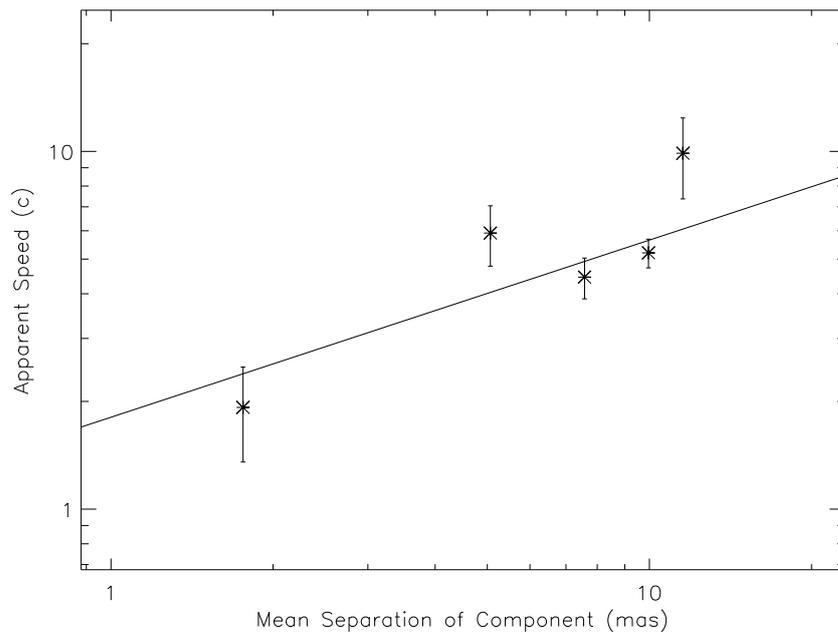


Рисунок 3.6 — Пример линейной подгонки  $\ln \beta_{\text{app}}$  от  $\ln \langle r \rangle$  для одного из источников выборки, где  $\langle r \rangle$  — средневзвешенное расстояние компонента от ядра в мсек дуги, а  $\beta_{\text{app}}$  — его видимая скорость в скоростях света. Этот пример для источника 1514–241 даёт величину наклона прямой 0.5, что близко к среднему наклону для всех подгонок.

ку в выборке. Для количественной оценки этого эффекта вычислялась величина стандартного отклонения распределения видимых скоростей для каждого многокомпонентного источника. Медиана этих стандартных отклонений составляет величину  $3.1c$ , это типичный разброс измеренных видимых скоростей одного источника. Также вычислялась средняя видимая скорость компонентов для каждого источника в выборке. Стандартное отклонение средних скоростей составляет величину  $7.6c$ , это типичный разброс видимых скоростей от источника к источнику в выборке. Эти результаты показывают, что существует характерная физическая скорость, связанная с каждым источником в выборке, которая, вероятно, является скоростью релятивистского истечения. Скорости отдельных компонентов имеют относительно небольшой разброс вокруг характерной скорости данного источника. Если поток плазмы ускоряется, то в действительности может существовать физический диапазон Лоренц-факторов внутри источника, который, тем не менее, меньше разброса Лоренц-факторов от источника к источнику. Компоненты также могут перемещаться в диапазоне видимых Лоренц-факторов от нуля, для стоячих ударных волн, до максимального Лоренц-фактора, связанного с физической скоростью истечения плазмы. Этот результат означает, что РСДБ кинематику можно использовать, в том числе, для оценки Допплер-фактора. Поскольку интерес

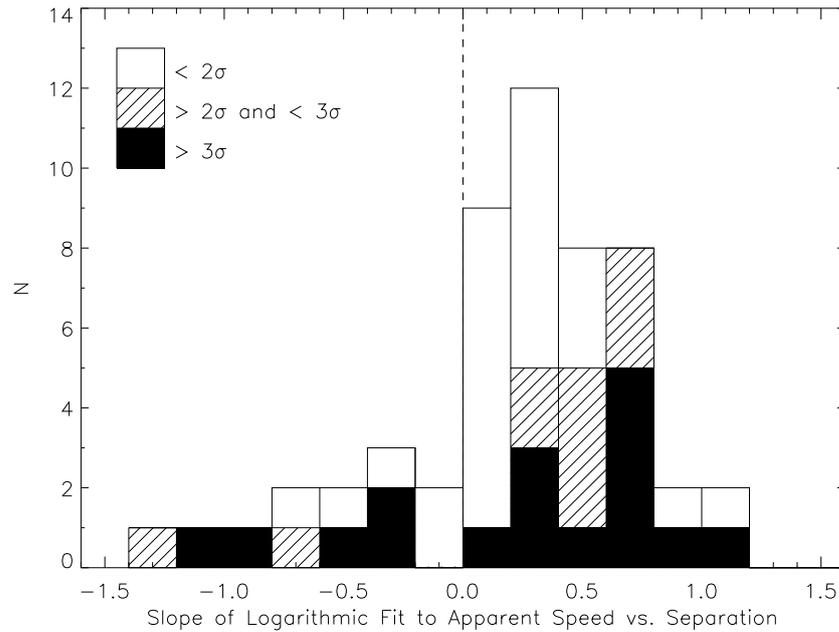


Рисунок 3.7 — Гистограмма наклонов линейных подгонок  $\ln \beta_{\text{app}}$  от  $\ln \langle r \rangle$  для отдельных источников, где  $\langle r \rangle$  — средневзвешенное расстояние компонента, а  $\beta_{\text{app}}$  — его видимая скорость в скоростях света. Постоянное положительное ускорение компонента вдоль струи даёт наклон 0.5. Заштрихованные и закрашенные столбцы указывает на значимость наклонов на уровнях  $2\sigma$ – $3\sigma$  и  $3\sigma$ , соответственно. Здесь 3 из 56 источников находятся вне окна гистограммы.

