УДК 629.78.001.5 «РАДИОАСТРОН»

«РАДИОАСТРОН»: ИТОГИ ВЫПОЛНЕНИЯ НАУЧНОЙ ПРОГРАММЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗА 5 ЛЕТ ПОЛЁТА

«RADIOASTRON» FIVE YEARS AFTER LAUNCH: MAIN SCIENCE RESULTS

Н.С. Кардашев[1], **N.S. Kardashev**
А.В. Алакоз[1], **A.V. Alakoz**
А.С. Андрианов[1], **A.S. Andrianov**
М.И. Артюхов[2], **M.I. Artyukhov**
В. Баан[3], **W. Baan**
В.Е. Бабышкин[2], **V.E. Babyshkin**
Н. Бартель[4], **N. Bartel**
О.С. Баяндина[1], **O.S. Bayandina**
И.Е. Вальтц[1], **I.E. Val'tts**
П.А. Войцик[1], **P.A. Voitsik**
А.З. Воробьев[2], **A.Z. Vorobyov**
К. Гвинн[5], **C. Gwinn**
Х.Л. Гомез[6], **J.L. Gomez**
Г. Джиованнини[7], **G. Giovannini**
Д. Джонси[8], **D. Jauncey**
М. Джонсон[9], **M. Johnson**
Х. Имаи[10], **H. Imai**
Ю.Ю. Ковалев[1], **Y.Y. Kovalev**
С.Е. Куртц[11], **S.E. Kurtz**
М.М. Лисаков[1], **M.M. Lisakov**
А.П. Лобанов[12], **A.P. Lobanov**
В.А. Молодцов[2], **V.A. Molodtsov**
Б.С. Новиков[1], **B.S. Novikov**
А.В. Погодин[2], **A.V. Pogodin**
М.В. Попов[1], **M.V. Popov**
А.С. Привезенцев[2], **A.S. Privesenzev**
А.Г. Рудницкий[1], **A.G. Rudnitski**
Г.М. Рудницкий[13], **G.M. Rudnitski**
Т. Саволайнен[14], **T. Savolainen**
Т.И. Смирнова[15], **T.I. Smirnova**
А.М. Соболев[16], **A.M. Sobolev**
В.А. Согласнов[1], **V.A. Soglasnov**
К.В. Соколовский[1], **K.V. Sokolovsky**
Е.Н. Филиппова[2], **E.N. Filippova**
В.В. Хартов[2], **V.V. Khartov**
М.Е. Чурикова[2], **M.E. Churikova**
А.Е. Ширшаков[2], **A.E. Shirshakov**
В.И. Шишов[15], **V.I. Shishov**
Ф. Эдвардс[17], **P. Edwards**

[1] Астрокосмический центр Физического института имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Россия, г. Москва.
Astro Space Center of P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow.

[2] ФГУП «НПО имени С.А. Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.
Federal Enterprise «Lavochkin Association», Russia, Moscow region, Khimki.

[3] Нидерландский радиоастрономический институт «АСТРОН» (ASTRON), Нидерланды, г. Двингелоо.
Netherlands Institute for Radio Astronomy (ASTRON), Netherlands, Dwingeloo.

[4] Департамент физики и астрономии Йоркского университета, Канада, г. Торонто.
Department of Physics and Astronomy, York University, Canada, Toronto.

[5] Калифорнийский университет в Санта-Барбаре, США, Калифорния, г. Санта-Барбара.
University of California at Santa Barbara, USA, CA, Santa Barbara.

[6] Институт Астрофизики Андалусии, Испанский национальный исследовательский совет, Испания, Гранада, г. Апартадо.
Instituto de Astrofísica de Andalucía, CSIC, Spain, Granada, Apartado.

[7] Отделение физики и астрономии Болонского университета, Италия, г. Болонья. Институт радиоастрономии, Италия, г. Болонья.
Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università degli Studi di Bologna, Italy, Bologna. INAF-Osservatorio di Radioastronomia, Italy, Bologna.

[8] Государственное Объединение Научных и Прикладных Исследований (CSIRO), астрономия и космические науки, Австралия, г. Эппинг. Исследовательская школа астрономии и астрофизики, Австралийский национальный университет, Австралия, г. Канберра.
CSIRO Astronomy and Space Sciences, Australia, Epping. Research School of Astronomy and Astrophysics, Australian National University, Australia, Canberra.

[9] Гарвард-Смитсоновский центр астрофизики, США, Массачусетс, г. Кембридж.
Harvard Smithsonian Center for Astrophysics, USA, MA, Cambridge.

[10] Высшая школа науки и техники университета Кагосимы, Япония, г. Кагосима.
Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, Japan, Kagoshima.

[11] Центр радиоастрономии и астрофизики Национального автономного университета Мексики, Мексика, г. Морелия.
Centro de Radioastronomía y Astrofísica Universidad Nacional Autónoma de México, México, Morelia.

[12] Институт радиоастрономии имени Макса Планка, Германия, г. Бонн. Институт экспериментальной физики, Университет Гамбурга, Германия, г. Гамбург.
Max-Planck-Institute for Radio Astronomy, Germany, Bonn. Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg, Germany, Hamburg.

[13] Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, г. Москва.
Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Russia, Moscow.

[14] Университет Аалто, Радиообсерватория Метсахови, Финляндия, г. Кульмала. Университет Аалто (бывший Хельсинкский университет технологии), Финляндия, Хельсинки. Институт радиоастрономии им. Макса Планка, Германия, г. Бонн.
Aalto University Metsähovi Radio Observatory, Finland, Kylmälä. Aalto University Department of Radio Science and Engineering, Finland, Aalto. Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Germany, Bonn.

[15] Пущинская радиоастрономическая обсерватория Астрокосмического центра ФИАН, Россия, Московская область, г. Пущино.
Pushchino Radio Astronomy Observatory, Astro Space Center, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow Oblast', Pushchino.

[16] ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Россия, г. Екатеринбург.
Ural Federal University, Russia, Ekaterinburg.

[17] Государственное Объединение Научных и Прикладных Исследований (CSIRO), астрономия и космические науки, Австралия, г. Эппинг.
CSIRO Astronomy and Space Science, Australia, Epping.

Наземно-космический интерферометр «РАДИОАСТРОН» обеспечивает самое высокое угловое разрешение, достигнутое в настоящее время в астрономии. Детектирование интерферометрических откликов от квазаров с таким угловым разрешением на базах в 100–200 тыс. км указывает на яркостные температуры, превышающие комптоновский предел на два порядка величины. Поляриметрические измерения на наземно-космических базах выявили тонкую структуру, указывающую на реколлимационные ударные волны на масштабах 100–250 мкс дуги и спиральное магнитное поле у основания радиовыброса в BL Lacertae. Обнаружена субструктура диска рассеяния излучения пульсаров на базах интерферометра от 60000 до 250000 км. Эта субструктура образуется в результате действия межзвёздного интерферометра эффективной базой около одной астрономической единицы и с эффективным угловым разрешением лучше одной микросекунды дуги. Измерены диаметры дисков рассеяния для нескольких пульсаров и получены оценки расстояния до рассеивающих экранов. Наземно-космические наблюдения источников мазерного излучения в линиях воды и гидроксила показали, что мазерные источники в областях звездообразования на базах, значительно превышающих диаметр Земли, остаются неразрешенными. Такие очень компактные и яркие детали с угловыми размерами 20–60 мкс соответствуют линейным размерам около 5–10 млн километров (несколько солнечных диаметров).

Ключевые слова:
наземно-космический интерферометр;
радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ);
активные галактические ядра (АГЯ);
квазары; пульсары; космические мазеры;
межзвёздное рассеяние.

Earth-space interferometry with «RADIOASTRON» provides the highest direct angular resolution ever achieved in astronomy at any wavelength. RadioAstron detections of quasars on interferometric baselines of 100000–200000 km suggest brightness temperatures exceeding the «inverse-Compton catastrophe» limit by two orders of magnitude. Polarimetric measurements with very long space-ground baselines have revealed a recollimation shock and a helical magnetic field in the core region of BL Lacertae. A substructure within scattering disks was discovered in observations of pulsars with the space-ground interferometer at large baseline projections (60000–250000 km). The substructure is produced by interstellar interferometer with the effective baseline of about one astronomical unit, and with effective angular resolution better than one microarcsecond. Angular diameters of scattering disks were measured for several distant pulsars, distances to effective scattering screens were estimated for these objects. Space-VLBI observations of the water and hydroxyl masers show that the bright details of the masers in galactic star-forming regions remain unresolved at baseline projections which considerably exceed the Earth diameter. Very compact and bright water maser features with the angular sizes of about 20–60 microarcseconds are registered in galactic star-forming regions. This corresponds to linear sizes of about 5–10 million km (several solar diameters).

Key words:
space-ground interferometer;
Very Long Baseline Interferometry (VLBI);
active galactic nuclei (AGN);
quasrars; pulsars; cosmic masers;
interstellar scattering.

введение

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 360000 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 четырёх диапазонах длин волн: 92, 18, 6.2 и 1.2–1.6 см. НКИ 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, (*Кардашев Н.С. и др.*, 2013; *Ковалев Ю.А. и др.*, 2014).

В каждом частотном диапазоне имеются два поляризационных канала приёмника (LCP и RCP) с полосой регистрации сигнала шириной 2×16 МГц (верхняя и нижняя субполосы). В диапазоне P нижняя полоса не содержит полезного сигнала из-за влияния входного фильтра. В диапазоне C 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-метрового радиотелескопа обсерватории Грин Бэнк в качестве наземного плеча интерферометра.

Миссия «РАДИОАСТРОН» выполняется под общим руководством Астрокосмического центра Физического института имени П.Н. Лебедева (АКЦ ФИАН) (*Кардашев Н.С. и др*., 2013; *Бургин М.С. и др*., 2015). Управление спутником «СПЕКТР-Р» осуществляется НПО имени С.А. Лавочкина (НПОЛ) (*Хартов В.В. и др*., 2014). Определение орбиты КА на основе большого объёма измерительной и телеметрической информации, а также необходимые вычисления для управления и обработки данных проводятся Баллистической группой Института прикладной математики имени М.В. Келдыша (*Захваткин М.В. и др*., 2014; *Заславский Г.С. и др*., 2014). Высокая точность восстановления орбиты подтверждена группой обзора ядер галактик проекта, а также независимыми РСДБ-методами (*Duev D.A. et al*., 2015). Приём научных данных производится двумя специализированными телеметрическими станциями – в Пущинской радиоастрономической обсерватории (ПРАО) (*Каневский Б.З. и др*., 2014) и обсерватории Грин Бэнк (США) (*Ford H.A. et al*., 2014).

Основной объём корреляции наблюдательных данных выполняется на программном корреляторе Центра обработки научных информации (ЦОНИ) АКЦ ФИАН (*Андрианов А.С. и др*., 2014); в первичной обработке данных также участвуют корреляционные центры в Институте радиоастрономии Макса Планка (Бонн, Германия) (*Bruni G. et al*., 2014) и в Объединённом институте РСДБ (JIVE ERIC, Нидерланды).

Большое значение для осуществления миссии имеет 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 телеконференциях RISC обсуждает вопросы организации и планирования научных экспериментов, возможные направления научных исследований, полученные результаты наблюдений в процессе работы миссии и другие вопросы.

