

УДК 520.8-125

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МИЛЛИМЕТРОВОЙ АСТРОНОМИИ В САО РАН

© 2024 В. А. Столяров^{1*}, Ю. Ю. Балега^{1,2}, М. Г. Мингалиев^{1,3,4}, Ю. В. Сотникова^{1,3},
В. Ф. Вдовин^{5,1}, А. А. Гунбина⁵, Д. Е. Кукушкин^{1,6}, М. А. Тарасов⁷,
М. Ю. Фоминский⁷, А. М. Чекушкин⁷, В. С. Эдельман⁸, Р. А. Юсупов⁷

¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

² Китайский филиал института БРИКС по изучению сетей будущего, Шеньчжень, 518000 Китай

³ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

⁴ Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, 191187 Россия

⁵ Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова–Грехова Российской академии наук, Нижний Новгород, 603950 Россия

⁶ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101 Россия

⁷ Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, 125009 Россия

⁸ Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН, Москва, 119334 Россия

Поступила в редакцию 30 октября 2023 года; после доработки 18 марта 2024 года; принята к публикации 18 марта 2024 года

В статье рассмотрены перспективы развития наблюдательной базы в Специальной астрофизической обсерватории РАН для астрофизических исследований в миллиметровом диапазоне. В качестве первого шага предложен проект создания комплекта приемной аппаратуры субтерагерцового диапазона для работы на оптическом телескопе БТА. Также рассмотрена возможность установки нового инструмента для работы на частотах до 230 ГГц ($\lambda = 1.3$ мм) на верхней научной площадке САО РАН. Рассмотрены технические и эксплуатационные характеристики инструмента, вопросы выбора места для размещения полноповоротной антенны миллиметрового диапазона, статистика метеорологических данных и поглощение атмосферы, приведен список возможных научных задач, которые решаются на инструменте этого класса.

Ключевые слова: атмосферные явления — приборы: приемники — приборы: интерферометры — методы: наблюдательные

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования в области миллиметровой и субмиллиметровой¹⁾ астрономии начались относительно недавно, но уже принесли богатейшие научные результаты (см., например, Vossardi et al., 2017; Akiyama et al., 2019; Eklund et al., 2020; Guélin and Cernicharo, 2022). Измерения в этом диапазоне требуют отличных погодных условий, чувствительных приемников и антенн с поверхностью, выполненной с высокой точностью. В мире существует небольшое число телескопов такого типа, как отдельных антенн, например, 30-м антенна IRAM в Испании (Sánchez-Portal, 2023),

SRT на Сардинии (Prandoni et al., 2017), LMT в Мексике (Hughes et al., 2020), 45-м радиотелескоп в NRO (Япония, Hirabayashi, 1985), так и интерферометров, например, ALMA (Чили, Dougherty, 2020), NOEMA (Франция, Schuster et al., 2018), ATCA (Австралия, Indermuehle and Burton, 2014), KVN (Южная Корея, Chol Minh et al., 2004). В России к этой группе инструментов можно отнести три антенны РТ-13 (ИПА РАН, Shuygina et al., 2019) диаметром 13.2 м, которые работают в диапазоне частот до 40 ГГц и используются практически исключительно в прикладных целях. К сожалению, в настоящее время в России не существует инструментов для астрономических наблюдений в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах на частотах более 100 ГГц, что делает затруднительным для отечественных ученых выполнение большого числа научных задач.

С другой стороны, участие в крупных меж-

*E-mail: vlad@sao.ru

¹⁾ Согласно классификации ИТУ диапазон $\lambda = 1-10$ мм соответствует миллиметровой области, а $\lambda = 0.1-1$ мм — субмиллиметровой.

дународных проектах, таких как Event Horizon Telescope (ЕНТ, Akiyama et al., 2019) или Миллиметр (Novikov et al., 2021), требует наличия не только соответствующего инструмента, но и опыта проведения наблюдений в миллиметровом диапазоне, который можно получить на сравнительно небольшом телескопе, установленном на наблюдательной площадке обсерватории, где уже имеются необходимая инфраструктура и инженерная поддержка.

Список задач, который можно решать на инструменте этого класса, достаточно обширный. Для режима одиночного инструмента можно отметить следующие задачи: обзоры видимой части небесной сферы в молекулярных линиях $CO J = 1-0$ ($\nu = 115$ ГГц) и $CO J = 2-1$ ($\nu = 230$ ГГц), построение карт внегалактических источников в линиях молекул; мониторинг активных ядер галактик (АЯГ) совместно с основными инструментами САО РАН — РАТАН-600²⁾ (Parijskij, 1993) и оптическим телескопом БТА³⁾ (Ioannisianni et al., 1982); исследования эффекта Сюняева—Зельдовича в скоплениях галактик; проекты по поиску линий сложных молекул в межзвездной среде и другие задачи.

Кроме того, такой инструмент можно использовать в режиме РСДБ в проектах «Суффа» (Ножаев et al., 2007) и ЕНТ, а также как элемент интерферометра «земля — космос» совместно с космическим аппаратом «Миллиметр».

В случае быстрой реализации проекта ввод инструмента в эксплуатацию возможен в течение 5–6 лет. Как показывает практика, время жизни крупных радиоастрономических инструментов составляет более полувека, например, 30-м антенна ИРАМ была построена в 1980-х годах и используется уже почти 40 лет. РАТАН-600, до сих пор являющийся основным инструментом Специальной астрофизической обсерватории РАН, сдан в эксплуатацию в декабре 1976 года. Предполагается, что интерферометр SKA (Dewdney et al., 2009), где будут использованы антенны производителя СЕТС54 (Китай), будет работать 50–60 лет после завершения строительства.

2. ПРОЕКТ СУБТЕРАГЕРЦОВОЙ ОБСЕРВАТОРИИ В СОСТАВЕ ОПТИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА БТА

Предложения о тестировании приемной аппаратуры субтерагерцового диапазона на 6-м оптическом телескопе БТА появились в середине 2000-х

годов. Тогда же были проведены некоторые предварительные работы по изготовлению детекторов излучения (Vystavkin et al., 2007, 2008). В настоящее время началась реализация аналогичного проекта, но уже на новой элементной базе с учетом прогресса в области терагерцовой электроники за прошедшие полтора десятилетия.