представляет пиковое значение Лоренц-фактора, которое достигается в каждой релятивистской струе за 10-летний период мониторинга, в качестве измеренной видимой скорости, связанной с данным источником, ниже будет использоваться самое высокое измеренное значение скорости компонентов.

### 3.4.3 Распределение максимальных скоростей компонентов и оценка Лоренц и Допплер-факторов

На рисунке 3.8 представлена гистограмма распределения видимых скоростей самых быстрых деталей в каждом источнике с измеренным красным смещением ( $N = 65$ ). Это распределение имеет пик на значении видимой скорости около  $5c$  и длинный хвост, простирающийся до максимального значения  $44c$  (для компонента ‘1’ в источнике 1313–333), средняя видимая скорость  $11.5c$ , а медианное значение  $8.3c$ . Форма этого распределения аналогична соответствующему распределению, полученному в обзоре MOJAVE на 15 ГГц [72; 140].

Исследования кинематики релятивистских струй на более высоких частотах, такие как Бостонский мониторинг блазаров на 43 ГГц, показывают аналогичные видимые скорости деталей  $\approx 10c$  [38].

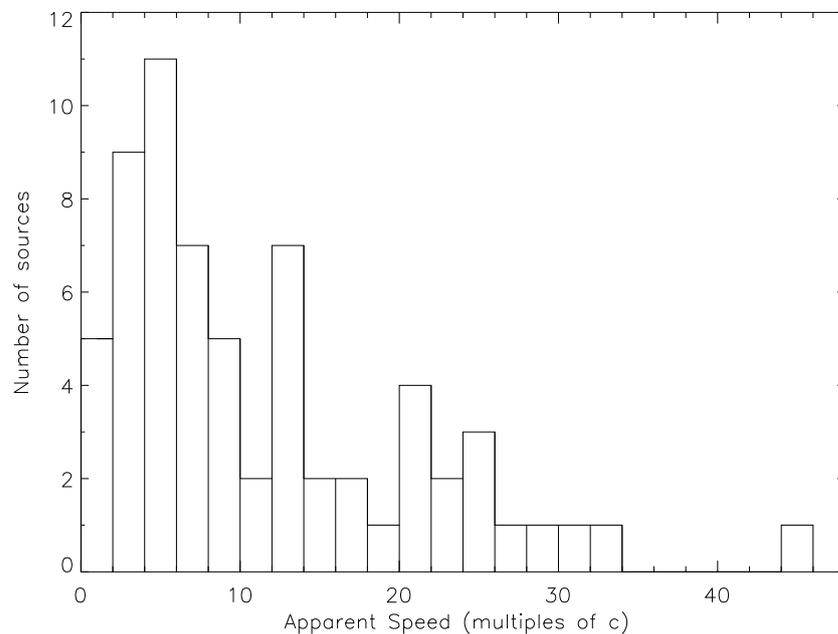


Рисунок 3.8 — Распределение максимальных значений видимой скорости компонентов в 65 источниках в обзоре RDV. По горизонтальной оси — видимая скорость компонента в скоростях света, по вертикальной — количество источников.

Поскольку Лоренц-фактор релятивистской плазмы  $\Gamma \geq (\beta_{\text{app}}^2 + 1)^{1/2}$ , наблюдаемая пиковая видимая скорость на рисунке 3.8, равная примерно  $44c$ , указывает, что Лоренц-факторы в релятивистских струях данной выборки источников достигают значений по меньшей мере  $\Gamma \approx 44$ . Это максимальное значение также хорошо согласуется с максимальными видимыми скоростями, найденными в работах [72; 140] на уровне  $50c$ . Падение количества источников с высокими видимыми скоростями, наблюдаемое на рисунке 3.8 и в других обзорах, исключает возможность единого значения Лоренц-фактора для всех источников выборки, поскольку тогда бы распределение видимых скоростей имело максимум на  $\beta_{\text{app}} \approx \Gamma$  и резко падало бы при малых  $\beta_{\text{app}}$  [140; 150]. Монте-Карло моделирование выборки релятивистских струй блазаров показывает, что Лоренц-факторы имеют степенное распределение с показателем около  $-1.4$  [39]. По результатам этого моделирования также можно оценить вид распределения значений Допплер-факторов, которое имеет пик при  $\delta \simeq 10$  и быстро спадает после  $\delta \simeq 30$ . Эти ограничения на значение Допплер-фактора важны для оценки яркостной температуры активных ядер в системе отсчёта излучающей плазмы (см. главу 2).