Научная программа проекта «РАДИОАСТРОН» состоит из трёх 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 выполнению полноценной научной программы проекта с июля 2013 года. Результаты выполнения РНП были представлены в (*Кардашев Н.С. и др.*, 2014). Все эксперименты с июля 2013 года проводятся на основе научных заявок. На открытый конкурс принимались заявки двух типов, «ключевая научная программа» (наиболее значимые и крупные проекты) и «общее наблюдательное время». Научная экспертиза поступивших заявок осуществляется международным научным советом экспертов «РАДИОАСТРОН» (RPEC) и результаты утверждаются руководителем проекта «РАДИОАСТРОН» академиком Н.С. Кардашевым.

В данной публикации мы приводим основные результаты выполнения научной программы миссии «РАДИОАСТРОН» к середине 2016 года. Эти достижения были включены в Национальный доклад по ФКИ для симпозиума КОСПАР-2016.

таблица 1 – Основные параметры НКИ (*Ковалев Ю.А. и др*., 2014).

диапазон, см	частотный интервал, МГц	угловое разрешение, мкс	эквивалентная плотность потока системы (SEFD), кЯн		чувствительность, мЯн
			LCP	RCP	
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

1. Выполнение научной программы

В рамках научной программы миссии изучаются, в основном, три группы космических объектов: квазары – ядра далеких галактик, пульсары – нейтронные звёзды нашей галактики, мазеры – области образования звёзд и планет в нашей галактике и в других галактиках. Наземное плечо интерферометра обеспечивают более 30 радиотелескопов России (Квазар – КВО и Калязин), Украины (Евпатория – до начала 2014 года), 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 около 10 микросекунд дуги. Публикации могут быть найдены на сайте проекта по следующему адресу: URL: http://www.asc.rssi.ru/radioastron/publications/publ.html.

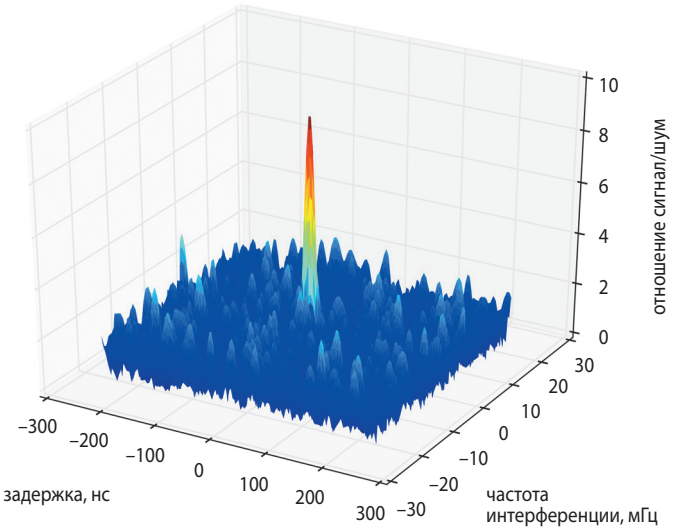
2. Основные научные результаты исследований внегалактических объектов

2.1. Наблюдения квазара 3C273 с «РАДИОАСТРОН»: вызов пределу яркостной температуры

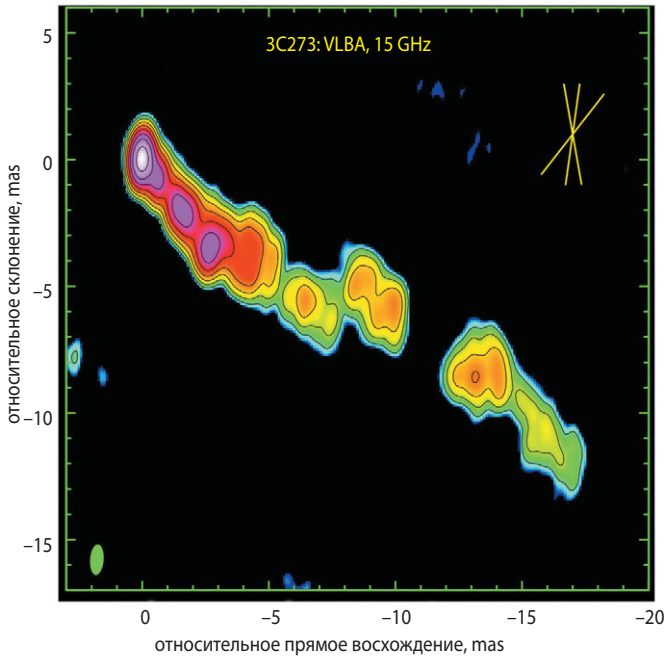
Энергетические потери на обратный Комптон-эффект накладывают верхний предел на яркостную температуру излучающей плазмы около $10^{11.5}$ К. Релятивистское усиление излучения может увеличивать наблюдаемую яркостную температуру, но не намного выше значения $10^{12.5}$ К.

Были выполнены наблюдения квазара 3C273 на проекциях баз, достигающих 171000 км, которые обнаруживают наличие структуры на масштабах до 26 микросекунд дуги (2.7 световых месяца) с яркостной температурой более 10^{13} К. Полученные результаты иллюстрируются на рисунке 1. Эти измерения бросают вызов нашему современному пониманию нетеплового непрерывного излучения в окрестностях сверхмассивных чёрных дыр и требуют намного более высоких скоростей струи, чем наблюдаемые. Другие возможные объяснения включают в себя непрерывное реускорение плазмы на расстоянии несколько парсек от центральной машины, излучение релятивистских протонов и пр. (в *Kovalev Y.Y. et al*., 2016).

Помимо 3C273 проводятся измерения яркостных температур многих других источников в рамках обзора ядер активных галактик. На наземно-космических базах на сегодняшний день успешно продетектировано 160 квазаров. Значения измеренных яркостных температур простираются до 10^{14} К и даже выше. Этот результат противоречит возможности существования в ядрах данных объектов равенства между плотностью энергии релятивистских частиц и магнитного поля. Он заставляет переосмыслить наше понимание механизма излучения ядер квазаров, а также значительно исправляет предыдущие и современные результаты РСДБ обзоров активных галактик, проводимые на наземных радиоинтерферометрах.



а



б

рисунок 1. а – отклик интерферометра «РАДИОАСТРОН» (Космический Радиотелескоп – GBT) на частоте 22 ГГц по наблюдениям квазара 3C 273 2 февраля 2013 года с длиной проекции базы 7.6 Гλ. Отношение амплитуды интерферометрического отклика к средней амплитуде шума показано как функция остаточных задержек (в наносекундах и миллигерцах). Вероятность ложного детектирования составляет величину меньше 10^{-6}; **б** – карта распределения яркости по VLBA наблюдениям квазара 3C 273 на 15 ГГц на эпоху 10 февраля 2013 года с пиком интенсивности 3.2 Ян/луч, уровнем шума 1.4 мЯн/луч, размером диаграммы направленности (зелёный эллипс внизу слева) 1.21×0.53 мс дуги. Контуры равной интенсивности проведены с шагом ×2 и начинаются с уровня 0.25% от пикового значения. Жёлтые линии показывают интервал позиционных углов наземно-космических баз с «РАДИОАСТРОНом», реализуемых в наблюдениях: 10°, −8°, −38°

2.2. Экстремальные яркостные температуры и рефракционное рассеяние субструктуры в 3C273 с «РАДИОАСТРОН»

Выше, мы обсуждали обнаружение «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 межзвёздной 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 учёта 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 гауссова 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. Подробности приведены в (*Johnson V.D. et al*., 2016).

2.3. РСДБ-картографирование 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 чёрных 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 104 гравитационных радиусов.

Космические РСДБ-наблюдения квазара TXS 0642+449 (OH 471) с большим 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 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 надёжность поляризационного картографирования с «РАДИОАСТРОНом» на данной длине волны. Этот результат (*Lobanov A.P. et al*., 2015) также подтверждается на основе статистического анализа данных обзора ядер активных галактик в проекте «РАДИОАСТРОН» (*Пащенко И.Н. и др*., 2015).

Получено поляризационное изображение 0642+449 с разрешением 0.8 мс дуги: четырёхкратное улучшение в сравнении с наземными РСДБ наблюдениями на той же длине волны, рисунок 2. Изображение показывает компактную структуру типа ядро-выброс с низким (≈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 реколлимационной волне. Максимальная яркостная температура в основании струи составила 4×10^{13} К. Результаты опубликованы в статье (*Lobanov A.P. et al*., 2015).

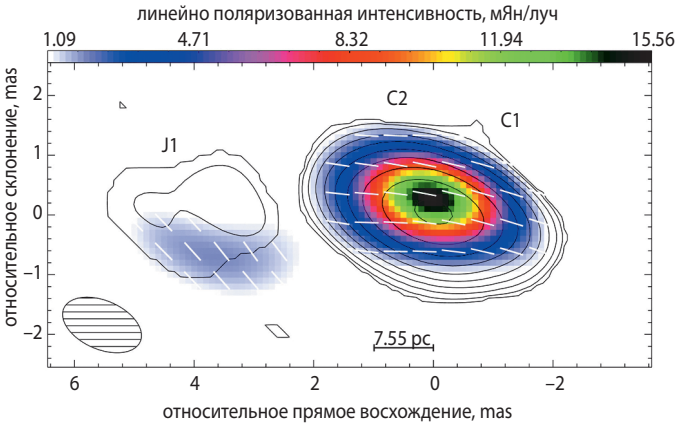


рисунок 2. Карта распределения полного (контуры) и линейно-поляризованного (цветные полутона) потока радиоизлучения от квазара 0642+449 на длине волны 18 см. Векторы белого цвета указывают ориентацию электрического вектора линейно-поляризованного излучения

2.4. 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 в истории астрономии угловым разрешением. Удалось восстановить особенности структуры джетов – гигантских, длиной до нескольких световых лет, струй вещества, которые выбрасывает сверхмассивная чёрная дыра в центре этой галактики, и восстановить структуру магнитного поля.

В ходе сеанса наблюдений BL Lacertae, проведённого на самой короткой длине волны интерферометра (1.3 см), было достигнуто рекордное угловое разрешение – 21 микросекунда дуги (рисунок 3). Объект – блазар со сверхмассивной чёрной дырой в центре. Чёрная дыра окружена диском плазмы, разогретой до температур в миллиарды градусов. Мощные магнитные поля и высокие температуры формируют джеты. Теоретические модели предсказывали, что из-за вращения чёрной дыры и аккреционного диска линии магнитного поля должны формировать спиральные структуры, которые, в свою очередь, ускоряют поток вещества в джетах. Нам удалось 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. Данные результаты опубликованы в работе (*Gomez J.L. et al.*, 2016).