2.1. Концепция субтерагерцовой обсерватории в составе БТА

Основная идея не перетерпела существенных изменений и описана в работе Vystavkin et al. (2008). В фокусе Несмит-1 телескопа БТА предполагается установка и тестирование различных вариантов субтерагерцовых приемников для наблюдений в диапазоне частот от 86 до 380 ГГц (диапазон длин волн 3.4–0.8 мм), используя атмосферные окна прозрачности. В качестве типа детекторов была выбрана технология «сверхпроводник — изолятор — нормальный металл — изолятор — сверхпроводник» (СИНИС) (Balega et al., 2020; Tarasov et al., 2022). Для согласования детекторов с оптической схемой телескопа будет использована система корректирующей оптики. Также будет разработана считывающая электроника, и будет изготовлен криостат для охлаждения детекторов до температуры не больше 0.1 К. Изначально предлагалось рассмотреть прототип системы криостатирования на основе изделия, представленного Edelman (2012). В настоящее время рассматривается несколько вариантов конструкций систем криостатирования, этот вопрос подробно исследован Balega et al. (2023) (см. раздел 3).

Оптическая схема телескопа БТА приведена на рис. 1а, взятом из работы Vystavkin et al. (2008). Основное зеркало телескопа диаметром 6 м (1) концентрирует входящее излучение в главном фокусе (2). Вблизи главного фокуса расположено вторичное зеркало (5), оно формирует узкий пучок, распространяющийся в обратном направлении вдоль оптической оси и попадающий на плоское диагональное зеркало (4), которое отклоняет пучок на 90°. Далее пучок проходит через металлическую трубку (3) в кабину (6). Фокус Несмит-1 расположен внутри кабины (6), где и будут располагаться приемники.

Нужно отметить, что длины волн в субтерагерцовом диапазоне довольно большие и размер дисков Эйри будет варьироваться примерно от 60 мм для $\lambda = 0.8$ мм до 260 мм для $\lambda = 3.4$ мм. Поэтому первые тестовые наблюдения с СИНИС-детекторами на площадке телескопа БТА предполагается проводить в режиме одиночного пикселя. В перспективе можно рассмотреть многопиксельную систему.

²⁾<https://rat.sao.ru/en/telescope/>

³⁾<https://www.sao.ru/Doc-en/Telescopes/bta/descrip.html>

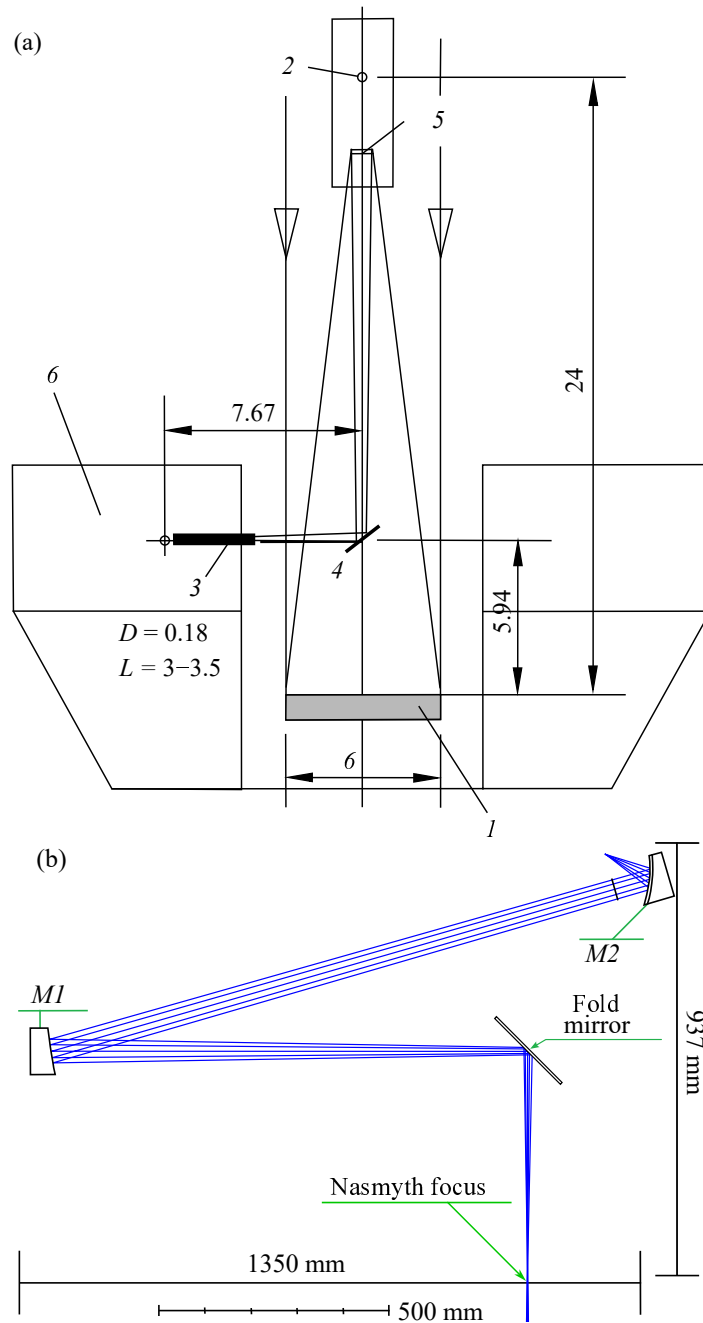


Рис. 1. Панель (а) — оптическая схема телескопа БТА (взято из работы Vystavkin et al. (2008) с разрешения авторов): (1) главное зеркало, (2) главный (первичный) фокус, (3) трубка, ведущая к фокусу Несмит-1, (4) плоское диагональное зеркало, отклоняющее пучок в сторону фокуса Несмит-1, (5) вторичное зеркало, (6) кабина с приемной аппаратурой. Размеры приведены в метрах. Панель (б) — оптическая система корректирующей оптики со следующими параметрами: $f'_{M1} = 1250$ мм, $f'_{M2} = 100$ мм, линейное увеличение системы $V = 0.08^x$.

На данный момент вопрос согласования сигнала, собираемого зеркалом телескопа, с детектирующей ячейкой находится на стадии проработки. Ниже представлены текущие результаты работы.

Была проведена оценка диаметра дифракционного пятна рассеяния телескопа в фокусе Несмита (результаты моделирования приведены в Balega

et al., 2024). Определены параксиальные характеристики корректирующей оптики для согласования сигнала. Относительное отверстие телескопа в фокусе Несмита составляет $1/30$, что соответствует диаметру первого дифракционного максимума для $\lambda = 2998$ мкм $D_{\max} \approx 200$ мм. Расчеты согласующей оптики показали, что оптимальный

диаметр рупора, устанавливаемого с детектирующей ячейкой внутри криостата, составляет 20 мм. В качестве конструкции антенны была предложена и смоделирована ретрансляционная рупорная антенна (back-to-back horn antenna), результаты также представлены в публикации Valega et al. (2024). Следовательно, линейное увеличение оптической системы из двух параболоидов не должно превышать $V = f'_2/f'_1 = 0.1^x$. Использование внеосевых параболоидов позволит упростить установку зеркал по опорному оптическому каналу, так как при этом нивелируется сферическая аберрация. Основным ограничением на предельно достижимое увеличение согласующей оптики являются габариты платформы в фокусе Несмита и конструктивные особенности приемника. В итоге была разработана оптическая система корректирующей оптики (см. рис. 1b).