### 3.5 Выводы

В данной главе представлены результаты изучения кинематики релятивистских струй на парсековых масштабах в выборке 68 АЯГ, при помощи глобальных РСДБ наблюдений на частоте 8 ГГц. В это исследование были включены все источники, которые наблюдались в 20 или более эпохах в течение серии из 50 РСДБ экспериментов с 1994 по 2003 год. Каждый источник наблюдался в среднем 43 раза. Для моделирования структуры источников подгонялись гауссовы модели к функции видности, связанной с каждым изображением, что дало в общей сложности 225 компонентов струи в 66 источниках, которые можно проследить от эпохи к эпохе. Полиномы второго порядка подгонялись к координатам  $x(t)$  и  $y(t)$  каждого компонента, чтобы измерить его скорость и ускорение. Результаты наблюдений, связанные с измеренными видимой скоростью, можно суммировать следующим образом:

1. При наличии в релятивистской струе несколько движущихся компонентов, компоненты, находящиеся дальше от ядра, имеют в среднем большую видимую скорость, чем компоненты, расположенные ближе к ядру, с высокой статистической значимостью.
2. Вариация видимых скоростей разных компонентов в каждом отдельном источнике значительно меньше, чем разброс видимых скоростей от источника к источнику в выборке, что свидетельствует о наличии характерной скорости, связанной с каждым источником.
3. Распределение видимых скоростей самых быстрых деталей в каждом источнике показывает максимум  $44c$  и медианное значение  $8.3c$ . Такие максимальные видимые скорости указывают на типичные значения Допплер-фактора  $\delta \simeq 10$ , максимальные до  $\delta \simeq 30$ .
4. Стационарные или медленно движущиеся компоненты найдены в 19 источниках. Эти компоненты сгруппированы в области  $\sim 4$  пк (в проекции) от ядра, и могут представлять собой стационарные реколламинационные ударные волны.

## Заключение

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

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

Автор выражает благодарность научному руководителю Юрию Юрьевичу Ковалеву за возможность проведения научной работы, терпение и индивидуальный подход, ценные указания и наставления; сотрудникам отдела космической радиоастрономии АКЦ ФИАН за полезные научные обсуждения; семье за терпение и моральную поддержку, без которой данная работа не была бы закончена.

## Список литературы

1. *Rees M. J.* Black Hole Models for Active Galactic Nuclei // *ARA&A*. — 1984. — Vol. 22. — P. 471–506.
2. *Ivezić Ž., Menou K., Knapp G. R., [et al.]*. Optical and Radio Properties of Extragalactic Sources Observed by the FIRST Survey and the Sloan Digital Sky Survey // *AJ*. — 2002. — Vol. 124, no. 5. — P. 2364–2400.
3. *Kellermann K. I., Condon J. J., Kimball A. E., [et al.]*. Radio-loud and Radio-quiet QSOs // *ApJ*. — 2016. — Vol. 831, no. 2. — P. 168.
4. *Curtis H. D.* Descriptions of 762 Nebulae and Clusters Photographed with the Crossley Reflector // *Publications of Lick Observatory*. — 1918. — Vol. 13. — P. 9–42.
5. *McKinney J. C.* General relativistic magnetohydrodynamic simulations of the jet formation and large-scale propagation from black hole accretion systems // *MNRAS*. — 2006. — Vol. 368, issue 4. — P. 1561–1582.
6. *Tchekhovskoy A., Narayan R., McKinney J. C.* Efficient generation of jets from magnetically arrested accretion on a rapidly spinning black hole // *MNRAS*. — 2011. — Vol. 418, no. 1. — P. L79–L83.
7. *Marscher A. P., Gear W. K.* Models for high-frequency radio outbursts in extragalactic sources, with application to the early 1983 millimeter-to-infrared flare of 3C 273. // *ApJ*. — 1985. — Vol. 298. — P. 114–127.
8. *Sikora M., Begelman M. C., Rees M. J.* Comptonization of Diffuse Ambient Radiation by a Relativistic Jet: The Source of Gamma Rays from Blazars? // *ApJ*. — 1994. — Vol. 421. — P. 153.
9. *Spada M., Ghisellini G., Lazzati D., [et al.]*. Internal shocks in the jets of radio-loud quasars // *MNRAS*. — 2001. — Vol. 325, no. 4. — P. 1559–1570.
10. *Stawarz Ł., Ostrowski M.* Radiation from the Relativistic Jet: A Role of the Shear Boundary Layer // *ApJ*. — 2002. — Vol. 578, no. 2. — P. 763–774.
11. *Giannios D.* Reconnection-driven plasmoids in blazars: fast flares on a slow envelope // *MNRAS*. — 2013. — Vol. 431, no. 1. — P. 355–363.