2.5. Многочастотное картографирование джета в далеком квазаре 0836+710

Радиоисточник S5 B0836+710 является мощным слабополяризованным квазаром, обнаруженным на красном смещении 2.17, которое соответствует фотометрическому расстоянию 16.9 Гпк. В нём наблюдается мощный, протяжённый и односторонний джет на масштабах парсеков и килопарсеков. Морфология источника указывает на наличие в нём плазменной неустойчивости. Изображения джета, полученные с помощью «РАДИОАСТРОНа» на 18, 6 и 1.3 см, демонстрируют сложную и скрученную структуру, которая не наблюдалась в предшествующих обзорах на наземных РСДБ-сетях. На изображениях, полученных на наземно-космических базах на 22 ГГц

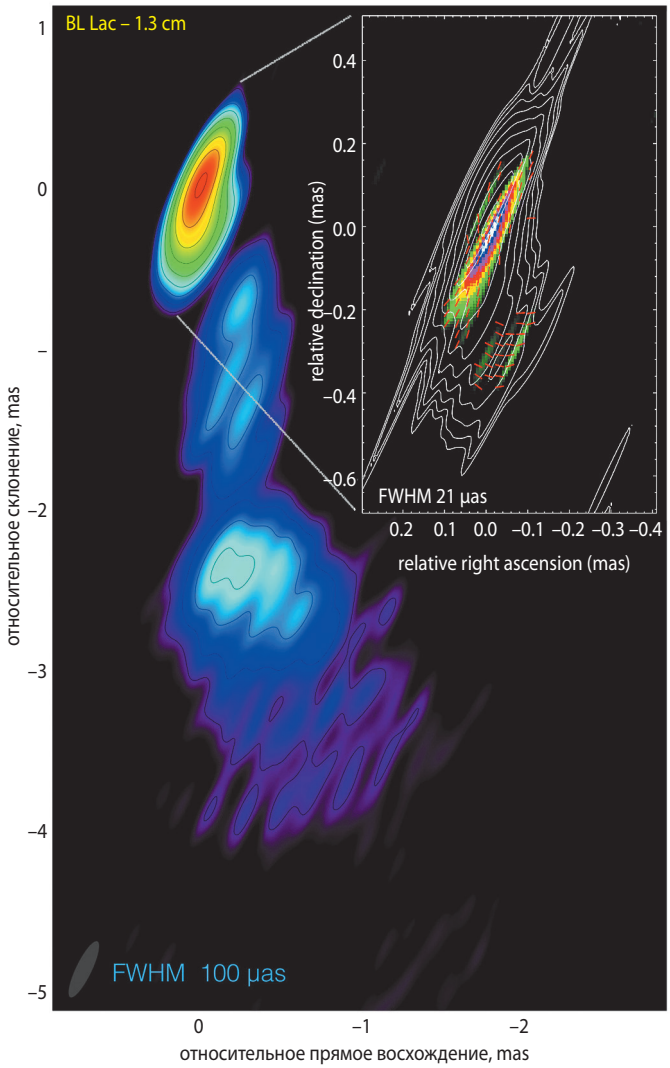


рисунок 3. Поляриметрические РСДБ-изображения объекта BL Lac, полученные с помощью «РАДИОАСТРОНа» 10–11 ноября 2013 года на длине волны 1.3 см, восстановленные с разным взвешиванием данных функции видности. Так называемое естественное взвешивание позволяет получить карту с меньшим разрешением, но более чувствительную к протяжённым областям (полная интенсивность – цвет и чёрные контуры, диаграмма направлености имеет размер 100 микросекунд дуги). Карта, полученная при «сверходнородном» взвешивании, приведена во вставке в правом верхнем углу (полная интенсивность – белые контуры, линейно поляризованный поток – цвет, позиционный угол электрического вектора – красные полоски, диаграмма направленности – 21 микросекунда дуги)

(рисунок 4), виден прерывистый выброс с явными признаками эффектов поперечного разрешения и поперечной асимметрии струи, которые могут быть интерпретированы как доказательства важного эффекта уярчения к краям и/или результат распространения по струе плазменной нестабильности. Рисунок 4 хорошо иллюстрирует преимущества детального наземно-космического РСДБ-изображения в сравнении с изображением, полученным на наземных базах. Результаты будут опубликованы в журнале «Astronomy and Astrophysics».

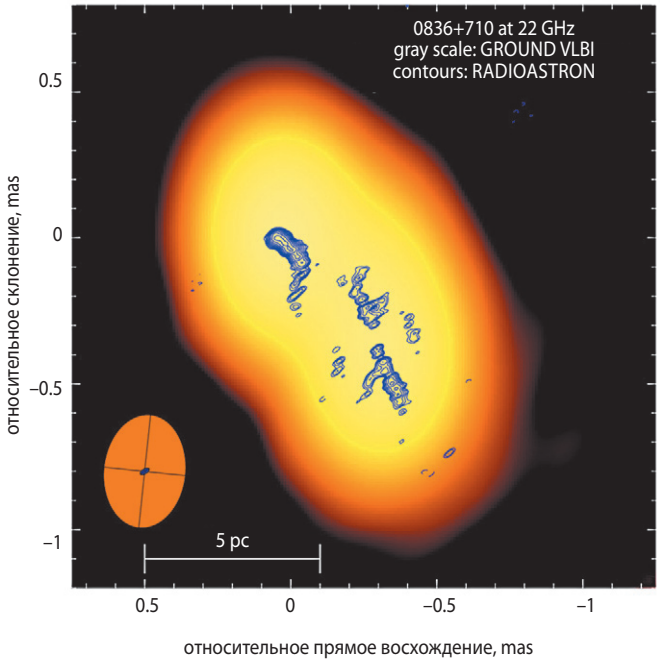


рисунок 4. Изображение 0836+710, полученное с помощью «РАДИОАСТРОНа» на частоте 22 ГГц (контуры), наложенное на изображение, полученное на наземных базах (цвет)

2.6. Тонкая структура изображения близкой галактики 3C84, полученная с рекордным линейным разрешением

В рамках выполнения Ключевой научной программы по изучению близких галактик было успешно получено изображение радиоисточника 3C84 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 чёрной дыры с высочайшим уровнем пространственной детализации. Полученные результаты позволят лучше понять процессы формирования струйных радиовыбросов в алактиках.

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, фазированную 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 5.

Центральная область 3C84 имеет сложную структуру на масштабах субмиллисекунд дуги. Выделяется яркое пятно сверху (Север) – это ядро галактики, а также деталь снизу (Юг) – она двигается с субсветовой скоростью по искривленной траектории. Изображение демонстрирует субструктуру этих областей с уникальной детализацией. Впервые ясно проявился контр-джет (выброс в направлении Севера) на масштабах субпарсеков. Джет и контр-джет разрешены поперек, угловое разрешение карты составляет примерно 50 микросекунд дуги или 500 радиусов Шварцшильда.

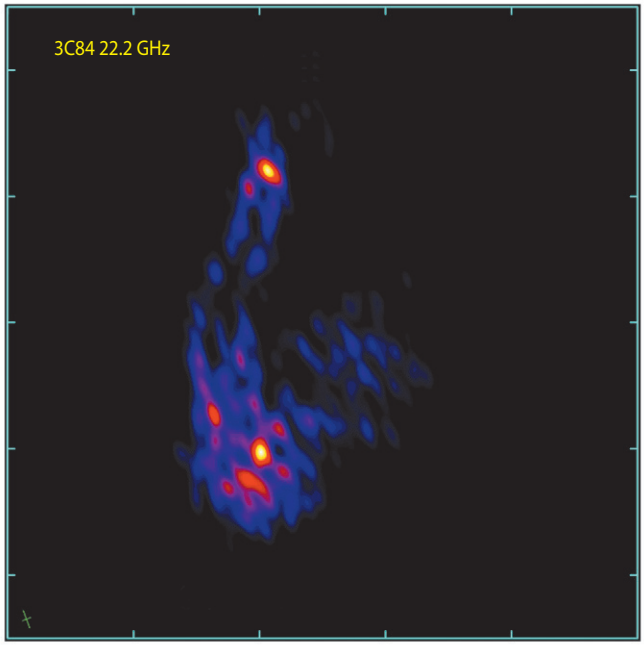


рисунок 5. Карта близкой галактики 3C84, полученная в полной интенсивности на 22 ГГц на наземно-космическом интерферометре «РАДИОАСТРОН» с экстремальным разрешением. Диаграмма направленности интерферометра указана в левом нижнем углу с размерами 150×70 микросекунд дуги. Видимое изображение с Севера на Юг (сверху вниз) занимает в проекции размер в 1.2 парсека

Полученные данные о структуре струи в её основании позволяют подробно изучать процесс формирования джета в районе центральной сверхмассивной чёрной 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 счёт взаимодействия с окружающей средой на фронте ударной волны. Данные результаты будут опубликованы в статьях *Giovannini G. et al.* и *Savolainen et al.*

2.7. Наблюдения PKS 1954-388 и детектирование его излучения «РАДИОАСТРОНом» на базе 80000

В рамках обзора активных ядер галактик с «РАДИОАСТРОНом» было получено значимое детектирование сигнала на проекции базы 6.2 диаметра Земли, которое соответствует яркостной температуре 5.9×10^{12} K, значительно превышающей предел Компоновской катастрофы. Это указывает на наличие доплеровского уярчения излучения и значительное превышение плотности энергии релятивистских частиц над магнитным полем.

Наблюдения были выполнены 23 августа 2012 года на частоте 1.66 ГГц с Австралийскими радиотелескопами Паркс и Мопра. Отметим, что приёмник космического телескопа на 1.66 ГГц был разработан в отделении радиофизики Государственного Объединения Научных и Прикладных Исследований (CSIRO, Австралия) и произведён в «British Aerospace Australia». Результаты многодиапазонного исследования в радио-, УФ-, рентген- и гамма-диапазонах были успешно интерпретированы в рамках однозонной синхрокомптонной модели (см. подробнее *Edwards et al*. (PASA, в печати). Поведение коррелированного потока с увеличением проекции базы показано на рисунке 6.

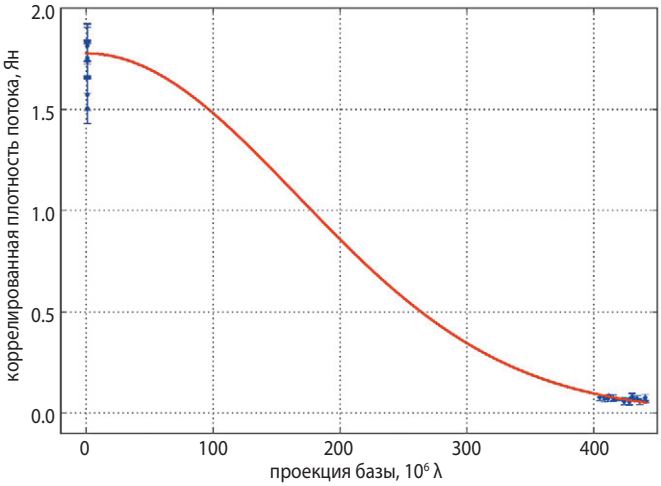


рисунок 6. Результаты измерений коррелированной плотности потока на неземных и наземно-космических базах при наблюдениях квазара PKS 1954–388 на телескопах Паркс, Мопра, «РАДИОАСТРОН» на длине волны 18 см представлены синим цветом. Красная кривая является результатом подгонки в рамках предположения о гауссовом распределении интенсивности излучающего компонента

3. Научные результаты исследования пульсаров

3.1. Зондирование межзвёздной плазмы гигантскими импульсами пульсара в Крабовидной туманности

Гигантские импульсы (ГИ) пульсара в Крабовидной туманности (B0531+21) наблюдались в проекте «РАДИОАСТРОН» в рамках исследования эффектов рассеяния радиоизлучения на межзвёздной среде. С 2011 по 2015 годы включительно было проведено девять наблюдений. Список всех наблюдений пульсара в Крабовидной туманности представлен в таблице 2. При этом впервые для радиоинтерферометрических 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». Пример интерференционных лепестков даётся на рисунке 7. Максимальная плотность потока регистрировавшихся гигантских импульсов достигала значения 100000 Ян. 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. Все результаты измерений приводятся в таблице 3.