Система включает в себя два внеосевых параболоида $M1$ и $M2$ с фокусными расстояниями $f'_{M1} = 1250$ мм, $f'_{M2} = 100$ мм и плоское зеркало (Fold mirror), линейное увеличение системы — $V = 0.08^x$. После системы корректирующей оптики диаметр первого дифракционного максимума при $\lambda = 1303$ мкм ($\nu = 230$ ГГц) составил $D_{\max} \approx 8$ мм, а при $\lambda = 2998$ мкм ($\nu = 100$ ГГц) $D_{\max} \approx 18.4$ мм, что не превышает диаметра рупора перед приемником ТГц излучения.

2.2. Прототип приемника прямого детектирования

В качестве прототипа приемного модуля прямого детектирования предполагается использовать СИНИС-детекторы. Схематичное изображение СИНИС-детектора приведено на рис. 2, подробное описание — в публикациях Gunbina et al. (2021), Tarasov et al. (2021) и Tarasov et al. (2022). Чувствительным элементом такого детектора является наноразмерный поглотитель из нормального металла. Нагрев поглотителя пропорционален мощности приходящего излучения, которое измеряется двумя туннельными переходами СИН-структуры (сверхпроводник — изолятор — нормальный металл). В зависимости от топологии СИНИС-структуры может быть реализован детектор с высокой квантовой эффективностью. Например, в работе Yusupov et al. (2020) на частоте 350 ГГц измеренная квантовая эффективность СИНИС-детектора составила 15 электронов на квант излучения. Сам по себе детектор не селективен по частоте и к поляризации излучения — частота и полоса приема определяются планарными антеннами, в которые интегрируются одиночные СИНИС-детекторы и фильтрующие элементы в измерительном тракте.

При разработке приемной системы в составе обсерватории важным фактором является фоновая

нагрузка, которая может составлять десятки пиковатт в условиях эксплуатации на наземном инструменте. Одиночный СИНИС-детектор насыщается на уровне мощности порядка 0.5–1.0 пВт. При объединении таких детекторов в матрицы приходящее излучение распределяется между ними, за счет чего можно подобрать требуемый уровень насыщения. Благодаря компактности детектора (размеры до 10×5 мкм и менее, в зависимости от требований к топологии и используемой технологии) можно интегрировать по четыре детектора в одну антенну. Предполагается, что для матричных детекторов будет использована микроволновая система считывания на основе сверхпроводниковых копланарных резонаторов. Первые результаты тестовых исследований с такой системой считывания с СИНИС-детектором приведены в работе Gunbina et al. (2021). Фотографии некоторых изготовленных матриц представлены на рис. 3.

Ожидаемые и предварительно измеряемые в лабораторных условиях характеристики по чувствительности различных матриц СИНИС-детекторов:

- вольт-ваттная чувствительность вплоть до 10^{10} В Вт⁻¹;
- мощность эквивалентная шуму (NEP) не хуже 10^{-16} Вт Гц^{-1/2};
- флуктуационная чувствительность 100 мК Гц^{-1/2} при температуре фонового излучения 2.7 К (Tarasov et al., 2020).

Для расчета чувствительности приемной системы с учетом характеристик телескопа БТА можно воспользоваться понятием эквивалентной шумовой плотности потока (Noise Equivalent Flux Density (NEFD), Leclercq, 2017). Предварительные оценки показывают, что при данном значении NEP с полосой пропускания порядка 10% от центральной частоты $\nu_c = 100$ ГГц и эффективности апертуры $\eta_A \approx 0.8$ этот параметр будет равен $NEFD \approx 100$ мЯн Гц^{-1/2}. В таком случае объект с плотностью потока $S_\nu = 10$ мЯн с $S/N \approx 5$ можно будет наблюдать при накоплении в 30–40 минут.

Существенной особенностью высокочувствительных приемников для терагерцовой астрономии является необходимость их глубокого криогенного охлаждения, создания для этого вакуумных криостатов и разнообразных интерфейсов (оптических, электрических, механических, тепловых и т.п.), обеспечивающих эффективную работу.

Другой ключевой интерфейс таких приемных систем — квазиоптический тракт, который согласует сигнал, собираемый гигантским зеркалом телескопа, с наноразмерным детектором. Помимо согласующих и корректирующих элементов приемного тракта здесь также можно выделить следующие проблемы: вакуумное окно в криостате