12. *Blandford R. D., Znajek R. L.* Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes. // MNRAS. — 1977. — Vol. 179. — P. 433–456.
13. *Blandford R. D., Payne D. G.* Hydromagnetic flows from accretion disks and the production of radio jets. // MNRAS. — 1982. — Vol. 199. — P. 883–903.
14. *Komissarov S. S., Barkov M. V., Vlahakis N., [et al.]*. Magnetic acceleration of relativistic active galactic nucleus jets // MNRAS. — 2007. — Vol. 380, no. 1. — P. 51–70.
15. *Матвеевко Л. И., Кардашев Н. С., Шоломицкий Г. Б.* О радиоинтерферометре с большой базой // Известия ВУЗов. Радиофизика. — 1965. — Т. 8, № 4. — С. 651–654.
16. *Readhead A. C. S., Cohen M. H., Blandford R. D.* A jet in the nucleus of NGC6251 // Nature. — 1978. — Vol. 272, no. 5649. — P. 131–134.
17. *Pearson T. J., Readhead A. C. S.* The milli-arcsecond structure of a complete sample of radio sources. I. VLBI maps of seven sources. // ApJ. — 1981. — Vol. 248. — P. 61–81.
18. *Cohen M. H., Pearson T. J., Readhead A. C. S., [et al.]*. Superluminal variations in 3C 120, 3C 273, and 3C 345. // ApJ. — 1979. — Vol. 231. — P. 293–298.
19. *Pearson T. J., Unwin S. C., Cohen M. H., [et al.]*. Superluminal expansion of quasar 3C273 // Nature. — 1981. — Vol. 290, no. 5805. — P. 365–368.
20. *Hirabayashi H., Hirose H., Kobayashi H., [et al.]*. Overview and Initial Results of the Very Long Baseline Interferometry Space Observatory Programme // Science. — 1998. — Vol. 281. — P. 1825.
21. *Horiuchi S., Fomalont E. B., Taylor W. K., [et al.]*. The VSOP 5 GHz Active Galactic Nucleus Survey. IV. The Angular Size/Brightness Temperature Distribution // ApJ. — 2004. — Vol. 616, no. 1. — P. 110–122.
22. *Dodson R., Fomalont E. B., Wiik K., [et al.]*. The VSOP 5 GHz Active Galactic Nucleus Survey. V. Imaging Results for the Remaining 140 Sources // Astrophysical Journal Supplement Series. — 2008. — Vol. 175, no. 2. — P. 314–355.
23. *Кардашев Н. С., Хартов В. В., Абрамов В. В. [и др.]*. «Радиоастрон» — телескоп размером 300000 км: основные параметры и первые результаты наблюдений // Астрон. журн. — 2013. — Т. 90, № 3. — С. 179–222.

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

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

48. *Fey A. L., Gordon D., Jacobs C. S., [et al.]*. The Second Realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry // *AJ*. — 2015. — Vol. 150, no. 2. — P. 58.
49. *Charlot P., Jacobs C. S., Gordon D., [et al.]*. The third realization of the International Celestial Reference Frame by very long baseline interferometry // *A&A*. — 2020. — Vol. 644. — A159.
50. *Xu M. H., Savolainen T., Zubko N., [et al.]*. Imaging VGOS Observations and Investigating Source Structure Effects // *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*. — 2021. — Vol. 126, no. 4. — e21238.
51. *Gaia Collaboration, Mignard F., Klioner S. A., [et al.]*. Gaia Data Release 2. The celestial reference frame (Gaia-CRF2) // *A&A*. — 2018. — Vol. 616. — A14.
52. *Zakhvatkin M. V., Andrianov A. S., Avdeev V. Y., [et al.]*. RadioAstron orbit determination and evaluation of its results using correlation of Space-VLBI observations // *Advances in Space Research*. — 2020. — Vol. 65, issue 2. — P. 798–812.
53. *Deller A. T., Brisken W. F., Phillips C. J., [et al.]*. DiFX-2: A More Flexible, Efficient, Robust, and Powerful Software Correlator // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. — 2011. — Vol. 123, no. 901. — P. 275.
54. *Bruni G., Anderson J., Alef W., [et al.]*. The RadioAstron Dedicated DiFX Distribution // *Galaxies*. — 2016. — Vol. 4, no. 4. — P. 55.
55. *Likhachev S. F., Kostenko V. I., Girin I. A., [et al.]*. Software Correlator for Radioastron Mission // *Journal of Astronomical Instrumentation*. — 2017. — Vol. 6, no. 3. — P. 1750004–131.
56. *Kovalev Y. Y., Lobanov A. P., Pushkarev A. B., [et al.]*. Opacity in compact extragalactic radio sources and its effect on astrophysical and astrometric studies // *A&A*. — 2008. — Vol. 483. — P. 759–768.
57. *Hovatta T., Lister M. L., Aller M. F., [et al.]*. MOJAVE: Monitoring of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. VIII. Faraday Rotation in Parsec-scale AGN Jets // *AJ*. — 2012. — Vol. 144. — P. 105.
58. *Kravchenko E. V., Kovalev Y. Y., Hovatta T., [et al.]*. Multiwavelength observations of the  $\gamma$ -ray flaring quasar S4 1030+61 in 2009-2014 // *MNRAS*. — 2016. — Vol. 462. — P. 2747–2761.