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

Ранее проводившиеся исследования уже показывали наличие такого двухкомпонентного рассеяния – рассеяние в области, близкой к Крабовидной туманности, и протяжённая составляющая, обусловленная межзвёздной плазмой. Так, в работе Р. Каруппусами (*Karuppusamy R. et al*., 2010) 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 её окрестностях.

Было выполнено моделирование распространения гигантских импульсов с заданной структурой через рассеивающую среду с характерной полосой декорреляции. Такой подход позволил рассмотреть влияние характерной структуры ГИ 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 неразрешённых пиков длительностью менее 30 нс и с яркостной температурой $T_b>10^{38}$ К. На основании этого можно сделать вывод, что такие неразрешённые 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 (*Hankins T.H. et al*., 2015).

Результаты этих исследований опубликованы в статье F/U/ Рудницкого с соавторами (*Рудницкий А.Г., Каруппусами Р., Попов М.В., Согласнов В.А*., 2016).

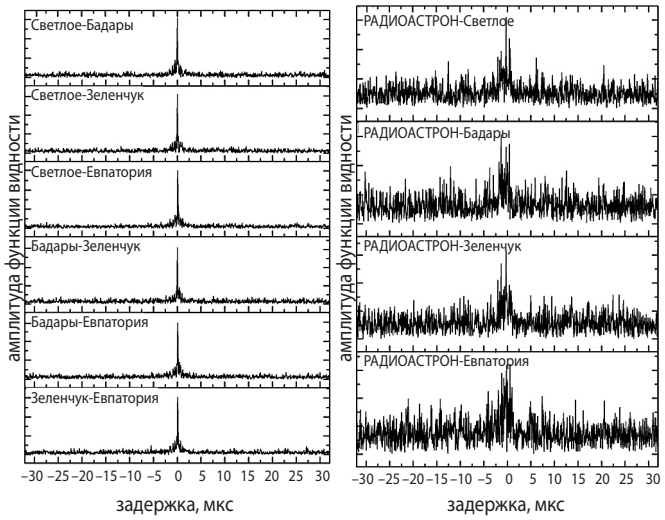


рисунок 7. Кросскорреляционные функции индивидуального ГИ для различных баз, сеанс RAFS01, импульс: 23:21:03.74, длина волны: 18 см. Слева представлены только наземные базы, справа – только наземно-космические. На наземно-космических базах проявляется субструктура кружка рассеяния

таблица 2 – Таблица наблюдений пульсара B0531+21, проводившихся в рамках научной программы миссии «РАДИОАСТРОН» в период с 2011 по 2015 годы

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 3 – Таблица измеренных параметров рассеяния для пульсара B0531+21. В первом столбце указано кодовое обозначение эксперимента, во втором – время рассеяния, в третьем – угловой диаметр кружка рассеяния, в четвертом – полоса декорреляции, в пятом – доля расстояния от наблюдателя до рассеивающего экрана, в последнем – количество обнаруженных гигантских импульсов

код наблюдения	τ_{SC}, мс	Θ, mas	Δν, кГц	α	кол-во ГИ
RAFS01	0.9±0.1	1.3±0.2	116.3±24.5	0.36±0.08	98
RAES04A	5.8±0.3	0.6±0.1	55.2±5.9	0.94±0.02	1202
RAES04B	5.5±0.7	0.5±0.1	41.2±7.9	0.96±0.03	1034
RAES04D	5.1±0.5	1.2±0.1	40.7±4.6	0.79±0.03	929
RAKS02AD	2.2±0.3	1.2±0.1	78.1±7.9	0.61±0.06	453
RAKS02AE	2340±23	14.0±1.4	–	0.92±0.07	579
RAGS10A	1.4±0.2	0.4±0.1	161.1±3.4	0.91±0.05	1807
RAGS10B	1.5±0.1	0.5±0.1	70.2±8.3	0.85±0.04	627
RAGS10C	–	–	–	–	–

3.2. Распределение неоднородностей межзвёздной плазмы в направлении удалённых пульсаров

Радиоизлучение от космических источников подвергается рассеянию на неоднородностях межзвёздной плазмы. Наиболее наглядно эффекты рассеяния проявляются для компактных источников, к каким относятся пульсары. Именно с открытием пульсаров проявления рассеяния радиоволн на неоднородностях межзвёздной плазмы были изучены теоретически и экспериментально. Основные эффекты рассеяния радиоволн следующие: увеличение измеренного углового размера источника τ_{SC}, увеличение длительности импульса пульсара Θ_{SC}, модуляция интенсивности радиоизлучения по частоте и времени с характерными масштабами $\Delta\nu_d$ и Δt_{sc}.

Одновременные измерения перечисленных выше параметров для выбранного объекта в течение достаточного большого интервала времени ($T>\Delta t_{sc}$) и в достаточно широкой полосе частот ($B_\nu>\Delta\nu_d$) позволяют получить информацию о структуре неоднородностей межзвёздной плазмы в направлении данного объекта. Преимущества в изучении эффектов рассеяния дают интерферометрические наблюдения со сверхдлинными базами (РСДБ) – 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).

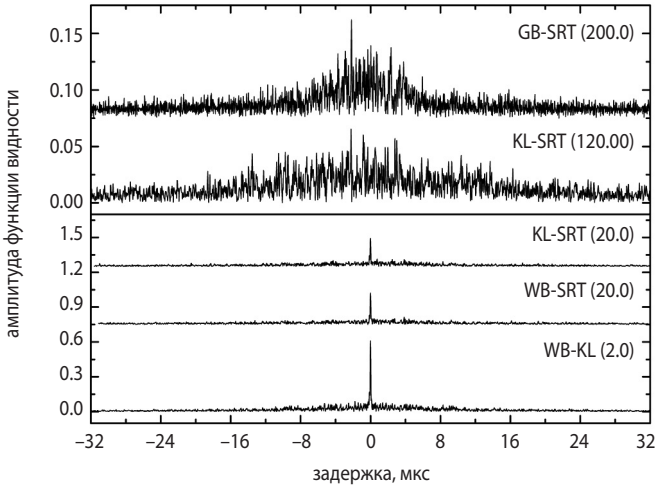


рисунок 8. Эволюция структуры функции видности при увеличении проекции базы интерферометра для пульсара B0329+54 в диапазоне 92 см (324 МГц). Рядом с каждой кривой указана комбинация радиотелескопов и величина проекции базы в миллионах длин волн (Mλ). Для проекции базы, больших 30 Mλ, центральный пик функции видности исчезает и проявляется структура кружка рассеяния. Две верхние кривые показаны с десятикратным увеличением

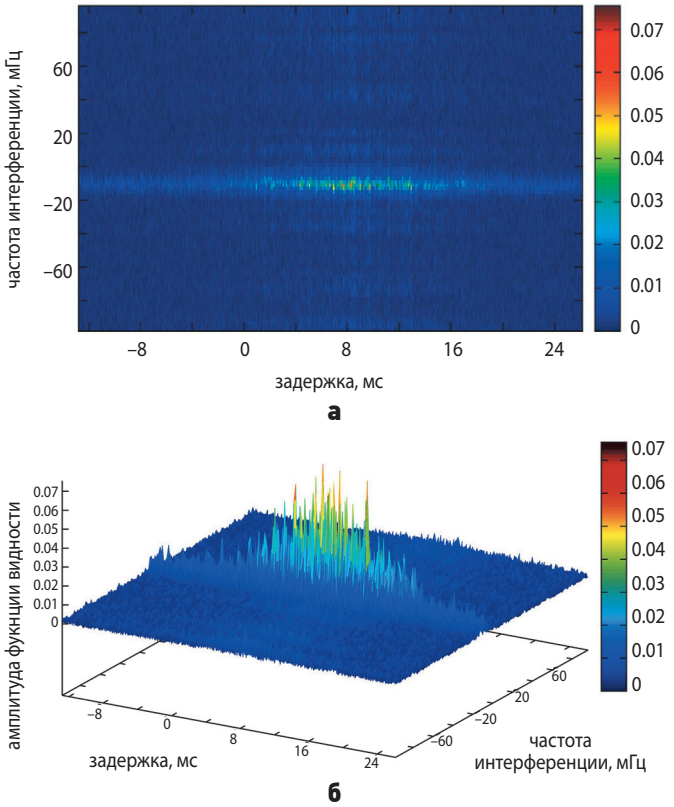
Интерференционный отклик для выбранной пары телескопов, который принято также называть функцией видности, получается из набора комплексных кросс-спектров путём последовательного преобразования Фурье, сначала по частоте (обратное преобразование Фурье), а затем по времени (прямое преобразование) на временном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

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: $\Delta f=1/(2\pi\Delta t_{SC})$ и $\Delta\tau=1/(2\pi\Delta\nu_d)$ на диаграмме частота интерференции – задержка соответственно. Именно такой вид был продемонстрирован в результате анализа наблюдений пульсара B0329+54 на базах наземно-космического интерферометра, достигавших 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 9, а центральное сечение пятна по координате временная задержка приводится на рисунке 8 для разных проекций базы интерферометра; самая верхняя кривая на рисунке 8 представляет собой сечение рисунка 9. Подробности исследования рассеяния по результатам наблюдений пульсара B0329+54 опубликованы в (*Gwinn C.R. et al.*, 2016).

Пульсар B1933+16 одновременно наблюдался в двух частотных диапазонах в течение полутора часов 1 августа 2013 года. 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 – левой круговой поляризации в обеих субполосах. На 92 см наблюдения происходили совместно с системой апертурного синтеза в Вестерборке (WSRT) и 25-метровой антенной американской решетки телескопов VLBA (Санта-Крус), а на 18 см работала 300-м антенна в Аресибо и два 32-метровых телескопа в Торуни и в Светлом.

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

На рисунке 10 показан вторичный спектр на частоте 1668 МГц, полученный посредством двумерного преобразования Фурье от динамического спектра.



а – двумерное представление диаграммы, **б** – трёхмерное представление диаграммы.

рисунок 9. Диаграмма задержка – частота интерференции для 500-секундного скана наблюдения 29 ноября 2012 года (пульсар B0329+54) в правом поляризационном канале, база «РАДИОАСТРОН» – Грин Бэнк

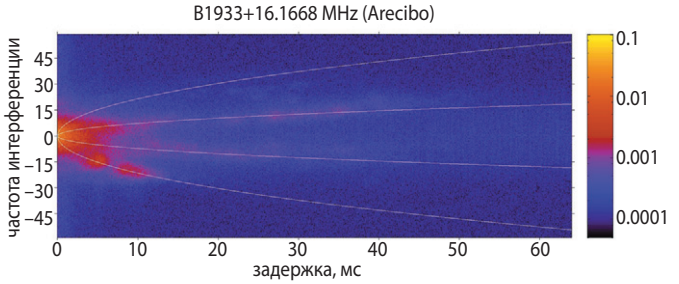


рисунок 10. Вторичный спектр для пульсара B1933+16 на частоте 1668 МГц. Параболические дуги указывают на наличие двух эффективных рассеивающих экранов на расстоянии 1.3 и 3.1 кпк от наблюдателя

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 (*Stinebring D.R. et al.*, 2001). По форме парабол можно независимо от предыдущих оценок определить положение одного или нескольких (по числу дуг) рассеивающих экранов, как это было предложено в (*Hill A.S. et al.*, 2003).