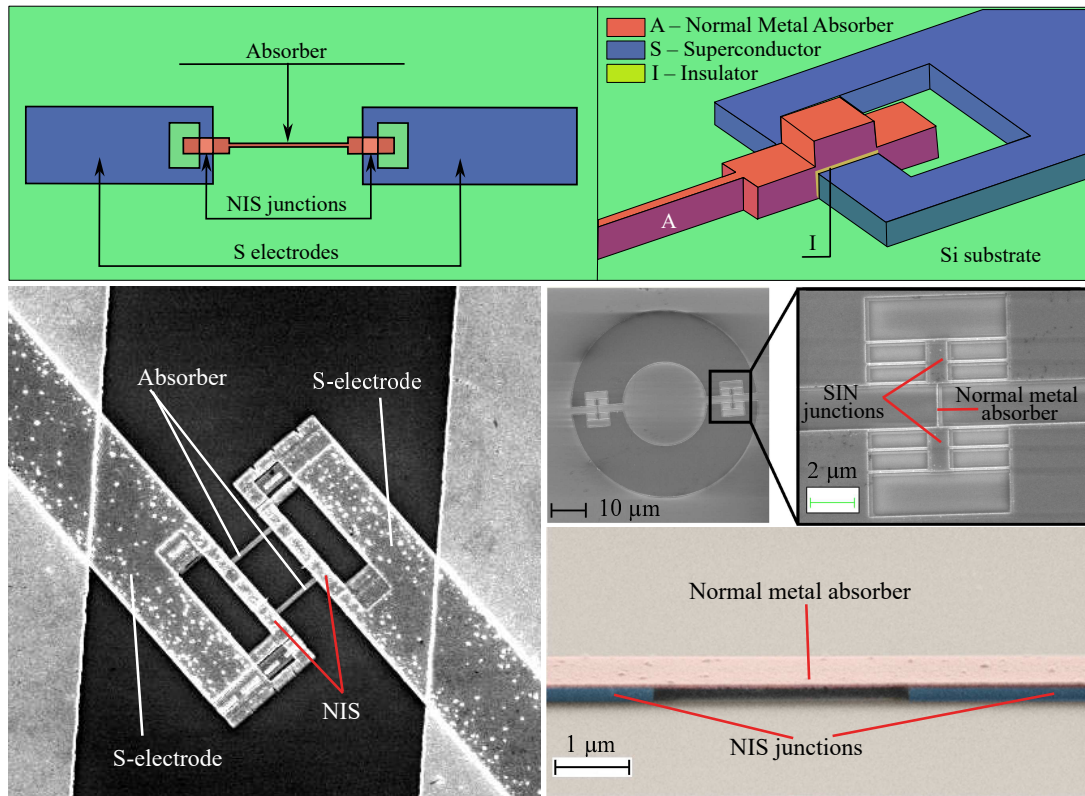


Рис. 2. СИНИС-детектор: (а) — схематичное изображение СИНИС-детектора; (б) — фотографии в сканирующем электронном микроскопе СИНИС-детектора различной топологии. Фотографии из публикации Gunbina et al. (2021).

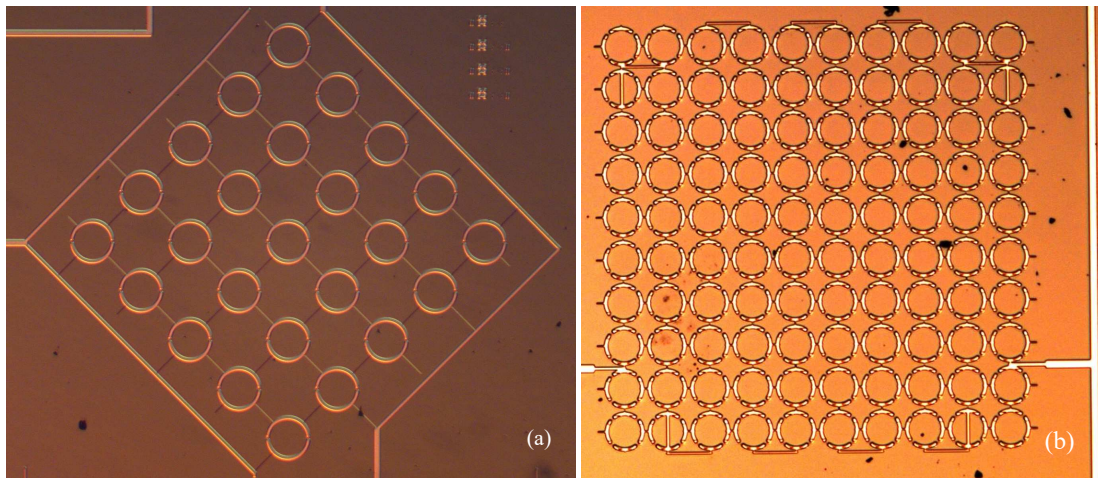


Рис. 3. Матрицы планарных антенн диапазона 350 ГГц: (а) — полуволновые антенны, (б) — электрически малые антенны.

(его материал и размеры); радиационные фильтры для подавления паразитного фонового излучения; элементы согласования внутри криостата и т. д. Некоторые элементы согласования и фильтрации, которые использовались в лабораторных экспериментах по исследованию характеристик приемных матриц на основе СИНИС-детекторов, приведены в работах Tarasov et al. (2020, 2022).

Еще один элемент таких систем, вносящий

вклад в шумы (и, соответственно, в общую чувствительность системы) — считывающая электроника. Один из вариантов считывания сигнала — «теплая» (работающая при комнатной температуре) электроника на основе операционных усилителей (JFET- или MOSFET-транзисторов). Основной недостаток такой системы — довольно высокие собственные шумы $20 \text{ нВ Гц}^{-1/2}$. Это не создает проблем для наземных измерений, так как требо-

Таблица 1. Технические характеристики

| | |
|---|--------------------------|
| Тип инструмента | полноповоротная антенна |
| Тип антенны | схема Кассегрена |
| Диаметр первичного зеркала, м | 15 |
| Эффективность апертуры по всем диапазонам η_A | > 0.65 |
| Диапазоны частот, ГГц | 86–116, 140–165, 200–260 |
| Точность поверхности, мкм | 55 |
| Точность наведения, угл. сек. | 2 |
| Точность сопровождения, угл. сек. | 0.3 |
| Эквивалентная плотность потока системы SEFD, Ян | – |
| SEFD ($\nu = 100$ ГГц, $T_{\text{rec}} = 40$ К, $T_{\text{atm}} = 30$ К, $T_{\text{spur}} = 20$ К) | 2200 |
| SEFD ($\nu = 230$ ГГц, $T_{\text{rec}} = 40$ К, $T_{\text{atm}} = 80$ К, $T_{\text{spur}} = 20$ К) | 3400 |
| Ширина полосы ПЧ, ГГц | до 8 (для SIS-смесителя) |
| Количество спектральных каналов | до 32 768 |
| Тип приемников ($\nu = 86–116$ ГГц) | HEMT, криогенный |
| Тип приемников ($\nu > 140$ ГГц) | SIS, криогенный |
| Максимальное разрешение, угл. сек. | 20 |

вания к мощности, эквивалентной шуму (МЭШ), не превышают значений 10^{-16} Вт Гц $^{-1/2}$. Этого вполне достаточно для наблюдений в условиях высокой фоновой нагрузки. Данный параметр при наземных наблюдениях в основном определяется большими значениями T_{atm} и излучением от «теплой» земли, попадающим в приемный тракт за счет боковых лепестков антенны. Но для более чувствительных исследований на аэростатных телескопах, и тем более для космических миссий, шумы считывающей электроники необходимо снижать. Также это важно для многопиксельных систем, где большое количество проводов считывающей электроники может вносить существенный уровень шумов. Перспективным является использование микроволновой считывающей электроники на основе высокодобротных сверхпроводящих компланарных резонаторов с холодным НЕМТ-усилителем⁴⁾ (первые результаты интеграции СИНИС-детекторов в такую систему представлены в работе Gunbina et al., 2021) с дальнейшей перспективой интеграции джозефсоновских параметрических усилителей бегущей волны на чипе. Информация о продвижении проекта установки СИНИС-детекторов на площадке телескопа БТА приведена в работе Valega et al. (2024).

