

К 90-ЛЕТИЮ ФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА им. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РАН (ФИАН)

ОБОЗРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

От проекта "Спектр-Р" к проекту "Спектр-М":
вехи космической радиоастрономии

С.Ф. Лихачёв, Т.И. Ларченкова

Представлен обзор основных технических решений проекта "Спектр-Р" ("Радиоастрон") и научных результатов, полученных в ходе его реализации в 2011–2019 гг. Также кратко описаны общие характеристики и научные задачи космической обсерватории "Миллиметрон" ("Спектр-М"), являющейся развитием проекта "Спектр-Р" в субмиллиметровый диапазон длин волн и планируемой к запуску в начале 2030-х годов. Головной научной организацией в обоих проектах является Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН.

Ключевые слова: радиоастрономия, субмиллиметровая астрономия, Спектр-Р, Радиоастрон, Спектр-М, Миллиметрон, радиointерферометрия, активные ядра галактик, струи, квазары, пульсары, мазеры, галактики, сверхмассивные чёрные дыры, кротовые норы, космическое микроволновое излучение, межзвёздная среда, вода в Галактике

PACS numbers: 07.87.+v, 95.55.-n, 98.80.Es

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.03.039662>

Содержание

1. Введение (814).
 2. Радиотелескопы и радиointерферометры (815).
 3. Проект "Спектр-Р" (816).
 - 3.1. Технические решения проекта "Спектр-Р".
 - 3.2. Научная программа и результаты проекта "Спектр-Р".
 4. Космическая обсерватория "Миллиметрон" (821).
 - 4.1. Технические характеристики обсерватории "Миллиметрон".
 - 4.2. Основные направления научной программы обсерватории "Миллиметрон".
 5. Заключение (824).
- Список литературы (824).

1. Введение

В 1980-х годах были предложены для реализации четыре масштабных космических проекта серии "Спектр", работающие в основных диапазонах электромагнитного спектра. Это проект "Спектр-Р" ("Радиоастрон") для изучения космических источников радиоизлучения в диапазоне длин волн от 92 до 1,35 см [1, 2], обсерватория "Спектр-РГ" ("Спектр-Рентген-Гамма") для наблюдения космических объектов в рентгеновских лучах [3], проект

"Спектр-УФ" ("Всемирная космическая обсерватория — Ультрафиолет") для исследования источников ультрафиолетового излучения [4] и проект "Спектр-М" (космическая обсерватория "Миллиметрон") для наблюдения космических объектов в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн [5, 6, 76].

Идея создания космических обсерваторий "Радиоастрон" и "Миллиметрон" принадлежит академику, лауреату Государственных премий СССР Николаю Семёновичу Кардашёву. Под его руководством был реализован проект "Радиоастрон" и начата работа над созданием космической обсерватории "Миллиметрон".

Радиотелескоп "Спектр-Р" был выведен на орбиту 18 июля 2011 г. и успешно проработал в космосе до января 2019 г., превысив свой гарантийный срок более чем в два раза. Рентгеновская космическая обсерватория "Спектр-РГ" стартовала 13 июля 2019 г. и в настоящее время работает на орбите и передаёт уникальные данные о космических рентгеновских источниках [8, 9]. Космические обсерватории "Спектр-УФ" и "Спектр-М" планируются к запуску в ближайшее десятилетие.

С гордостью отметим, что "Спектр-Р", разработанный в Астрокосмическом центре (АКЦ) ФИАН в кооперации с отечественной промышленностью, был не только первым успешно реализованным проектом из серии "Спектр", но и первым крупным космическим проектом современной России. Это уникальный по своим масштабам и сложности проект Федерального космического агентства, Российской академии наук и международной научной кооперации для изучения объектов Вселенной в радиодиапазоне. Проект "Радиоастрон" не только позволил вернуться российским учёным в мировое сообщество

С.Ф. Лихачёв (*), Т.И. Ларченкова (**)

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация
E-mail: (*) slikhach@asc.rssi.ru, (**) ltanya@asc.rssi.ru

Статья поступила 20 февраля 2024 г.,
после доработки 12 марта 2024 г.

РСДБ (радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами), но и с его помощью получить уникальные научные результаты. Совместные наблюдения космического радиотелескопа "Спектр-Р" с диаметром зеркала 10 м и крупнейших наземных радиотелескопов позволили реализовать наземно-космический радиоинтерферометр с самой большой длиной базы — 350000 км, что существенно улучшило угловое разрешение наблюдаемых объектов по сравнению как с наземными радиоинтерферометрами, так и с реализованным ранее наземно-космическим интерферометром VSOP [10, 11].

Космическая обсерватория "Миллиметрон" ("Спектр-М"), являясь логическим продолжением проекта "Спектр-Р" в более коротковолновом диапазоне электромагнитного спектра с технологиями следующего уровня сложности, также разрабатывается в Астрокосмическом центре ФИАН. Создание этой обсерватории станет следующим шагом в развитии технологий космического приборостроения и крупных космических конструкций, что позволит в конечном итоге реализовать амбициозную научную программу обсерватории.

В настоящей работе будет сделан краткий обзор технических решений и научных результатов проекта "Радиоастрон", а также научных задач космической обсерватории "Миллиметрон".

2. Радиотелескопы и радиоинтерферометры

Прежде чем непосредственно приступить к обсуждению космического проекта "Радиоастрон" и полученных с его помощью научных результатов, сделаем краткое введение в радиоастрономию. Радиоастрономия изучает космические объекты, излучающие в радиодиапазоне электромагнитного спектра, а именно, в диапазоне длин волн от нескольких миллиметров до десятка метров. Источниками радиоизлучения является большинство космических объектов, таких как галактики, звёзды, планеты, облака межзвёздного газа и др. В радиодиапазоне высвечивается энергия вспышечных процессов в активных ядрах галактик и квазарах, многих процессов, происходящих на фронтах ударных волн в межзвёздной среде и при взаимодействии турбулентных газовых потоков. Быстро вращающиеся нейтронные звёзды с сильными магнитными полями наблюдаются как радиопульсары.

Впервые космическое радиоизлучение было обнаружено в 1931 г. американским радиоинженером Карлом Янским при изучении атмосферных радиопомех. В 1937 г. Гроут Ребер сконструировал первый радиотелескоп, который имел параболическую форму и диаметр антенны около 9 м. С помощью этого телескопа была получена первая радиокарта неба на длине волны 1,5 м. Активное развитие радиоастрономии началось после Второй мировой войны. Были построены полноповоротные параболические радиотелескопы с диаметром 70–100 м в США, Германии, Англии, СССР и Австралии.

Простейший радиотелескоп состоит из антенны, приёмного устройства и регистрирующего устройства. Основной характеристикой радиотелескопа является его диаграмма направленности. Она характеризует как чувствительность, так и угловое разрешение, определяемое шириной главного лепестка диаграммы направленности (см., например, [12]). Ширина диаграммы направленно-

сти радиотелескопа примерно равна отношению длины волны λ , на которой проходят наблюдения, к диаметру зеркала телескопа D . Угловое разрешение характеризует способность радиотелескопа восстанавливать изображение наблюдаемого источника с заданным уровнем детализации, поэтому ширина диаграммы направленности определяет размер самых мелких деталей источника, различимых как отдельные детали. Из соотношения λ/D становится понятно, что для достижения большего разрешения при фиксированной длине волны необходимо увеличить диаметр телескопа.

Для решения проблемы увеличения углового разрешения было предложено "синтезировать" зеркало большого диаметра из нескольких отдельных независимых антенн. Угловое разрешение такого "синтетического" инструмента (радиоинтерферометра) определяется не диаметром отдельных антенн, а расстоянием между ними, так называемой базой радиоинтерферометра D . Если взять две антенны, расположенные на расстоянии D друг от друга, то сигнал от источника до одной из антенн будет приходить чуть раньше, чем до другой. Если затем сигналы с двух антенн проинтерферировать, то из результирующего сигнала с помощью специальной математической процедуры редукции можно восстановить информацию об источнике с эффективным разрешением. Такая процедура называется апертурным синтезом. Важно, чтобы каждый радиотелескоп обладал идентичными приёмными устройствами и линиями связи, обеспечивающими сохранение когерентности принимаемых сигналов при их передаче в центр корреляционной обработки. Интерференцию можно осуществлять путём передачи сигнала по кабелям и волноводам в общий смеситель. Так работают многоантенные связанные радиоинтерферометры, которые начали строиться в 1960-х годах.

В работе советских учёных Л. Матвеевко, Н. Кардашёва, Г. Шоломицкого [13] было предложено на каждой антенне независимо регистрировать данные наблюдений, а затем их совместно обрабатывать, что позволяет использовать радиотелескопы, находящиеся на сколь угодно больших расстояниях друг от друга. Такой метод получил название радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). Для проведения РСДБ-наблюдений необходимо иметь несколько радиотелескопов, оснащённых однотипными приёмниками и системами регистрации, и центр корреляционной обработки. В этом случае "интерферируют" предварительно оцифрованные по меткам точного времени и записанные на носителе сигналы наблюдаемого источника с помощью соответствующего программного обеспечения.