Таким образом, с использованием наземно-космического интерферометра «РАДИОАСТРОН» и ряда наземных интерферометров мы исследовали распределение неоднородностей межзвёздной плазмы в направлении четырёх 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 (рисунок 11). Также был измерен временной масштаб уширения рассеянного импульса на неоднородностях межзвёздной плазмы по зависимости амплитуды функции видности V(τ) 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.

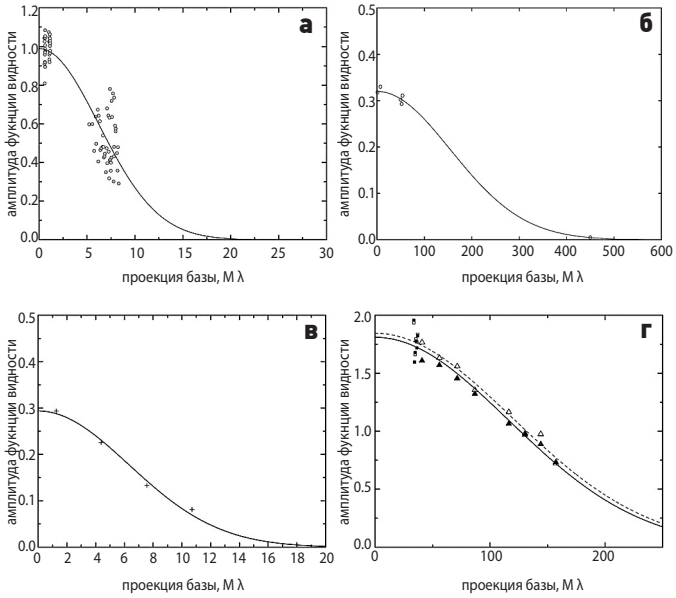


рисунок 11. Зависимость амплитуды функции видности от величины проекции базы. Ось X оцифрована в миллионах длин волн. Пульсар B1641-45 (**а**) – сплошная линия соответствует диаметру кружка рассеяния в 27 миллисекунд дуги. Использованы только наземные проекции базы. Пульсар B1749-28 (**б**). Пульсар B1933+16 (**в**, **г**) – зависимость амплитуды функции видности от величины проекции базы на частоте **(в)** 316 МГц на базе Вестерборк – «РАДИОАСТРОН» и **(г)** 1668 МГц на базах Аресибо – «РАДИОАСТРОН» (треугольники) и Аресибо – Светлое (кружки). Закрашенные значки и сплошная линия соответствуют верхней субполосе, незакрашенные значки и пунктирная линия – нижней

Следует отметить, что ни для одного пульсара не подходит модель равномерного распределения рассеивающей плазмы на луче зрения. Выявленные рассеивающие экраны отождествляются с реальными объек-

тами, 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 межзвёздной 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. 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 (τ_{SC}), угловой диаметр кружка рассеяния (Θ_H), галактические координаты пульсара (l, b), расстояние до пульсара (D) и расстояние до рассеивающего экрана (d).

3.3. Статистические свойства субструктуры диска рассеяния для пульсара B0329+54

Выполнен анализ статистических свойств субструктуры, обнаруженной в диске рассеяния излучения от пульсара B0329+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 110-метровый радиотелескоп обсерватории Грин-Бэнк (США). Кружок рассеяния был разрешен на всех базах, т.е. интерферометрический отклик (функция видности) не содержит компактной детали (см. рисунки 8–9).

Был проведён 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 приведён на рисунке 12. Из 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

$$G(\tau)=A_1k_1\exp(-k_1\tau)+A_2k_2\exp(-k_2\tau).$$

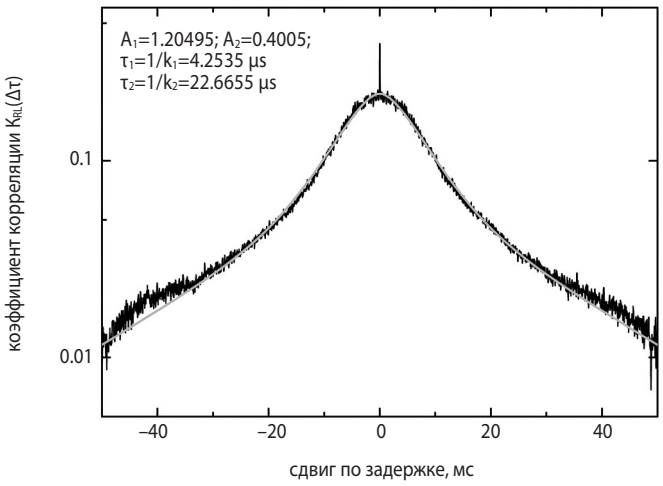


рисунок 12. Аппроксимация средней ККФ функции видности двумя экспоненциальными функциями

таблица 4 – Вычисленные параметры рассеяния

пульсар	N_{ch}	δt, с	ΔT, с	Δt_{sc}, с	$\Delta \nu_d$, кГц	τ_{SC}, мкс	Θ_H, мас	l, b, °	D, кпк	d, кпк
B1641-45	16384	0.45	115	0.20 (0.05)	0.062 (0.002)	2600 (100)	27 (5)	339.2, -0.2	4.9	3.0
B1749-28	256	5.62	225	220 (20)	410 (100)	310 (0.040)	0.5 (0.2)	1.54, -0.96	1.3	0.95
B1933+16	8192	0.35	250	–	0.25 (0.15)	600 (400)	12.3 (0.6)	52.4, -2.1	3.7	2.6
B1933+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]
B0329+54	2048	0.71	70	102 (8)	7.0 (0.8)	12 (2)	4.8 (0.8)	145, -1.2	1.0	0.5

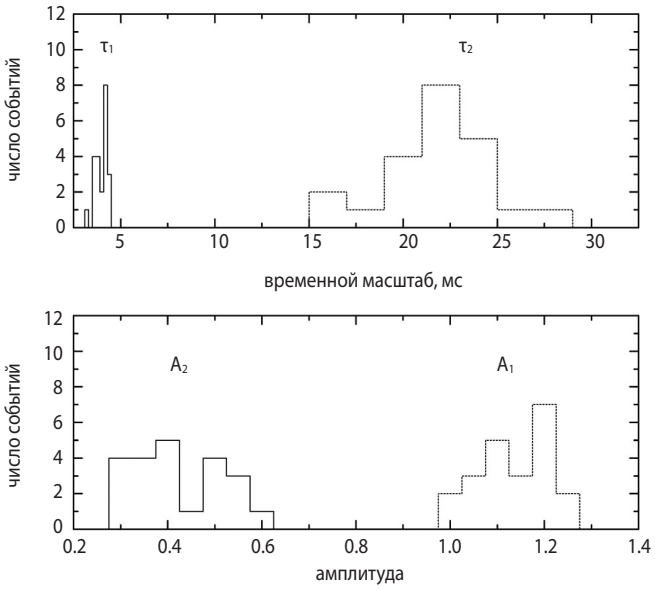


рисунок 13. Распределение измеренных параметров: времени рассеяния и относительного вклада для двухкомпонентной модели рассеяния радиоизлучения пульсара B0329+54 в диапазоне 92 см

Сплошной серой линией на рисунке 12 показана кривая для нашей теоретической формулы, примененной к аппроксимации реальной ККФ. Такая аппроксимация была выполнена для всех наблюдательных 10-минутных сканов. Рисунок 13 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 четырёхкратном изменении.

Возможным объяснением присутствия двух временных масштабов в АКФ может служить модель анизотропного рассеяния. Для этой модели полученное нами отношение постоянных времени $k_2/k_1=5.5$ даёт 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. рисунок 10). Предполагается, что эти структуры (параболические арки) возникают в результате интерференции между субструктурами диска рассеяния, образовавшимися путём рефракции на тонких слоях межзвёздной 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 годы.

3.4. Исследования близкой межзвёздной 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/см^3. Расстояние до пульсара было оценено исходя из модели Кордеса и Лазио в 1 кпк (*Cordes J.M. et al.*, 2003). По наблюдениям собственного движения пульсара в (*Zou W.Z. et al.*, 2005) были получены его скорости по двум координатам: $\mu_\alpha=17\pm4$ миллисекунд дуги /год и $\mu_\beta=32\pm6$ миллисекунд дуги /год.

В наблюдениях принимали участие 10-метровый космический радиотелескоп «РАДИОАСТРОН», 110-метровый телескоп в Грин-Бэнке (GBT) и система апертурного синтеза в Вестерборке (WSRT). Регистрировалась полоса частот 316–332 МГц с однобитовой оцифровкой для данных с космического аппарата и двухбитовой оцифровкой для наземных телескопов. Первичная обработка проводилась на корреляторе АКЦ ФИАН (*Андрианов А.С. и др.*, 2014) с использованием некогерентной компенсации дисперсии сигнала в полосе приёмника. 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 внеимпульсное выбиралось на расстоянии 0.5 P от предыдущего окна. База космического интерферометра составляла 60000 км.

На рисунке 14 приведены радиоспектры индивидуальных сильных импульсов с разнесением по времени (время растет 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, рисунки 14а и 14б) тонкая структура сохраняется, а на интервале 200 с (рисунки 14б и 14г) изменяется. Крупная структура сохраняет свою форму.

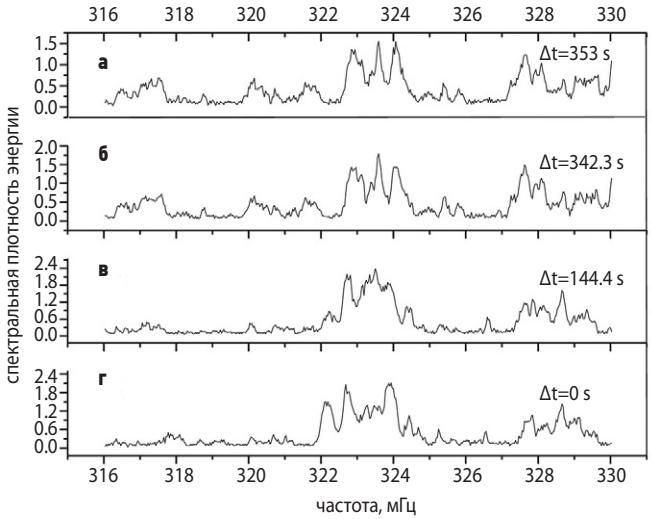


рисунок 14. Спектры индивидуальных импульсов пульсара, разнесенные по времени на указанное число секунд от нижнего спектра

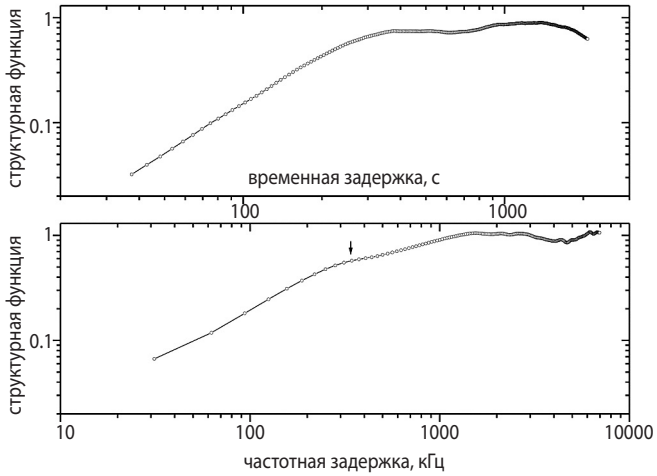


рисунок 15. Средние временная (вверху) и частотная (внизу) структурные функции (SF) для базы Грин Бэнк-Вестерборк (GB-WB), приведённые в двойном логарифмическом масштабе. Стрелкой отмечен сдвиг (300 кГц), при котором происходит излом в частотной структурной функции

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 межзвёздной плазмы.

