

3. Результаты реализованных в 2014 – 2015 годах летных научных программ, исследований и наблюдений

**Проект наземно-космического радиоинтерферометра
Радиоастрон**

Миссия РадиоАстрон представляет собой наземно-космическую систему РСДБ (радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами), предназначенную для исследования структуры космических радиоисточников со сверхвысоким угловым разрешением, обеспечиваемым огромными базами интерферометра, достигающими значений порядка 350000 км.

Наземно-космический интерферометр (НКИ) РадиоАстрон состоит из 10-метрового космического радиотелескопа (КРТ), установленного на борту космического аппарата СПЕКТР-Р, который обращается вокруг Земли по эллиптической орбите с периодом обращения около 9 дней. КРТ работает в четырех диапазонах длин волн 92, 18, 6.2 и 1.2-1.6 см. Наземно-космический интерферометр обеспечивает измерение угловых размеров радиоисточников с максимальным угловым разрешением в 7 микросекунд дуги на волне 1.3 см и на максимальной наземно-космической базе. РадиоАстрон также позволяет получать изображения наиболее ярких источников при наблюдениях вблизи плоскости орбиты или вблизи прохождения перигея, где реализуются необходимые комбинации проекций наземно-космических баз. Основные параметры НКИ приводятся в таблице 1.

Таблица 1

Диапазон (см)	Частотный интервал (МГц)	Угловое разрешение (мксек)	Системная температура (кЯн) LCP RCP		Чувствительность (мЯн)
92 (P)	316-332	530	13.3	13.5	14
18 (L)	1636-1692	100	2.76	2.93	3
6.2 (C)	4804-4860	35	11.6	-	5
1.2-1.6 (K)	18372-25132	7	46.7	36.8	16

В каждом частотном диапазоне имеются два поляризационных канала приемника (LCP и RCP) с полосой регистрации сигнала шириной 2x16 МГц (верхняя и нижняя субполосы). В диапазоне P нижняя полоса не содержит полезного сигнала из-за влияния входного фильтра. В диапазоне С работоспособным оказался только один поляризационный канал с левой круговой поляризацией (LCP). Угловое разрешение НКИ указано для максимальной проекции базы на уровне ширины интерференционного лепестка. Чувствительность приведена по уровню среднеквадратического отклонения (1 сигма) для времени интегрирования 300 секунд в одной 16-МГц полосе с использованием 110-м радиотелескопа обсерватории Грин Бэнк в качестве наземного плеча интерферометра.

Миссия РадиоАстрон выполняется под общим руководством Астрокосмического центра Физического института им П.Н. Лебедева (АКЦ ФИАН). Управление спутником СПЕКТР-Р осуществляется Научно-производственным объединением им. Лавочкина (НПОЛ). Определение орбиты КА и необходимые вычисления для управления и обработки данных проводятся Баллистической группой Института прикладной математики им. Келдыша. Прием научных данных производится двумя

специализированными телеметрическими станциями – в Пушинской радиоастрономической обсерватории (ПРАО) и обсерватории Грин Бэнк (США).

Основной объем корреляции наблюдательных данных выполняется на программируемом корреляторе Центра обработки научных информации (ЦОНИ) АКЦ ФИАН; в первичной обработке данных также участвуют корреляционные центры в Институте радиоастрономии Макса Планка (Бонн, Германия) и в Объединенном институте РСДБ (JIVE, Нидерланды).

Большое значение для осуществления миссии играет участие крупных наземных радиотелескопов по всему миру. Это участие осуществляется на основе конкурсных заявок. Некоторые обсерватории выделяют наблюдательное время на своих радиотелескопах по специальным соглашениям.

Для координации разработки и выполнения научной программы миссии создан Международный координационный совет (RISC, RadioAstron International Science Council), который состоит из представителей АКЦ ФИАН, НПОЛ, сотрудников участвующих в наблюдениях обсерваторий и других представителей международной радиоастрономической общественности. На своих ежегодных встречах и дополнительных телеконференциях RISC обсуждает возможные направления научных исследований, а также полученные результаты наблюдений в процессе работы миссии.

Научная программа проекта РадиоАстрон состоит из трех основных частей: Ранняя научная программа (РНП), Ключевая научная программа (КНП) и Общее наблюдательное время (ОНВ). В результате выполнения РНП, которая закончилась в июне 2013 года, были исследованы все возможности

НКИ и испытаны различные методы проведения исследований с НКИ, что открыло дорогу для выполнения программ КНП и ОНВ. Ключевая научная программа (КНП) стартовала в июле 2013 года и закончилась в июне 2014 года. Эта программа была направлена на решение наиболее очевидных научных задач. Она была основана на конкурсных заявках (АО1) от научных организаций, большинство которых активно участвовали в подготовке миссии или в обеспечении наблюдений наземными радиотелескопами. С июля 2014 года началось выполнение Ключевых научных программ (КНП) и программ общего назначения (ОНВ) по открытым конкурсным заявкам от любых исследовательских групп и индивидуальных ученых.

Выполнение научной программы

В период 2014 - 2015 гг. миссия РадиоАстрон выполняла научную программу, сформированную в результате конкурса научных заявок АО2 и АО3. На конкурс принимались заявки двух типов, “ключевая научная программа” (КНП) и “общее наблюдательное время” (ОНВ).

Научная экспертиза поступивших проектов осуществлена международным научным советом экспертов РадиоАстрон (RPEC) и результаты утверждены руководителем проекта РадиоАстрон академиком Н.С. Кардашевым. В международный совет экспертов миссии входят: Dave Jauncey (CSIRO, Австралия), Mat Lister (PERDU, США), Михаил Попов (АКЦ ФИАН, Россия), Richard Porcas (председатель, MPIfR, Германия), Jason Hessels (Университет Амстердама, Нидерланды) и Wouter Vlemmings (Онсальская обсерватория, Швеция). Для периода АО2 - АО3 было одобрено 25 научных заявок. В соответствии с рекомендациями RPEC была разработана долговременная программа регулярных наблюдений источников на период с 1 июля 2014 года по 31 июня 2016 года.

В рамках научной программы миссии РадиоАстрон изучаются три группы космических объектов: квазары — ядра далеких галактик, пульсары — нейтронные звезды нашей галактики, мазеры — области образования звезд и планет в нашей галактике и в других галактиках. Наземное плечо интерферометра обеспечивают более 30 радиотелескопов России, Украины, Австралии, Великобритании, Германии, Индии, Испании, Италии, Нидерландов, Польши, Швеции, Финляндии, Китая, Южной Кореи, ЮАР, США, Японии и др. Получены успешные результаты по всем научным направлениям. Реализовано рекордное угловое разрешение, составляющее несколько сотысячный долей угловой секунды. Ниже приводятся научные результаты, полученные в 2014-2015 гг. Публикации проекта могут быть найдены на сайте проекта по следующему адресу: <http://www.asc.rssi.ru/radioastron/publications/publ.html>

3. Основные научные результаты по внегалактическим объектам

3.1. Наблюдения квазара 3C273 с РадиоАстроном: вызов пределу яркостной температуры.

Энергетические потери на обратный Комптон-эффект накладывают верхний предел на яркостную температуру излучающей плазмы около $10^{11.5}$ К. Релятивистское усиление излучения может увеличивать наблюдаемую яркостную температуру, но не намного выше значения 10^{13} К при использовании наземной интерферометрии со сверхдлинной базой на любой длине волны.

Представлены наблюдения квазара 3C273, выполненные при участии космической РСДБ миссии РадиоАстрон на проекциях баз, достигающих

171000 км, которые обнаруживают наличие структуры на масштабах до 26 микросекунд дуги (2.7 световых месяца) и яркостной температуры 10^{13} К. Эти измерения бросают вызов нашему современному пониманию нетеплового непрерывного излучения в окрестностях сверхмассивных черных дыр и требуют либо намного более высоких скоростей струи, чем наблюдаемые, либо постоянного ускорения релятивистской плазмы, которое должно иметь место на расстоянии нескольких парсек от центральной машины.

Помимо 3C273 проводятся измерения яркостных температур многих других источников в рамках обзора ядер активных галактик в проекте РадиоАстрон. На наземно-космических базах на сегодняшний день успешно продетектировано 160 квазаров. Значения измеренных яркостных простираются до 10^{14} К и даже выше – принципиально меняя предыдущие и современные результаты РСДБ обзоров активных галактик, проводимые на наземных интерферометрах.

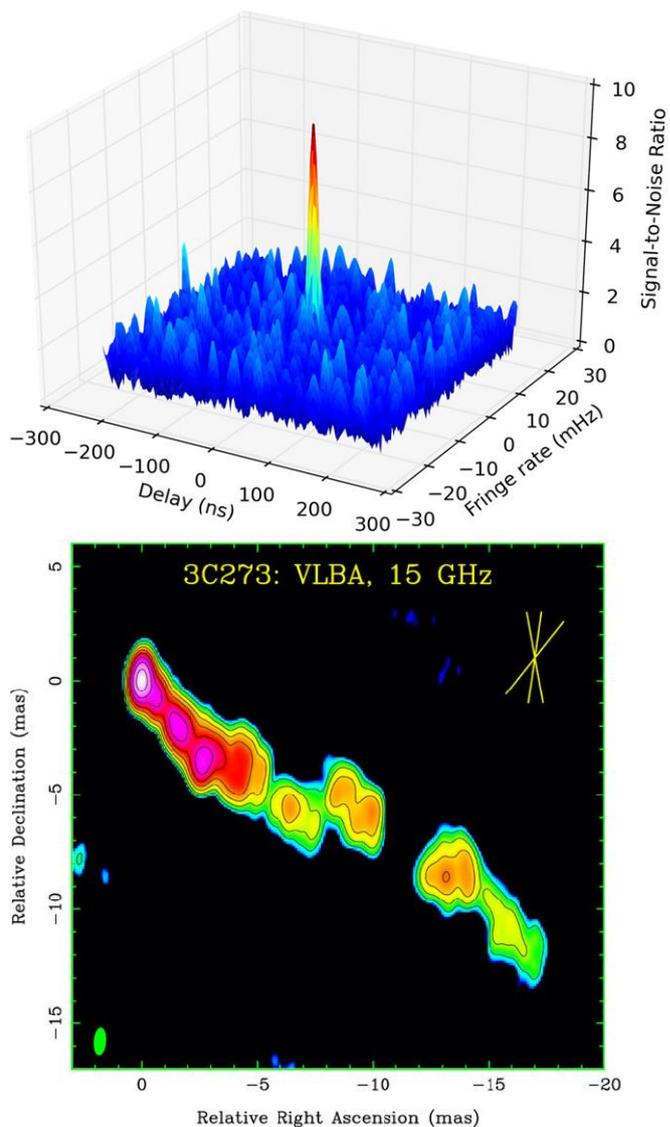


Рис. 3.1. Слева: Отклик интерферометра РадиоАстрон (Космический Радиотелескоп–GBT) на частоте 22 ГГц по наблюдениям квазара 3С 273 2 февраля 2013 с длиной проекции базы 7.6 Гл. Отношение амплитуды интерферометрического отклика к средней амплитуде шума показана как функция остаточных задержек (в наносекундах и миллиГерцах). Справа: Карта распределения яркости по VLBA наблюдениям квазара 3С 273 на 15 ГГц на эпоху 10 февраля 2013г. с пиком интенсивности 3.2 Ян/луч, уровнем шума 1.4 мЯн/луч, размером диаграммы направленности (зеленый эллипс внизу слева) 1.21×0.53 мсек дуги. Контуры равной интенсивности проведены с шагом $\times 2$ и начинаются с уровня 0.25% от пикового значения. Желтые линии показывают интервал позиционных углов наземно-космических баз с РадиоАстроном, реализуемых в наблюдениях: 10° , -8° , -38° .

3.2. Экстремальные яркостные температуры и рефракционное рассеяние субструктуры в 3C273 с РадиоАстроном.

Наземно-космическая интерферометрия с РадиоАстроном обеспечивает самые высокие угловые разрешения, когда либо достигнутые при наблюдениях на длинах волн от 1.3 до 92 см. Ковалев и др. (2015) сообщают об обнаружении РадиоАстроном классического квазара 3C273 на интерференционных базах до 171000 км, которые предполагают яркостные температуры, превышающие ожидаемые пределы «катастрофы обратного комптон-эффекта" на два порядка величины.

Нами показано, что на 18 см, эти оценки, скорее всего, возникают вследствие существования рефракционной субструктуры, вызванной рассеянием в межзвездной среде. Рассеивающие свойства использованы для оценки истинной яркостной температуры, составившей 7×10^{12} К. Эта яркостная температура примерно в 15 раз ниже оценок, полученных без учета субструктуры. Такая температура согласуется с ожидаемыми теоретическими пределами. При наблюдениях на длине волны 6 см, субструктура существенно влияет на измеренные значения, но при этом дает яркостную температуру, сравнимую со значениями, получаемыми в моделях, не учитывающих субструктуру. На длине волны 1.3 см, субструктура не оказывает влияния на получаемые чрезвычайно высокие яркостные температуры, составляющие примерно 10^{13} - 10^{14} К.

В итоге, наши результаты предполагают, что яркостная температура 3C273 растет с частотой, достигая максимума вблизи 20 ГГц, совпадающей с частотой завала спектра. Мы также обнаружили, что для предполагаемого гауссового источника оценка рефракционной субструктуры на одиночной сверхдлинной базе определяет абсолютный минимум яркостной температуры, если рассеивающие свойства вдоль заданного луча зрения

известны, и что этот минимум точно аппроксимирует видимую яркостную температуру для широкого интервала значений плотности потока излучения.

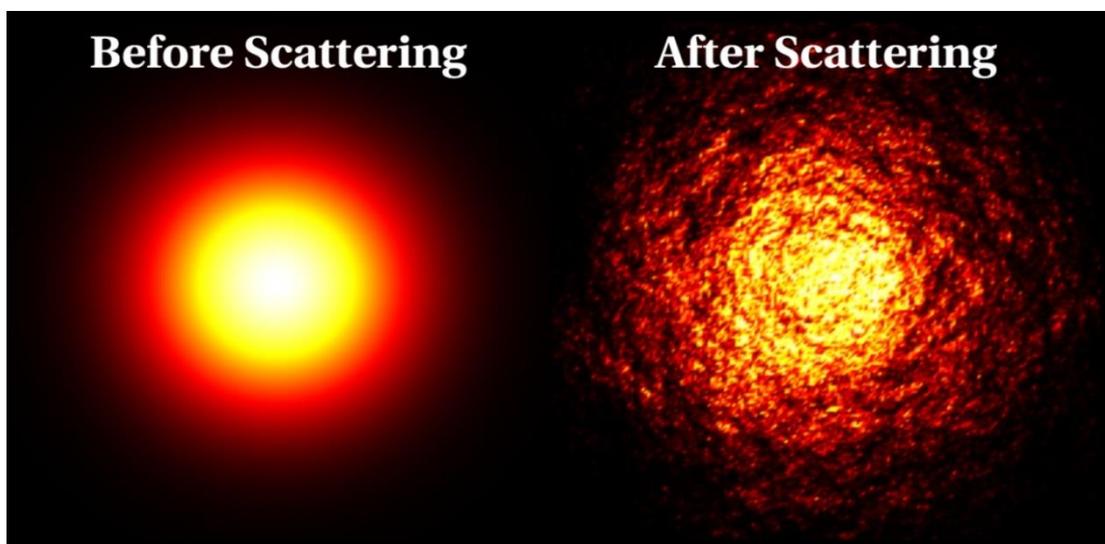


Рис. 3.2. Смоделированные изображения, показывающие эффекты рефракционной субструктуры.

3.3. Первое в истории изображение активной галактики с экстремальным угловым разрешением, полученное как в полной интенсивности, так и в линейной поляризации на длине волны 1.3 см.