Вектор базы D имеет длину $D = \Delta S / \cos \beta$, где β — угол между направлением на источник и вектором базы (рис. 1). Так как $\Delta S = vt$, где v — скорость радиоволн, то задержка $\tau = (D/v) \cos \beta$. Таким образом, задержка τ содержит информацию о длине D и измеряется корреляционным методом. Записи сигналов $S(t)$ на телескопе 1 и $S(t + \tau)$ на телескопе 2 сводятся в корреляторе, на выходе которого воспроизводится корреляционная функция $K(\tau) = \langle S(t) S(t + \tau) \rangle$, имеющая максимум при $\tau = 0$. Сдвигая записи до появления максимума выходного сигнала, определяют задержку τ , равную величине сдвига.

Современные технические средства позволили создать систему РСДБ, которая включает в себя теле-

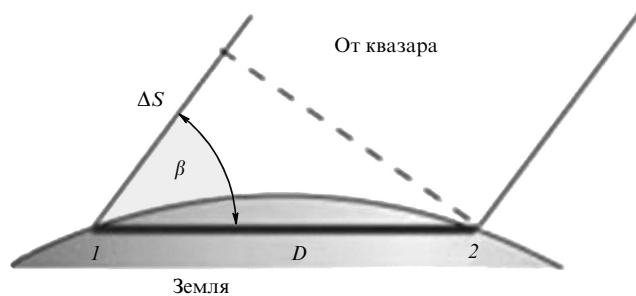


Рис. 1. Иллюстрация радиоинтерферометрического метода.

скопы, расположенные на разных материках и разнесённые на несколько тысяч километров. Метод РСДБ позволяет определить длину вектора базы с ошибкой 2–3 см и направление на источник с точностью до 0,001 угловой секунды по обоим угловым координатам. Первые трансконтинентальные интерферометры были реализованы в 1968–1969 гг. между телескопами в США и Швеции [14], а также между антеннами дальней космической связи США и Австралии [15, 16]. Радиоастрономы СССР и США провели в 1969 г. совместные трансконтинентальные интерферометрические наблюдения с использованием 43-м телескопа в Грин Бэнке (США) и 22-м телескопа в Симеизе (СССР) [17, 18].

Так как наземные сети РСДБ ограничены размером Земли, то для реализации баз интерферометра больше диаметра Земли необходимо выведение радиотелескопа в космос [19]. В конце 1970-х гг. в СССР был создан первый космический радиотелескоп КРТ-10 с рефлекторной раскрывающейся антенной диаметром 10 м, имеющей сетчатую отражающую поверхность, оснащённый приёмной аппаратурой для длин волн 12 и 72 см. Летом 1979 г. этот радиотелескоп был установлен на пилотируемой орбитальной станции "Салют-6", где были проведены астрономические наблюдения [20, 21]. Благодаря работе КРТ-10 была продемонстрирована принципиальная возможность использования космических радиотелескопов для наблюдения астрономических объектов.

Первые наземно-космические интерферометры были реализованы в конце 1980-х гг. в США [22, 23] и в конце 1990-х гг. в Японии (проект VSOP [10, 11]). Наземно-космический радиоинтерферометр "Радиоастрон" начал свою работу в 2011 г. после успешного старта ракеты "Зенит-3Ф" с космическим аппаратом "Спектр-Р" 18 июля 2011 г. с 45-й площадки космодрома Байконур (рис. 2).

3. Проект "Спектр-Р"

Космический радиотелескоп (КРТ), входящий в состав бортового комплекса научной аппаратуры космического аппарата (КА) "Спектр-Р" (рис. 3), и наземный научный комплекс созданы Астрокосмическим центром ФИАН в тесной кооперации с АО "НПО Лавочкина" и рядом научных и производственных организаций России. Некоторые приборы бортового комплекса поставлены зарубежными организациями (рубийевый стандарт частоты, приёмник диапазона 18 см, высокочастотный маломощный усилитель). Модуль служебных систем "Навигатор", входящий в состав КА, и наземный комплекс управления КА созданы специалистами АО "НПО Лавочкина" с участием большого числа организаций Роскосмоса.



Рис. 2. Старт ракеты-носителя с космическим радиотелескопом "Спектр-Р" и разгонным блоком "Фрегат" на стартовой площадке 45 космодрома Байконур 18 июля 2011 г. (Из работы [2].)

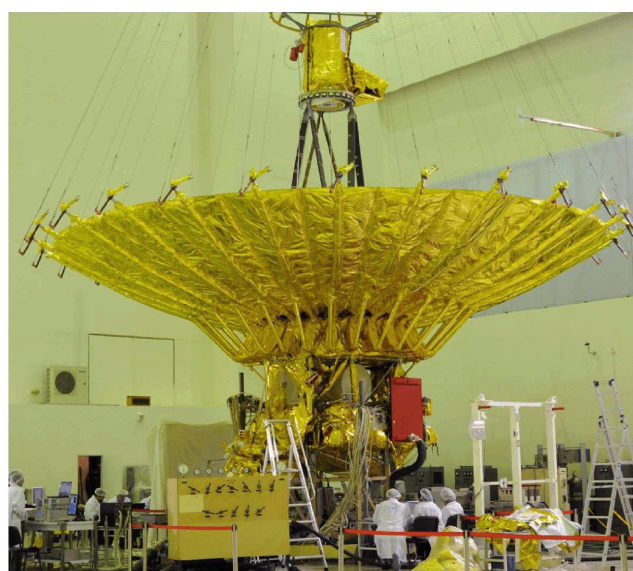


Рис. 3. Космический радиотелескоп "Спектр-Р" на заключительных наземных испытаниях в АО "НПО Лавочкина" (Из работы [2].)

3.1. Технические решения проекта "Спектр-Р"

Подробное описание конструкции КРТ, конфигурации и параметров бортового комплекса научной аппаратуры, а также наземного комплекса управления можно найти в работе [2]. Здесь же мы кратко перечислим основные составляющие КРТ и наземного сегмента. Обсерватория "Спектр-Р" спроектирована по модульному принципу и состоит из служебного модуля "Навигатор", на который установлена рефлекторная антенна диаметром 10 м и бортовой комплекс научной аппаратуры, в том числе приёмная аппаратура, работающая на длинах волн 92, 18, 6,2 и 1,35 см. Компоновка КРТ и аппаратурного комплекса на служебном модуле показана на рис. 4. Для обеспечения высокой надёжности служебного модуля (без изготовления экспериментального космического аппарата для дополнительных лётных испытаний) в его составе были максимально использованы узлы, системы и агрегаты, имеющие лётную квалификацию на космических аппаратах. Такой подход существенно сократил стоимость и сроки создания обсерватории за счёт сведе-

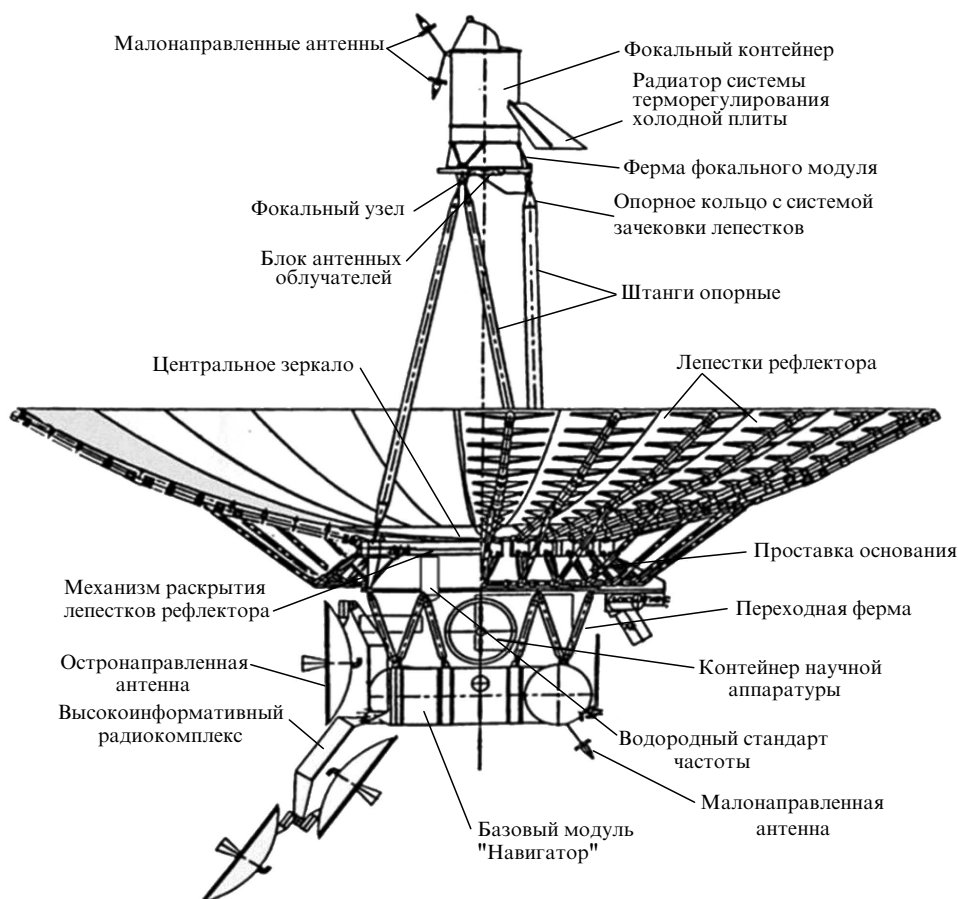


Рис. 4. Компоновка космического радиотелескопа на базовом модуле "Навигатор". (Из работы [24].)