59. *Kravchenko E. V., Kovalev Y. Y., Sokolovsky K. V.* Parsec-scale Faraday rotation and polarization of 20 active galactic nuclei jets // MNRAS. — 2017. — Vol. 467. — P. 83–101.
60. *Petrov L., Gordon D., Gipson J., [et al.]*. Precise geodesy with the Very Long Baseline Array // Journal of Geodesy. — 2009. — Vol. 83, no. 9. — P. 859–876.
61. *Petrov L., Kovalev Y. Y.* On significance of VLBI/Gaia position offsets // MNRAS. — 2017. — Vol. 467. — P. L71–L75.
62. *Kovalev Y. Y., Petrov L., Plavin A. V.* VLBI-Gaia offsets favor parsec-scale jet direction in active galactic nuclei // A&A. — 2017. — Vol. 598. — P. L1.
63. *Petrov L., Kovalev Y. Y.* Observational consequences of optical band milliarcsec-scale structure in active galactic nuclei discovered by Gaia // MNRAS. — 2017. — Vol. 471. — P. 3775–3787.
64. *Plavin A. V., Kovalev Y. Y., Petrov L. Y.* Dissecting the AGN Disk-Jet System with Joint VLBI-Gaia Analysis // ApJ. — 2019. — Vol. 871, no. 2. — P. 143.
65. *Greisen E. W.* AIPS, the VLA, and the VLBA // Information Handling in Astronomy - Historical Vistas. — 2003. — Vol. 285. — P. 109.
66. *Högbom J. A.* Aperture Synthesis with a Non-Regular Distribution of Interferometer Baselines // A&AS. — 1974. — Vol. 15. — P. 417.
67. *Shepherd M. C.* Difmap: an Interactive Program for Synthesis Imaging // Astronomical Data Analysis Software and Systems VI. Vol. 125 / ed. by G. Hunt, H. Payne. — 1997. — P. 77. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
68. *Narayan R., Nityananda R.* Maximum entropy image restoration in astronomy. // ARA&A. — 1986. — Vol. 24. — P. 127–170.
69. *Байкова А. Т.* Дифференциальный метод максимальной энтропии // Известия ВУЗов. Радиофизика. — 1998. — Т. 41, № 8. — С. 991–998.
70. *Байкова А. Т.* Восстановление изображений по проекциям с использованием метода максимальной энтропии. Численное моделирование малоразмерной астротомографии // Астрон. журн. — 2007. — Т. 84, № 11. — С. 984–996.
71. *Salvatier J., Wiecki T. V., Fonnesbeck C.* Probabilistic programming in Python using PyMC3 // PeerJ Computer Science. — 2016. — Vol. 2. — e55.

72. *Lister M. L., Aller M. F., Aller H. D., [et al.].* MOJAVE: XIII. Parsec-scale AGN Jet Kinematics Analysis Based on 19 years of VLBA Observations at 15 GHz // *AJ.* — 2016. — Vol. 152. — P. 12.
73. *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. — Vol. 147. — P. 143.
74. *Shapiro I. I., Wittels J. J., Counselman III C. C., [et al.].* Submilliarcsecond astrometry via VLBI. I - Relative position of the radio sources 3C 345 and NRAO 512 // *AJ.* — 1979. — Vol. 84. — P. 1459–1469.
75. *Reid M. J., Honma M.* Microarcsecond Radio Astrometry // *ARA&A.* — 2014. — Vol. 52. — P. 339–372.
76. *Pradel N., Charlot P., Lestrade J.-F.* Astrometric accuracy of phase-referenced observations with the VLBA and EVN // *A&A.* — 2006. — Vol. 452. — P. 1099–1106.
77. *Sokolovsky K. V., Kovalev Y. Y., Pushkarev A. B., [et al.].* A VLBA survey of the core shift effect in AGN jets. I. Evidence of dominating synchrotron opacity // *A&A.* — 2011. — Vol. 532. — A38.
78. *Walker R. C., Dhawan V., Romney J. D., [et al.].* VLBA Absorption Imaging of Ionized Gas Associated with the Accretion Disk in NGC 1275 // *ApJ.* — 2000. — Vol. 530. — P. 233–244.
79. *O'Sullivan S. P., Gabuzda D. C.* Magnetic field strength and spectral distribution of six parsec-scale active galactic nuclei jets // *MNRAS.* — 2009. — Vol. 400. — P. 26–42.
80. *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. — Vol. 494. — P. 527–537.
81. *Lee S.-S., Lobanov A. P., Krichbaum T. P., [et al.].* A Global 86 GHz VLBI Survey of Compact Radio Sources // *AJ.* — 2008. — Vol. 136, no. 1. — P. 159–180.
82. *Lobanov A.* Brightness temperature constraints from interferometric visibilities // *A&A.* — 2015. — Vol. 574. — A84.
83. *Шкловский И. С.* Замечания о природе выбросов радиогалактик // *Астрон. журн.* — 1963. — Т. 40, № 6. — С. 972–981.