Российский космический радиотелескоп «Спектр-Р» совместно с 15 наземными радиотелескопами из России (сеть «Квазар-КВО»), Европы и США, во время наблюдений активного ядра галактики в созвездии Ящерицы, объекта BL Lacertae, получил изображения с самым высоким угловым разрешением в истории астрономии. Учёные смогли разглядеть на них особенности структуры джетов – гигантских струй вещества, которые выбрасывает сверхмассивная черная дыра в центре этой галактики, и восстановить структуру магнитного поля.

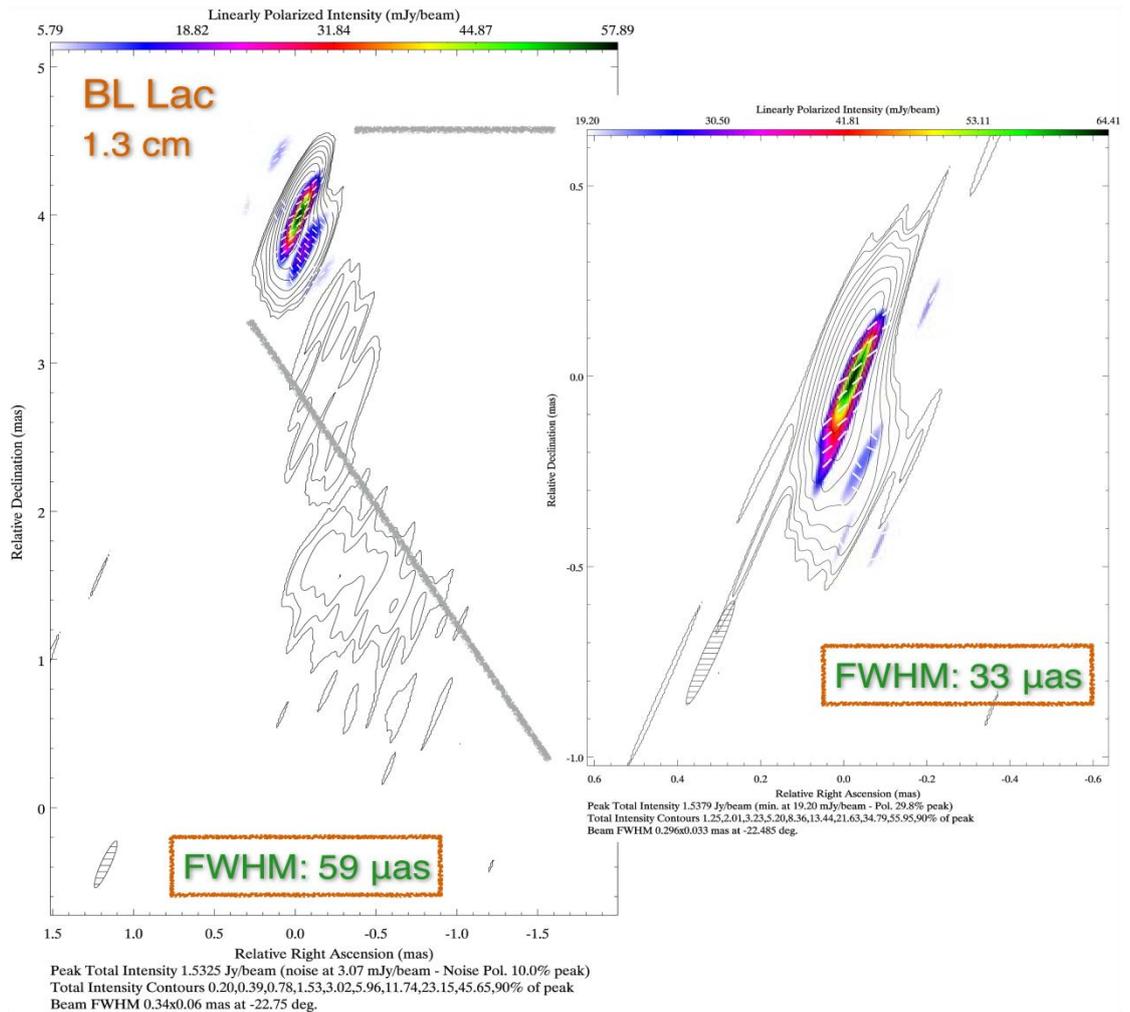


Рис. 3.3. Поляриметрические РСДБ изображения объекта BL Lac полученные с помощью РадиоАстроны 10–11 ноября 2013г. на частоте 22 ГГц с помощью естественного (слева) и сверхднородного (справа) взвешивания данных.

В ходе сеанса наблюдений, проведённого на самой короткой длине волны интерферометра (1,3 см) ученые смогли добиться рекордного углового разрешения – 21 микросекунда дуги. Научная группа наблюдала за поведением объекта BL Lacertae. Это блазар, сверхмассивная черная дыра, окруженная диском плазмы, разогретой до температур в миллиарды градусов. Мощные магнитные поля и высокие температуры формируют джеты – струи газа длиной до нескольких световых лет. Теоретические

модели предсказывали, что из-за вращения черной дыры и аккреционного диска, линии магнитного поля должны формировать спиральные структуры, которые в свою очередь ускоряют поток вещества в джетах. Ученым с помощью РадиоАстроны смогли увидеть эти спиральные структуры магнитного поля, а также зоны ударной волны в области формирования джета, что позволило лучше понять, как работают эти самые мощные во Вселенной источники излучения. Ядро галактики оказалось экстремально горячим. Если бы мы попытались воспроизвести эти физические условия на Земле, то получили бы зону с температурой более триллиона градусов.

3.4. РСДБ картографирование с РадиоАстроном поляризованного радиоизлучения далекого квазара 0642+449 на частоте 1.6 ГГц.

Поляризация радиоизлучения внегалактических выбросов на субмиллисекундных угловых масштабах содержит важную информацию для понимания структуры магнитного поля внутренних областей струй и ближайших окрестностей сверхмассивных черных дыр в центрах активных галактик. Космические РСДБ наблюдения дают уникальную возможность для поляриметрического картографирования с субмиллисекундным угловым разрешением и изучения свойств магнитного поля в активных ядрах галактик на масштабах менее 10^4 гравитационных радиусов.

Космические РСДБ наблюдения квазара TXS 0642+449 (OH 471) с высоким красным смещением, выполненные на длине волны 18 см (частота 1.6 ГГц) в рамках ранней научной программы миссии РадиоАстрон, были использованы для тестирования работы орбитального космического

радиотелескопа (КРТ) в поляриметрическом режиме наблюдений с целью разработки методологии проведения полностоксовой поляриметрии с космическим РСДБ на частоте 1.6 ГГц и изучения поляризованного излучения наблюдаемого объекта на субмиллисекундных масштабах.

Установлено, что амплитуда инструментальной поляризация КРТ на 18 см составляет не более 9%, отражая высокую надежность поляризационного картографирования с РадиоАстроном на данной длине волны. Получено поляризационное изображение 0642+449 с разрешением 0.8 мсек дуги (четырёхкратное улучшение в сравнении с наземными РСДБ наблюдениями на той же длине волны). Изображение показывает компактную структуру типа ядро-выброс с низким ($\approx 2\%$) уровнем поляризации и преимущественно поперечным магнитным полем в ядерной области. Обнаружена сложная структура ядерной области, с двумя яркими деталями, возможно, соответствующими основанию выброса и сильной реколламинационной волне. Максимальная яркостная температура в основании струи составила 4×10^{13} К.

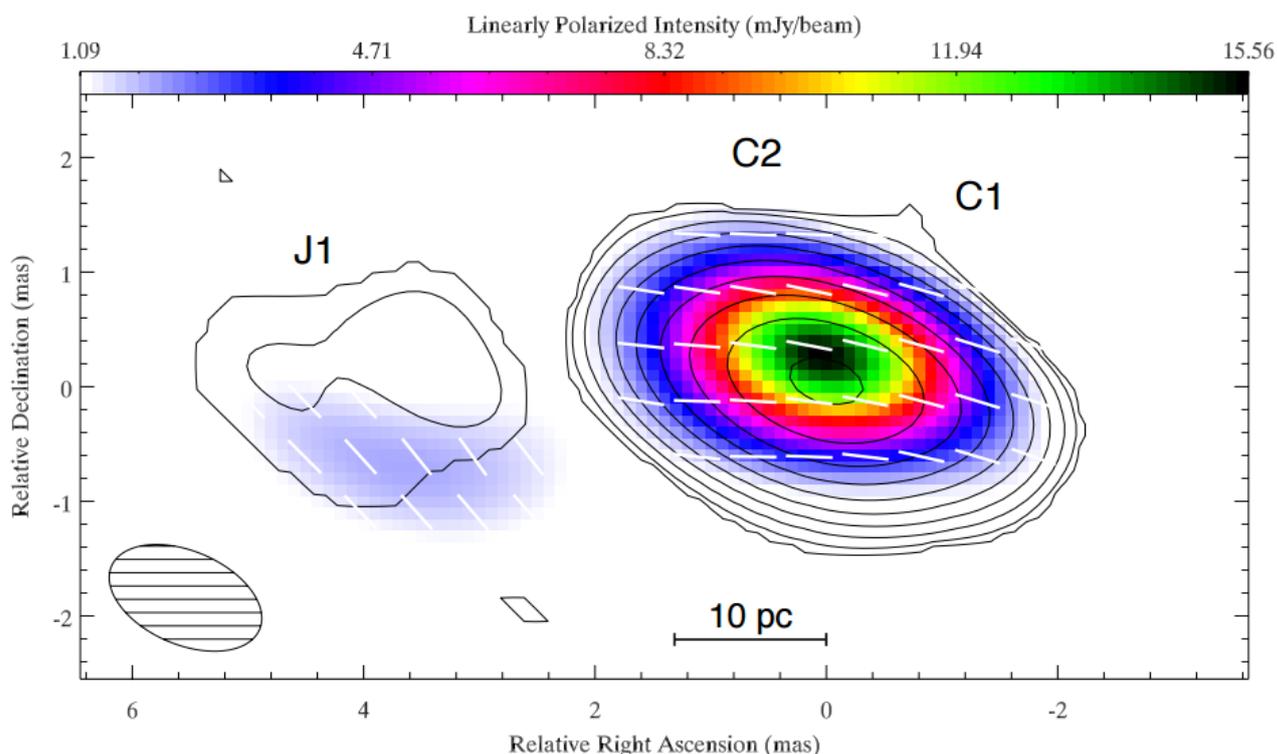


Рис. 3.4. Карта распределения полного (контуры) и линейно-поляризованного (цветные полутона) потока радиоизлучения от квазара 0642+449 на длине волны 18 см по данным РадиоАстроны. Вектора указывают ориентацию электрического вектора линейно-поляризованного излучения.

3.5. Тонкая структура изображения близкой галактики 3С84, полученная с рекордным угловым разрешением.

В рамках выполнения Ключевой научной программы по изучению близких галактик было успешно получено изображение радиоисточника 3С84 в гигантской эллиптической галактике NGC1275 с высочайшим угловым разрешением. Галактика находится на расстоянии в 75 мегапарсек; угловой размер в 1 миллисекунду дуги соответствует всего 0.3 парсека. Благодаря этому объект является одним из лучших кандидатов для исследования джета вблизи центральной сверхмассивной черной дыры с высочайшим уровнем

пространственной детализации. Полученные результаты позволят лучше понять процессы формирования струйных радиовыбросов в галактиках.

Картографирование на частотах 5 и 22 ГГц было проведено с наземной решеткой из 25 телескопов, включая Европейскую РСДБ сеть вместе с Российской Квазар-КВО, Калязин, Корейскую РСДБ сеть, Американские телескопы GBT, VLBA, фазированная VLA. Сигнал наземно-космического интерферометра успешно зарегистрирован для интервала проекций баз интерферометра от 0.2 до примерно 7 диаметров Земли в обоих диапазонах. Полученное изображение представлено на рисунке 3.5.

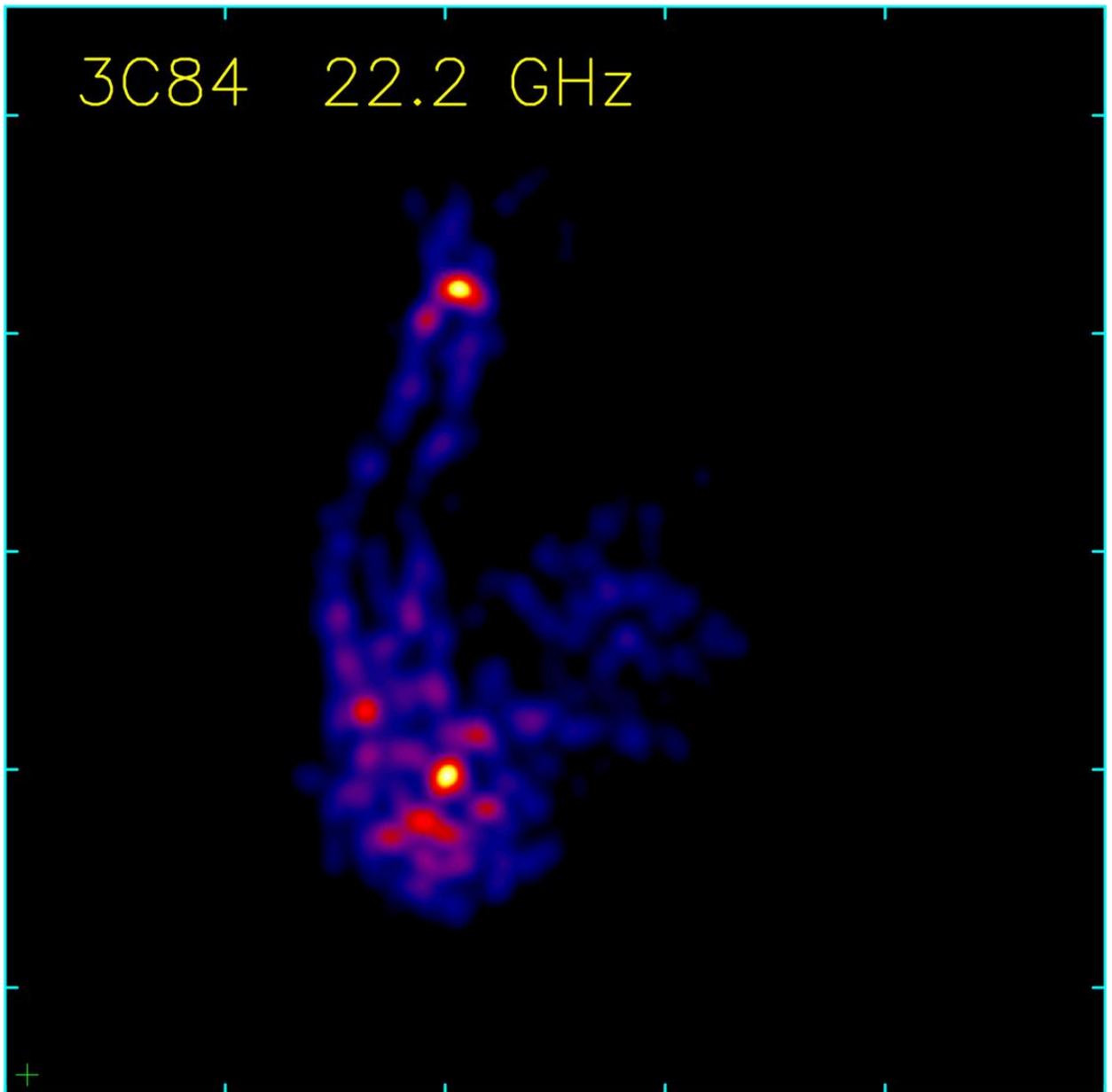


Рис. 3.5. Карта близкой галактики 3C84, полученная в полной интенсивности на 22 ГГц на наземно-космическом интерферометре РадиоАстрон с экстремальным разрешением. Диаграмма направленности интерферометра указана в левом нижнем углу с размерами 150 x 70 микросекунд дуги. Видимое изображение с Севера на Юг (сверху вниз) занимает в проекции размер в 1.2 парсека.