ния к минимуму объёма наземной экспериментальной отработки, что было особенно актуально в условиях ограниченного финансирования проекта.

Конструкция антенны КРТ была разработана исходя из необходимости размещения 10-метрового зеркала антенны в сложенном состоянии в отсеке ракеты под головным обтекателем с заданным внутренним диаметром 3,8 м, а также обеспечения необходимой точности отражающей поверхности после её раскрытия. Максимально допустимое отклонение поверхности зеркала радиотелескопа от профиля идеального параболоида вращения во всех условиях эксплуатации, согласно техническому заданию, составило ± 2 мм [2]. Отражающая поверхность сформирована центральной частью зеркала диаметром 3 м и 27 радиальными лепестками-сегментами, синхронно раскрывающимися на орбите в космосе. Для создания высокоточной отражающей поверхности лепестков была проведена двухэтапная наземная регулировка положения лепестков.

Приёмный комплекс состоял из бортовых приёмников, обеспечивающих приём сигналов в четырёх диапазонах длин волн: приёмник П-КРТ-92 (диапазон Р с центральной частотой 324 МГц в полосе ± 7 МГц), приёмник П-КРТ-18 (диапазон L с центральной частотой 1664 МГц в полосе ± 30 МГц), приёмник П-КРТ-6М (диапазон С с центральной частотой 4832 МГц в полосе ± 55 МГц) и приёмник П-КРТ-135М (диапазон К с центральной частотой 22,232 ГГц и ещё семью поддиапазонами частот для многочастотного синтеза в интервале частот 18,372–25,120 ГГц) [2]. Каждый приёмник имел

два независимых идентичных канала, на входы которых подаются сигналы в левой или правой круговой поляризации из блока антенных облучателей.

Хорошо известно, что в РСДБ ключевое значение имеет стабильность частоты (фазы), определяемая прежде всего стандартом частоты, сигнал от которого используется в качестве первичного опорного сигнала для осуществления необходимых последовательных частотных преобразований. КРТ был способен работать с опорными сигналами от трёх источников: бортового водородного стандарта частоты 5 МГц или 15 МГц, сигнала 15 МГц петли фазовой синхронизации высокоинформативного радиоканала (ВИРК), синхронизированного сигналом наземного водородного стандарта частоты на станции слежения, и бортового рубидиевого стандарта частоты 5 МГц. Отметим, что бортовой водородный стандарт частоты КРТ, созданный специалистами ЗАО "Время-Ч", стал первым в мире бортовым активным водородным стандартом частоты на околоземной орбите. ВИРК предназначен для передачи высокоскоростной видеoinформации от космического радиотелескопа на наземную станцию слежения и для синхронизации бортовой опорной частоты сигналом от наземного водородного стандарта в одном из двух режимов: "КОГЕРЕНТ" и "Н-мазер".

Важной особенностью проекта "Радиоастрон" стал выбор сильноэволюционирующей под воздействием возмущений Луны и Солнца орбиты. Величина эксцентриситета орбиты изменялась от 0,96 до 0,59, наклонение — в пределах от 10° до 85° , радиус перигея от 7000 км



Рис. 5. Радиотелескоп РТ-22 ПРАО АКЦ ФИАН в г. Пушино.

до 81,5 тыс. км, а радиус апогея от 280 до 353 тыс. км. Для анализа данных, полученных с помощью наземно-космического интерферометра, необходимо с максимальной высокой точностью определять положение его базы, т.е. с высокой точностью восстанавливать орбиту КА. Для определения орбиты использовалась модель движения, учитывающая нецентральность гравитационного поля Земли, притяжение Луны и Солнца, переменное давление солнечного света, возмущающие ускорения, возникающие в процессе разгрузки маховиков; поправки к гравитационному полю Земли, обусловленные её деформацией под действием гравитации Луны и Солнца. Использование такой модели позволило восстанавливать орбиту КА для обработки данных на корреляторе с точностью положения не хуже ± 500 м и точностью скорости не хуже ± 2 см s^{-1} по трём координатам.

13 августа 2011 г. был проведён первый сеанс связи с наземной станцией слежения, созданной на базе радиотелескопа РТ-22 в Пушинской радиоастрономической обсерватории (ПРАО) АКЦ ФИАН в г. Пушино (рис. 5). С этого момента были начаты измерения основных параметров космического радиотелескопа, поиск лепестков наземно-космического интерферометра и выполнение научной программы. В течение первых трёх месяцев после запуска была выполнена программа лётных испытаний бортовых систем космической платформы "Навигатор", подтвердившая их соответствие техническим требованиям. По ряду параметров бортовых систем реальные характеристики, полученные в ходе лётных испытаний, существенно превысили требования технических заданий, что позволило обеспечить наилучшие условия для реализации научной программы обсерватории.

Первый сигнал наземно-космического интерферометра был получен 15 ноября 2011 г. по наблюдениям квазара 0212 + 735 в диапазоне 18 см при удалении КА около 100000 км от Земли и проекции базы "Радиоастрон" — 100-м радиотелескоп в Эффельсберге (Германия) на картинную плоскость источника 8100 км [2]. Напомним, что в режиме интерферометра чувствительность системы двух телескопов пропорциональна квадратному корню из произведения эффективной площади этих телескопов, поэтому 10-м КРТ и 100-м наземный радиотелескоп по чувствительности эквивалентны системе двух 30-м радиотелескопов.

Первое картографирование было выполнено по результатам наблюдений на длине волны 6 см "Радиоастрон" — EVN (European VLBI Network — Европейская РСДБ-сеть) 14–15 марта 2012 г. квазара 0716 + 714, расстояние до которого составляет 1,6 Гпк; были реализованы проекции баз от 1,5 до 7 диаметров Земли [2]. В мае 2012 г. зафиксированы интерференционные отклики от квазара 2013 + 370 на самой короткой волне длиной 1,35 см и на длине волны 6 см. Ранняя научная программа проекта "Радиоастрон" была реализована в период с февраля 2012 г. по июнь 2013 г. международными группами исследователей, сформированными в рамках проекта. С июля 2013 г. началась ключевая научная программа на основе открытых конкурсных заявок. Получение успешных результатов в рамках ранней научной программы значительно повысило интерес международной научной общественности к проекту "Радиоастрон", выразившийся в большом количестве поданных заявок на наблюдения от крупнейших радиоастрономических обсерваторий мира и ведущих учёных-астрофизиков. Это также способствовало включению в работу проекта второй наземной станции слежения и сбора научной информации — 43-м радиотелескопа в Грин Бэнке (США).

Одним из ключевых сегментов наземной поддержки проекта "Радиоастрон" является Центр обработки научной информации (ЦОНИ) [26]. В процессе реализации проекта в наблюдениях в составе интерферометра участвовали около 60 наземных радиотелескопов, расположенных в разных частях земного шара. В каждом эксперименте было задействовано до 32 радиотелескопов. Полученные научные данные объёмом около 428 Пбайт с этих радиотелескопов были переданы в АКЦ ФИАН для обработки и хранения. Обработка и анализ результатов, полученных на наземно-космическом интерферометре "Радиоастрон", проводились в АКЦ ФИАН. В первую очередь выполнялась кросс-корреляционная обработка потоков данных, записанных на отдельных радиотелескопах с плотностью записи 128 или 256 Мбит s^{-1} , включая КРТ с 128 Мбит s^{-1} . Стадия корреляционной обработки — наиболее важная, ресурсоёмкая и требовательная к вычислительной мощности задача расчёта функций видности, используемых в дальнейшем посткорреляционном анализе. Важнейшим элементом указанного процесса является коррелятор АКЦ ФИАН [27], работающий на вычислительном кластере, общая производительность которого составляла 1 Тфлопс в 2011 г. и более 3 Тфлопс после 2018 г. Потоки данных на выходе коррелятора являются интегральной мерой качества всего проекта "Радиоастрон" и, по существу, определяют успех в решении поставленных научных задач. Коррелятор АКЦ ФИАН работает по схеме FX-коррелятора и обеспечивает выполнение необходимых и хорошо известных функций для регулярной, ежедневной и успешной корреляционной обработки данных многостанционных РСДБ-сетей с наземными и наземно-космическими базами. Всего на корреляторе АКЦ ФИАН были обработаны данные свыше 4000 наблюдательных сессий проекта "Радиоастрон".

Для редактирования, калибровки, посткорреляционной обработки и анализа РСДБ-данных в АКЦ ФИАН был создан программный комплекс Astro Space Locator (ASL) [28, 29], имеющий удобное графическое представление данных и совместимость со всеми известными

системами обработки данных РСДБ. Он разработан для Microsoft Windows на языке C++ с использованием Microsoft Foundation Classes (MFC), но также работает в некоторых дистрибутивах Linux (Ubuntu и Fedora) и на MacOS с использованием программного обеспечения для эмуляции Windows (WINE, Parallels и т.д.). Важно отметить, что во многом благодаря успешной работе коррелятора была реализована научная программа проекта "Радиоастрон" и получены уникальные научные результаты, речь о которых пойдёт далее.