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

Полезные результаты были получены путем анализа структурных функций $SF(b, \Delta f, \Delta t)$. На рисунке 15 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. Наклоны временной и частотной SF различаются примерно в два раза (для масштабов до 250 кГц): β_1=0.9±0.03 для частотной и β_2=1.73±0.02 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=β_2+2=3.73.

На рисунке 16 приведены средние частотные структурные функции для наземной (квадраты) и космической (кружки) баз при нулевом временном сдвиге. Видно, что уровни, на которые выходят SF, различаются 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 межзвёздной 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, он вносит основной вклад в мерцания пульсара (дифракционные), а также определяет мелкомасштабную структуру в спектрах импульсов; второй – ближний, на расстоянии всего 0.13 пк, связанный со слабыми мерцаниями (крупномасштабная структура). Френелевский масштаб равен $2.5\cdot10^9$ 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 Θ_{ref}=120 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: Θ_{scat}=0.7 угловых мс. Анализ временной и частотной структурных функций дал значение показателя степени флуктуаций электронной плотности межзвёздной плазмы, n=3.73.

В целом, модель среды качественно повторяет модель среды, использованную нами ранее для интерпретации данных наблюдений мерцаний пульсара

B0950+08 (*Смирнова Т.И. и др.*, 2014). 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).

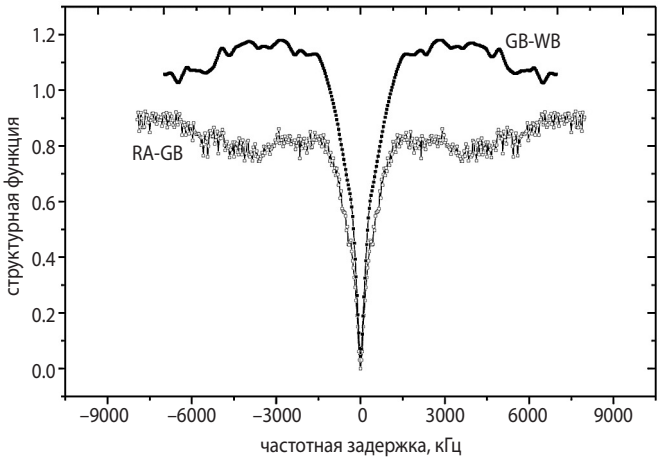


рисунок 16. Нормированные частотные структурные функции для наземной (GB-WB) и космической баз (RA-GB)

4. Исследование космических водяных мазеров на частоте 22 ГГц в проекте «РАДИОАСТРОН»

4.1. 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 чёрной 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 КРТ проекта «РАДИОАСТРОН» и двумя наземными станциями: 110-метровым радиотелескопом в Грин-Бэнк (США) и 32-метровым телескопом в Торуне (Польша). Проекция базы интерферометра в этих наблюдениях достигала примерно двух диаметров Земли, что соответствует угловому разрешению около 110 микросекунд дуги (рисунок 17).

Второй мегамазер, зарегистрированный на наземно-космическом интерферометре «РАДИОАСТРОН», находится в галактике NGC3079 (примерно 52–65 млн. световых лет в направлении созвездия Большой Медведицы). Наблюдения NGC 3079 в ноябре 2014 года с проекцией базы около 2.3 диаметра Земли (что соответствует угловому разрешению около 95 микросекунд дуги) привели к обнаружению излучения компактных мазерных деталей (рисунок 18).

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.

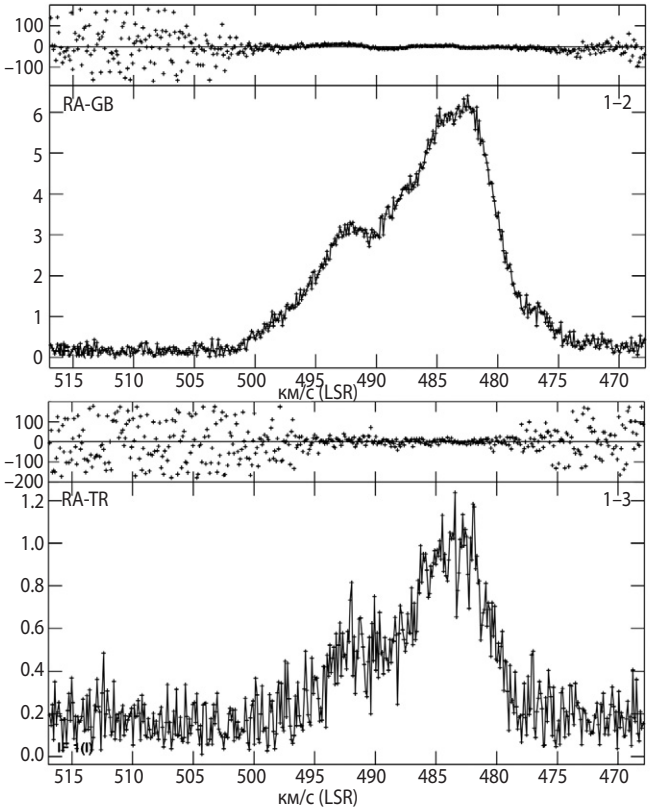


рисунок 17. Кросскорреляционный спектр мегамазерного излучения NGC4258, полученный между 10-метровым КРТ и наземными телескопами: 110-метровым радиотелескопом в Грин-Бэнке (вверху) и 32-метровым радиотелескопом в Торуни (внизу). Упорядоченное поведение фазы (верхняя часть рисунка) указывает на диапазон 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

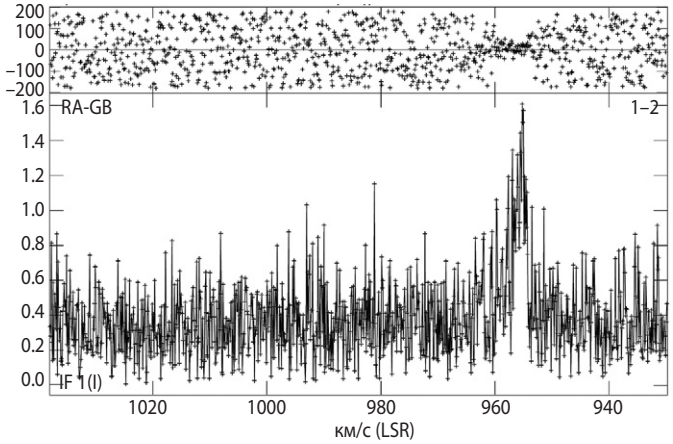


рисунок 18. Кросскорреляционный спектр мегамазерного излучения NGC3079, полученный между 10-метровым КРТ и 110-метровым радиотелескопом в Грин-Бэнке 14 ноября 2014 года, максимальная проекция базы составила 2.3 диаметра Земли (обозначения осей аналогичны рисунку 17)

4.2. 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 звёзд Orion KL. Она расположена на расстоянии около 1370 световых 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 звёздного 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 года на базе между космическим радиотелескопом «СПЕКТР-Р» и наземными радиотелескопами в Йебесе (Испания, 40-м), Торуне (Польша, 32-м) и 26-м телескопом 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 астрономической единицы (около трёх диаметров Солнца).

27 апреля 2015 года 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 двумя наиболее чувствительными наземными антеннами из принявших участие в наблюдениях: 100-метровом 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 наблюдениий 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 года в направлении на комплекс ярких водяных мазеров в направлении W3 (OH).

Коррелированный сигнал был зарегистрирован на проекциях базы до 3.8 диаметров Земли между КРТ 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.

4.3. Картографирование водяных мазеров

Представлены 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 года. Совместно с «РАДИОАСТРОНом» в эксперименте принимали участие Европейская РСДБ сеть (EVN), включая российские телескопы системы «Квазар – 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 19, слева. Изображение мазерного пятна, построенное по данным наземных телескопов (серые контуры), имеет протяжённую структуру, за исключением очень компактной детали (чёрные контуры), видимой вплоть до 6 диаметров Земли. Анализ данных «РАДИОАСТРОНа» и японского интерферометра VERA (частное сообщение Х. Имаи) позволил отождествить положение компактных деталей мазера, наблюдавшихся на наземно-космических базах (рисунок 19, справа). Это даёт возможность исследовать структуру и физические характеристики этой области звездообразования и уточнить механизм накачки. В 2015 году в рамках проекта «РАДИОАСТРОН» проведено повторное картографирование мазеров H_2O в этой области звездообразования во