Центральная область 3C84 показала сложную структуру на масштабах суб-миллисекунд дуги. Выделяется яркое пятно сверху (Север) – это ядро галактики, а также деталь снизу (Юг) – она движется с суб-световой

скоростью по искривленной траектории. Изображение демонстрирует субструктуру этих областей с уникальной детализацией. Впервые ясно проявился контр-джет (выброс на Север) на масштабах суб-парсеков. Джет и контр-джет разрешены поперек, угловое разрешение карты составляет примерно 50 микросекунд дуги или 500 радиусов Шварцшильда.

Подробности о структуре струи в ее основании позволяют подробно изучать процесс формирования джета в районе центральной сверхмассивной черной дыры и аккреционного диска. Можно видеть уярчение к краям для джета и контр-джета, это важный уникальный результат для понимания природы выброса. Он указывает на стратификацию течения плазмы – эффект, крайне редко видимый в прямых наблюдениях. На Юге в конце джета выделяется пятно, его яркость оказалась экстремальной для такого далекого расстояния от центральной машины галактики. В результате, ученые зарегистрировали и изучили эффективный разогрев релятивистской плазмы за счет взаимодействия с окружающей средой на фронте ударной волны.

4. Научные результаты исследования пульсаров

4.1. Зондирование межзвездной плазмы гигантскими импульсами пульсара в Крабовидной туманности.

Гигантские импульсы пульсара в Крабовидной туманности (B0531+21) наблюдались в проекте РадиоАстрон в рамках исследования эффектов рассеяния радиоизлучения на межзвездной среде. С 2011 по 2015 гг. включительно было проведено 9 наблюдений. Список всех наблюдений пульсара в Крабовидной туманности представлен в Таблице 1. При этом впервые для радио интерферометрических наблюдений гигантских

импульсов пульсара в Крабовидной туманности были получены интерференционные отклики на наземно-космических базах вплоть до 150000 км, в наблюдениях совместно с космическим радиотелескопом миссии РадиоАстрон. Максимальная плотность потока регистрировавшихся гигантских импульсов достигала значения 100000 Янских. Для каждой эпохи наблюдений были измерены параметры рассеяния: время рассеяния, полоса декорреляции, угловой размер кружка рассеяния, радиус дифракционного пятна, расстояние до эффективного рассеивающего экрана, а также анализировались структурные функции фазы в зависимости от времени. Измерение параметров проводилось в предположении теории одиночного тонкого эффективного рассеивающего экрана.

Для каждого наблюдения наши оценки расстояния до рассеивающего экрана дают различные значения. В случае самого первого сеанса наблюдений (RAFS01) расстояние до экрана соответствовало случаю равномерно распределенного рассеивающего вещества на луче зрения. В других случаях видно, что рассеяние доминировало в областях близких к Крабовидной туманности.

Ранее проводившиеся исследования уже указывали на наличие такого двухкомпонентного рассеяния – рассеяние в области, близкой к Крабовидной туманности и протяженная составляющая, обусловленная межзвездной плазмой. В частности, в работе Р. Каруппусами было показано, что в течение шести часов наблюдений были выявлены заметные изменения в картине рассеяния для пульсара в Крабовидной туманности, и доминирующая область рассеяния находилась в окрестностях Крабовидной туманности.

Было выполнено моделирование распространения гигантских импульсов с заданной структурой через рассеивающую среду с характерной

полосой декорреляции. Такой подход позволил рассмотреть влияние характерной структуры гигантских импульсов на измерение полосы декорреляции и на структуру функции видности. Наблюдаемые квазирегулярные структуры в функции видности для индивидуальных гигантских импульсов указывают на присутствие в структуре этих импульсов сильных неразрешенных всплесков на частоте 1668 МГц. Подобные всплески ранее наблюдались только на частотах выше 5 ГГц – в той области частот, где они не замываются рассеянием. Таким образом, РСДБ наблюдения гигантских импульсов от пульсара в Крабовидной туманности позволяют сделать заключение о наличии в этих импульсах на частоте 1668 МГц тонкой структуры с присутствием неразрешенных пиков длительностью менее 30 нс и с яркостной температурой $T_b > 10^{38}$ К. На основании этого можно сделать вывод, что такие неразрешенные компоненты со столь высокими значениями яркостной температуры будут распространяться в магнитосфере пульсара как сильные электромагнитные волны, ускоряя частицы плазмы, в результате чего образуются новые детали в профиле пульсара HFIP, HFC1, HFC2, обнаруженные Хэнкинсом.

По полученным результатам опубликовано: 2 статьи в трудах конференций, 1 печатная работа: «Исследование космической плазмы по данным РСДБ наблюдений гигантских импульсов пульсара B0531+21 в проекте “Радиоастрон”», *Астрономический Журнал*, том 93, №2, с. 167–176, 2016. Готовятся к публикации еще две печатные работы. Результаты были представлены на шести международных конференциях.

Таблица 4.1. Таблица наблюдений пульсара B0531+21, проводившихся в рамках научной программы миссии РадиоАстрон в период с 2011 по 2015 гг.

Код сеанса	Дата	Время	T, (часы)	λ , (см)	D, (км)	N _{GRT}
RAFS01	14.11.2011	23:00-00:00	1.0	18	46000	4
RAES04A	02.03.2012	13:00-17:00	4.0	18	145000	8
RAES04B	06.03.2012	13:30-17:30	4.0	18	128000	8
RAES04D	23.10.2012	07:00-09:00	2.0	18	113000	7
RAKS02AD	27.10.2013	06:00-09:00	3.0	18	150000	4
RAKS02AE	02.11.2013	19:30-08:40	12.0	92	57000	5
RAGS10A	10.01.2015	22:00-04:00	6.0	18	153000	5
RAGS10B	28.01.2015	21:00-03:00	6.0	18/92	140000	10
RAGS10C	15.02.2015	20:00-02:00	6.0	92	107000	2

Таблица 4.2. Таблица измеренных параметров рассеяния для пульсара B0531+21.

Obs. code	τ_{SC} , (μ s)	τ , (mas)	$\tau\tau$, (kHz)	R _{diff} , (km)	τ	Кол-во ГИ
RAFS01	0.9 \pm 0.1	1.3 \pm 0.2	116.3 \pm 24.5	10361 \pm 1700	0.36 \pm 0.08	98
RAES04A	5.8 \pm 0.3	0.6 \pm 0.1	55.2 \pm 5.9	21817 \pm 2900	0.94 \pm 0.02	1202
RAES04B	5.5 \pm 0.7	0.5 \pm 0.1	41.2 \pm 7.9	26949 \pm 7700	0.96 \pm 0.03	1034
RAES04D	5.1 \pm 0.5	1.2 \pm 0.1	40.7 \pm 4.6	11413 \pm 900	0.79 \pm 0.03	929
RAKS02AD	2.2 \pm 0.3	1.2 \pm 0.1	78.1 \pm 7.9	12113 \pm 1200	0.61 \pm 0.06	453
RAKS02AE	2340 \pm 23	14.0 \pm 1.4	–	5140 \pm 500	0.92 \pm 0.07	579
RAGS10A	1.4 \pm 0.2	0.4 \pm 0.1	161.1 \pm 13.4	34015 \pm 9268	0.91 \pm 0.05	1807
RAGS10B	1.5 \pm 0.1	0.5 \pm 0.1	70.2 \pm 8.3	25675 \pm 4485	0.85 \pm 0.04	627
RAGS10C	–	–	–	–	–	–

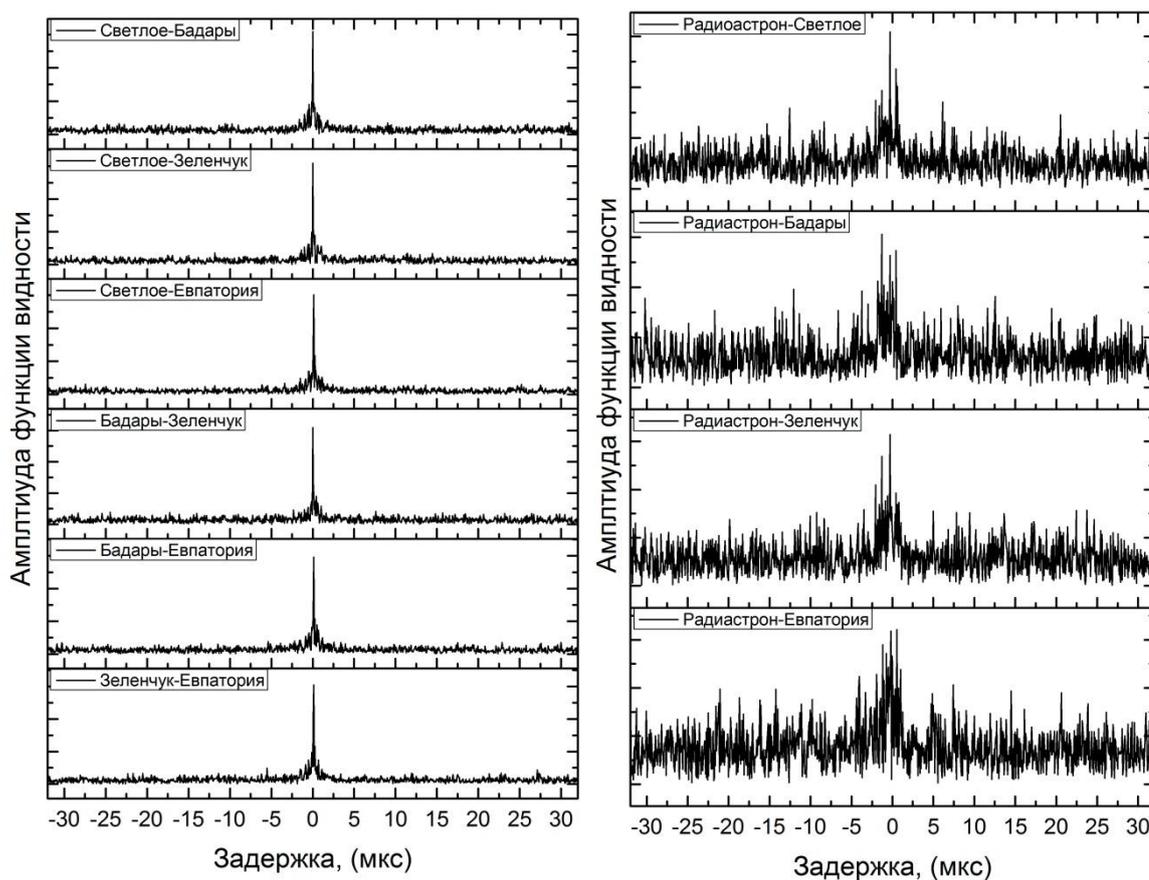


Рис. 4.1. Кросскорреляционные функции индивидуального гигантского импульса для различных баз, сеанс RAFS01, импульс: 23:21:03.74, длина волны: 18 см. Слева представлены только наземные базы, справа – только наземно-космические. На наземно-космических базах проявляется субструктура кружка рассеяния.

4.2. Распределение неоднородностей межзвездной плазмы в направлении удаленных пульсаров

Радиоизлучение от космических источников подвергается рассеянию на неоднородностях межзвездной плазмы. Наиболее наглядно эффекты рассеяния проявляются для компактных источников, какими являются пульсары. Именно с открытием пульсаров проявления рассеяния радиоволн на неоднородностях межзвездной плазмы были изучены теоретически и экспериментально. Основными эффектами рассеяния радиоволн являются

следующие: увеличение измеренного углового размера источника θ_{SC} , увеличение длительности импульса пульсара τ_{SC} , модуляция интенсивности радиоизлучения по частоте и времени с характерными масштабами τ_d и Δt_{sc} .

Одновременные измерения перечисленных выше параметров для выбранного объекта в течение достаточного длинного интервала времени ($T > \Delta t_{sc}$) и в достаточно широкой полосе частот ($B_{\nu} > \tau_d$) позволяют получить информацию о структуре неоднородностей межзвездной плазмы в направлении данного объекта. Преимущества в изучении эффектов рассеяния дают интерферометрические наблюдения со сверхдлинными базами (РСДБ), так как только в таких наблюдениях можно непосредственно измерить угол рассеяния θ_H . Новые возможности в этом направлении обеспечивает наземно-космический интерферометр РадиоАстрон, который позволяет реализовать высокое угловое разрешение до 1 миллисекунды дуги в метровом диапазоне длин волн (92 см), и до 0.2 миллисекунд дуги в дециметровом диапазоне (18 см).

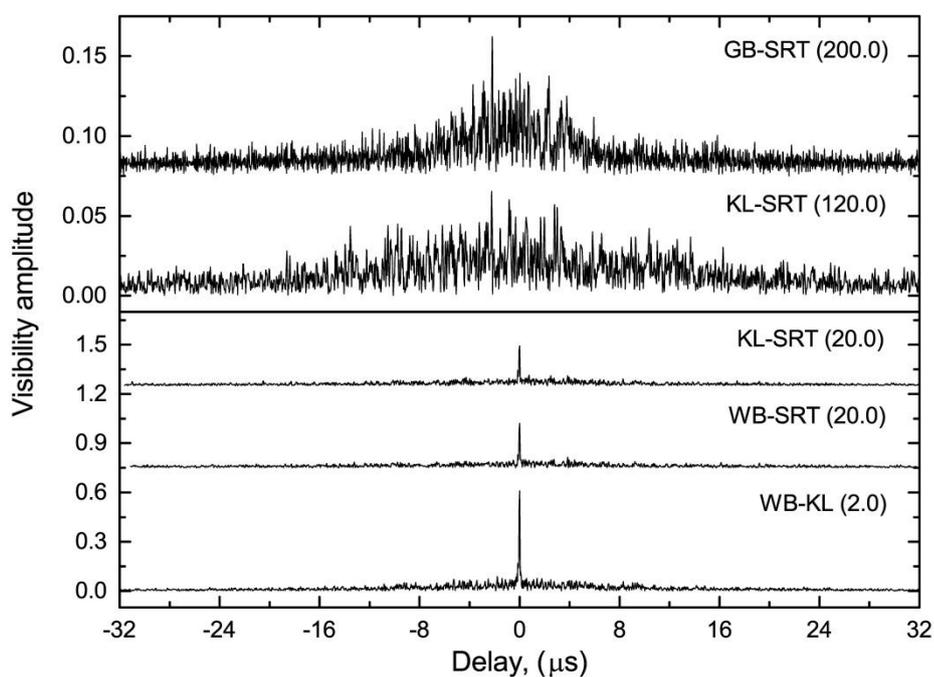


Рис. 4.2. Эволюция структуры функции видности при увеличении проекции базы интерферометра для пульсара V0329+54 в диапазоне 92 см (324 МГц). У каждой кривой указана комбинация радиотелескопов и величина проекции базы в миллионах длин волн (Мλ). Для проекции базы, больших 30 Мλ центральный пик функции видности исчезает и проявляется структура кружка рассеяния. Две верхних кривых показаны с десятикратным увеличением.

Интерференционный отклик для выбранной пары телескопов, который принято также называть функцией видности, получается из набора комплексных кросс спектров путем последовательного преобразования Фурье, сначала по частоте (обратное преобразование Фурье), а затем по времени (прямое преобразование) на временном интервале интегрирования ΔT . Функция видности анализируется на диаграмме задержка – частота интерференции $V_{AB}(\Delta, f)$.