84. *Cohen M. H., Lister M. L., Homan D. C., [et al.]*. Relativistic Beaming and the Intrinsic Properties of Extragalactic Radio Jets // *ApJ*. — 2007. — Vol. 658, issue 1. — P. 232–244.
85. *Aharonian F., Akhperjanian A. G., Bazer-Bachi A. R., [et al.]*. An Exceptional Very High Energy Gamma-Ray Flare of PKS 2155-304 // *ApJL*. — 2007. — Vol. 664, no. 2. — P. L71–L74.
86. *Albert J., Aliu E., Anderhub H., [et al.]*. Variable Very High Energy  $\gamma$ -Ray Emission from Markarian 501 // *ApJ*. — 2007. — Vol. 669, no. 2. — P. 862–883.
87. *Levy G. S., Linfield R. P., Edwards C. D., [et al.]*. VLBI Using a Telescope in Earth Orbit. I. The Observations // *ApJ*. — 1989. — Vol. 336. — P. 1098.
88. *Linfield R. P., Levy G. S., Ulvestad J. S., [et al.]*. VLBI Using a Telescope in Earth Orbit. II. Brightness Temperatures Exceeding the Inverse Compton Limit // *ApJ*. — 1989. — Vol. 336. — P. 1105.
89. *Linfield R. P., Levy G. S., Edwards C. D., [et al.]*. 15 GHz Space VLBI Observations Using an Antenna on a TDRSS Satellite // *ApJ*. — 1990. — Vol. 358. — P. 350.
90. *Frey S., Gurvits L. I., Altschuler D. R., [et al.]*. Dual-Frequency VSOP Observations of AO 0235+164 // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. — 2000. — Vol. 52. — P. 975–L982.
91. *Авдеев В. Ю., Андрианов А. С., Балаж Я. [и др.]*. Космическая Миссия «Радиоастрон». Первые Результаты // *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*. — 2012. — № 3. — С. 4–21.
92. *Кардашев Н. С., Крейсман Б. Б., Погодин А. В. [и др.]*. Проектирование Орбиты Космического Аппарата «Спектр-Р» Для Наземно-Космического Интерферометра // *Космические Исследования*. — 2014. — Т. 52, № 5. — С. 366.
93. *Ковалев Ю. А., Васильков В. И., Попов М. В. [и др.]*. Проект «РадиоАстрон». Измерения и анализ основных параметров космического телескопа в полете в 2011–2013 гг. // *Космические Исследования*. — 2014. — Т. 52, № 5. — С. 430–439.
94. *Liu J., Bignall H., Krichbaum T., [et al.]*. Effelsberg Monitoring of a Sample of RadioAstron Blazars: Analysis of Intra-Day Variability // *Galaxies*. — 2018. — Vol. 6, no. 2. — P. 49.

95. Журавлев В. И. Пакет Fakerat В Международном Интерферометрическом Проекте «Радиоастрон» Со Сверхдлинными Наземно-Космическими Базами // Космические Исследования. — 2015. — Т. 53, № 3. — С. 232.
96. *Murphy D. W.* Simulations of space VLBI // IAU Colloq. 131: Radio Interferometry. Theory, Techniques, and Applications. Vol. 19 / ed. by T. J. Cornwell, R. A. Perley. — 1991. — P. 107–111. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
97. *Murphy D. W., Yakimov V., Kobayashi H.*, [et al.]. Space VLBI Simulations // VLBI Tecnology: Progress and Future Observational Possibilities / ed. by T. Sasao, S. Manabe, O. Kameya, [et al.]. — 1994. — P. 34–38.
98. *Smith J. G., Meier D. L., Murphy D. W.*, [et al.]. JPL Contribution to the VSOP Mission // Advances in Space Research. — 2000. — Vol. 26, no. 4. — P. 637–640.
99. *Ford H. A., Anderson R., Belousov K.*, [et al.]. The RadioAstron Green Bank Earth Station // Proceedings of the SPIE. Vol. 9145. — 2014. — 91450B. — (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series).
100. *Petrov L., Kovalev Y. Y., Fomalont E. B.*, [et al.]. The Very Long Baseline Array Galactic Plane Survey—VGaPS // AJ. — 2011. — Vol. 142, issue 2. — P. 35.
101. *Thompson A. R., Moran J. M., Swenson Jr. G. W.* Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy. — 3rd ed. — Cham : Springer, 2017.
102. *Gwinn C. R., Popov M. V., Bartel N.*, [et al.]. PSR B0329+54: Statistics of Substructure Discovered within the Scattering Disk on RadioAstron Baselines of up to 235,000 km // ApJ. — 2016. — Vol. 822, no. 2. — P. 96.
103. *Popov M. V., Bartel N., Gwinn C. R.*, [et al.]. PSR B0329+54: substructure in the scatter-broadened image discovered with RadioAstron on baselines up to 330 000 km // MNRAS. — 2017. — Vol. 465, no. 1. — P. 978–985.
104. *Gwinn C. R., Kovalev Y. Y., Johnson M. D.*, [et al.]. Discovery of Substructure in the Scatter-broadened Image of Sgr A\* // ApJL. — 2014. — Vol. 794, no. 1. — P. L14.
105. *Johnson M. D., Narayan R., Psaltis D.*, [et al.]. The Scattering and Intrinsic Structure of Sagittarius A\* at Radio Wavelengths // ApJ. — 2018. — Vol. 865, no. 2. — P. 104.