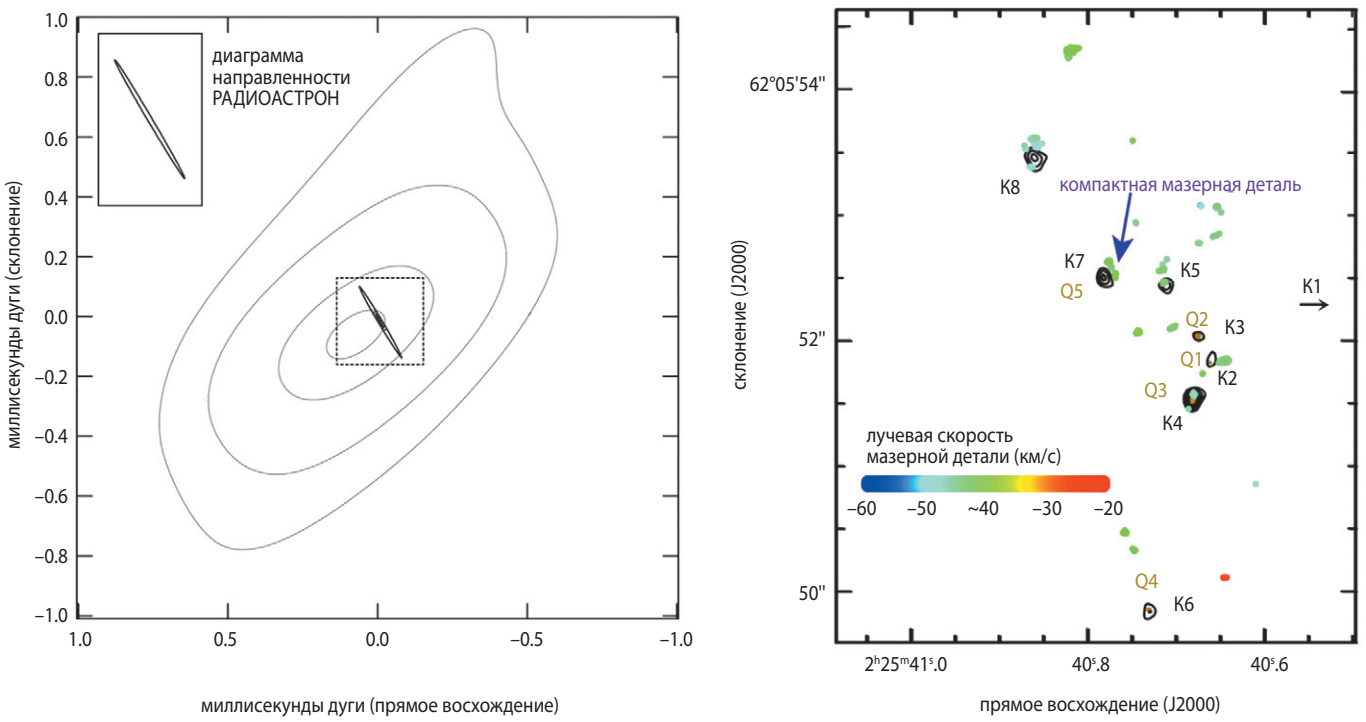


рисунок 19. W3 IRS5, слева: контурное изображение самого яркого мазерного пятна в линии H_2O, зарегистрированного на наземно-космических базах (данные получены во время совместного с европейской РСДБ-сетью, включая станции «Квазар – КВО», сеанса 17 октября 2013 года). Синтезированная диаграмма направленности наземно-космического интерферометра показана в верхнем левом углу изображения. Справа – карта распределения мазерных деталей в W3 IRS5, полученная в наблюдениях японского интерферометра VERA (*данные Х. Имаи*). Коричневые и чёрные контуры показывают распределение яркости 7-мм и 13-мм континуумного излучения. Положение самой яркой из компактных деталей, обнаруженных на «РАДИОАСТРОНе», показано стрелкой

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.

За время работы интерферометра было проведено более 135 наблюдательных сессий, во время которых наблюдались 19 (7 успешно) мазеров в областях звездообразования в нашей Галактике, 8 мазеров (0 успешно) в оболочках звёзд 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.

4.4. Тонкая пространственная структура мазера H2O в глобуле IC 1396 N: диск или джеты?

Глобула IC 1396 N, расположенная на расстоянии 750 пк, была выбрана для исследования со сверхвысоким разрешением. В этой области наблюдается активное образование звёзд промежуточных масс и обнаружены несколько молодых звёздных объектов и молекулярных выбросов. В направлении наиболее яркого молодого звёздного объекта IRAS 21391+5802 ($460L_\odot$) наблюдается сильный мазер H_2O, мониторинг которого выполняется на протяжении более чем 20 лет. Ранее были выполнены несколько интерферометрических исследований мазера H_2O и получены его изображения с разрешениями 0.5–100 мс. На основе анализа карт мазера предложена модель прецессирующего диска, тем не менее, интерпретация основных данных остается неоднозначной (*Slysh V.I. et al.*, 1999). Ожидалось, что наблюдения с более высокими разрешениями (в 3–30 раз), нежели в предыдущих исследованиях, позволят прояснить кинематику и динамику источника.

В 2014 году выполнены пять сессий наблюдений IC 1396 N с космическим телескопом «РАДИОАСТРОН» и сетью наземных телескопов (таблица 5).

В этих наблюдениях источник показал сильную переменность: в июле (во время сессии с самой короткой наземно-космической базой ~2.3 диаметров Земли, угловое разрешение 0.1 мс) максимальная плотность потока от источника, измеренная на одиночном телескопе, составила 5 Ян, а в декабре (в сессии с проекцией наземно-космической базы около 5.1 диаметров Земли, угловое разрешение 0.03 мс) – 51 Ян. Спектр, полученный во второй сессии наблюдений (b) с наилучшим покрытием uv-плоскости, приведён на рисунке 20а.

таблица 5 – Параметры сессий наблюдений IC 1396 N

код наблюдения	дата	длительность сессии, часы	проекции наземно-космических баз (диаметров Земли)	телескопы, участвовавшие в наблюдениях	плотность потока, измеренная на одиночной антенне, Ян
a	07.2014	3	2.5	Ys, Nt, Sr, Tr, Kl, RA	5
b	10.2014	4	3.8	Ys, Kl, Ef, Tr, RA	12
c	11.2014	1	5.9	Ef, Tr, Kl, Sv, RA	20
d	12.2014	1	5.1	Ef, Sr, Kl, RA	51
e	12.2014	1	3.8	Sr, Tr, Sv, Zc, RA	28

Интерферометрический отклик от источника не был получен на наземно-космических базах. Отсутствие детектирования сигнала на проекциях баз более 2.5 диаметров Земли указывает на нижний предел – размер мазера L>0.3 а.е. и на верхний предел – яркостная температура 6.25×10^{12} K.

Позиции и потоки мазерных деталей были получены из карт, построенных методом частоты интерференционных лепестков по данным наблюдений на наземных базах. Получена карта мазера H_2O, указывающая на наличие мощного выброса вещества из протозвёздного объекта. Обнаружены вытянутые по прямой линии четыре новые группы пятен (2–5, центральная часть спектра). При этом группы 2 и 5 совпадают пространственно, а группы 3 и 4 не наблюдались в 1996 году и, возможно, являются джетами, которые сформировались в период 18 лет между наблюдениями 1996 и 2014 годы (рисунок 20б). Сопоставление положений групп деталей 1, 4 и 3, 6 (2014 год) с деталями, наблюдавшимися ранее в 1996 году, а также наличие линейной зависимости скорости от расстояний может означать, что данные группы организованы в два протопланетных кольца (рисунок 20в).

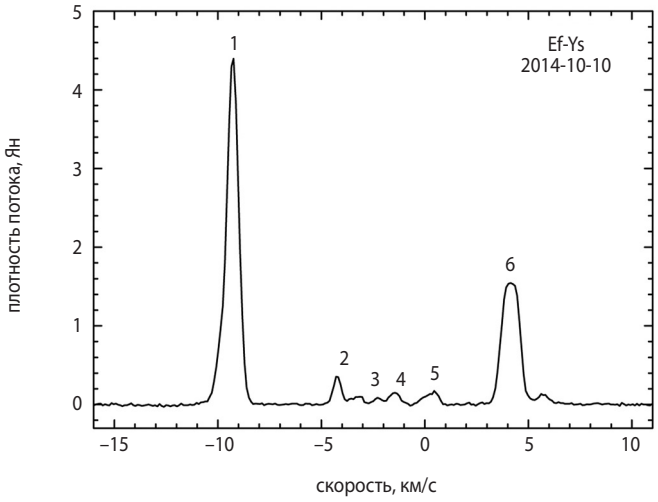
Правильная структура (деталей соответствующих центральной части спектра), которая наблюдалась в 1996 году и интерпретировалась ранее как кеплеровский диск (*Slysh V.I. et al.*, 1999), также детектируется в наблюдениях 2014 года, но имеет меньший поток. Другими словами, на протяжении 18 лет пространственная структура мазера, которой соответствует центральная часть спектра с интервалом скорости примерно 1.5 км/с, сохраняется в масштабе менее 20 миллисекунд дуги, что на расстоянии 750 пк соответствует линейному размеру около 15 а.е.

заключение

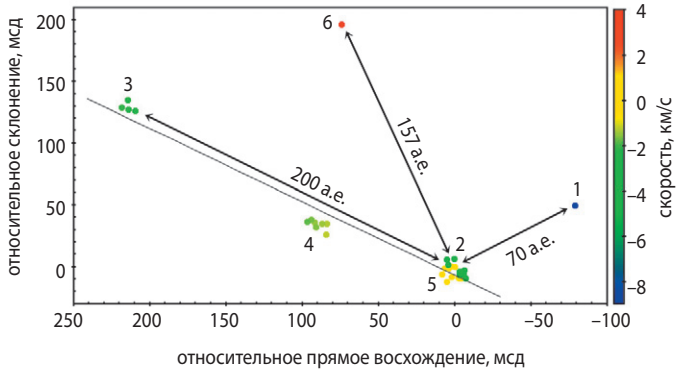
Исследование объектов Вселенной с рекордным угловым разрешением позволило научным группам проекта «РАДИОАСТРОН» получить ряд важных научных результатов. Коротко суммируем некоторые из них.

1. Анализ результатов наблюдений квазара 3C273, выполненных на 18, 6 и 1.3 см на проекциях баз, достигающих 171000 км, позволил обнаружить наличие структуры в ядре квазара на масштабах до 26 микросекунд дуги (2.7 световых месяца). Ее яркость оценена на уровне, превышающем 10^{13} K. Аналогичные результаты обнаруживаются для большого количества ядер активных галактик в проводимом обзоре. Это противоречит возможности существования в ядрах данных объектов равенства между плотностью энергии релятивистских частиц и магнитного поля. Полученные экстремальные величины яркости заставляют нас переосмыслить понимание механизма нетеплового излучения ядер квазаров, а также значительно корректируют предыдущие и современные результаты РСДБ-обзоров активных галактик, проводимые на наземных радиоинтерферометрах. Кроме этого, мы сообщаем об открытии эффекта субструктуры рефракционного рассеяния излучения этого квазара на длине волны 18 см.

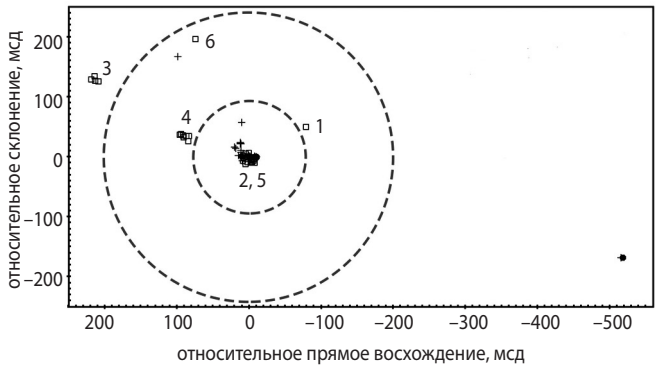
2. Космические РСДБ-наблюдения квазара TXS 0642+449 (OH 471) с высоким красным смещением, выполненные на длине волны 18 см (частота 1.6 ГГц) в рамках ранней научной программы миссии «РАДИОАСТРОН», были использованы для тестирования работы орбитального КРТ в поляриметрическом режиме наблюдений с целью 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 надёжность 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 (≈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 реколлимационной волне.



а



б



в

рисунок 20. а – кросскорреляционный спектр (Стокс I), полученный во второй сессии наблюдений 2014 году (наземная база). Цифры над спектральными деталями соответствуют номерам мазерных групп; **б** – новые мазерные пятна – возможные джеты. Карта компонентов мазера H_2O в IC 1396 N, полученная в данных наблюдениях (наземная база); **в** – возможные протопланетные кольца. Комбинированная карта компонентов мазера H_2O в IC 1396 N, полученных:

- в данных наблюдениях (наземная база) – квадраты;
- в наблюдениях 1996 г. (*Slysh V.I. et al.*, 1999) – чёрные кружки;
- в наблюдениях 1996 г. (*Patel N.A. et al.*, 2000) – крестики

3. Российский КРТ «СПЕКТР-Р» совместно с 15 наземными радиотелескопами из России (сеть «Квазар – КВО»), Европы и США, во время наблюдений активного ядра галактики в созвездии Ящерицы получил изображения на длине волны 1.3 см с самым высоким в истории астрономии угловым разрешением (21 микросекунда дуги). Эти измерения позволили выявить особенности структуры джетов – гигантских струй вещества, которые выбрасывает сверхмассивная чёрная дыра в центре этой галактики, обнаружить в ядре ударную волну и восстановить спиральную структуру магнитного поля.