Для точечного источника, такого как пульсар, подверженного рассеянию, модуль функции видности, определенный для достаточно большой базы интерферометра, разрешающей кружок рассеяния, представляет собой пятно увеличенной амплитуды с размерами:

$\Delta f = 1/(2\Delta t_{sc})$ и $\Delta \tau = 1/(2\Delta \tau_d)$ на диаграмме частота интерференции – задержка, соответственно. Именно такой вид был продемонстрирован в результате анализа наблюдений пульсара B0329+54 на базах наземно-космического интерферометра достигавшим 235000 км. На меньших базах интерферометра, когда оба радиотелескопа находятся в пределах одного дифракционного пятна, функция видности имеет пик в начале координат (при правильной компенсации частоты интерференции и задержки); амплитуда этого пика уменьшается с увеличением базы, что и позволяет измерить размеры кружка рассеяния. Вид интерференционного отклика на больших наземно-космических базах показан на рисунке 4.3, а центральное сечение пятна по координате временная задержка приводится на рисунке 4.2 для разных проекций базы интерферометра; самая верхняя кривая на рисунке 4.2 представляет собой сечение рисунка 4.3.

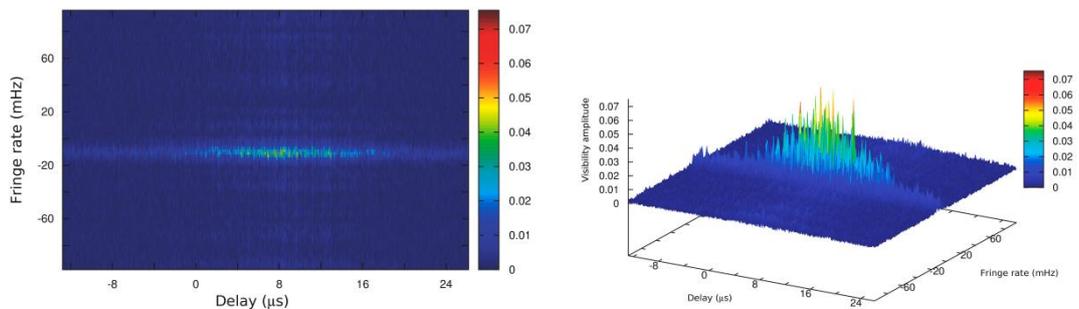


Рис. 4.3. Диаграмма задержка – частота интерференции для 500 секундого скана наблюдения 29 ноября 2012 (пульсар B0329+54) в правом поляризованном канале, база РадиоАстрон-Грин Бэнк. Слева двумерное представление диаграммы, справа – трехмерное представление диаграммы.

Пульсар B1933+16 одновременно наблюдался в двух частотных диапазонах в течение полутора часов 1 августа 2013 г. В связи с

особенностями работы КРТ на частоте 316 МГц наблюдения проводились в правой круговой поляризации только в верхней субполосе, а на частоте 1668 МГц в левой круговой поляризации в обеих субполосах. На 92 см наблюдения происходили совместно с системой апертурного синтеза в Вестерборке (WSRT) и 25-м антенной американской решетки телескопов VLBA (Санта-Крус), а на 18 см работала 300-м антенна в Аресибо и два 32-метровых телескопа в Торунь и в Светлом.

Диаметр кружка рассеяния на 316 МГц получился равным $\theta_H = 12.3 \pm 0.6$ миллисекунд дуги, что хорошо согласуется с ранними измерениями Гвина (15.2 \pm 1.3 миллисекунды дуги), а на 1668 МГц – $\theta_H = 0.84 \pm 0.04$ миллисекунд дуги.

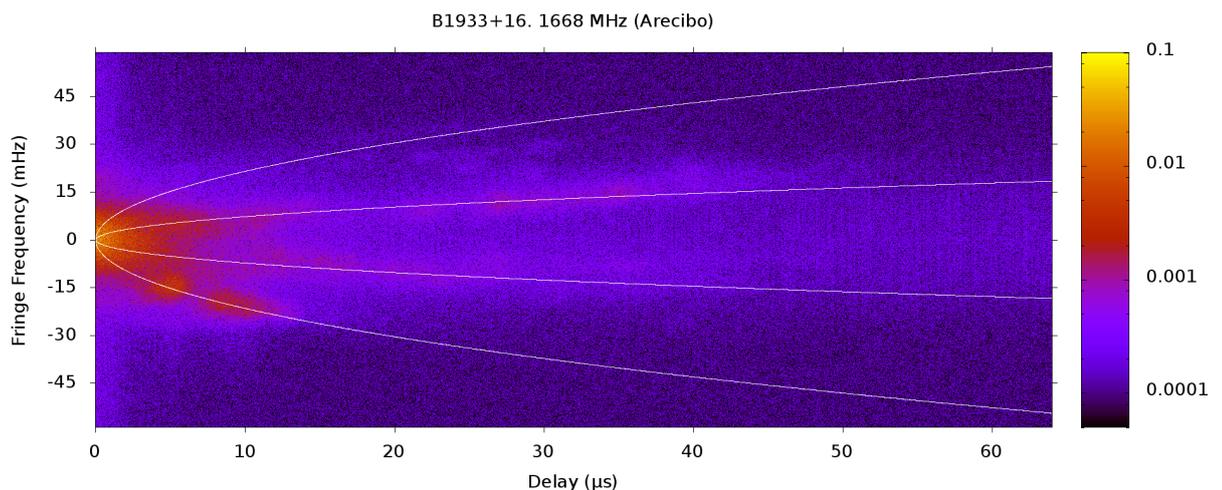


Рис. 4.4. Вторичный спектр для пульсара B1933+16 на частоте 1668 МГц. Параболические дуги указывают на наличие двух эффективных рассеивающих экранов на расстоянии 1.3 и 3.1 кпк от наблюдателя.

На Рис. 4.4 показан вторичный спектр на частоте 1668 МГц, полученный посредством двумерного преобразования Фурье от динамического спектра. Кроме большого центрального пятна можно заметить отдельные структуры, которые выстраиваются вдоль параболических дуг с вершиной в центре вторичного спектра. Такие дуги были впервые обнаружены и исследованы в

работах Стинебринга с соавторами в 2001 году. По форме парабол можно независимо от предыдущих оценок определить положение одного или нескольких (по числу дуг) рассеивающих экранов, как это было предложено в работе.

Таким образом, с использованием наземно-космического интерферометра РадиоАстрон и ряда наземных интерферометров мы исследовали распределение неоднородностей межзвездной плазмы в направлении четырех удаленных пульсаров B0329+54, B1641-45, B1749-28 и B1933+16, расположенных вблизи плоскости Млечного пути, радиоизлучение которых подвергается сильному рассеянию. По поведению нормированной амплитуды функции видности в зависимости от величины проекции базы этих интерферометров были измерены углы рассеяния для всех пульсаров (см. Рис. 4.5). Также был измерен временной масштаб уширения рассеянного импульса на неоднородностях межзвездной плазмы по зависимости амплитуды функции видности $V(\theta)$ от величины запаздывания, или по форме хвостовой части среднего профиля импульса. Сравнение угла рассеяния и временного масштаба уширения рассеянного импульса в модели тонкого экрана позволило локализовать положение такого экрана на луче зрения от наблюдателя до пульсара.

Следует отметить, что ни для одного пульсара не подходит модель равномерного распределения рассеивающей плазмы на луче зрения. Выявленные рассеивающие экраны отождествляются с реальными объектами, находящимися на луче зрения к этим пульсарам G339.1-04 (PSR B1641-45) и G0.55-0.85 (PSR B1749-28). Кроме того, по кривизне параболических дуг на частоте 1668 МГц было выявлено два экрана на расстояниях 1.3 кпк и 3.1 кпк, второй из них можно считать согласующимся с определениями по углам рассеяния. Выполненные исследования структуры

межзвездной плазмы путем анализа РСДБ наблюдений пульсаров, проведенных с наземно-космическим интерферометром РадиоАстрон, выявили конкретные слои, ответственные за основной вклад в рассеяние радиоволн, и эти слои находятся вблизи спиральных рукавов Галактики. Результаты измерений и вычислений приводятся в Таблице 4.3.

Таблица 4.3. Вычисленные параметры рассеяния. Таблица содержит название пульсара, число каналов коррелятора (N_{ch}), шаг сэмплирования коррелятора (Δt), время интегрирования (ΔT), характерное время мерцаний (Δt_{sc}), ширину полосы декорреляции в спектре ($\Delta \nu_d$), время рассеяния (Δt_{sc}), угловой диаметр кружка рассеяния ($\Delta \theta$), галактические координаты пульсара (l, b), расстояние до пульсара (D) и расстояние до рассеивающего экрана (d).

Пульсар	N_{ch}	Δt , (с)	ΔT , (с)	Δt_{sc} , (с)	$\Delta \nu_d$, (кГц)	Δt_{sc} , (мкс)	$\Delta \theta$, (мас)	l, b , (°)	D , (кпк)	d , (кпк)
V1641-45	16384	0.45	115	0.20 (0.05)	0.062 (0.002)	2600 (100)	27 (5)	339.2, -0.2	4.9	3.0
V1749-28	256	5.62	225	220 (20)	410 (100)	310 (0.040)	0.5 (0.2)	1.54, - 0.96	1.3	0.95
V1933+16	8192	0.35	250	–	0.25 (0.15)	600 (400)	12.3 (0.6)	52.4, - 2.1	3.7	2.6
V1933+16	2048	0.35	250	41.6 (0.5)	50.4 (1.1)	3.2 (0.1)	0.84 (0.04)	52.4, -2.1	3.7	2.7 [1.3;3. 1]
V0329+54	2048	0.71	70	102 (8)	7.0 (0.8)	12 (2)	4.8 (0.8)	145 -1.2	1.0	0.5

4.3. Статистические свойства субструктуры диска рассеяния для пульсара V0329+54

Выполнен анализ статистических свойств субструктуры, обнаруженной в диске рассеяния излучения от пульсара V0329+54 на частоте 324 МГц на наземно-космическом интерферометре РадиоАстрон. Наблюдения этого пульсара были проведены в ноябре 2012 года в течение четырёх

последовательных дней 26, 27, 28 и 29 ноября; длительность сеанса каждый день составила по 1 часу. Проекция базы интерферометра изменялась от 60000 до 235000 км. В качестве наземного плеча интерферометра работал 100-м радиотелескоп обсерватории Грин Бэнк (США). Круг рассеяния был разрешен на всех базах, т. е. интерферометрический отклик (функция видности) не содержит компактной детали (см. Рис. 4.3).

Был проведен анализ сечения интерференционного отклика по координате «временная задержка». Структура этого сечения представляет собой случайные вариации по амплитуде и фазе. В качестве статистической характеристики функции видности мы использовали кросскорреляционную функцию (ККФ), между модулями функции видности, полученными в каналах приемника с разными поляризациями (LCP и RCP). Эта функция $K_{RL}(\Delta\tau)$ сглаживает глубокую модуляцию амплитуды самой функции видности. Пример средней ККФ приведен на Рис. 4.6. Из этого рисунка видно, что имеется два временных масштаба в форме ККФ. Для объяснения такой структуры была получена теоретическая формула, основанная на предположении, что передаточная функция среды содержит два экспоненциальных компонента $G(\tau)=A_1k_1\exp(-k_1\tau)+A_2k_2\exp(-k_2\tau)$.

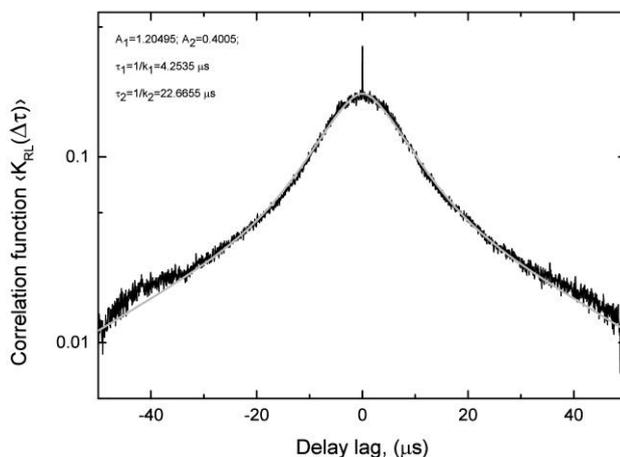


Рис. 4.6. Аппроксимация средней ККФ функции видности двумя экспоненциальными функциями.

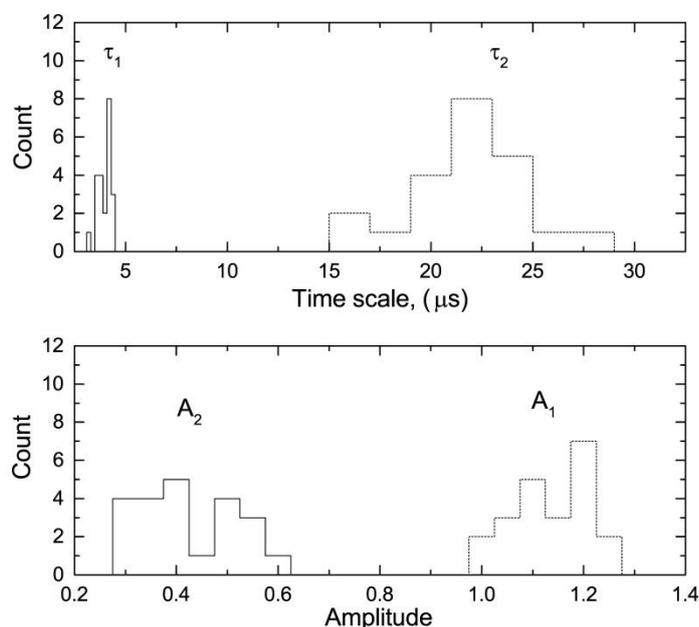


Рис. 4.7. Распределение измеренных параметров: времени рассеяния и относительного вклада для двухкомпонентной модели рассеяния радиоизлучения пульсара B0329+54 в диапазоне 92 см.

Сплошной серой линией на Рисунке 4.6 показана кривая для нашей теоретической формулы, примененной к аппроксимации реальной АКФ. Такая аппроксимация была выполнена для всех наблюдательных 10-минутных сканов. Рисунок 4.7 показывает распределение измеренных параметров: амплитуды A и постоянной времени $\tau=1/k$. Оказалось, что в передаточной функции среды имеется два временных масштаба 4.1 мкс и 23 мкс с отношением амплитуд $A_1/A_2=0.38$. Эти значения не зависят заметным образом от величины проекции базы при почти четырехкратном изменении.

Возможным объяснением присутствия двух временных масштабов в АКФ может служить модель анизотропного рассеяния. Для этой модели полученное нами отношение постоянных времени $k_2/k_1=5.5$ дает для

отношения углов рассеяния $\theta_2/\theta_1=7.4$, а отношение амплитуд должно составить величину $A_1/A_2=0.40$, что весьма близко к полученному экспериментальному значению. Однако в течение четырёх дней вектор проекции базы изменялся в пространстве на значительный угол (около 60 градусов), и это должно было сказаться на соотношении амплитуд и постоянных времени, чего не наблюдалось.

Другим объяснением могут служить упорядоченные структуры, наблюдаемые во вторичных динамических спектрах пульсаров (см. Рис. 4.4). Предполагается, что эти структуры (параболические арки) возникают в результате интерференции между субструктурами диска рассеяния, образовавшимся путем рефракции на тонких слоях межзвездной плазмы. Эти сложные структуры существуют в широком диапазоне пространственных масштабов, что может давать два масштаба в АКФ. Однако, во вторичном спектре для исследуемого пульсара B0329+54, мы не заметили никаких признаков параболических арок. Необходимы дополнительные наблюдения для этого и других ярких пульсаров, чтобы разрешить загадку двойной структуры АКФ. Такие наблюдения запланированы в дополнительной программе научных исследований проекта РадиоАстрон на 2016-2018 гг.

4.4. Исследования близкой межзвездной турбулентной плазмы

Для разделения влияния ближней и дальней среды на рассеяние радиоизлучения пульсаров необходимо наличие высокого пространственного разрешения, которое в наших наблюдениях обеспечивает наземно-космический интерферометр РадиоАстрон. Приводимые в данном разделе результаты основаны на наблюдениях мерцаний пульсара PSR B1919+21 на частоте 324 МГц.