3.2. Научная программа и результаты проекта "Спектр-Р"

Научная программа проекта была направлена на изучение основных типов компактных источников с высокой яркостной температурой: активных ядер галактик (АЯГ) и квазаров, пульсаров — сильно замагниченных быстро вращающихся нейтронных звёзд, галактических и внегалактических источников мазерного излучения. Попутно был проведён эксперимент по измерению гравитационного красного смещения.

Одним из основных направлений научной программы наземно-космического радиоинтерферометра "Радиоастрон" было изучение природы излучения АЯГ и квазаров. До запуска проекта "Радиоастрон" предполагалось, что наблюдается синхротронное излучение релятивистских электронов из струйных выбросов АЯГ и квазаров. В такой модели собственные яркостные температуры источников не могут превышать $10^{11.5}$ К из-за обратного комптоновского охлаждения [30, 31]. Отметим, что наблюдаемое излучение АЯГ может казаться ярче из-за доплеровского усиления за счёт движения излучающей плазмы в сторону наблюдателя (см., например, [32]). Однако современные РСДБ-наблюдения кинематики струйных выбросов АЯГ свидетельствуют о том, что типичное доплеровское усиление составляет 5–10 [33]. Способность интерферометра измерить яркостную температуру источника определяется его чувствительностью и величиной проекции базы. В проекте "Радиоастрон" реализованы длины баз наземно-космического интерферометра вплоть до 28 диаметров Земли, что позволяет измерять яркостную температуру источников до 10^{15} – 10^{16} К.

Для измерения яркостной температуры АЯГ был проведён обзор 163 наиболее ярких источников в трёх диапазонах длин волн: 1,3 см, 6 см и 18 см [34]. Большой размер выборки важен как для моделирования эффектов релятивистского усиления [35], так и для исследования типичного значения измеряемой яркостной температуры АЯГ. Анализ наблюдений показал, что измеренные яркостные температуры для рассмотренной выборки источников в 10–100 раз превышают комптоновский предел [34, 36]. Среди возможных объяснений таких экстремальных яркостных температур могут быть следующие: неверное определение величины доплер-фактора РСДБ-методами, большее время комптоновских потерь, магнитное пересоединение линий как постоянный источник ускорения частиц, а также синхротронное излучение протонов [37, 38].

Другой, не менее важный вопрос: какова структура магнитного поля в релятивистских струях квазаров? Согласно современным представлениям магнитное поле отвечает за формирование и коллимацию релятивистских струй вблизи центральной сверхмассивной чёрной

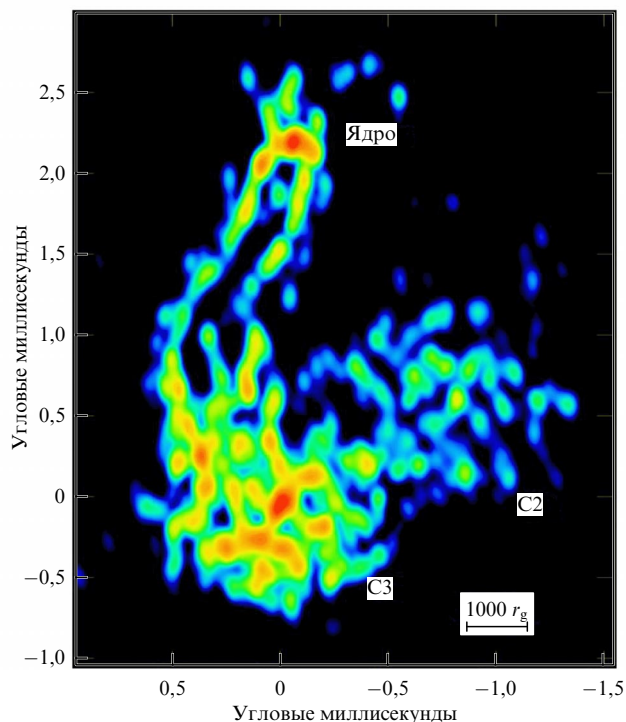


Рис. 6. Радиоизображение центральной (парсековой) области источника 3C84, полученное с помощью наземно-космического интерферометра "Радиоастрон". По осям x и y отложено расстояние в миллисекундах дуги от центра изображения. На изображении отмечены радиоядро и яркие излучающие области C2 и C3. (Из работы [41].)

дыры. Информация о поляризации радиоизлучения таких струй и частотном спектре позволяет исследовать их магнитные поля и энергетический спектр частиц их вещества. Для исследования структуры магнитного поля необходим анализ пространственно разрешённых линейных поляризационных спектров, т.е. требуется поперечно разрешать струи на нескольких частотах наблюдений. Такие наблюдения были реализованы в обзоре АЯГ и при выполнении поляризационной программы проекта "Радиоастрон", в рамках последней проведено 20 экспериментов картографирования 10 источников со сверхвысоким угловым разрешением. В результате удалось установить, что у многих АЯГ степень линейной поляризации растёт с увеличением базы наземно-космического интерферометра, т.е. с угловым разрешением. Это свидетельствует о существовании в АЯГ сверхкомпактных областей с однородным магнитным полем [39, 40]. В частности, по результатам поляризационного картографирования блазара BL Lacertae было установлено, что магнитные поля в основании джета имеют тороидальную структуру. Для указанного источника также удалось измерить параметры видимого ядра, для которого ширина у основания струи оказалась равной примерно 70 мкс дуги, или 0,3 пк [40].

В результате проведённого картографирования удалось разрешить поперёк многие релятивистские струи квазаров, что позволило обнаружить:

- уярчение излучения к краям струй как результат стратификации течения релятивистской плазмы (рис. 6) [41, 45] и субрелятивистскую оболочку вокруг струй, предсказанную ранее из анализа фарадеевского вращения [42];

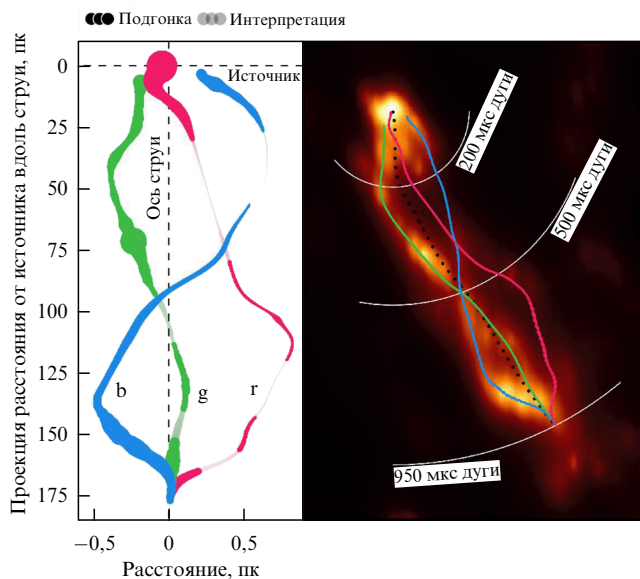


Рис. 7. Филаментарные структуры в струе квазара 3С 279, вызванные развитием неустойчивости Кельвина–Гельмгольца, пронизанные спиральным магнитным полем. Движение излучающей плазмы вдоль таких нитей, по-видимому, вызывает наблюдаемую переменность. Анализ поляризационной структуры, а также асимметрии распределения яркости поперёк струи позволили оценить структуру магнитного поля, представляющего из себя спираль с углом закрутки $\sim 45^\circ$. (Из работы [43].)

- указания на предпочтительность механизма Блендфорда–Пейна при формировании струи в ядре радиогалактики 3С84, т.е. доказать участие аккреционного диска в этом процессе [41];

- кокон горячей плазмы вокруг релятивистской струи на парсековых масштабах в источнике 3С84, обеспечивающий суперколлимацию цилиндрической струи [44];

- плазменные неустойчивости в релятивистских струях [43] (рис. 7).

К следующему классу объектов, на изучение которых была направлена научная программа проекта "Радиоастрон", относятся очень компактные источники радиоизлучения — пульсары. В результате распространения радиоизлучения от пульсара к наблюдателю происходит рассеяние на неоднородностях межзвёздной плазмы и образуется так называемый диск рассеяния с угловыми размерами в несколько миллисекунд дуги в метровом диапазоне радиоволн. Параметры диска рассеяния выборки пульсаров были исследованы в ходе реализации научной программы проекта. Уже первые наблюдения

самого яркого в Северном полушарии небесной сферы пульсара В0329+54 показали, что диск рассеяния не является однородным, а состоит из многочисленных изолированных пятен (пиков), составляющих субструктуру диска рассеяния [48]. Открытие этого нового эффекта — наличия субструктуры диска рассеяния пульсаров — позволило восстановить параметры эффективных рассеивающих экранов и оценить расстояния до них, а также обнаружить указания на наличие слоистой структуры межзвёздной плазмы нашей Галактики [46, 52, 53]. Была показана необходимость учёта эффекта субструктуры рассеяния при анализе данных интерферометрических наблюдений с экстремальным угловым разрешением [47].

Отметим, что аналогичный эффект обнаружен также для квазаров [38]. Результат моделирования влияния эффекта субструктуры рассеяния на наблюдаемое изображение источника для трёх длин волн 18, 6,2 и 1,35 см показан на рис. 8. Кроме того, с помощью анализа структурных и корреляционных функций наблюдаемого рассеянного радиоизлучения пульсаров впервые были обнаружены близко расположенные к Солнечной системе слои межзвёздной плазмы, которые могут вызывать быструю переменность потока компактных внегалактических радиоисточников [49–51].