106. *Schmidt M.* 3C 273 : A Star-Like Object with Large Red-Shift // *Nature*. — 1963. — Vol. 197, no. 4872. — P. 1040.
107. *Oke J. B.* Absolute Energy Distribution in the Optical Spectrum of 3C 273 // *Nature*. — 1963. — Vol. 197, no. 4872. — P. 1040–1041.
108. *Lister M. L., Aller M. F., Aller H. D., [et al.]*. MOJAVE. X. Parsec-scale Jet Orientation Variations and Superluminal Motion in Active Galactic Nuclei // *AJ*. — 2013. — Vol. 146, no. 5. — P. 120.
109. *Johnson M. D., Gwinn C. R.* Theory and Simulations of Refractive Substructure in Resolved Scatter-broadened Images // *ApJ*. — 2015. — Vol. 805, no. 2. — P. 180.
110. *Johnson M. D., Kovalev Y. Y., Gwinn C. R., [et al.]*. Extreme Brightness Temperatures and Refractive Substructure in 3C 273 with RadioAstron // *ApJL*. — 2016. — Vol. 820, no. 1. — P. L10.
111. *Jorstad S. G., Marscher A. P., Lister M. L., [et al.]*. Polarimetric Observations of 15 Active Galactic Nuclei at High Frequencies: Jet Kinematics from Bimonthly Monitoring with the Very Long Baseline Array // *AJ*. — 2005. — Vol. 130, no. 4. — P. 1418–1465.
112. *Savolainen T., Homan D. C., Hovatta T., [et al.]*. Relativistic beaming and gamma-ray brightness of blazars // *A&A*. — 2010. — Vol. 512. — A24.
113. *Gregory P. C., Condon J. J.* The 87GB Catalog of Radio Sources Covering  $0^\circ < \delta < +75^\circ$  at 4.85 GHz // *Astrophysical Journal Supplement*. — 1991. — Vol. 75. — P. 1011.
114. *Becker R. H., White R. L., Edwards A. L.* A New Catalog of 53,522 4.85 GHz Sources // *Astrophysical Journal Supplement*. — 1991. — Vol. 75. — P. 1.
115. *Halpern J. P., Eracleous M., Mattox J. R.* Redshifts of Candidate Gamma-Ray Blazars // *AJ*. — 2003. — Vol. 125, no. 2. — P. 572–579.
116. *Spinrad H., Smith H. E.* AO 0235+164 a red BL Lacertae object. // *ApJ*. — 1975. — Vol. 201. — P. 275–276.
117. *Véron-Cetty M. P., Véron P.* A catalogue of quasars and active nuclei: 13th edition // *A&A*. — 2010. — Vol. 518. — A10.
118. *Cohen R. D., Smith H. E., Junkkarinen V. T., [et al.]*. The Nature of the BL Lacertae Object AO 0235+164 // *ApJ*. — 1987. — Vol. 318. — P. 577.

119. *Gabuzda D. C., Cawthorne T. V.* VLBI polarization images of eight compact active galactic nuclei at  $\lambda = 1.3$  cm // MNRAS. — 2000. — Vol. 319, no. 4. — P. 1056–1066.
120. *Jones D. L., Baath L. B., Davis M. M., [et al.]*. The sub-milliarcsecond radio structure of AO 0235+164. // ApJ. — 1984. — Vol. 284. — P. 60–64.
121. *Altschuler D. R., Gurvits L. I., Alef W., [et al.]*. The centi-arcsecond structure of 16 low-frequency variable sources at 92 cm. // A&AS. — 1995. — Vol. 114. — P. 197.
122. *Chu H. S., Baath L. B., Rantakyro F. T., [et al.]*. VLBI observations of the puzzling BL Lacertae object 0235+164 // A&A. — 1996. — Vol. 307. — P. 15.
123. *Jorstad S. G., Marscher A. P., Mattox J. R., [et al.]*. Multiepoch Very Long Baseline Array Observations of EGRET-detected Quasars and BL Lacertae Objects: Superluminal Motion of Gamma-Ray Bright Blazars // Astrophysical Journal Supplement Series. — 2001. — Vol. 134, no. 2. — P. 181–240.
124. *Agudo I., Marscher A. P., Jorstad S. G., [et al.]*. On the Location of the  $\gamma$ -Ray Outburst Emission in the BL Lacertae Object AO 0235+164 Through Observations Across the Electromagnetic Spectrum // ApJL. — 2011. — Vol. 735, no. 1. — P. L10.
125. *Ackermann M., Ajello M., Ballet J., [et al.]*. Multi-wavelength Observations of Blazar AO 0235+164 in the 2008-2009 Flaring State // ApJ. — 2012. — Vol. 751, no. 2. — P. 159.
126. *Rickett B. J., Lazio T. J. W., Ghigo F. D.* Interstellar Scintillation Observations of 146 Extragalactic Radio Sources // Astrophysical Journal Supplement Series. — 2006. — Vol. 165, no. 2. — P. 439–460.
127. *Sikora M., Begelman M. C., Madejski G. M., [et al.]*. Are Quasar Jets Dominated by Poynting Flux? // ApJ. — 2005. — Vol. 625, no. 1. — P. 72–77.
128. *Vlahakis N., Königl A.* Magnetic Driving of Relativistic Outflows in Active Galactic Nuclei. I. Interpretation of Parsec-Scale Accelerations // ApJ. — 2004. — Vol. 605, no. 2. — P. 656–661.
129. *Komissarov S. S.* Magnetic acceleration of relativistic jets. // Mem. Soc. Astron. Ital. — 2011. — Vol. 82. — P. 95.