PSR B1919+21 - это сильный пульсар с галактическими координатами: широта 55° и долгота 3.5° , мера дисперсии $DM = 12.43$ пк/см³. Расстояние до пульсара было оценено исходя из модели Кордеса и Лазио в 1 кпк [Cordes, 2003]. По наблюдениям собственного движения пульсара в работе [Zou, 2005] были получены его скорости по двум координатам: $\mu_{\alpha} = 1.7 \pm 4$ миллисекунд дуги /год и $\mu_{\delta} = 3.2 \pm 6$ миллисекунд дуги /год.

В наблюдениях принимали участие 10-м космический радиотелескоп Радиоастрон (КРТ), 110-м телескоп в Грин Бэнке (GBT) и система апертурного синтеза в Вестерборке (WSRT). Регистрировалась полоса частот 316-332 МГц с одноразрядной оцифровкой для данных с космического аппарата и двухбитовой оцифровкой для наземных телескопов. Первичная обработка проводилась на корреляторе АКЦ ФИАН с использованием некогерентной компенсации дисперсии сигнала в полосе приемника. Данные были прокоррелированы с использованием 512 частотных каналов в двух выбранных окнах: на импульсе и вне импульса пульсара длительностью по 40 мс (3% периода пульсара, $P = 1.337$ с). Импульсное окно было центрировано к максимуму среднего профиля, а вне импульсное выбиралось на расстоянии $0.5P$ от предыдущего окна. База космического интерферометра составляла 60000 км.

На Рис. 4.8 приведены радио спектры индивидуальных сильных импульсов с разнесением по времени (время растёт снизу вверх) в секундах. В этих спектрах отчетливо видны дифракционные искажения, вызванные рассеянием радиоволн. Эти искажения имеют два частотных масштаба: мелкая структура с масштабом порядка 400 кГц и крупномасштабная порядка 1500 кГц. При малом разнесении по времени (11 с, Рис. 4.8 а и 4.8 б) тонкая структура сохраняется, а на интервале 200 с (Рис. 4.8 в и 4.8 г) изменяется. Крупная структура сохраняет свою форму.

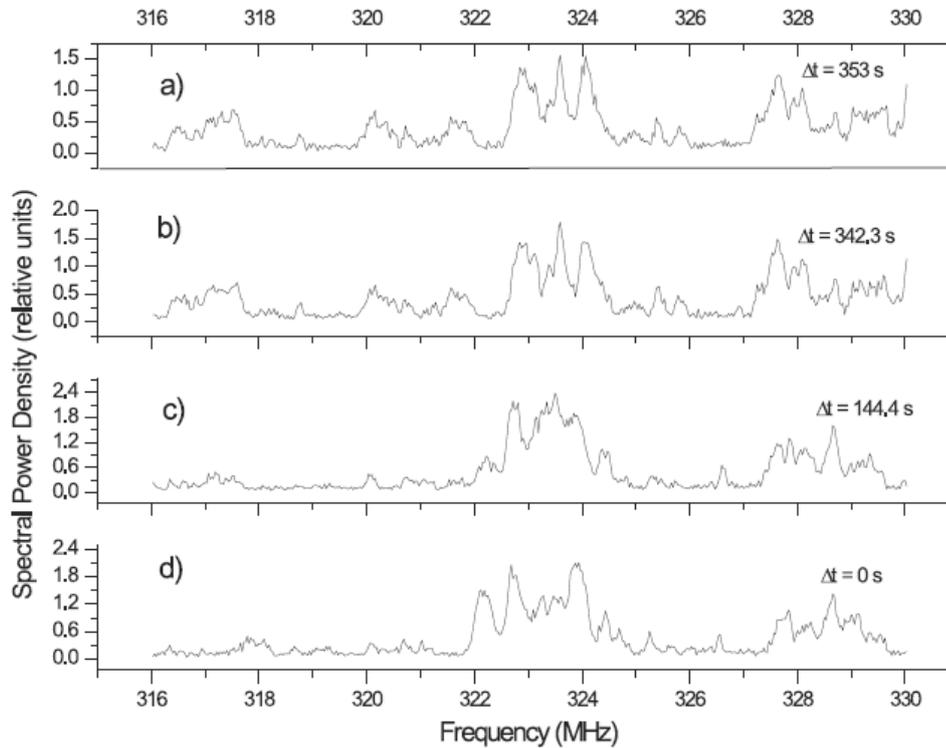


Рис. 4.8. Спектры индивидуальных импульсов пульсара, разнесенные по времени на указанное число секунд от нижнего спектра.

Корреляционный анализ динамических спектров дает нам характерные временной t_{dif} и частотный f_{dif} масштабы мерцаний. Мы получили масштабы: $f_{1,dif}=330$ кГц и $f_{1,dif}=700$ кГц (полуширина на уровне 1/2 соответствующей функции) и амплитуды 0.84 и 0.15 для мелкой и крупной структур соответственно. Эти структуры обусловлены рассеянием излучения на дальнем и ближнем слоях межзвездной плазмы.

Анализ пространственной функции когерентности для космической базы (RA-GB) позволил оценить угол рассеяния в плоскости наблюдателя: $\theta_{scat}=0.7$ миллисекунды дуги. Анализ частотно-временной корреляционной функции для слабых мерцаний дал оценку угла рефракции в направлении пульсара: $\theta_{ref}=120$ угловых мс и расстояния до призмы, $Z_{prism}<1.3$ пк.

Полезные результаты были получены путем анализа структурных функций, которые можно определить следующим образом:



На Рис. 4.9 показаны средние временная (вверху) и частотная (внизу) структурные функции (SF) для наземной базы, приведенные в двойном логарифмическом масштабе. Стрелкой отмечен излом в частотной структурной функции. Наклон временной и частотной SF отличается примерно в 2 раза (для масштабов до 250 кГц): $\beta_1=0.9 \pm 0.05$ для частотной и $\beta_2=1.7 \pm 0.05$ для временной функций. Такое соотношение между частотными и временными структурными функциями соответствует дифракционной модели формирования частотной структуры. Показатель степени для спектра флуктуаций плотности неоднородностей связан с показателем SF(t) соотношением $n = \beta + 2 = 3.7$.

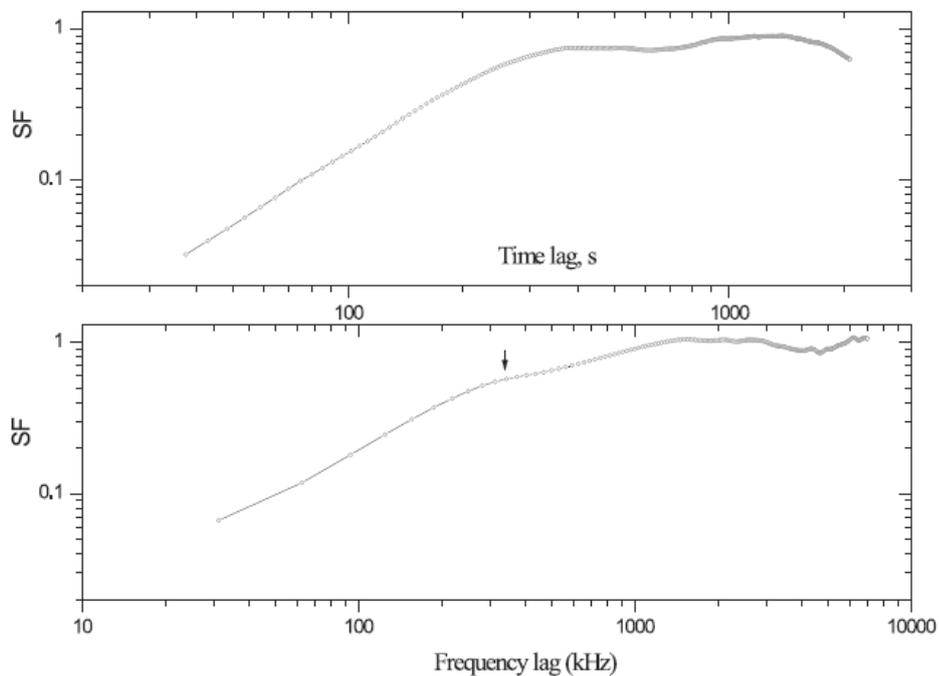


Рис. 4.9. Средние временная (вверху) и частотная (внизу) структурные функции (SF) для базы Грин Бэнк-Вестерборк (GB-WB), приведенные в двойном логарифмическом масштабе. Стрелкой отмечен сдвиг (300 кГц), при котором происходит излом в частотной структурной функции.

На Рис. 4.10 приведены средние частотные структурные функции для наземной (квадраты) и космической (кружки) баз при нулевом временном

сдвиге. Видно, что уровни, на которые выходят SF, отличаются примерно на 0.2, что соответствует относительному вкладу двух частотных масштабов в структуре спектров мерцаний. Соотношение их амплитуд согласуется с фитингом суммы двух компонент в среднюю частотную корреляционную функцию для наземной базы. Для космической базы излома в структурной функции нет, она описывает мелкомасштабную часть спектров с относительной амплитудой 0.8.

Таким образом, анализ частотно-временных и структурных функций позволил оценить пространственное распределение межзвездной плазмы на луче зрения. Было показано, что наблюдения хорошо согласуются с наличием двух экранов в этом направлении: один находится на расстоянии порядка 440 пк от наблюдателя и он вносит основной вклад в мерцания пульсара (дифракционные), а также определяет мелкомасштабную структуру в спектрах импульсов и второй - ближний, на расстоянии всего 0.13 пк, связанный со слабыми мерцаниями (крупномасштабная структура). Френелевский масштаб равен $2.5 \cdot 10^9$ см. Кроме того за ближним экраном находится призма, которая приводит к дрейфу дифракционной картины со скоростью 1.5 МГц/1000 с. Мы оценили угол рефракции как $\theta_{ref} = 12\epsilon$ угловых мс и получили верхнюю оценку для расстояния до призмы: $Z_{prism} < 1.3$ пк. Анализ пространственной функции когерентности для космической базы (RA-GB) позволил оценить угол рассеяния в плоскости наблюдателя: $\theta_{scat} = 0.7$ угловых мс. Анализ временной и частотной структурных функций дал значение показателя степени флуктуаций электронной плотности межзвездной плазмы, $n = 3.73$.

В целом, модель среды качественно повторяет модель среды, использованную нами ранее для интерпретации данных наблюдений мерцаний пульсара B0950+08. Однако, в нашем случае расстояние до фазового экрана 1 значительно больше, характерный угол рассеяния θ_{scat}

также значительно больше, поэтому мерцания пульсара 1919+21 являются сильными (насыщенными).

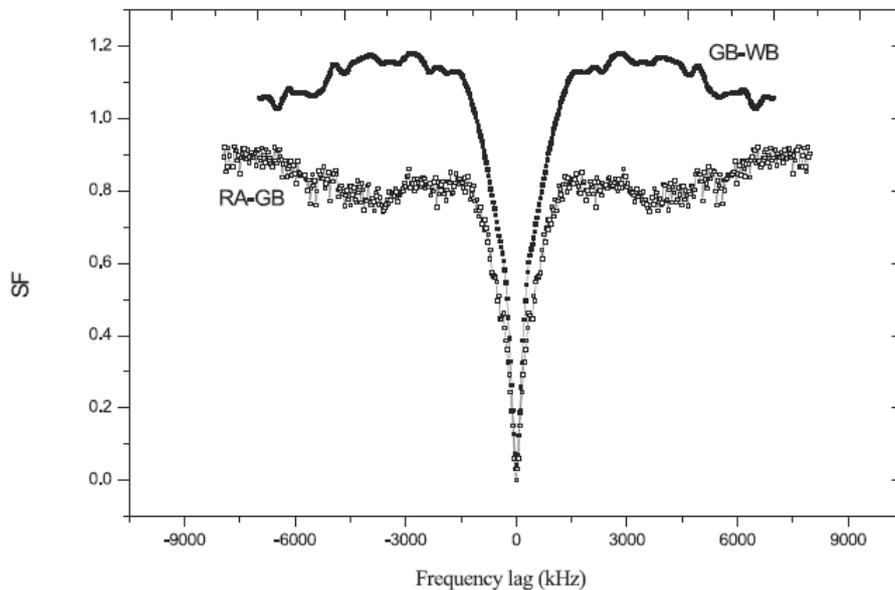


Рис. 4.10. Нормированные частотные структурные функции для наземной (GB-WB) и космической баз (RA-GB).

5. Исследование космических водяных мазеров на частоте 22 ГГц в проекте РадиоАстрон.

5.1. Первые внегалактические мазеры, зарегистрированные на базах больше диаметра Земли: NGC4258 и NGC3079.

Галактика NGC4258 (Мессье 106), находящаяся на расстоянии примерно 24 млн. световых лет в направлении созвездия Гончих Псов, является прототипом галактик, в которых наблюдается мазерное излучение в линии молекулы воды от газового аккреционного диска вокруг сверхмассивной черной дыры в центре. Это излучение наблюдается в виде многочисленных компактных деталей большой светимости, по расположению и движению которых можно исследовать структуру диска, определить расстояние до галактики.

Накачка таких мазеров может черпать энергию из рентгеновского излучения центральной части галактики. Наличие большого числа наблюдаемых компонент объясняется неустойчивостями и турбулентностью в диске. Интерферометрический отклик от компактных мазерных деталей был зарегистрирован в 2014 году на наземно-космических базах между космическим радиотелескопом проекта “Радиоастрон” и двумя наземными станциями: 100-м радиотелескопом в Грин-Бэнк (США) и 32-м телескопом в Торуне (Польша). Проекция базы интерферометра в этих наблюдениях достигала примерно 2 диаметров Земли, что соответствует угловому разрешению около 110 микросекунд дуги (Рис. 5.1).

Второй мегамазер, зарегистрированный на наземно-космическом интерферометре РадиоАстрон, находится в галактике NGC3079 (примерно 52-65 млн. световых лет в направлении созвездия Большой Медведицы). Наблюдения NGC3079 в ноябре 2014 г. с проекцией базы около 2.3 диаметра Земли (что соответствует угловому разрешению около 95 микросекунд дуги) привели к обнаружению излучения компактных мазерных деталей (Рис. 5.2).

Успешная регистрация внегалактических мазеров открыла возможность проведения исследований объектов за пределами нашей галактики методом космической интерферометрии. Этот метод позволяет многократно увеличить угловое разрешение, необходимое для определения точных положений мазеров и исследования движений газа в околоядерных дисках других галактик, что чрезвычайно важно для измерения расстояний и изучения структуры Вселенной.