В направлении исследования источников мазерного излучения была реализована программа обзора мазеров в областях звездообразования в нашей Галактике для получения оценок яркостной температуры, плотности потока и структуры изучаемых источников, программа картографирования ряда наиболее многообещающих источников с целью детального изучения их тонкой пространственной структуры, а также программа наблюдения ряда внегалактических объектов — так называемых мегамазеров. Благодаря наблюдениям с рекордным пространственным разрешением ~ 10 мкс дуги в диске мегамазера водяного пара галактики NGC4258 обнаружены компактные детали высокой яркости и установлено наличие экстремально тонкого диска, что является уникальной наблюдательной информацией для понимания условий образования этих необычных источников излучения. Кроме того, были обнаружены эволюционирующие области водяного пара внутри вращающегося центрального диска с радиусом около 0,126 пк [54]. В полученных спектрах обнаружена эволюция скоростей спектральных компонент водяного пара с быстро нарастающей и медленно спадающей активностью в газовых сгустках центрального диска галактики NGC4258. Такой тип сдвиговой неустойчивости компонент излучения предполагает механизм передачи ради-

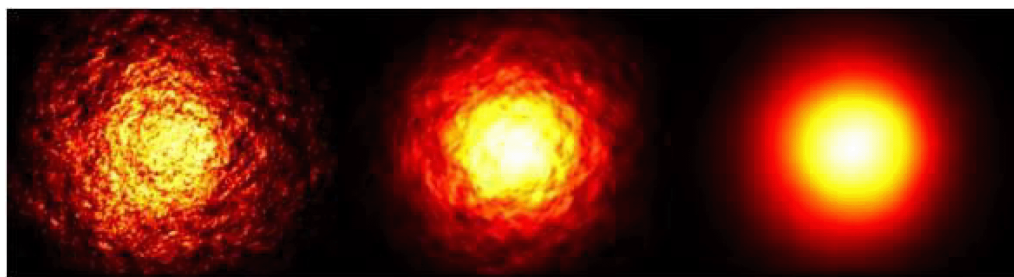


Рис. 8. Результат моделирования влияния эффекта субструктуры рассеяния на изображение источника для трёх длин волн (слева направо): 18, 6,2 и 1,35 см. (Из работы [38].)

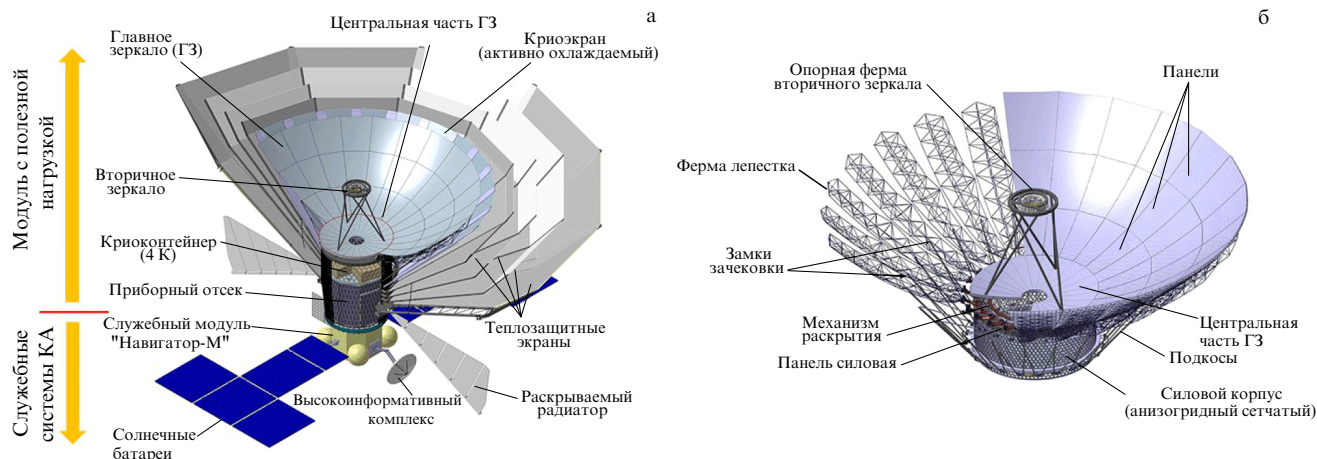


Рис. 9. (а) Рабочая конфигурация космической обсерватории "Миллиметрон", (б) конструкция главного зеркала обсерватории. (Рисунок с сайта www.millimetron.ru.)

ального импульса и вязкости в накапливаемой массе диска, поэтому обнаруженная активность мегамазера водяного пара в NGC4258 может быть связана с магнито-вращательной нестабильностью, определяющей скорость аккреции массы в центральном диске галактики [54].

Яркая вспышка мазера водяного пара в источнике G25.25 + 1.05 наблюдалась на интерферометре "Радиоастрон" на удалении КА от Земли на расстояние, равное 9 диаметрам Земли. Была обнаружена сверхкомпактная мазерная деталь с угловыми размерами не более 25 мкс дуги и яркостной температурой 3×10^{16} К. Сопровождающие исследования источника G25.65 + 1.05 в более спокойном состоянии проводились на наземной решётке VLA, и впервые была получена карта мазерных пятен в этом источнике. Сделан вывод о том, что вспышка мазера водяного пара объясняется увеличением размера излучающей области в проекции на луч зрения в результате перекрытия двух молекулярных облаков в картинной плоскости [55].

На расстоянии примерно в 720 пк в области звездообразования Цефей А впервые удалось наблюдать сравнимые по размеру с Солнцем источники мазерного излучения водяного пара. На настоящий момент эти объекты являются самыми маленькими структурами, когда-либо наблюдавшимися в мазерах в нашей Галактике. Предполагается, что они связаны с турбулентными вихрями в потоке газа от формирующейся массивной звезды в области HW3dii [56].

Одним из следствий принципа эквивалентности в Общей теории относительности (ОТО) является эффект гравитационного замедления скорости хода часов, или гравитационного красного смещения, измерение которого является областью активного экспериментального исследования. Суть эффекта гравитационного красного смещения состоит в том, что при распространении электромагнитной волны в гравитационном поле её частота f изменяется, причём относительное изменение частоты $\Delta f/f$ оказывается прямо пропорциональным разности гравитационных потенциалов ΔU . В случае справедливости принципа эквивалентности коэффициент пропорциональности равен обратной скорости света в квадрате. Как было сказано выше, в рамках проекта "Радиоастрон" попутно удалось провести эксперимент

по измерению гравитационного красного смещения. Так по измерениям в рамках всего лишь одной орбиты КА проверен принцип эквивалентности ОТО с точностью около 10^{-4} , что соответствует точности специализированного эксперимента Gravity Probe A [57 – 59].

4. Космическая обсерватория "Миллиметрон"

Как было отмечено во введении, логическим продолжением проекта "Спектр-Р" в более коротковолновом диапазоне электромагнитного спектра является космическая обсерватория "Миллиметрон" ("Спектр-М"), которая также разрабатывается в Астрокосмическом центре ФИАН. Как и проект "Спектр-Р", обеспечивший не только получение уникальных научных результатов, но и технологический прорыв в создании крупных научных проектов современной России, "Миллиметрон" является проектом высочайшего уровня технологической сложности. Создание такого высокотехнологичного инструмента, обладающего высоким пространственным разрешением и чувствительностью, позволит учёным решить целый ряд прорывных задач астрофизики и космологии.

4.1. Технические характеристики обсерватории "Миллиметрон"

Космическая обсерватория "Миллиметрон" (КОМ) (рис. 9) будет работать в широком диапазоне длин волн, от нескольких миллиметров до 70 мкм, в двух режимах: как одиночная космическая обсерватория с 10-метровым телескопом и как интерферометр космос–Земля [1, 5, 6]. Первый режим будет иметь наилучшую чувствительность для изучения самых слабых источников Вселенной. Второй режим обеспечит высокое угловое разрешение до 10^{-8} – 10^{-9} угловых секунд дуги, что позволит изучать структуру компактных релятивистских объектов во Вселенной. Высокая чувствительность (0,1–1 мкЯн) достигается за счёт большой апертуры главного зеркала и глубокого охлаждения (до температуры не выше 10 К) зеркала телескопа и бортовой научной аппаратуры. При этом высокое угловое разрешение обеспечивается, в том числе, конфигурацией орбиты. Обсерватория будет работать на орбите вблизи точки Лагранжа L2 на расстоянии 1,5 млн км от Земли в противосолнечном направлении [60] (рис. 10).

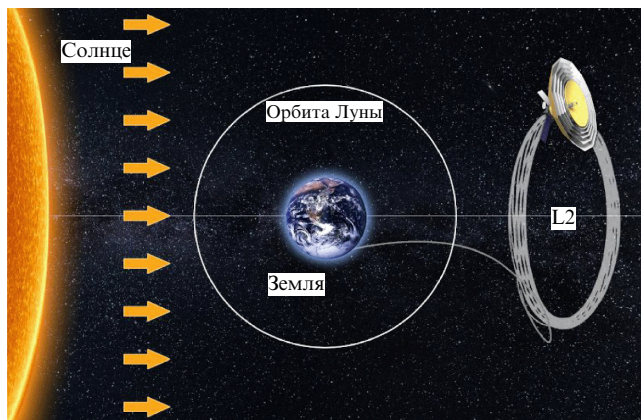


Рис. 10. Изображение гало-орбиты КОМ в точке L2 системы Солнце–Земля с периодом 180 дней. (Рисунок с сайта www.millimetron.ru.)