⁴⁾High Electron Mobility Transistor, вариант полевого транзистора

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Проект субтерагерцовой обсерватории в составе БТА, работы по которому ведутся в настоящее время, предназначен главным образом для тестирования приемной аппаратуры в этом диапазоне и не может являться долгосрочным решением. Для организации наблюдений в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах на постоянной основе необходимо создание специализированного инструмента на базе полноповоротной антенны рефлекторного типа.

Рассмотрим вкратце основные требования к этому инструменту, возможные характеристики которого приведены в таблице 1. При расчете эквивалентной плотности потока системы SEFD использовались оценки шумовой температуры приемника T_{rec} , атмосферы T_{atm} и паразитного излучения за счет боковых лепестков антенны T_{spur} по аналогии с оценками, сделанными в меморандуме ALMA (Magnum, 2017). Стоит отметить, что приведенные в таблице 1 характеристики достаточно консервативные и эффективность инструмента может быть улучшена, например, за счет увеличения эффективности апертуры η_A , которая для антенн ALMA составляет 0.7–0.8 на частотах до 300 ГГц.



Рис. 4. Варианты антенн для установки: (а) — антенна компании EIE, источник: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO); (б) — антенна компании Vertex, источник: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO); (с) — антенна интерферометра NOEMA, источник: NOEMA (IRAM).

Приведенные в таблице 1 значения SEFD относятся ко входу приемника и не учитывают ослабление сигнала в атмосфере, но их достаточно для проведения последующих оценок.

3.1. Параметры антенны

Принимая во внимание ряд факторов, включая в первую очередь метеоусловия, оптимальным решением представляется установка антенны для наблюдений в миллиметровом диапазоне для трех спектральных окон от $\nu_c = 100$ ГГц ($\lambda = 3$ мм) до $\nu_c = 230$ ГГц ($\lambda = 1.3$ мм), соответствующих атмосферным окнам прозрачности. Разумным компромиссом между стоимостью, погодными условиями и разнообразием научных задач может быть полноповоротная антенна небольшого диаметра (до 15 м) с точностью поверхности первичного зеркала порядка 55 мкм. Стандартной оптической схемой, которая применяется в подобных инструментах (ALMA, NOEMA), является схема Кассегрена.

3.1.1. Возможные варианты антенн

Поскольку астрономические инструменты такого класса являются уникальными установками, в настоящее время в мире существует очень небольшое количество производителей антенн для миллиметровых наблюдений, из которых можно отметить компании EIE⁵⁾ и Vertex⁶⁾. Также есть компании в Юго-Восточной Азии и в Китае,

⁵⁾<http://www.eie.it/en>

⁶⁾<https://www.vertexant.com/>

которые разрабатывают и изготавливают такие инструменты, например CETC 54⁷⁾, фирма-субподрядчик проекта SKA, изготавливающая антенны SKA-MID (Pellegrini et al., 2021). В некоторых случаях астрономические учреждения с помощью субподрядчиков занимаются изготовлением и установкой антенн самостоятельно (IRAM, интерферометр NOEMA).

Некоторые варианты антенн приведены для иллюстрации на рис. 4.

В зависимости от погодных условий антенну иногда помещают в радиопрозрачный купол, что повышает итоговую стоимость всей конструкции. Решение об использовании такого купола нужно принимать после исследования астроклимата на месте размещения телескопа.

3.2. Приемная аппаратура

Предполагается, что инструмент будет оснащен поляризационными приемниками для наблюдений в широком диапазоне частот от 86 до 260 ГГц. Для работы на частотах в первом спектральном окне от 86 до 116 ГГц оправдано использование приемников на НЕМТ-усилителях, изготовленных в виде монолитной интегральной схемы (monolithic microwave integrated circuit, ММИС). Существует большое количество разработок приемной аппаратуры на основе НЕМТ в этом диапазоне. В частности, можно отметить разработки таких приемников для проекта ALMA (Yagoubov et al., 2020).

⁷⁾<http://www.militram.com/>

[cetc-54-antenna-capability-products/](http://www.militram.com/cetc-54-antenna-capability-products/)

Задача по работе в составе сети РСДБ включает использование болометров в качестве детекторов для второго и третьего спектрального окна на частотах от 140 до 260 ГГц, так как в этом случае будет теряться фазовая компонента сигнала. Стандартной практикой при наблюдениях в миллиметровом диапазоне на частотах выше 120–150 ГГц и вплоть до терагерца является применение когерентных (гетеродинных) приемников с SIS-смесителями⁸⁾ (Wilson and Guilloteau, 2018).

В настоящее время в мире и, в частности в России наблюдается значительный прогресс в области маломощных SIS-приемников, в том числе в связи с началом проекта «Миллиметр» (Novikov et al., 2021). Например, Rudakov et al. (2020) рассмотрели маломощный SIS-приемник для работы в диапазоне 211–275 ГГц, разработанный сотрудниками Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН совместно с коллегами из Астрономического института университета Гронингена (Нидерланды). Данный приемник предполагается использовать как для инструментов космического базирования, так и для наземных проектов. Подобным приемником можно оснастить и предлагаемый миллиметровый телескоп САО РАН.

Нетрудно оценить, что при заявленных значениях эквивалентной плотности потока системы (SEFD) в таблице 1 (при полосе ПЧ в 4 и 8 ГГц для центральной частоты $\nu_c = 100$ ГГц и 230 ГГц соответственно) при получасовом накоплении можно наблюдать источники с плотностями потока порядка 10–20 мЯн в зависимости от зенитного угла с $S/N \approx 5$.

Еще можно отметить, что для режима одиночного зеркала разработаны сверхпроводящие кинетические индукционные детекторы (kinetic inductance detectors, KID). В частности, массивом из таких детекторов NIKA-2 оснащен 30-м телескоп IRAM в Испании (Adam et al., 2018). Камера с тремя тысячами пикселей на два диапазона 150 ГГц и 260 ГГц позволяет получить поле зрения до 6.5° с разрешением в $17.5''$ и $11''$ на данных частотах.

Приемные рупоры на разные диапазоны обычно устанавливаются на взаимозаменяемые картриджи либо на вращающуюся платформу барабанного типа в фокальной области антенны.

Для оцифровки сигнала и для получения его спектра, а также для конвертирования оцифрованного сигнала в формат данных РСДБ (Mark6) можно использовать разработку коллаборации CASPER⁹⁾: Roach-2 на ПЛИС Xilinx Virtex-6 (Kubo et al., 2018).