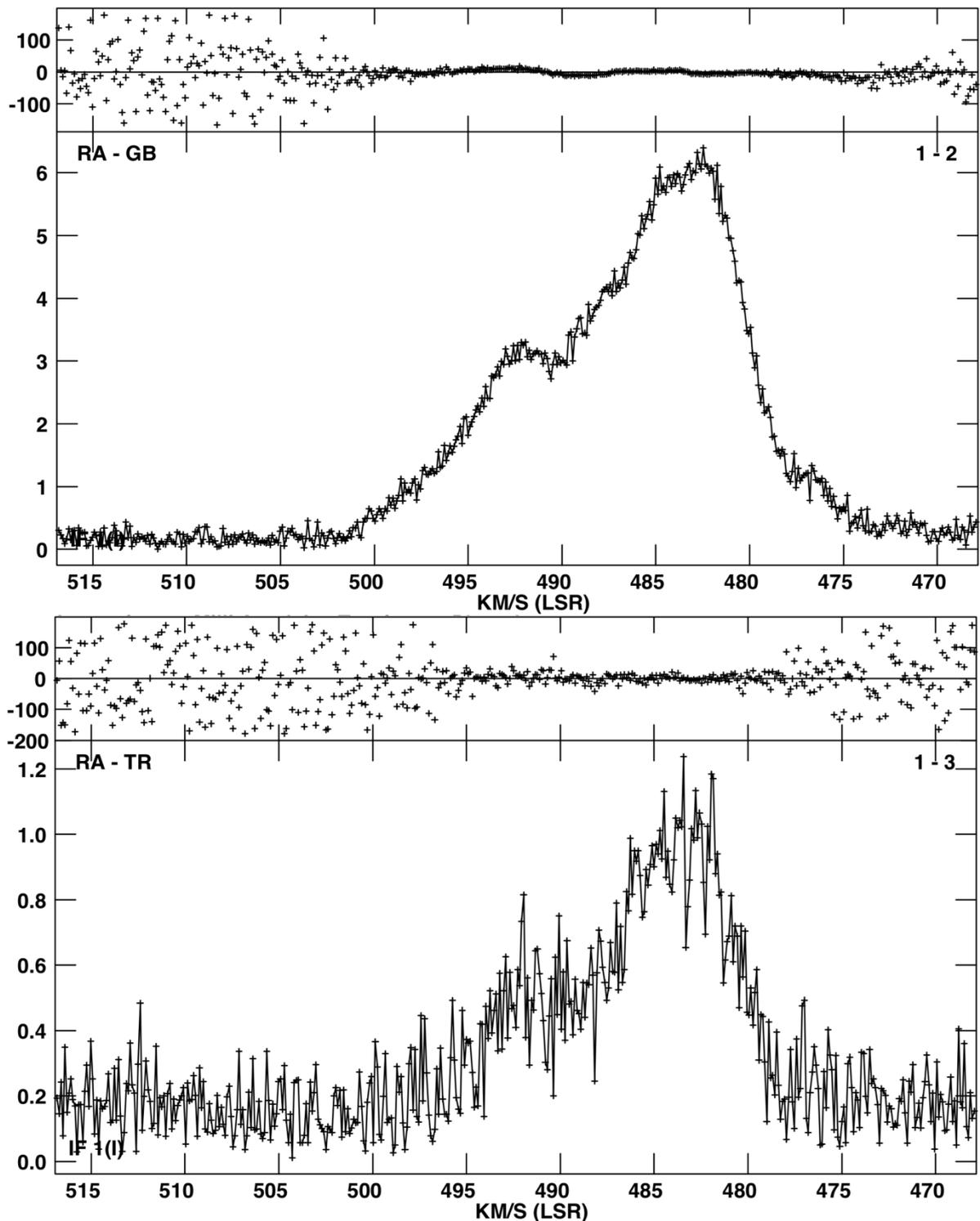


Рис. 5.1: Кросс-корреляционный спектр мегамазерного излучения NGC4258, полученный между 10-м космическим радиотелескопом (КРТ) и наземными телескопами: 100-м радиотелескопом в Грин-Бэнке (вверху) и 32-м радиотелескопом в Торунь (внизу). Упорядоченное поведение фазы (верхняя часть рисунка) указывает на диапазон скоростей, в котором зарегистрирован отклик интерферометра. В области, где интерферометрический сигнал от мазерных компонент отсутствует или теряется в шумах, фаза изменяется хаотически между соседними каналами. По осям отложены: амплитуда коррелированного сигнала в относительных единицах и фаза в градусах в зависимости от скорости спектральной детали в км/с относительно локального стандарта покоя.

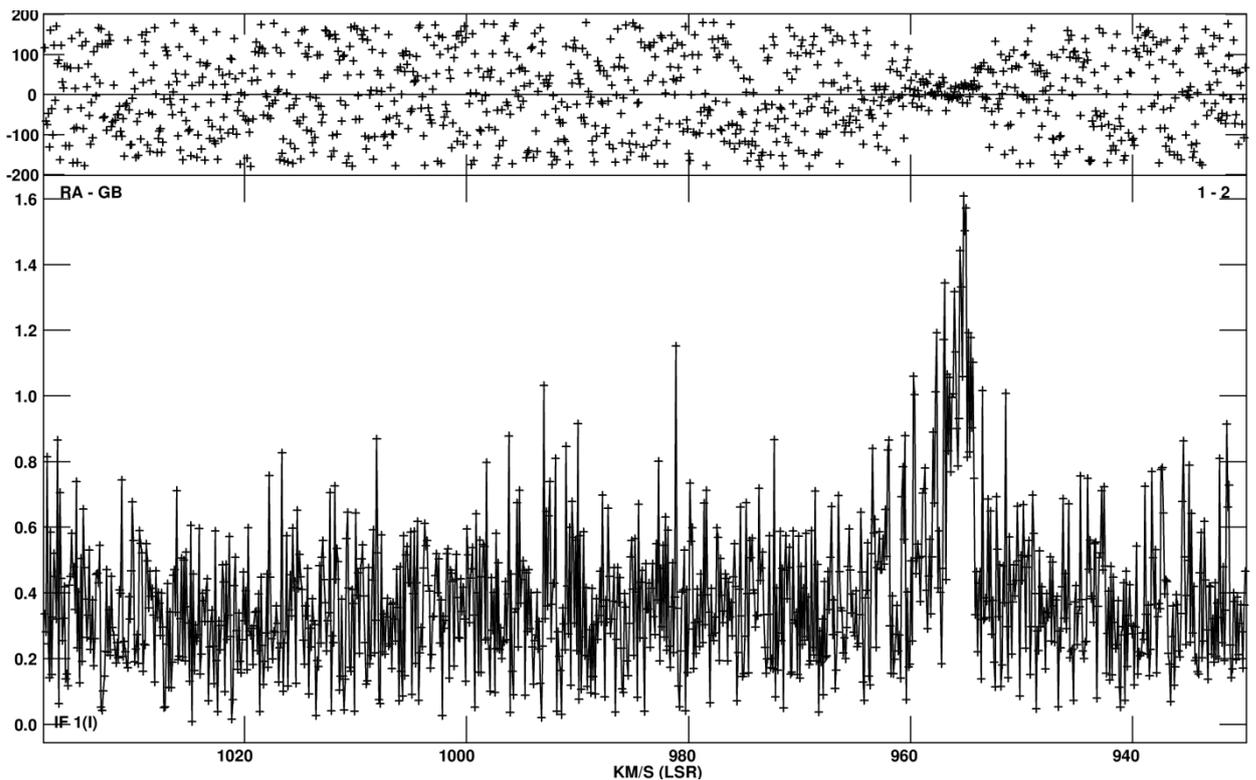


Рис. 5.2: Кросс-корреляционный спектр мегамазерного излучения NGC3079, полученный между 10-м космическим радиотелескопом (КРТ) и 100-м радиотелескопом в Грин-Бэнке 14 ноября 2014 года, максимальная проекция базы составила (обозначения осей аналогичны рисунку 1).

Мазеры в областях звездообразования Orion KL, W49 N, W3 (OH)

В рамках ключевой научной программы РадиоАстрон было обнаружено излучение от очень компактной детали водяного мазера, связанного с ближайшей к нам областью образования массивных звезд Orion KL. Она расположена на расстоянии 1370 св. лет от Солнца и является частью комплекса молекулярных облаков в созвездии Ориона. В этом источнике протекают активные процессы звездообразования, сопровождаемые мощным мазерным излучением. Компактная мазерная деталь связана со струйным истечением из аккрецирующего молодого звездного объекта. Оценки показывают, что яркостная температура мазерного излучения в этом объекте может превышать 10^{15} К.

Коррелированный сигнал был получен в двух экспериментах в ноябре-декабре 2013 г. на базе между космическим радиотелескопом Спектр-Р проекта РадиоАстрон и наземными радиотелескопами в Йебесе (Испания, 40-м), Торуне (Польша, 32-м) и 26-м телескопе около Йоханнесбурга (ЮАР). Проекция базы интерферометра во время наблюдений достигала ~ 3.5 диаметра Земли, размеры радиоинтерферометрических лепестков — ~ 63 микросекунды дуги. На расстоянии Orion KL это соответствует линейному размеру примерно в 0.03 астрономических единиц¹ (около 3 диаметров Солнца).

27 апреля 2015 были проведены новые наблюдения одного из наиболее удаленных источников мазерного излучения в линии водяного пара в Галактике — области звездообразования W49 N, находящейся на расстоянии около 36 тысяч световых лет в спиральном рукаве Персея. Совместно с космическим телескопом в эксперименте принимали участие несколько наземных телескопов, сигнал на наземно-космической базе был обнаружен с двумя наиболее чувствительными наземными антеннами из принявших участие в наблюдениях: 100-м телескопе в Эффельсберге (Германия) и 43 метровом телескопе в Йебесе (Испания). Проекция базы интерферометра во время наблюдений достигала ~ 9.7 диаметров Земли, угловое разрешение составляло рекордные для наблюдений мазеров водяного пара ~ 23 микросекунды дуги.

В результате переобработки данных экспериментов ранней научной программы с использованием улучшенных алгоритмов был обнаружен интерферометрический отклик в сеансе 2012 г. в направлении на комплекс ярких водяных мазеров в направлении W3 (OH).

Коррелированный сигнал был зарегистрирован на проекциях базы до 3.8 диаметров Земли между космическим радиотелескопом и наземными

антеннами в Эффельсберге и Йебесе, размеры радио-интерферометрических лепестков составляли ~58 микросекунд дуги.

Такие наблюдения позволят получить оценки яркостных температур и размеров мазерных источников.

5.2. Картографирование водяных мазеров.

Получены результаты картографирования водяных мазеров в области звездообразования W3 IRS5 на наземно-космическом интерферометре РадиоАстрон в рамках одной из ключевых научных программ проекта. Наблюдения состоялись 17 октября 2013 г. Совместно с РадиоАстроном в эксперименте принимали участие Европейская РСДБ сеть (EVN), включая российские телескопы системы Квazar-КВО. Значимый интерференционный сигнал получен до проекции базы в ~6 диаметров Земли. Это позволило достичь углового разрешения в 36 микросекунд дуги. Изображение самой яркой компоненты мазера в W3 IRS5 представлено на рисунке 2, слева. Изображение мазерного пятна, построенное по данным наземных телескопов (серые контуры), имеет протяженную структуру, за исключением очень компактной детали (черные контуры), видимой вплоть до 6 диаметров Земли. Анализ данных РадиоАстрона и японского интерферометра VERA позволил отождествить положение компактных деталей мазера, наблюдавшихся на наземно-космических базах (Рис. 5.3, справа). Это дает возможность исследовать структуру и физические характеристики этой области звездообразования и уточнить механизм накачки. В 2015 г. в рамках проекта РадиоАстрон проведено повторное картографирование мазеров H₂O в этой области звездообразования во время совместной сессии с участием

космического радиотелескопа и наземной сети телескопов EVN с целью получения положения компактных деталей, их размеров, формы и сравнения с данными картографирования 2013 года.

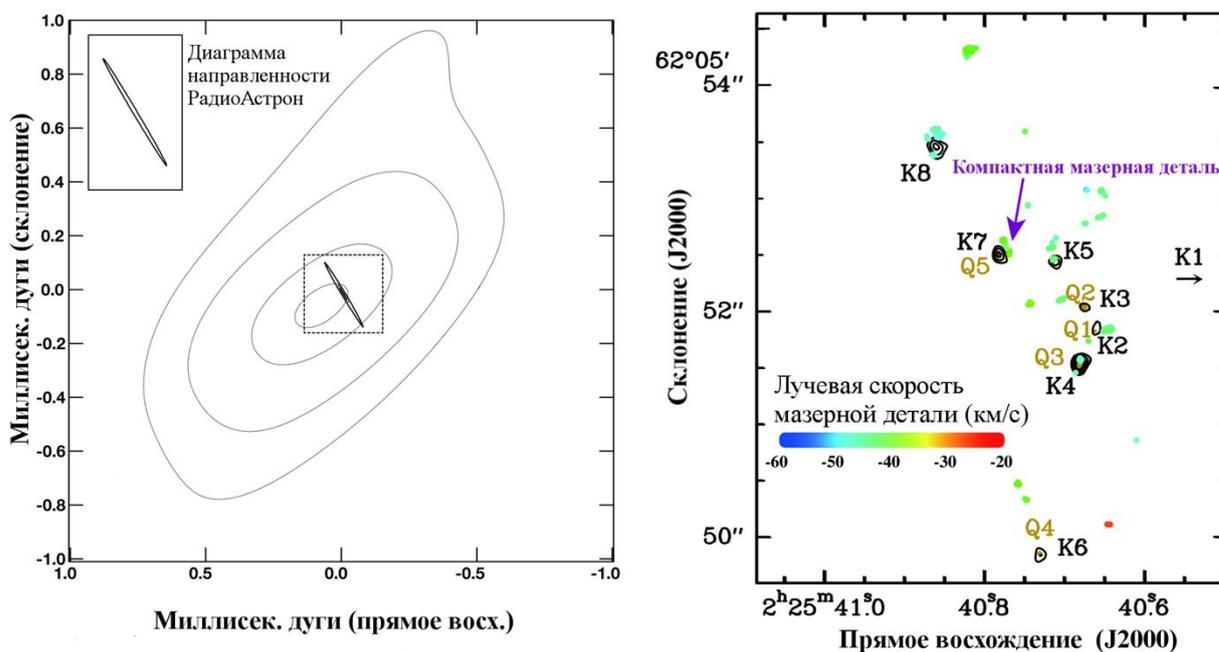


Рис. 5.3: W3 IRS5, слева: контурное изображение самого яркого мазерного пятна в линии H₂O, зарегистрированного на наземно-космических базах (данные получены во время совместного с европейской РСДБ-сетью, включая станции Кварзар-КВО, сеанса 17 октября 2013 г.). Карта построена в узком диапазоне лучевых скоростей (0.1 км/с), соответствующих максимуму излучения наиболее яркой детали спектра. Серые и черные контуры показывают распределение яркости, полученное только на наземных базах и только на наземно-космических базах соответственно. Синтезированная диаграмма направленности наземно-космического интерферометра показана в верхнем левом углу изображения. Боковые лепестки, достигающие в наземно-космическом изображении уровня в 60 % от величины истинного пика в центре, не показаны во избежание путаницы. Справа показана карта распределения мазерных деталей в W3 IRS5, полученная в наблюдениях японского интерферометра VERA. Коричневые и черные контуры показывают распределение яркости 7-мм и 13-мм континуумного излучения, соответственно (van der Tak et al. 2005). Положение самой яркой из компактных деталей, обнаруженных на РадиоАстроне, показано стрелкой.

За время работы интерферометра было проведено более 135 наблюдательных сессий во время которых наблюдались 19 (6 успешно) мазеров в областях звездообразования в нашей галактике, 8 мазеров (0 успешно) в оболочках звезд поздних типов и 4 (2 успешно) внегалактических источника мазерного излучения (всего 31 объект, 10 успешно). В 24 сессиях

зарегистрировано мазерное излучение на проекциях баз, заметно превышающих диаметр Земли.

6. Заключение

6.1. Представлены наблюдения квазара 3C273, выполненные при участии космической РСДБ миссии РадиоАстрон на проекциях баз, достигающих 171000 км, которые обнаруживают наличие структуры на масштабах до 26 микросекунд дуги (2.7 световых месяца) и яркостной температуры 10^{13} К. Эти измерения бросают вызов нашему современному пониманию нетеплового непрерывного излучения в окрестностях сверхмассивных черных дыр и требуют либо намного более высоких скоростей струи, чем наблюдаемые, либо постоянного ускорения релятивистской плазмы, которое должно иметь место на расстоянии нескольких парсек от центральной машины. Помимо 3C273 проводятся измерения яркостных температур многих других источников в рамках обзора ядер активных галактик в проекте РадиоАстрон. На наземно-космических базах на сегодняшний день успешно продетектировано 160 квазаров. Значения измеренных яркостных простираются до 10^{14} К и даже выше – принципиально меняя предыдущие и современные результаты РСДБ обзоров активных галактик, проводимые на наземных интерферометрах.