4. Было проведено картографирование близкой радиогалактики 3C84 на частотах 5 и 22 ГГц. 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 увидеть контр-джет (выброс на Север) на масштабах субпарсеков. Джет и контр-джет разрешены поперек, угловое разрешение карты составляет примерно 50 микросекунд дуги или 500 радиусов Шварцшильда. Детали в структуре струи у её основания позволяют подробно изучать процесс формирования джета в районе центральной сверхмассивной чёрной 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. Заметим, что аналогичный результат виден и при наблюдениях «РАДИОАСТРОНом» струи в квазаре 0836+710. На расстоянии более парсека от ядра 3C84 выделяется пятно, его яркость оказалась экстремальной для такого далекого расстояния от центральной машины галактики. Возможно зарегистрирован эффективный разогрев релятивистской плазмы за счёт взаимодействия с окружающей средой на фронте ударной волны.

5. На максимальных базах интерферометра (50000–250000 км) обнаружена и исследована субструктура диска рассеяния радиоизлучения пульсаров. Такая субструктура обусловлена действием межзвёздного 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. 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 межзвёздной плазмы; положение этих слоев коррелирует со спиральной структурой Галактики или с конкретными галактическими туманностями.

7. 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.

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

9. Наблюдения мазеров воды и гидроксила с помощью «РАДИОАСТРОНа» 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).

10. Очень компактные мазерные детали с угловыми размерами в 20–60 микросекунд дуги обнаружены в нескольких областях звездообразования. Это соответствует линейным размерам в 5–10 млн. километров (несколько солнечных диаметров). В ряде источников обнаружены множественные компоненты сверхмалого размера, что закладывает основу для исследования внутренней кинематики областей звездообразования.

11. Оценки наблюдаемых яркостных температур лежат в диапазоне от нескольких единиц $\times 10^{12}$ до 10^{16} К. При этом в наблюдавшихся источниках на космических базах наблюдается существенная потеря потока. Это свидетельствует о том, что в окрестностях сверхкомпактных компонент присутствуют более протяженные области мазерного излучения, дающие значительный вклад в общий поток.

Проект «РАДИОАСТРОН» осуществляется АКЦ ФИАН и НПО имени С.А. Лавочкина по контракту с Российским космическим агентством совместно с многими научно-техническими организациями в России и других странах. Представленные результаты частично основаны на наблюдениях, выполненных на радиотелескопах ИПА РАН. Представленные исследования частично основаны на результатах наблюдений радиотелескопа РТ-70 Евпатория (Украина), проведенных радиоастрономическим институтом Национальной Академии наук Украины по контракту с Государственным космическим агентством Украины и Национальным центром управления и испытаний космических средств при технической поддержке АКЦ ФИАН. Результаты оптических позиционных измерений КА «Спектр-Р» глобальной сетью телескопов МАСТЕР (*Lipunov V. et al*., 2010), коллаборацией ISON и Коуровской обсерваторией использовались для высокоточного восстановления орбиты аппарата в дополнение к стандартным средствам миссии. Результаты частично получены на основе наблюдений со 100-м телескопом института Радиоастрономии общества Макса Планка (MPIfR) в Эффельберге, с телескопами Медичина, Ото, Сардиния, управляемых INAF. Европейская РСДБ сеть является совместным проектом независимых Европейских, Африканских, Азиатских и Североамериканских радиоастрономических институтов. Национальная радиоастрономическая обсерватория США является средством национального научного фонда США и управляется согласно контракта с Associated Universities, Inc. Обсерватория Аресибо управляется SRI International согласно контракта с национальным научным фондом США (AST-1100968), совместно с Ana G. Mendez-Universidad Metropolitana и Universities Space Research Association. Телескопы Австралийской РСДБ-решётки являются частью Australia Telescope National Facility, которая финансируется Commonwealth of Australia и управляется CSIRO.

Представленные научные исследования частично поддержаны Программой фундаментальных исследований Президиума РАН П-7, подпрограмма «Переходные и взрывные процессы в астрофизике», грантом РФФИ 13-02-12103.

список литературы

Андрианов А.С., Гирин И.А., Жаров В.Е., Костенко В.И. и др. Корреляционная обработка данных наземно-космического интерферометра «РАДИОАСТРОН» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 3, С. 55-59.

Бургин М.С., Войцик П.А., Кутькин А.М., Лисаков М.М. и др. Управление и контроль функционирования бортового комплекса научной аппаратуры космического радиотелескопа // Космические исследования. 2015. 53. С. 199-206.

Заславский Г.С., Степаньянц В.А., Тучин А.Г., Погодин А.В. и др. Коррекция траектории движения космического аппарата «СПЕКТР-Р» // Космические исследования. 2014. 52. С. 387-398.

Захваткин М.В., Пономарев Ю.Н., Степаньянц В.А., Тучин А.Г. и др. Навигационное обеспечение научной миссии «РАДИОАСТРОН» // Космические исследования. 2014. 52. С. 376-386.

Каневский Б.З., Смирнов А.И., Сазанков С.В., Белоусов К.Г. и др. Наземнная станция слежения. Проект «РАДИОАСТРОН» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 3. С. 47-54.

Кардашев Н.С., Алакоз А.В., Ковалев Ю.Ю., Попов М.В. и др. «РАДИОАСТРОН»: итоги выполнения ранней научной программы исследований объектов Вселенной со сверхвысоким угловым разрешением // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 3. С. 4-11.

Кардашев Н.С., Хартов В.В., Абрамов В.В., Авдеев В.Ю. и др. «РАДИОАСТРОН» – телескоп размером 300000 км: основные параметры и первые результаты наблюдений // Астрономический Журнал. 2013. 90. С. 179-222.

Ковалев Ю.А., Васильков В.И., Попов М.В., Согласнов В.А. и др. Проект «РАДИОАСТРОН». Измерения и анализ основных параметров космического телескопа в полете в 2011–2013 гг. // Космические исследования. 2014. 52. С. 430-439.

Пащенко И.Н., Ковалев Ю.Ю., Войцик П.А. Первая оценка величины инструментальной поляризации космического радиотелескопа «РАДИОАСТРОН» по результатам ранней научной программы наблюдений активных ядер галактик // Космические исследования. 2015. 53. С. 214-224.

Рудницкий А.Г., Каруппусами Р., Попов М.В., Согласнов В.А. Исследование космической плазмы по данным РСДБ-наблюдений гигантских импульсов пульсара B0531+21 в проекте «РАДИОАСТРОН» // Астрономический Журнал. 2016. 93. С. 167-176.

Хартов В.В., Ширшаков А.Е., Артюхов М.И., Казакевич Ю.В. и др. Особенности управления миссией «РАДИОАСТРОН» // Космические исследования. 2014. 52. С. 360-365.

Bruni G., Anderson J.M., Alef W., Lobanov A. et al. Space-VLBI with RADIOASTRON: new Correlator Capabilities at MPIfR // 2014. Proceedings of Science, EVN 2014. id. 119.

Cordes J.M., Lazio T.J.W. NE2001. II. Using Radio Propagation Data to Construct a Model for the Galactic Distribution of Free Electrons // Astroph/0301598. 2003. P. 1-41.

Duev D.A., Zakhvatkin D.A., Stepanyants V.A., Calves G.M. et al. RADIOASTRON as a Target and as an Instrument: Enhancing the Space VLBI Mission's Scientific Output // Astronomy & Astrophysics. 2015. 573. id. 99.

Ford H.A., Anderson R., Belousov K., Brandt J.J. et al. The RADIOASTRON Green Bank Earth Station // Proceedings of the SPIE. 2014. 9145. id. 91450B. 11 p.

Gomez J.L., Lobanov A.P., Bruni G., Kovalev Y.Y. et al. Probing the Innermost Regions of AGN Jets and Their Magnetic Fields with RADIOASTRON. I. Imaging BL Lacertae at 21 Microarcsecond Resolution // Astrophysical Journal. 2016. 817. id. 96.

Gwinn C.R., Popov M.V., Bartel N., Andrianov A.S. et al. PSR B0329+54: Statistics of Substructure Discovered within the Scattering Disk on RADIOASTRON Baselines of up to 235,000 km // Astrophysical Journal. 2016. 822. id. 96.

Hankins T.H., Jones G., Eilek J.A. The Crab Pulsar at Centimeter Wavelengths. I. Ensemble Characteristics // Astrophysical Journal. 2015. 802, issue 2. id. 130.

Hill A.S., Stinebring D.R., Barnor H.A., Berwick D.E. et al. I. Frequency Dependence // Astrophysical Journal. 2003. 599. P. 457-464.

Johnson M.D., Kovalev Y.Y., Gwinn C.R., Gurvits L.I. et al. Extreme Brightness Temperatures and Refractive Substructure in 3C273 with RADIOASTRON // Astrophysical Journal Letters. 2016. 820. P. L10.

Karuppusamy R., Stappers B.W., van Straten W. Giant pulses from the Crab pulsar. A wide-band study // Astronomy & Astrophysics. 2010. 515. A36.

Kovalev Y.Y., Kardashev N.S., Kellermann K.I., Lobanov A.P. et al. RADIOASTRON Observations of the Quasar 3C273: a Challenge to the Brightness Temperature Limit // Astrophysical Journal Letters. 2016. 820. P. L9.

Lipunov V., Kornilov V., Gorbovskoy E. et al. Master Robotic Net // Advances in Astronomy. 2010. 349. P. 171-175

Lobanov A.P., Gomez J.L., Bruni G., Kovalev, Y.Y. et al. RADIOASTRON Space VLBI Imaging of Polarized Radio Emission in the High-Redshift Quasar 0642+449 at 1.6 GHz // Astronomy & Astrophysics. 2015. 583. id. 100.

Patel N.A., Greenhill L.J., Herrnstein J., Zhang Q. et al. Proper Motion of Water Masers Associated with IRAS 21391+5802: Bipolar Outflow and an AU-Scale Dusty Circumstellar Shell // Astrophysical Journal. 2000. 538. P. 268-274.

Slysh V.I., Val'tts I.E., Migenes V., Fomalont E. et al. Protoplanetary Disk and/or Bipolar Outflow Traced by H_2O Masers in IC 1396N // Astrophysical Journal. 1999. 526. P. 236-241.

Smirnova T.V., Shishov V.I., Popov M.V., Gwinn C.R., Anderson J.M. et al. RADIOASTRON Studies of the Nearby, Turbulent Interstellar Plasma with the Longest Space-Ground Interferometric Baselines // Astrophysical Journal. 2014. 786. id.115.

Stinebring D.R., McLaughlin M.A., Becker K.M., Espinoza Goodman J.E. et al. Faint Scattering Around Pulsars: Probing the Interstellar Medium on Solar System Size Scales // Astrophysical Journal. 2001. 549. P. L97-L100.

Zou W.Z., Hobbs G., Wang N., Manchester R.N. et al. Timing measurements and proper motions of 74 pulsars using the Nanshan radio telescope // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2005. 362. P. 1189-1198.

Статья поступила в редакцию 30.06.2016 г.