⁸⁾Superconductor–Insulator–Superconductor

⁹⁾<https://casper.berkeley.edu/>

4. ВЫБОР ПЛОЩАДКИ И ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ В АТМОСФЕРЕ

На территории САО РАН существует три очевидных места, где антенну можно установить без существенных затрат на создание новой инфраструктуры. Это территория РАТАН-600, недалеко от станции Зеленчукской (высота 974 м), верхняя наблюдательная площадка (ВНП, высота 2070 м) и точка в 1.5 км к юго-востоку от ВНП, так называемый холм Семиродники (высота 2340 м). Для первых двух пунктов есть достаточно длительные ряды метеорологических параметров, тогда как для третьего пункта необходимо проводить их мониторинг.

Кроме мониторинга метеорологических параметров на какой-либо площадке перед установкой антенны необходимо провести инженерно-геологические изыскания. Их задачами являются комплексное изучение инженерно-геологических условий с целью получения необходимых и достаточных материалов для разработки проектной документации по строительству служебного помещения и самой антенны, включая рельеф, геологическое строение, геоморфологические и гидрогеологические условия, состав, состояние и свойства грунтов, геологические и инженерно-геологические процессы, а также составление прогноза возможных изменений инженерно-геологических условий в сфере взаимодействия проектируемых объектов с геологической средой.

4.1. Методика оценки содержания осаждаемой воды по метеоданным

Зная температуру воздуха и относительную влажность, можно оценить слой осаждаемой воды в миллиметрах (perceptible water vapour (PWV), содержание водяного пара в воздушном столбе единичного сечения) по методике, описанной Otárola et al. (2010):

$$e_0 = e_s \frac{RH}{100},$$

$$e_s = 611.21 \exp \left[\left(18.68 - \frac{T}{234.5} \right) \left(\frac{T}{257.1 + T} \right) \right],$$

$$\rho_{V_0} = \frac{e_0}{R_V T(K)},$$

$$PWV = 1000 H \rho_{V_0} \left(1 - \exp \left(-\frac{z_0 - z_{\max}}{H} \right) \right),$$

где e_0 — парциальное давление водяного пара у поверхности в паскалях; e_s — парциальное давление

водяного пара в насыщении как функция от температуры воздуха T (в градусах Цельсия) у поверхности; RH — относительная влажность воздуха у поверхности в процентах; ρ_{V_0} — плотность водяного пара у поверхности (кг м^{-3}); $R_V = 461.9$ — газовая постоянная для водяного пара ($\text{Дж кг}^{-1} \text{К}^{-1}$); $T(\text{К})$ — температура воздуха в градусах Кельвина; H — характеристический масштаб для водяного пара в километрах, для данных расчетов принят за 1.68 км; z_0 — географическая высота места в километрах; z_{max} — максимальная высота, до которой проводилось интегрирование профиля водяного пара, для расчетов принята за 12 км.

4.2. Статистика метеоданных и оценка PWV для ВНП

Верхняя научная площадка САО РАН является наиболее удобным местом для размещения миллиметрового телескопа. Там расположены основные оптические инструменты — 6-м телескоп БТА, Цейсс-1000 с 1-м зеркалом и несколько более мелких инструментов. Высота площадки составляет 2070 м над уровнем моря. Поскольку содержание воды в атмосферном столбе зависит от высоты, то на ВНП эта величина меньше, чем на расположенных ниже площадках, например на РАТАН-600. На рис. 5а, б, с представлены: гистограмма распределения значений PWV в миллиметрах за весь период наблюдений 2008–2020 гг.; усредненные значения PWV по месяцам, включая среднесуточные, дневные и ночные значения; эмпирическая кумулятивная функция распределения (CDF) для значений PWV. Из графиков видно, что $PWV < 5$ мм наблюдается в 30% случаев, а $PWV < 7$ мм — в половине случаев, что соответствует полугодовому периоду, с октября по апрель.

На рис. 5д приведена гистограмма распределения скорости ветра в порывах за весь период наблюдений (2008–2020 гг). Несмотря на то, что ветровые нагрузки на ВНП больше, чем на равнине, за время наблюдений скорость ветра в порывах достигала 40 м с^{-1} всего один раз. Хотя условия эксплуатации отличаются для конструкций антенн от разных производителей, наблюдения в штатном режиме обычно проводятся при средней скорости ветра меньше $10\text{--}12 \text{ м с}^{-1}$ (в порывах менее 15 м с^{-1}). Далее возможна работа по некоторым задачам при средней скорости ветра менее 22 м с^{-1} , выше которой антенна переводится в нерабочее положение, при котором аэродинамическое сопротивление конструкции минимально. Предельная (survival conditions at stow) скорость ветра для большинства антенн обычно составляет $50\text{--}55 \text{ м с}^{-1}$.

4.3. Вариант установки антенны на холме Семиродники

В направлении на юго-восток от ВНП на расстоянии 1.5 км находится холм Семиродники, высота которого составляет 2340 м, что на 250 м выше места, где располагаются основные оптические инструменты САО РАН (рис. 6). В настоящее время не существует данных метеомониторинга для этой точки. Поэтому для оценки возможности установки антенны необходимо собрать статистику метеоданных, включая температуру, влажность и скорость ветра, с помощью автономной метеостанции, которую там необходимо установить.

Эксперимент по измерению поглощения, проведенный в декабре 2013 года, показал уменьшение поглощения на г. Пастухова (2733 м) на 13% или на 0.3 мм PWV по сравнению с ВНП при перепаде высоты порядка 700 м (рис. 9, Bubnov et al., 2015). Ожидается, что на холме Семиродники средние значения PWV в зимний период будут меньше на 0.10–0.15 мм, чем на ВНП.

4.4. Сравнение PWV на некоторых площадках

Как правило, инструменты, которые работают в диапазоне короче 3 мм, устанавливаются на высокогорье (ALMA, JCMT, LMA). Однако существуют телескопы, которые размещены на высотах меньше 3 км и при этом успешно проводят наблюдения на частотах больше 230 ГГц. К ним относятся, например, 30-м телескоп на Пико Велета в Испании (IRAM30, 2850 м, Sánchez-Portal, 2023), интерферометр NOEMA (Франция, Южные Альпы, 2550 м, Negi, 2016). Не стоит забывать об инструментах CARMA (США, 2196 м, Shiao et al., 2006) и NMA (Япония, 1350 м, Morita, 1994), которые долгое время наблюдали на частотах до 300 ГГц и были закрыты по финансовым соображениям, так как ресурсы было решено направить на развитие проекта ALMA. Кроме того, в настоящее время готовится проект e-KVN (Южная Корея, Вун, 2021), где предлагается установка 21-м антенны на высоте порядка 600 м над уровнем моря для работы на частоте 230 ГГц.