6.2. Ковалев и др. (2015) сообщают об обнаружении РадиоАстроном классического квазара 3C273 на интерференционных базах до 171000 км, которые предполагают яркостные температуры, превышающие ожидаемые пределы «катастрофы обратного комптон-эффекта" на два порядка

величины. Показано, что на 18 см, эти оценки, скорее всего, возникают вследствие существования рефракционной субструктуры, вызванной рассеянием в межзвездной среде. Рассеивающие свойства использованы для оценки истинной яркостной температуры, составившей 7×10^{12} К. Эта яркостная температура примерно в 15 раз ниже оценок, полученных без учета субструктуры. Такая температура согласуется с ожидаемыми теоретическими пределами. При наблюдениях на длине волны 6 см, субструктура существенно влияет на измеренные значения, но при этом дает яркостную температуру, сравнимую со значениями, получаемыми в моделях, не учитывающих субструктуру. На длине волны 1.3 см, субструктура не оказывает влияния на получаемые чрезвычайно высокие яркостные температуры, составляющие примерно 10^{13} - 10^{14} К.

6.3. Российский космический радиотелескоп «Спектр-Р» совместно с 15 наземными радиотелескопами из России (сеть «Квазар-КВО»), Европы и США, во время наблюдений активного ядра галактики в созвездии Ящерицы, объекта VL Lacertae, получил изображения с самым высоким угловым разрешением в истории астрономии. Учёные смогли разглядеть на них особенности структуры джетов – гигантских струй вещества, которые выбрасывает сверхмассивная черная дыра в центре этой галактики, и восстановить структуру магнитного поля. В ходе сеанса наблюдений, проведённого на самой короткой длине волны интерферометра (1,3 см) ученые смогли добиться рекордного углового разрешения – 21 микросекунда дуги.

6.4. Космические РСДБ наблюдения квазара TXS 0642+449 (ОН 471) с высоким красным смещением, выполненные на длине волны 18 см (частота

1.6 ГГц) в рамках ранней научной программы миссии РадиоАстрон, были использованы для тестирования работы орбитального космического радиотелескопа (КРТ) в поляриметрическом режиме наблюдений с целью разработки методологии проведения полностоксовой поляриметрии с космическим РСДБ на частоте 1.6 ГГц и изучения поляризованного излучения наблюдаемого объекта на субмиллисекундных масштабах.

Установлено, что амплитуда инструментальной поляризация КРТ на 18 см составляет не более 9%, отражая высокую надежность поляризационного картографирования с РадиоАстроном на данной длине волны. Получено поляризационное изображение 0642+449 с разрешением 0.8 мсек дуги. Изображение показывает компактную структуру типа ядро-выброс с низким ($\approx 2\%$) уровнем поляризации и преимущественно поперечным магнитным полем в ядерной области. Обнаружена сложная структура ядерной области, с двумя яркими деталями, возможно, соответствующими основанию выброса и сильной реколламинационной волне. Максимальная яркостная температура в основании струи составила 4×10^{13} К.

6.5. Было проведено картографирование источника 3C84 на частотах 5 и 22 ГГц с наземной решеткой из 25 телескопов, включая Европейскую РСДБ сеть вместе с Российской Квазар-КВО, Калязин, Корейскую РСДБ сеть, Американские телескопы GBT, VLBA, фазированная VLA. Сигнал наземно-космического интерферометра успешно зарегистрирован для интервала проекций баз интерферометра от 0.2 до примерно 7 диаметров Земли в обоих диапазонах.

Впервые удалось явно показать существование контр-джета (выброс на Север) на масштабах суб-парсеков. Джет и контр-джет разрешены поперек, угловое разрешение карты составляет примерно 50 микросекунд дуги или

500 радиусов Шварцшильда. Детали в структуре струи у ее основания позволяют подробно изучать процесс формирования джета в районе центральной сверхмассивной черной дыры и аккреционного диска. Можно видеть уярчение к краям для джета и контр-джета, это важный уникальный результат для понимания природы выброса. Он указывает на стратификацию течения плазмы – эффект, крайне редко видимый в прямых наблюдениях. На Юге в конце джета выделяется пятно, его яркость оказалась экстремальной для такого далекого расстояния от центральной машины галактики. Возможно зарегистрирован эффективный разогрев релятивистской плазмы за счет взаимодействия с окружающей средой на фронте ударной волны.

6.6. На максимальных базах интерферометра (50000-250000 км) обнаружена и исследована субструктура диска рассеяния радиоизлучения пульсаров. Такая субструктура обусловлена действием межзвездного интерферометра с эффективной базой около одной астрономической единицы и с эффективным угловым разрешением лучше миллионной доли угловой секунды. Было показано другими исследователями, что действие этого интерферометра распространяется и на другие радиоисточники (не только пульсары) и позволяет детектировать в этих источниках сверхкомпактные детали структуры. Так, например, был обнаружен компактный источник в центре нашей Галактики.

6.7. Угловой диаметр кружка рассеяния был измерен для нескольких пульсаров благодаря высокой разрешающей силе наземно-космического интерферометра Радиоастрон. Для этих пульсаров получены оценки локализации рассеивающих слоев межзвездной плазмы; положение этих

слоев коррелирует со спиральной структурой Галактики или с конкретными галактическими туманностями.

6.8. С помощью разработанного нами метода анализа параметров структурных функций мерцаний радиоизлучения пульсаров в спектральной и во временной областях на наземных и наземно-космических базах выявлены близкие к солнечной системе слои плазмы, которые ранее постулировались для объяснения быстрой переменности компактных внегалактических источников: активных галактических ядер и квазаров.

6.9. Измеренные параметры корреляционной функции интерферометрического отклика указывают на наличие двух временных шкал в функции отклика среды, что, в свою очередь, свидетельствует о неізотропной структуре неоднородностей межзвездной плазмы, по-видимому, обусловленной влиянием магнитного поля.

6.10. Наблюдения мазеров воды и гидроксила с помощью РадиоАстрон показали, что яркие детали в галактических областях звездообразования не полностью разрешаются даже на проекциях баз, значительно превышающих диаметр Земли. Рекордное угловое разрешение для мазерных наблюдений на текущий момент полученное при наблюдениях водяного мазера в W49N составляет 23 микросекунды дуги (соответствует проекции базы в 9.7 диаметра Земли).

6.11. Очень компактные мазерные детали с угловыми размерами в 20-60 микросекунд дуги обнаружены в нескольких областях звездообразования.

Это соответствует линейным размерам в 5-10 миллионов километров (несколько солнечных диаметров).

6.12. Оценки наблюдаемых яркостных температур лежат в диапазоне от 10^{13} до 10^{16} К

Публикации миссии РадиоАстрон за 2014-2016 гг.

Публикации в реферируемых журналах

- PSR B0329+54: Statistics of Substructure Discovered within the Scattering Disk on RadioAstron Baselines of up to 235,000 km.
Gwinn, C. R., Popov, M. V., Bartel, N., Andrianov, A. S., Johnson, M. D., Joshi, B. C., Kardashev, N. S., Karuppusamy, R., Kovalev, Y. Y., Kramer, M., Rudnitskii, A. G., Safutdinov, E. R., Shishov V. I., Smirnova T. V., Soglasnov V. A., Steinmassl, S. F., Zensus, J. A., & Zhuravlev, V. I.
Astrophysical Journal, **822**, 2, 96 (2016)
- Исследование космической плазмы по данным РСДБ-наблюдений гигантских импульсов пульсара B0531+21 в проекте "РадиоАстрон".
Рудницкий, А. Г., Каруппусами, Р., Попов, М. В., & Согласнов, В. А.
Астрономический Ж., **93**, 167 (2016)
Studies of Cosmic Plasma using RadioAstron VLBI Observations of Giant Pulses of the Pulsar B0531+21.
Rudnitskiy, A. G, Karuppusamy, R., Popov, M. V., & Soglasnov, V. A.
Astronomy Reports, **60**, 211 (2016)

- Probing the Innermost Regions of AGN Jets and Their Magnetic Fields with RadioAstron. I. Imaging BL Lacertae at 21 Microarcsecond Resolution.
Gomez, J. L., Lobanov, A. P., Bruni, G., Kovalev, Y. Y., Marscher, A. P., Jorstad, S. G., Mizuno, Y., Bach, U., Sokolovsky, K. V., Anderson, J. M., Galindo, P., Kardashev, N. S., & Lisakov, M. M.
 Astrophysical Journal, **817**, 96 (2016)
- RadioAstron Observations of the Quasar 3C273: a Challenge to the Brightness Temperature Limit.
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, Yu. A., Lisakov, M. M., Petrov, L. Yu., Romney, J. D., Salter, C. J., & Sokolovsky, K. V.
 Astrophysical Journal Letters, **820**, L9 (2016)
- Extreme Brightness Temperatures and Refractive Substructure in 3C273 with RadioAstron.
Johnson, M. D., Kovalev, Y. Y., Gwinn, C. R., Gurvits, L. I., Narayan, R., Macquart, J. P., Jauncey, D. L., Voitsik, P. A., Anderson, J. M., Sokolovsky, K. V., & Lisakov, M. M.
 Astrophysical Journal Letters, **820**, L10 (2016)
- RadioAstron Space VLBI Imaging of Polarized Radio Emission in the High-Redshift Quasar 0642+449 at 1.6 GHz.
Lobanov, A. P., Gomez, J. L., Bruni, G., Kovalev, Y. Y., Anderson, J., Bach, U., Kraus, A., Zensus, J. A., Lisakov, M. M., Sokolovsky, K. V., & Voytsik, P. A.

Astronomy & Astrophysics, **583**, A100 (2015)

- Результаты испытаний радиоинтерферометра с нулевой базой в проекте "Радиоастрон".

Бирюков, А. В.

Космические исследования, **53**, 183 (2015)

Test Results of Radio Interferometer with Zero Base in the RadioAstron Project.

Biryukov, A. V.

Cosmic Research, **53**, 171 (2015)

- Формат данных и моды наблюдений интерферометра "Радиоастрон".

Андреянов, В. В.

Космические исследования, **53**, 195 (2015)

Data Format and Observational Modes for the RadioAstron Interferometer.

Andreyanov, V. V.

Cosmic Research, **53**, 182 (2015)

- Управление и контроль функционирования бортового комплекса научной аппаратуры космического радиотелескопа.

Бургин, М. С., Войцик, П. А., Кутькин, А. М., Лисаков, М. М., Миронова, Е. Н., Соколовский, К. В., & Фадеев Е. Н.

Космические исследования, **53**, 199 (2015)

Monitoring and Control of Onboard Scientific Equipment of the Space Radio Telescope.

Burgin, M. S., Voytsik, P. A., Kutkin, A. M., Lisakov, M. M., Mironova, E. N.,

Sokolovsky, K. V., & Fadeev, E. N.

Cosmic Research, **53**, 186 (2015)

- Исследование бортовой квантовой шкалы времени в условиях орбитального полета космического радиотелескопа проекта "Радиоастрон".

Зиновьев, А. Н.

Космические исследования, **53**, 207 (2015)

Investigation of Onboard Quantum Time Scale for Orbital Flight of a Space Radio Telescope (the RadioAstron Project).

Zinoviev, A. N.

Cosmic Research, **53**, 193 (2015)

- Первая оценка величины инструментальной поляризации космического радиотелескопа "Радиоастрон" по результатам ранней научной программы наблюдений активных ядер галактик.

Пащенко, И. Н., Ковалев, Ю. Ю., & Войцик, П. А.

Космические исследования, **53**, 214 (2015)

First Estimate of the Value of the Instrumental Polarization of the RadioAstron Space Radio Telescope Using the Results of an Early Scientific Program for Observing Active Galactic Nuclei.

Pashchenko, I. N., Kovalev, Yu. Yu., & Voitsik, P. A.

Cosmic Research, **53**, 199 (2015)

- Использование наземных РСДБ станций Евпатория-Симеиз-Пушино в проекте "Радиоастрон".

Вольвач, А. Е., Костенко, В. И., Ларионов, М. Г., Вольвач, Л. Н., Муха, Д.

М., Набатов, А. С., Резниченко, А. М., Каневский, Б. З., & Коваленко, А. В.

Космические исследования, **53**, 225 (2015)

Testing of the Ground-based VLBI Stations Yevpatoria-Simeiz-Pushchino of the RadioAstron Mission.

Volvach, A. E., Kostenko, V. I., Larionov, M. G., Volvach, L. N., Mucha, D. M., Nabatov, A. S., Reznichenko, A. M., Kanevsky, B. Z., & Kovalenko, A. V.

Cosmic Research, **53**, 209 (2015)

- Пакет *fakerat* в международном интерферометрическом проекте "Радиоастрон" со сверхдлинными наземно-космическими базами.

Журавлев, В. И.

Космические исследования, **53**, 231 (2015)

Fakerat Software in the International Interferometric RadioAstron Project with very Long Ground-Space Bases.

Zhuravlev, V. I.

Cosmic Research, **53**, 216 (2015)

- Создание и развитие программного комплекса для планирования наблюдений в проекте "Радиоастрон".

Якимов, В. Е.

Космические исследования, **53**, 242 (2015)

Creation and Development of the Software Complex for Scheduling Observations in the RadioAstron Project.

Yakimov, V. E.

Cosmic Research, **53**, 226 (2015)

- PSR B0329+54: Substructure in the Scatter-broadened Image Discovered with RadioAstron on Baselines of up to 235,000 km.

Popov, M. V., Andrianov, A. S., Bartel, N., Gwinn, C. R., Johnson, M. D., Joshi, B. C., Kardashev, N. S., Karuppusamy, R., Kovalev, Y. Y., Kramer, M., Rudnitskii, A. G., Safutdinov, E. R., Shishov, V. I., Smirnova, T. V., Soglasnov, V. A., Zensus, J. A., & Zhuravlev, V. I.

Astrophysical Journal, submitted; preprint arXiv:1501.04449 (2015)
- RadioAstron as a Target and as an Instrument: Enhancing the Space VLBI Mission's Scientific Output.

Duev, D.A., Zakhvatkin, D.A., Stepanyants, V.A., Calves, G. M., Pogrebenko, S.V., Gurvits, L.I., Cimo, G., & Bocanegra Bahamon, T.M.

Astronomy & Astrophysics, **573**, A99 (2015)
- Измерение гравитационного красного смещения с помощью космического радиотелескопа "РадиоАстрон".

Бирюков, А. В., Кауц, В. Л., Кулагин, В. В., Литвинов, Д. А., & Руденко, В. Н.

Астрономический Ж., **91**, 887 (2014)

Gravitational Redshift Test with the Space Radio Telescope "RadioAstron".

Biriukov, A. V., Kauts, V. L., Kulagin, V. V., Litvinov, D. A., & Rudenko, V. N.

Astronomy Reports, **58**, 783 (2014)
- Наземно-космический радиоинтерферометр "РАДИОАСТРОН".

Андреянов, В. В., Кардашев, Н. С., & Хартов, В. В.

Космические исследования, **52**, 353 (2014)

Space-Ground Radio Interferometer RadioAstron.

Andreyanov, V. V., Kardashev, N. S., & Khartov, V. V.

Cosmic Research, **52**, 319 (2014)

- Особенности управления миссией "РАДИОАСТРОН".

*Хартов, В. В., Ширшаков, А. Е., Артюхов, М. И., Казакевич, Ю. В.,
Воробьев, А. З., Калашников, А. И., Погодин, А. В., Филиппова, Е. Н., &
Комовкин, С. В.*

Космические исследования, **52**, 360-365 (2014)

Features of RadioAstron Mission Control.