130. *Königl A.* Relativistic Jets: Open Problems and Challenges // International Journal of Modern Physics D. — 2010. — Vol. 19, no. 06. — P. 635–647.
131. *Granot J., Komissarov S. S., Spitkovsky A.* Impulsive acceleration of strongly magnetized relativistic flows // MNRAS. — 2011. — Vol. 411, issue 2. — P. 1323–1353.
132. *Lyutikov M., Lister M.* Resolving Doppler-factor Crisis in Active Galactic Nuclei: Non-steady Magnetized Outflows // ApJ. — 2010. — Vol. 722, no. 1. — P. 197–203.
133. *Daly R. A., Marscher A. P.* The Gasdynamics of Compact Relativistic Jets // ApJ. — 1988. — Vol. 334. — P. 539.
134. *Kadler M., Ros E., Perucho M., [et al.].* The Trails of Superluminal Jet Components in 3C 111 // ApJ. — 2008. — Vol. 680, no. 2. — P. 867–884.
135. *Unwin S. C., Wehrle A. E., Lobanov A. P., [et al.].* Variability in the Inverse-Compton X-Ray Flux from the Jet in Quasar 3C 345 // ApJ. — 1997. — Vol. 480, no. 2. — P. 596–606.
136. *Homan D. C., Lister M. L., Kellermann K. I., [et al.].* Jet Collimation in Action: Realignment on Kiloparsec Scales in 3C 279 // ApJL. — 2003. — Vol. 589, no. 1. — P. L9–L12.
137. *Homan D. C., Ojha R., Wardle J. F. C., [et al.].* Parsec-Scale Blazar Monitoring: Proper Motions // ApJ. — 2001. — Vol. 549, no. 2. — P. 840–861.
138. *Homan D. C., Kadler M., Kellermann K. I., [et al.].* MOJAVE: Monitoring of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. VII. Blazar Jet Acceleration // ApJ. — 2009. — Vol. 706, no. 2. — P. 1253–1268.
139. *Pushkarev A. B., Kovalev Y. Y.* Single-epoch VLBI imaging study of bright active galactic nuclei at 2 GHz and 8 GHz // A&A. — 2012. — Vol. 544. — A34.
140. *Lister M. L., Cohen M. H., Homan D. C., [et al.].* MOJAVE: Monitoring of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. VI. Kinematics Analysis of a Complete Sample of Blazar Jets // AJ. — 2009. — Vol. 138, no. 6. — P. 1874–1892.
141. *Piner B. G., Mahmud M., Fey A. L., [et al.].* Relativistic Jets in the Radio Reference Frame Image Database. I. Apparent Speeds from the First 5 Years of Data // AJ. — 2007. — Vol. 133, no. 5. — P. 2357–2388.

142. *Lister M. L., Aller H. D., Aller M. F., [et al.]*. MOJAVE: Monitoring of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. V. Multi-Epoch VLBA Images // *AJ*. — 2009. — Vol. 137, no. 3. — P. 3718–3729.
143. *Petrov L., Ma C.* Study of harmonic site position variations determined by very long baseline interferometry // *Journal of Geophysical Research*. — 2003. — Vol. 108, B4. — P. 2190.
144. *Fey A. L., Ma C., Arias E. F., [et al.]*. The Second Extension of the International Celestial Reference Frame: ICRF-EXT.1 // *AJ*. — 2004. — Vol. 127, no. 6. — P. 3587–3608.
145. *Lister M. L., Homan D. C., Kellermann K. I., [et al.]*. Monitoring Of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. XVIII. Kinematics and Inner Jet Evolution of Bright Radio-loud Active Galaxies // *ApJ*. — 2021. — Vol. 923, no. 1. — P. 30.
146. *Ackermann M., Ajello M., Allafort A., [et al.]*. The Second Catalog of Active Galactic Nuclei Detected by the Fermi Large Area Telescope // *ApJ*. — 2011. — Vol. 743, no. 2. — P. 171.
147. *Britzen S., Vermeulen R. C., Campbell R. M., [et al.]*. A multi-epoch VLBI survey of the kinematics of CFJ sources. II. Analysis of the kinematics // *A&A*. — 2008. — Vol. 484, no. 1. — P. 119–142.
148. *Gomez J. L., Marti J. M. A., Marscher A. P., [et al.]*. Parsec-Scale Synchrotron Emission from Hydrodynamic Relativistic Jets in Active Galactic Nuclei // *ApJL*. — 1995. — Vol. 449. — P. L19.
149. *Kellermann K. I., Lister M. L., Homan D. C., [et al.]*. Sub-Milliarcsecond Imaging of Quasars and Active Galactic Nuclei. III. Kinematics of Parsec-scale Radio Jets // *ApJ*. — 2004. — Vol. 609, no. 2. — P. 539–563.
150. *Vermeulen R. C., Cohen M. H.* Superluminal Motion Statistics and Cosmology // *ApJ*. — 1994. — Vol. 430. — P. 467.