В таблице 2 сравниваются значения PWV для разных площадок (CARMA, NOEMA, ВНП и РАТАН-600) и показано, какую долю от общего времени может наблюдаться значение PWV меньше данного. Из приведенных оценок видно, что содержание воды, измеренное на Цейсс-1000 (ВНП), вполне сопоставимо с условиями CARMA. Ожидается, что при установке антенны на холме Семиродники, высота которого на 250 м больше, ситуация с PWV может несколько улучшиться. Как уже отмечалось, на этом месте необходимо провести мониторинг метеорологических параметров.

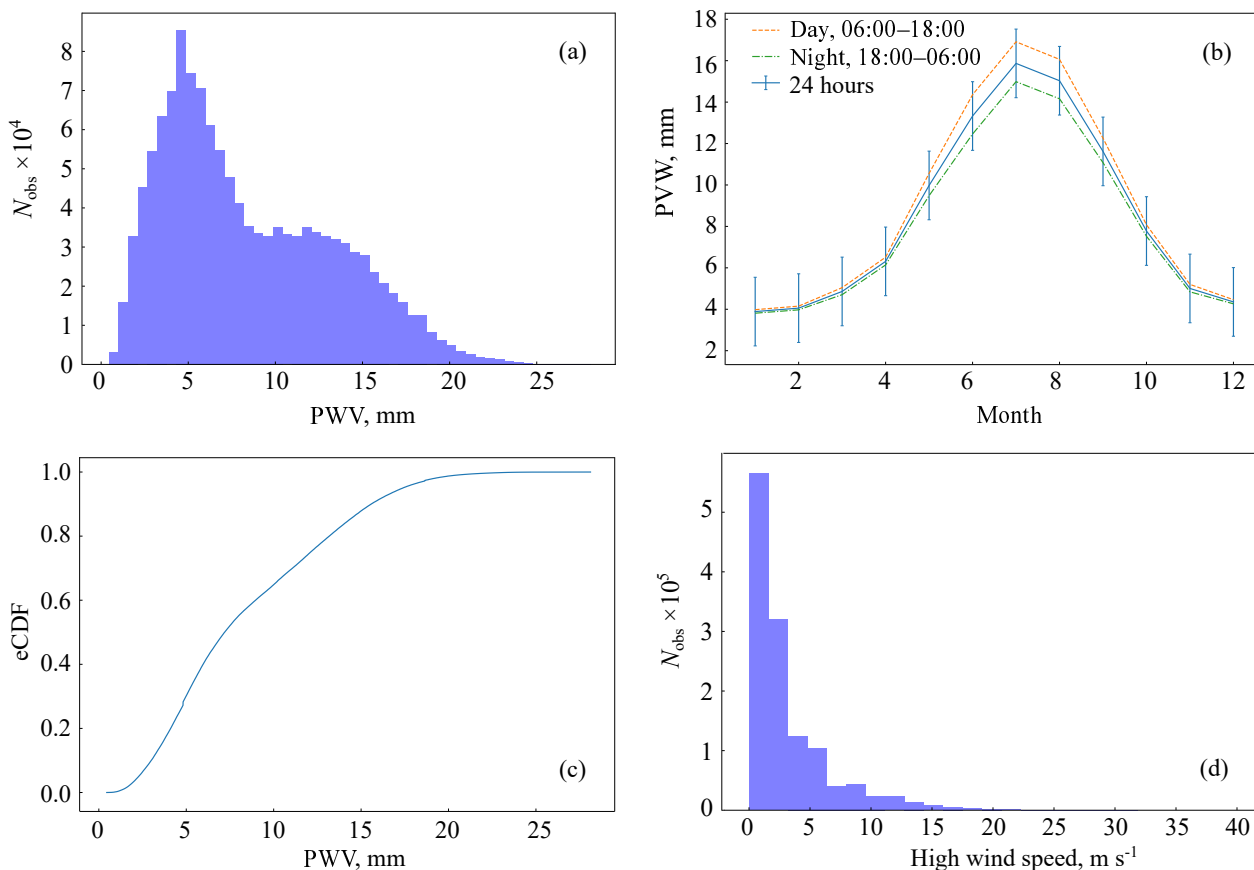


Рис. 5. Оценка PWV на ВНП (Цейсс-1000) по значениям влажности и температуры, а также статистика скорости ветра за период с 2008 по 2020 г. На панелях представлены: (a) — гистограмма распределения значений PWV; (b) — усредненные значения PWV по месяцам (дневные, средние, ночные); (c) — кумулятивная функция распределения вероятности (CDF) для значений PWV; (d) — гистограмма распределения значений скорости ветра в порывах.

Таблица 2. Сравнение значений PWV (мм) для разных площадок

| Площадки | Высота, м | Доля времени, % | | | | |
|--------------|--------------|-----------------|------|-----|-----|-----|
| | | 90 | 50 | 25 | 10 | 5 |
| НОЕМА, зима | 2550 | 7.0 | 2.1 | 1.0 | 0.3 | 0.2 |
| НОЕМА, общее | 2550 | 11.0 | 4.0 | 2.0 | 1.0 | 0.4 |
| CARMA | 2196 | 12.0 | 5.0 | 4.5 | 3.0 | 2.0 |
| Zeiss-1000 | 2070 | 16.0 | 7.0 | 4.5 | 3.0 | 2.0 |
| RATAN-600 | 974 | 20.0 | 11.5 | 7.5 | 4.5 | 3.5 |

5. НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ

В данном разделе перечислены некоторые научные проблемы, которые можно будет решать на предлагаемом инструменте, работающем в миллиметровом диапазоне.

Стоит отметить, что даже в режиме одиночного зеркала можно будет ставить совершенно новые

для САО РАН задачи, специфические для данного диапазона. Режим РСДБ, с другой стороны, предполагает широкую кооперацию с другими инструментами, в рамках которой можно получить уникальные результаты.