*Khartov, V. V., Shirshakov, A. E., Artyukhov, M. I., Kazakevich, Yu. V.,
Vorob'ev, A. Z., Kalashnikov, A. I., Pogodin, A. V., Filippova, E. N., &
Kotovkin, S. V.*

Cosmic Research, **52**, 326 (2014)

- Проектирование орбиты космического аппарата "СПЕКТР-Р" для наземно-космического интерферометра .

*Кардашев, Н. С., Крейсман, Б. Б., Погодин, А. В., Пономарев, Ю. Н.,
Филиппова, Е. Н., & Шейхет, А. И.*

Космические исследования, **52**, 366 (2014)

Orbit Design for the Spektr-R Spacecraft of the Ground-Space Interferometer.

*Kardashev, N. S., Kreisman, B. B., Pogodin, A. V., Ponomarev, Yu. N.,
Filippova, E. N., & Sheikhet, A. I.*

Cosmic Research, **52**, 332 (2014)

- Навигационное обеспечение научной миссии "РАДИОАСТРОН".
Захваткин, М. В., Пономарев, Ю. Н., Степаньянц, В. А., Тучин, А. Г., & Заславский, Г. С.
 Космические исследования, **52**, 376 (2014)
 Navigation Support for the RadioAstron Mission.
Zakhvatkin, M. V., Ponomarev, Yu. N., Stepan'yants, V. A., Tuchin, A. G., & Zaslavskiy, G. S.
 Cosmic Research, **52**, 342 (2014)
- Коррекция траектории движения космического аппарата "СПЕКТР-Р".
Заславский, Г. С., Степаньянц, В. А., Тучин, А. Г., Погодин, А. В., Филиппова, Е. Н., & Шейхет, А. И.
 Космические исследования, **52**, 387 (2014)
 Trajectory Correction of the Spektr-R Spacecraft Motion.
Zaslavskiy, G. S., Stepan'yants, V. A., Tuchin, A. G., Pogodin, A. V., Filippova, E. N., & Sheikhet, A. I.
 Cosmic Research, **52**, 353 (2014)
- Работа системы ориентации космического аппарата "СПЕКТР-Р".
Лисаков, М. М., Войнаков, С. М. Сыров, А. С., Соколов, В. Н., Добрынин, Д. А., Шатский, М. А., Камальдинова, Р. А., Сосновцев, В.В., Рябогин, Н. В., Вьюнитская, Т. Б., & Филиппова, Е. Н.
 Космические исследования, **52**, 399 (2014)
 Operation of the Spektr-R Orientation System.

Lisakov, M. M., Voinakov, S. M., Syrov, A. S., Sokolov, V. N., Dobrynin, D. A., Shatsky, M. A., Kamaldinova, R. A., Sosnovtsev, V. V., Ryabogin, N. V., Vyunitskaya, T. B., & Filippova, E. N.
Cosmic Research, **52**, 365 (2014)

- Функциональные ограничения на ориентацию бортовых и наземных средств в проекте "РАДИОАСТРОН".

Войнаков, С. М., Филиппова, Е. Н., Шейхет, А. И., & Якимов, В. Е.
Космические исследования, **52**, 408 (2014)

Functional Restrictions on the Orientation of Onboard and Ground Methods in the RadioAstron Project.

Voinakov, S. M., Filippova, E. N., Sheikhet, A. I., & Yakimov, V. E.
Cosmic Research, **52**, 373 (2014)

- Вопросы обеспечения точности конструкции космического радиотелескопа проекта "РАДИОАСТРОН".

Федорчук, С. Д., & Архипов, М. Ю.
Космические исследования, **52**, 415 (2014)

On the Assurance of the Design Accuracy of the Space Radio Telescope RadioAstron.

Fedorchuk, S. D., & Arkhipov, M. Yu.
Cosmic Research, **52**, 379 (2014)

- Комплекс работ по численному моделированию динамики конструкции космического радиотелескопа проекта "РАДИОАСТРОН".
Архипов, М. Ю., & Телепнев, П. П.
 Космические исследования, **52**, 418 (2014)

System of Works on Numerical Modeling of the dynamics of the Structure of the Space Radiotelescope in the RadioAstron Pproject .
Arkhipov, M. Yu., & Telepnev, P. P.
 Cosmic Research, **52**, 382 (2014)
- Система обеспечения теплового режима космического радиотелескопа.
Тулин, Д. В., Виноградов, И. С., Шабарчин, А. Ф., Привезенцев, А. С., & Гончаров, К. А.
 Космические исследования, **52**, 423 (2014)

System of Maintaining the Thermal Regime of a Space Radio Telescope.
Tulin, D. V., Vinogradov, I. S., Shabarchin, A. F., Privezentsev, A. S., & Goncharov, K. A.
 Cosmic Research, **52**, 386 (2014)
- Численное моделирование температурных деформаций космического радиотелескопа "РАДИОАСТРОН".
Архипов, М. Ю., Виноградов, И. С., Новиков, С. Б., & Федорчук, С. Д.
 Космические исследования, **52**, 428 (2014)

Numerical Modeling of RadioAstron SRT Temperature Deformations.
Arkhipov, M. Yu., Vinogradov, I. S., Novikov, S. B., & Fedorchuk, S. D.

Cosmic Research, **52**, 391 (2014)

- Проект "РАДИОАСТРОН". Измерения и анализ основных параметров космического телескопа в полете в 2011-2013 гг.

Ковалев, Ю. А., Васильков, В. И., Попов, М. В., Соголаснов, В. А., Войцик, П. А., Лисаков, М. М., Кутькин, А. М., Николаев, Н. Я., Нижепьский, Н. А., Жеканис, Г. В., & Цыбулев, П. Г.

Космические исследования, **52**, 430 (2014)

The RadioAstron Project: Measurements and Analysis of Basic Parameters of Space Telescope in Flight in 2011-2013.

Kovalev, Yu. A., Vasil'kov, V. I., Popov, M. V., Soglasnov, V. A., Voitsik, P. A., Lisakov, M. M., Kut'kin, A. M., Nikolaev, N. Ya., Nizhel'skii, N. A., Zhekanis, G. V., & Tsybulev, P. G.

Cosmic Research, **52**, 393 (2014)

- Блок антенных облучателей для проекта "РАДИОАСТРОН".

Турьгин М. С.

Космические исследования, **52**, 440 (2014)

Antenna Feed Unit for the RadioAstron Project.

Turygin M. S.

Cosmic Research, **52**, 403 (2014)

- "РАДИОАСТРОН": итоги выполнения ранней научной программы исследований объектов Вселенной со сверхвысоким угловым разрешением.

Кардашев, Н. С., Алакоз, А. В., Ковалев, Ю. Ю., Попов, М. В., Соболев, А.

М., & Соколовский, К. В.

Вестник НПО им. С.А. Лавочкина, No.3, 4 (2014)

Radioastron: Main Results of the Implementation of the Early Science Program in Studies of Astronomical Objects

in the Universe with Ultra-High Angular Resolution.

Kardashev, N. S., Alakoz, A. V., Kovalev, Y. Y., Popov, M. V., Sobolev, A. M., & Sokolovsky K. V.

Solar System Research, **49**, No. 7, 573 (2015)

- Проектирование орбиты космического аппарата "СПЕКТР-Р" для наземно-космического интерферометра.

Кардашев Н.С., Хартов В.В., Крейсман Б.Б., Погодин А.В., Пономарев Ю.Н., Филиппова Е.Н., Шейхет А.И.

"SPEKTR-R" Spacecraft Orbit Design for Ground-Space Interferometer.

Kardashev, N. S., Khartov, V. V., Kreisman, B. B., Pogodin, A. V., Ponomarev, Yu. N., Filippova, E. N., & Sheikhet, A. I.

Вестник НПО им. С.А. Лавочкина, No.3, 37 (2014)

- Наземная станция слежения. Проект "РАДИОАСТРОН".

Каневский, Б. З., Смирнов, А. И., Сазанков, С. В., Белоусов, К. Г., Шацкая, М. В., Абрамов, А. А., Селиверстов, С. И., Лихачев, С. Ф., Федоров, Н. А., Коваленко, А. В., Черный, Р. А., Суворин, Д. И., Логвиненко, С. В., Орешко, В. В., Исаев Е. А., Думский, Д. В., Кирпиченков, А. И., Скрипкин, А. А., Коган, Б. Л., & Зелезецкий, А. Л.

The Earth-based Tracking Station. "RADIOASTRON" Project.

Kanevskiy, B. Z., Smirnov, A. I., Sazankov, S. V., Belousov, K. G., Shatskaya, M. V., Abramov, A. A., Seliverstov, S. I., Likhachev, S. F., Fedorov, N. A., Kovalenko, A. V., Cherny, R. A., Suvorin, D. I., Logvinenko, C. B., Oreshko, V.

V., Isaev, E. A., Dumckiy, D. V., Kirpichenkov, A. I., Skripkin, A. A., Kogan, B. L., & Zelezetskiy, A. L.

Вестник НПО им. С.А. Лавочкина, No.3, 47 (2014)

- Корреляционная обработка данных наземно-космического интерферометра "РАДИОАСТРОН".

Андрианов, А. С., Гурин, И. А., Жаров, В. Е., Костенко, В. И., Лихачев, С. Ф., & Шацкая, М. В.

Correlator of the FIAN Astro Space Center in "RADIOASTRON" Mission.

Andrianov, A. S., Guirin, I. A., Jarov, V. E., Kostenko, V. I., Likhachev, S. F., & Shatskaya, M. V.

Вестник НПО им. С.А. Лавочкина, No.3, 55 (2014)

- Система регистрации радиоастрономических данных.

Белоусов, К. Г., Дронова, О. Б., Лихачев, С. Ф., & Чибисов, А.В.

Device for Recording of Radioastronomical Data.

Belousov, K. G., Dronova, O. B., Likhachev, S. F., & Chibisov, A. V.

Вестник НПО им. С.А. Лавочкина, No.3, 60 (2014)

- Развитие центра обработки научной информации проекта "РАДИОАСТРОН".

Шацкая, М. В., Абрамов, А. А., Гурин, И. А., Костенко, В. И., Лихачев, С. Ф., Селиверстов, С.И., & Федоров, Н. А.

Development of Data Processing Center of "RADIOASTRON" Project.

Shatskaya, M. V., Abramov, A. A., Guirin, I. A., Kostenko, V. L., Likhachev, S. F., Seliverstov, S. I., & Fedorov, N. A.

Вестник НПО им. С.А. Лавочкина, No.3, 65 (2014)

- Функциональные ограничения на ориентацию бортовых и наземных средств в проекте "РАДИОАСТРОН".

Войнаков, С. М., Филиппова, Е. Н., Шейхет, А. И., & Якимов, В. Е.

Functional Constraints for Orientation of Onboard and Ground Aids for "RADIOASTRON" Project.

Voinakov, S. M., Filippova, E. N., Sheikhet, A. I., & Yakimov V. E.

Вестник НПО им. С.А. Лавочкина, No.3, 85 (2014)

[[Article pdf](#)]

- К вопросу о численном моделировании динамики конструкции космического аппарата "СПЕКТР-Р".

Архипов, М. Ю., Телепнев, П. П., & Кузнецов, Д. А.

On the Question of Numerical Simulation of "СПЕКТР-Р" Spacecraft Structure Dynamics.

Arhipov, M. Yu., Telepnev, P. P., Kuznetsov D. A.

Вестник НПО им. С.А. Лавочкина, No.3, 96 (2014)

- RadioAstron Studies of the Nearby, Turbulent Interstellar Plasma with the Longest Space-Ground Interferometer Baseline.

Smirnova, T. V., Shishov, V. I., Popov, M. V., Gwinn, C. R., Anderson, J. M.,

Andrianov, A. S., Bartel, N., Deller, A., Johnson, M. D., Joshi, B. C.,

Kardashev, N. S., Karuppusamy, R., Kovalev, Y. Y., Kramer, M., Soglasnov, V.

A., Zensus, J. A., Zhuravlev, V. I.

Astrophysical Journal, 786, 115 (2014)

- RadioAstron gravitational redshift experiment: status update.
Litvinov, D. A., Bach, U., Bartel, N., Belousov, K. G., Bietenholz, M., Biriukov, A. V., Cimo, G., Duev, D. A., Gurvits, L. I., Gusev, A. V., Haas, R., Kauts, V. L., Kanevsky, B. Z., Kovalenko, A. V., Kronschnabl, G., Kulagin, V. V., Lindqvist, M., Molera, Calves, G., Neidhardt, A., Ploetz, C., Pogrebenko, S. V., Porayko, N. K., Rudenko, V. N., Smirnov, A. I., Sokolovsky, K. V., Stepanyants, V. A., Yang, J., & Zakhvatkin, M. V.
Submitted to the 14th Marcel Grossmann Meeting Proceedings,
arXiv:1605.05832 (2016)
- Measurement of the Gravitational Redshift Effect with RadioAstron Satellite.
Birukov, A. V., Kauts, V. L., Litvinov, D. A., Porayko, N. K., & Rudenko, V. N.
Proceedings to Recontres de Moriond 2015; preprint arXiv:1506.02238
(2015)
- Gravitational Redshift Experiment with the Space Radio Telescope RadioAstron.
Litvinov, D., Bartel, N., Belousov, K., Bietenholz, M., Biriukov, A., Fionov, A., Gusev, A., Kauts, V., Kovalenko, A., Kulagin, V., Poraiko, N., & Rudenko, V.
Proceedings of the Journees 2014 "Systemes de reference spatio-temporels":
Recent developments and prospects in ground-based and space astrometry,

Pulkovo Observatory, St. Petersburg, Russia, 22-24 September 2014;
preprint arXiv:1503.03641 (2015)

- Preliminary Results of Giant Pulse Investigations from Crab Pulsar with RadioAstron.
Rudnitskiy, A. G., Popov, M. V., & Soglasnov, V. A.
Proceedings of Science, EVN 2014, 065 (2015)
- Study of Scattering Material with RadioAstron-VLBI Observations.
Andrianov, A., Smirnova, T. V., Shishov, V. I., Popov, M. V., Kardashev, N. S., Soglasnov, V. A., Gwinn, C., Johnson, M., Bignall, H., Deller, A., & Kramer, M.
Proceedings of Science, EVN 2014, 064 (2014)
- The Nuclear Structure of 3C84 with Space VLBI (RadioAstron) Observations.
Giovannini, G., Orienti, M., Savolainen, T., Nagai, H., Giroletti, M., Hada, K., Bruni, G., Hodgson, J., Honma, M., Kino, M., Kovalev, Y. Y.; Krichbaum, T., Lee, S., Lobanov, A., Sohn, B., Sokolovsky, K., Voitsik, P., & Zensus, J. A.
Proceedings of Science, EVN 2014, 021 (2014); preprint arXiv:1504.01516 (2015)
- Space-VLBI with RadioAstron: new Correlator Capabilities at MPIfR.
Bruni, G., Anderson, J.M., Alef, W., Lobanov, A., Zensus, J.A.
Proceedings of Science, EVN 2014, 119 (2014); preprint arXiv:1502.06894 (2015)

- The RadioAstron Green Bank Earth Station.
Ford, H. A., Anderson, R., Belousov, K., Brandt, J. J., Ford, J. M., Kanevsky, B., Kovalenko, A., Kovalev, Y. Y., Maddalena, R. J., Sergeev, S., Smirnov, A., Watts, G., & Weadon, T. L.
Proceedings of the SPIE, **9145**, id. 91450B 11 pp. (2014)
- Space VLBI Mission RadioAstron: Development, Specifications, and early Results.
Kovalev, Y. Y., Kardashev N. S., & RadioAstron collaboration
Proceedings of Science, **40**, 1 (2012)
- RadioAstron Early Science Program.
Space-VLBI AGN Survey: Strategy and First Results.
Sokolovsky, K. V. for the RadioAstron AGN Early Science Working Group,
Proceedings of Science, 11th EVN Symposium, 1 (2012)