Антенна телескопа представляет собой двухзеркальную оптическую систему, построенную по схеме Кассегрена и состоящую из главного параболического и вторичного гиперболического зеркал. Как и в случае проекта "Радиоастрон", конструкция главного зеркала разработана исходя из необходимости размещения 10-метрового зеркала антенны в сложном состоянии в отсеке ракеты под головным обтекателем и обеспечения высокой точности отражающей поверхности после её раскрытия. Отражающая поверхность сформирована центральной частью зеркала диаметром 3 м и 24 радиальными лепестками-сегментами [61], раскрывающимися на орбите в космосе. Материал отражающей поверхности панелей и основной конструкции лепестков — высокомодульный углепластик [62], обеспечивающий низкий коэффициент теплового расширения. Каждый лепесток главного зеркала состоит из каркаса и трёх независимых отражающих панелей, которые устанавливаются на каркас с помощью линейных актюаторов. Для регулировки панелей зеркала предусмотрены бортовые системы контроля и адаптации поверхности, которые позволяют корректировать отклонения положения панелей, связанные с процессом раскрытия, и искажения формы поверхности, связанные с возможными тепловыми деформациями. Отметим, что среднеквадратическое отклонение поверхности всей антенны составляет 6 мкм.

Концепция раскрытия главного зеркала обсерватории "Миллиметрон" основана на опыте, полученном при

реализации проекта "Радиоастрон". Раскрытие лепестков осуществляется путём вращения вдоль одной оси через синхронную систему, что снижает сложность и повышает точность механизма развёртывания антенны.

Научная аппаратура КОМ будет состоять из отдельных приёмников, каждый из которых оптимизирован для решения определённых научных задач. Интерферометрические наблюдения в режиме Земля–космос будут проводиться с использованием РСДБ-приёмников, разделённых на частотные диапазоны, соответствующие диапазонам обсерватории ALMA и других наземных станций. Охватываемый диапазон частот РСДБ-приёмников от 33 до 373 ГГц [63–65] с возможностью включения дополнительного диапазона 490–650 ГГц. Для реализации многочастотных наблюдений предусмотрена квазиоптическая схема, позволяющая принимать сигнал с одного и того же направления на небе.

Отметим, что в проекте "Миллиметрон" планируется впервые провести интерферометрические наблюдения с КА, находящегося на орбите вблизи точки Лагранжа L2 на расстоянии 1,5 млн км от Земли. В работе [66] было показано, что, несмотря на существующие ограничения такой орбиты, возможно получить заполнение плоскости пространственных частот, достаточное для восстановления с приемлемым качеством изображения теней центральных массивных объектов в источниках Sgr A* и M87* (рис. 11).

Для наблюдений в режиме одиночной антенны планируется использование спектрометра высокого разрешения, длинноволнового матричного спектрометра и коротковолнового матричного спектрометра. Спектрометр высокого разрешения работает в диапазоне частот от ~ 500 ГГц до ~ 5 ТГц и включает в себя семь отдельных гетеродинных приёмников, работающих в заданных частотных диапазонах. Спектральное разрешение во всех частотных диапазонах будет не меньше чем 10^6 , что позволит проводить спектральные наблюдения с очень высоким разрешением. Шесть из семи приёмников будут построены с использованием смесителей SIS и НЕВ, требующих глубокого охлаждения. Седьмой приёмник, дублирующий диапазон частот первого приёмника 500–700 ГГц, будет построен на основе смесителей на диодах с барьером Шоттки, что позволит проводить наблюдения с его участием после окончания периода активного охлаждения телескопа.

Диапазон рабочих частот длинноволнового матричного спектрометра составляет от 100 ГГц до 1 ТГц и разбит на четыре поддиагона. Основной задачей

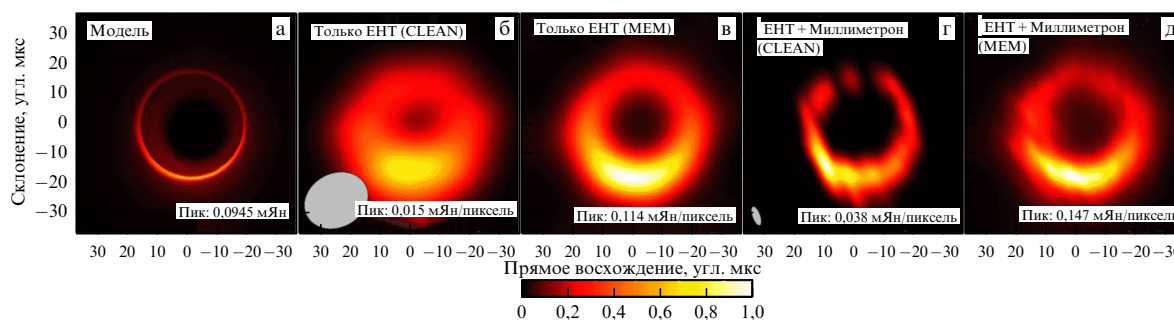


Рис. 11. Модельные двумерные изображения тени чёрной дыры в галактике M87. (б, в) Известный результат наземного интерферометра Телескоп горизонта событий. (г, д) Результаты наземно-космического интерферометра "Миллиметрон" – Телескоп горизонта событий. (Из работы [66].)

прибора является получение изображений, спектральной и поляризационной информации от космических источников слабой интенсивности.

Рабочий частотный диапазон коротковолнового матричного спектрометра — от 700 ГГц до 6 ТГц также разбит на четыре поддиагона. Этот высокочувствительный прибор предназначен для решения научных задач, требующих как фотометрических наблюдений, так и широкополосной спектроскопии среднего спектрального разрешения 10^3 .

4.2. Основные направления научной программы обсерватории "Миллиметрон"

Научная программа космической обсерватории "Миллиметрон" подробно изложена в работе [76]. Здесь мы кратко перечислим только ключевые ("прорывные") научные задачи в рамках трёх основных направлений исследований: 1) изучение фундаментальных процессов в ранней Вселенной, 2) исследование свойств пространства-времени и вещества в сверхсильных гравитационных полях и 3) происхождение жизни во Вселенной. Решение сформулированных в рамках этих направлений научных задач позволит ответить на ряд фундаментальных вопросов физики, в частности: 1) какие физические процессы происходили в ранней Вселенной в доэребинационную эпоху, чем определяются параметры крупномасштабной структуры Вселенной, когда и как возникли первые звёзды и галактики, как они соотносятся с теми, которые наблюдаются в ближней Вселенной; 2) какова структура пространства-времени в окрестности сверхмассивных гравитирующих тел, какова их природа, когда и как они возникли; 3) как возникла жизнь во Вселенной, уникальна ли она или повсеместно распространена во Вселенной, каковы её формы и наблюдаемые проявления.

Ключевые научные задачи трёх перечисленных выше направлений актуальны для современной астрофизики и космологии. В направлении изучения фундаментальных процессов в ранней Вселенной ключевым проектом является обнаружение u - и μ -искажений в частотном спектре реликтового излучения [67–70], т.е. обнаружение отклонений данного спектра от равновесного спектра чёрного тела. Информацию о начальных флуктуациях плотности на малых масштабах проблематично извлечь как из анализа крупномасштабной структуры Вселенной ввиду сильной нелинейности процесса её формирования на указанных масштабах, так и из анализа угловой анизотропии распределения температуры реликтового излучения из-за наличия диссипативных процессов в барионной компоненте массы (затухания Силка [71]). При этом если в доэребинационную эпоху во Вселенной происходили процессы, сопровождаемые энерговыделением, то след от них остаётся в частотном спектре реликтового излучения, из планковского преобразующемся в спектр Бозе–Эйнштейна с ненулевым химическим потенциалом μ . Измерение величины химического потенциала Вселенной, которая позволит получить ограничения на спектр начальных возмущений, информацию о возможном существовании первичных чёрных дыр, частиц со временем жизни 10^9 – 10^{10} с, диссипации акустических волн, является одной из ключевых научных задач обсерватории.

Современные методы наблюдательной радиоастрономии позволяют исследовать свойства пространства-

времени и вещества в сверхсильных гравитационных полях. Полученные с помощью Телескопа горизонта событий изображения тени сверхмассивных чёрных дыр в источнике M87 и Sgr A* продемонстрировали возможности наземной РСДБ [72, 73]. Однако для более детального изучения геометрии пространства-времени и свойств вещества вблизи горизонта событий сверхмассивных чёрных дыр необходимы наблюдения на более коротких волнах и с большими базами интерферометра. Поэтому ключевой задачей КОМ в режиме наземно-космического интерферометра будет измерение геометрии пространства-времени в окрестности источника Sgr A* в центре Галактики, а также центральных сверхмассивных чёрных дыр в ближайших к нам галактиках, в том числе двойных сверхмассивных чёрных дыр, а также выявление наблюдательных проявлений кротовых нор [74–79].

Среди перечисленных задач поиск кротовых нор (КН) — теоретически предсказанных Общей теорией относительности объектов [80–82] — занимает особое место с точки зрения развития фундаментальной науки. Обнаружение таких объектов приведёт к кардинальному изменению научного мировоззрения, докажет не только наличие сложной топологии пространства-времени, но и сделает реальным существование других вселенных. В начале 2000-х годов Н.С. Кардашёвым совместно с И.Д. Новиковым была высказана гипотеза о том, что ядра некоторых галактик могут быть не сверхмассивными чёрными дырами, а входами в кротовые норы [83]. Сверхвысокое угловое разрешение наряду с высокой чувствительностью КОМ в режиме наземно-космического интерферометра позволяют проверить эту гипотезу, используя характерные наблюдательные отличия кротовых нор и чёрных дыр [78, 79, 84–86], такие как монополярное магнитное поле кротовой норы; различия формы и размера теней и фотонных колец для ЧД и КН; наличие синего гравитационного смещения в излучении от истечения вещества из входа КН; возможность наблюдения излучения из входа КН.

Вопросы, связанные с возникновением жизни в Солнечной системе и во Вселенной в целом, имеют всеобщий научный и мировоззренческий интерес. В этом направлении основным проектом КОМ станет задача изучения происхождения и переноса воды во Вселенной — одной из ключевых составляющих, необходимых для зарождения жизни на Земле.

Отметим, что, поскольку структура научной программы КОМ является иерархичной, вокруг ключевых проектов, на решения которых будут направлены основные усилия (в том числе наблюдательное время), также развиваются проекты следующих уровней, тематически связанные с ключевыми. Например, к проектам второго уровня (с ними можно подробно ознакомиться в работе [76]) относятся такие актуальные задачи, как исследование эффекта Сюняева–Зельдовича и релятивистских поправок к нему [87, 88]; наблюдения первых галактик [89–91]; обнаружение и исследование сверхмассивных чёрных дыр (СМЧД) во Вселенной на рубеже эпохи реионизации [92] и их эволюционных особенностей в "тёмные" эпохи $z \sim 10$ – 30 [93, 94], изучение наблюдательных проявлений взаимного влияния галактик и растущих массивных чёрных дыр в их центрах и выявление механизмов, определяющих их согласованную эволюцию; изучение эволюции галактик в "полуденной" Все-

ленной (в эпоху глобальной вспышки звездообразования при $z \sim 2$) [95, 96] и свойств инфракрасных галактик с большим количеством пыли [97]; обнаружение гравитационно-линзированных систем для измерения постоянной Хаббла H_0 [98, 99].

В направлении изучения сверхсильных гравитационных полей — это многочастотные поляризационные наблюдения ближайшей окрестности чёрных дыр в SgrA*, M87* и исследование характера турбулентности аккреционного течения с их помощью; оценка параметров аккреционного потока на основе измерений многоволнового распределения яркости в окрестности СМЧД ($\sim 0,1$ мс дуги) в более широком поле SgrA*, вплоть до радиуса Бонди $\sim 0,03 - 0,1$ пк.

В направлении изучения образования и переноса воды во Вселенной предполагается изучение филаментарной структуры межзвёздной среды, гигантских молекулярных облаков и областей звездообразования в ближайшей окрестности Солнца; исследование транспорта воды во внутренние области протопланетных дисков на основе измерений их спектральных особенностей; наблюдательные проявления процесса формирования планет земного типа, формирования зон обитаемости, влияние переменности и вспышечной активности центральных звёзд — красных карликов на физические свойства дисков в пределах предполагаемых зон обитаемости; исследование резервуаров воды и измерение её запасов в Солнечной системе.

5. Заключение

Проект "Спектр-Р", разработанный в Астрокосмическом центре ФИАН в кооперации с отечественной промышленностью, стал важным этапом не только развития радиоастрономии в России, но и первым за долгие годы успешным крупным проектом Федеральной космической программы Российской Федерации. Этот беспрецедентный по своим масштабам и сложности проект Федерального космического агентства, Российской академии наук и международной научной кооперации позволил получить уникальные научные результаты. При его реализации были отработаны важнейшие технологии создания космических аппаратов для научного космоса и соответствующих служебных систем. Кроме того, совместные наблюдения космического радиотелескопа "Спектр-Р" с диаметром зеркала 10 м и крупнейших наземных радиотелескопов позволили реализовать наземно-космический радиоинтерферометр с самой большой длиной базы — 350000 км, что существенно улучшило угловое разрешение наблюдаемых объектов по сравнению как с наземными радиоинтерферометрами, так и с реализованным ранее наземно-космическим интерферометром VSOP.

Космическая обсерватория "Миллиметр" ("Спектр-М"), являясь логическим продолжением проекта "Спектр-Р" в более коротковолновом диапазоне электромагнитного спектра с технологиями следующего уровня сложности, также разрабатывается в Астрокосмическом центре ФИАН. Создание этой обсерватории станет следующим шагом в развитии технологий космического приборостроения и крупных космических конструкций, что позволит в конечном итоге реализовать амбициозную научную программу обсерватории и решить целый ряд прорывных задач астрофизики.

В заключение отметим, что, наряду с разработкой космической обсерватории "Миллиметр", в Астрокосмическом центре ФИАН проводятся работы, направленные на развитие субтерагерцевой астрономии в Российской Федерации. Прорабатывается концепция создания субтерагерцевых инструментов в виде универсальной компактной антенной решётки для размещения на территории Российской Федерации [100]. На базе концепции такой антенной решётки также возможна реализация нескольких космических проектов субтерагерцевого диапазона нового поколения — космического интерферометра и телескопа, расположенного на поверхности Луны. Наземные антенные решётки смогут выступить в качестве поддержки режима наземно-космического интерферометра со сверхдлинной базой обсерватории "Миллиметр".

Список литературы

1. Кардашев Н С и др. *Труды ФИАН* **228** 112 (2000)
2. Кардашев Н С и др. *Астрон. журн.* **90** (3) 179 (2013); Kardashev N S et al. *Astron. Rep.* **57** 153 (2013)
3. Sunyaev R et al. *Astron. Astrophys.* **656** A132 (2021)
4. Shustov B et al. *Astrophys. Space Sci.* **320** 187 (2009)
5. Smirnov A V et al. *Proc. SPIE* **8442** 84424C (2012)
6. Кардашев Н С и др. *УФН* **184** 1319 (2014); Kardashev N S et al. *Phys. Usp.* **57** 1199 (2014)
7. Новиков И Д и др. *УФН* **191** 404 (2021); Novikov I D et al. *Phys. Usp.* **64** 386 (2021)
8. Predehl P et al. *Nature* **588** 227 (2020)
9. Pavlinsky M et al. *Astron. Astrophys.* **661** A38 (2022)
10. Hirabayashi H et al. *Science* **281** 1825 (1998)
11. Hirabayashi H et al. *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **52** 955 (2000)
12. Thompson A R, Moran J M, Swenson G W (Jr.) *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy* (New York: Wiley, 2001); Пер. на русск. яз.: Томпсон А Р, Моран Д М, Свенсон Д У (мл.) *Интерферометрия и синтез в радиоастрономии* (М.: Физматлит, 2003)
13. Матвеевко Л И, Кардашев Н С, Шоломицкий Г Б *Изв. вузов. Радиофизика* **8** 651 (1965); Matveenko L I, Kardashev N S, Sholomitskii G B *Sov. Radiophys.* **8** 461 (1965)
14. Kellermann K I et al. *Astrophys. J.* **153** L209 (1968)
15. Gubbay J et al. *Nature* **222** 730 (1969)
16. Kellermann K I et al. *Astrophys. J.* **169** 1 (1971)
17. Бродерик Д Д и др. *Астрон. журн.* **47** 784 (1970); Broderick J J et al. *Sov. Astron.* **14** 627 (1971)
18. Матвеевко Л И, Сообщения ИПА РАН № 176 (СПб.: Институт прикладной астрономии РАН, 2007)
19. Кардашев Н С, Парицкий Ю Н, Соколов А Г *УФН* **104** 328 (1971); Kardashev N S, Pariiskii Yu N, Sokolov A G *Sov. Phys. Usp.* **14** 366 (1971)
20. Заксон М Б и др. *Земля и Вселенная* (4) 2 (1980)
21. Арсентьев В М и др. *ДАН СССР* **264** 588 (1982); Arsent'ev V M et al. *Sov. Phys. Dokl.* **27** 362 (1982)
22. Levy G S et al. *Astrophys. J.* **336** 1098 (1989)
23. Linfield R P et al. *Astrophys. J.* **358** 350 (1990)
24. Александров Ю А и др. *Вестн. НПО им. С.А. Лавочкина* (3) 11 (2011)
25. Kardashev N S, Kovalev Y Y, Kellermann K I *Radio Sci. Bull.* (343) 22 (2012)
26. Shatskaya M V et al. *J. Astron. Instrum.* **11** 2250004 (2022)
27. Likhachev S F et al. *J. Astron. Instrum.* **6** 1750004 (2017)
28. Andrianov A S et al., in *Astronomical Data Analysis Software and Systems XXVI. Proc. of a Conf., 16–20 October 2016, Trieste, Italy* (ASP Conf. Ser., Vol. 521, Eds M. Molinaro, K Shortridge, F Pasian) (San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, 2019) p. 323
29. Likhachev S F et al. *Astron. Comput.* **33** 100426 (2020)
30. Kellermann K I, Pauliny-Toth I I K *Astrophys. J.* **155** L71 (1969)
31. Readhead A C S *Astrophys. J.* **426** 51 (1994)

32. Шкловский И С и др. *Астрон. журн.* **40** 972 (1963); Shklovskii I S *Sov. Astron.* **7** 748 (1964)
33. Lister M L et al. *Astron. J.* **152** 12 (2016)
34. Kovalev Y Y et al. *Adv. Space Res.* **65** 705 (2020)
35. Lister M L, in *Radio Astronomy at the Fringe, Green Bank, West Virginia, USA* (ASP Conf. Proc., Vol. 300, Eds J A Zensus, M H Cohen, E Ros) (San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, 2003) p. 71
36. Кардашев Н С и др. *Вестн. НПО им. С.А. Лавочкина* (3) 4 (2016)
37. Kovalev Y Y et al. *Astrophys. J. Lett.* **820** L9 (2016)
38. Johnson M D et al. *Astrophys. J. Lett.* **820** L10 (2016)
39. Bruni G et al. *Astron. Astrophys.* **604** A111 (2017)
40. Gómez J L et al. *Astrophys. J.* **817** 96 (2016)
41. Giovannini G et al. *Nat. Astron.* **2** 472 (2018)
42. Lobanov A P et al. *Astron. Astrophys.* **583** A100 (2015)
43. Fuentes A et al. *Nat. Astron.* **7** 1359 (2023)
44. Savolainen T et al. *Astron. Astrophys.* **676** A114 (2023)
45. Kim J-Y et al. *Astrophys. J.* **952** 34 (2023)
46. Попов М В и др. *Астрон. журн.* **93** 778 (2016); Popov M V et al. *Astron. Rep.* **60** 792 (2016)
47. Popov M V et al. *Astrophys. J.* **888** 57 (2020)
48. Popov M V et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **465** 978 (2017)
49. Smirnova T V et al. *Astrophys. J.* **786** 115 (2014)
50. Shishov V I et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **468** 3709 (2017)
51. Андрианов А С и др. *Астрон. журн.* **94** 516 (2017); Andrianov A S et al. *Astron. Rep.* **61** 513 (2017)
52. Gwinn C R et al. *Astrophys. J.* **822** 96 (2016)
53. Fadeev E N et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **480** 4199 (2018)
54. Baan W A et al. *Nat. Astron.* **6** 976 (2022)
55. Bayandina O S et al. *Adv. Space Res.* **65** 763 (2020)
56. Sobolev A M et al. *Astrophys. J.* **856** 60 (2018)
57. Litvinov D A et al. *Phys. Lett. A* **382** 2192 (2018)
58. Nunes N V et al. *Adv. Space Res.* **65** 790 (2020)
59. Nunes N V et al. *Class. Quantum Grav.* **40** 175005 (2023)
60. Rudnitskiy A G et al. *Acta Astronaut.* **196** 29 (2022)
61. Golubev E S et al. *Proc. SPIE* **11451** 114510K (2020)
62. Arkhipov M et al. *J. Astron. Telesc. Instrum. Syst.* **7** 044001 (2021) <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.7.4.044001>
63. Khudchenko A et al. *Proc. SPIE* **12190** 121902W (2022)
64. Khudchenko A et al. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **13** 645 (2023)
65. Третьяков И В, Худченко А В, Черный Р А, Лихачев С Ф *Радиотехника и электроника* **68** 904 (2023); Tretyakov I V, Khudchenko A V, Chernii R A, Likhachev S F *J. Commun. Technol. Electron.* **68** 989 (2023)
66. Likhachev S F et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **511** 668 (2022)
67. Zeldovich Ya B, Sunyaev R A *Astrophys. Space. Sci.* **4** 301 (1969)
68. Sunyaev R A, Zeldovich Ya B *Astrophys. Space. Sci.* **7** 20 (1970)
69. Novikov D I, Mihalchenko A O *Phys. Rev. D* **107** 063506 (2023)
70. Maillard J-P et al. *Phys. Rev. D* **109** 023523 (2024)
71. Silk J *Astrophys. J.* **151** 459 (1968)
72. Event Horizon Telescope Collab., Akiyama K et al. *Astrophys. J. Lett.* **875** L1 (2019)
73. Event Horizon Telescope Collab., Akiyama K et al. *Astrophys. J. Lett.* **930** L12 (2022)
74. Andrianov A S et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **500** 4866 (2021)
75. Чернов С В *ЖЭТФ* **159** 1018 (2021); Chernov S V *J. Exp. Theor. Phys.* **132** 897 (2021)
76. Новиков И Д, Репин С В *Астрон. журн.* **98** 3 (2021); Novikov I D, Repin S V *Astron. Rep.* **65** 3 (2021)
77. Andrianov A et al. *Phys. Rev. D* **105** 063015 (2022)
78. Bugaev M A et al. *Phys. Rev. D* **108** 124059 (2023)
79. Чернов С В *Астрон. журн.* **100** 693 (2023); Cherov S V *Astron. Rep.* **67** 798 (2023)
80. Flamm L, Schumann R *Phys. Z.* **17** 448 (1916)
81. Einstein A, Rosen N *Phys. Rev.* **48** 73 (1935)
82. Wheeler J A *Phys. Rev.* **97** 511 (1955)
83. Kardashev N S, Novikov I D, Shatskiy A A *Int. J. Mod. Phys. D* **16** 909 (2007)
84. Tsukamoto N, Harada T, Yajima K *Phys. Rev. D* **86** 104062 (2012)
85. Новиков И Д *УФН* **188** 301 (2018); Novikov I D *Phys. Usp.* **61** 280 (2018)
86. Ishkaeva V A, Sushkov S V *Phys. Rev. D* **108** 084054 (2023)
87. Sunyaev R A, Zeldovich Ya B *Astrophys. Space. Sci.* **9** 368 (1970)
88. Novikov D I et al. *Phys. Rev. D* **101** 123510 (2020)
89. Ларченкова Т И и др. *Астрофизика* **65** 179 (2022); Larchenkova T I et al. *Astrophysics* **65** 161 (2022)
90. Nath B B et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **521** 662 (2023)
91. Пилипенко С В, Ермаш А А, Бендо Г *Астрономический журн.* **99** 297 (2002); Pilipenko S V, Ermash A A, Bendo G *Astron. Rep.* **66** 296 (2022)
92. Ferrara A, in *Understanding the Epoch of Cosmic Reionization: Challenges and Progress* (Astrophysics and Space Science Library, Vol. 423, Ed. A Mesinger) (Cham: Springer, 2016) p. 163, https://doi.org/10.1007/978-3-319-21957-8_6
93. Васильев Е О, Шекинов Ю А, Нат Б Б *Астрофизика* **65** 333 (2022); Vasiliev E O, Shchekinov Yu A, Nath B B *Astrophysics* **65** 324 (2022)
94. Vasiliev E O, Shchekinov Yu A *Astrophys. J.* **887** 174 (2019)
95. Spignolio L et al. *Publ. Astron. Soc. Aust.* **34** 57 (2017)
96. Spognolio L et al. *Publ. Astron. Soc. Aust.* **38** 21 (2021)
97. Casey C M, Narayanan D, Cooray A *Phys. Rep.* **541** 45 (2014)
98. Ларченкова Т И, Ермаш А А, Дорошкевич А Г *Письма в Астрон. журн.* **45** 866 (2019); Larchenkova T I, Ermash A A, Doroshkevich A G *Astron. Lett.* **45** 821 (2019)
99. Ларченкова Т И, Лыскова Н С, Лутовинов А А *Письма в Астрон. журн.* **37** 483 (2011); Larchenkova T I, Lyskova N S, Lutovinov A A *Astron. Lett.* **37** 441 (2011)
100. Лихачев С Ф и др. *Космические исследования* **62** 121 (2024); Likhachev S F et al. *Cosmic Res.* **62** 117 (2024)

From the Spektr-R project to the Spektr-M project: milestones in space radio astronomy

S.F. Likhachev^(*), T.I. Larchenkova^(**)

Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Leninskii prosp. 53, 119991 Moscow, Russian Federation
E-mail: ^(*) slikhach@asc.rssi.ru, ^(**) ltanya@asc.rssi.ru

The main technical solutions implemented in the Spektr-R observatory (RadioAstron) and the scientific results obtained during its orbital operation from 2011 through 2019 are reviewed. General characteristics and research objectives of the Millimetron (Spectrum-M) space observatory, a development of the Spectrum-R project in the submillimeter wavelength range, are outlined. The launch of Millimetron is scheduled for the early 2030s. Research programs of both projects are led by the Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences.

Keywords: radio astronomy, submillimeter astronomy, Spektr-R, RadioAstron, Spektr-M, Millimetron, radio interferometry, active galactic nuclei, jets, quasars, pulsars, masers, galaxies, supermassive black holes, wormholes, cosmic microwave radiation, interstellar medium, water in the Galaxy

PACS numbers: **07.87.+v**, **95.55.-n**, 98.80.Es

Bibliography — 100 references
Uspekhi Fizicheskikh Nauk **194** (8) 814–825 (2024)
DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.03.039662>

Received 20 February 2024, revised 12 March 2024
Physics – Uspekhi **67** (8) (2024)
DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2024.03.039662>