5.1. Режим одиночной антенны

Основным режимом работы миллиметрового телескопа будет режим одиночной антенны. В разделе 3.2 было показано, что при получасовом накоплении на инструменте будет возможно наблюдать объекты с плотностью потока порядка 20 мЯн с отношением $S/N \approx 5$. Отметим, что эти оценки проводились для случая «средней» атмосферы с $PWV \approx 10$ мм. При реализации такой чувствительности появляется возможность проведения наблюдений как объектов Галактики, так и множества внегалактических объектов. Простая экстраполяция числа объектов из каталога компактных источников PCCS2 (Ade et al., 2016a) на область с плотностью потоков больше 30 мЯн

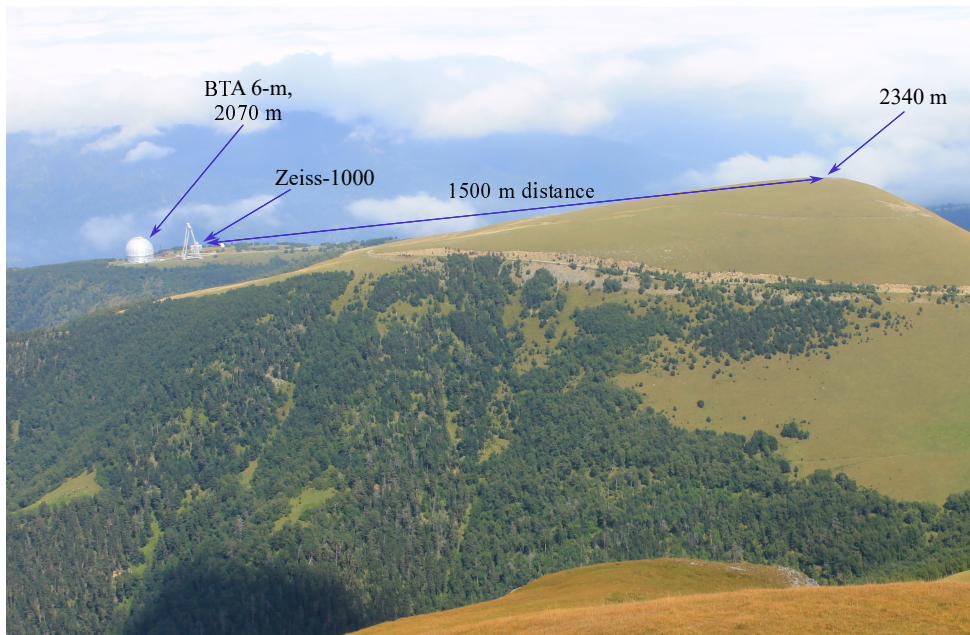


Рис. 6. Предполагаемое место установки радиотелескопа на холме Семиродники.

дает число доступных для наблюдения внегалактических источников порядка 15–20 тысяч на частотах 100–230 ГГц.

Рассмотрим вкратце научные задачи, которые можно будет решать в режиме одиночной антенны.

5.1.1. Обзоры в линиях CO и построение карт излучения в линиях молекул

Наблюдения излучения вращательных переходов молекул монооксида углерода $^{12}\text{CO } J = 1-0$ (115.27 ГГц), $^{13}\text{CO } J = 1-0$ (110.20 ГГц) и $^{12}\text{CO } J = 2-1$ (230.54 ГГц) используются для определения наличия в межзвездной среде молекулярного водорода H_2 , который тесно связан с процессом звездообразования. Напрямую наблюдать молекулярный водород затруднительно, поэтому для определения массы H_2 в газовых облаках используются наблюдения молекулярных линий CO и отношение светимости CO к массе H_2 (Shetty et al., 2011). Кроме того, измерения доплеровского смещения линий CO дают информацию о кинематике объекта.

Несмотря на то, что за последние годы проводилось множество обзоров в линиях CO как нашей, так и соседних галактик, существует большое количество объектов, для которых эти данные отсутствуют.

Дополнительную информацию о кинематике и химическом составе молекулярных облаков можно получить путем проведения наблюдений линий других молекул, таких как ион альдегидной

группы $\text{HCO}^+ J = 1-0$ (89.19 ГГц), молекулярный ион $\text{N}_2\text{H}^+ J = 1-0$ (93.17 ГГц), молекулы CS (97.98 ГГц), HCN (88.63 ГГц), C^{18}O (109.78 ГГц) и многих других (Lovas et al., 1979; Tzioumis, 2013).

5.1.2. Мониторинг активных ядер галактик

В режиме одиночной антенны на данном инструменте совместно с наземными радиотелескопами будет возможно проведение квазиодновременных измерений в континууме на частотах до 230 ГГц различных подклассов активных ядер галактик (АЯГ): блазаров; сейфертовских галактик NLS 1; галактик FR 0, FR I и FR II; компактных молодых объектов (CSS, GPS, HFP); предельно далеких радиогалактик и квазаров ($z > 3$). Кроме радиотелескопов в таких программах мониторинга бывают задействованы и инструменты в других диапазонах, например в оптическом и гамма (Bychkova et al., 2018). С появлением новых эффективных инструментов, таких как «Спектр-РГ» (Sunyaev et al., 2021), программы квазиодновременного мониторинга в нескольких диапазонах будут особенно интересными и миллиметровый телескоп САО РАН может внести в них существенный вклад.

В рамках таких программ возможны исследования кандидатов во внегалактические источники нейтрино сверхвысоких энергий (ТЭВ – ПЭВ), что позволит изучить связь между событиями нейтрино и радиовспышками в квазарах, которая была установлена статистически (Plavin et al., 2020; Novatta et al., 2021) и максимально проявилась на высоких

радиочастотах — десятки ГГц. Массовые измерения АЯГ на сотнях ГГц станут основой развития теории эффективного ускорения протонов в них.

Результаты программ мониторинга АЯГ могут быть использованы для расчета граничных условий в моделях механизмов нетеплового излучения в них, оценок областей зарождения гамма-излучения, помогут исследовать внутренние области релятивистских джетов на частотах в сотни ГГц там, где синхротронное самопоглощение пренебрежимо мало.

5.1.3. Исследование эффекта

Сюняева–Зельдовича в близких скоплениях

Тепловой эффект Сюняева–Зельдовича (С–З) возникает за счет обратного комптоновского рассеяния фотонов реликтового излучения (РИ) на электронах горячего газа, в который погружены скопления галактик, и приводит к изменению интенсивности РИ, которое зависит от частоты (Sunyaev and Zeldovich, 1972). Возникающие отклонения спектра РИ от чернотельного имеют минимум на частотах порядка 150 ГГц, где наблюдается уменьшение температуры РИ в месте нахождения скопления, и максимум на частотах порядка 400 ГГц, когда можно наблюдать увеличение его температуры (см., например, Mroczkowski et al., 2019). На частоте порядка 220 ГГц эффект пропадает.

Эффект С–З наблюдался на различных инструментах, среди которых нужно отметить космический телескоп Planck, по результатам наблюдений которого была построена карта параметра комптонизации y для всей небесной сферы, а также составлен каталог скоплений галактик, где наблюдается этот эффект (Ade et al., 2016b; Aghanim et al., 2016c). Среди наземных инструментов эффект С–З наблюдался на SPT¹⁰⁾ (Plagge et al., 2010; Everett et al., 2020) и на АСТ¹¹⁾ (Hilton et al., 2021), где были измерены профили поверхностной яркости и давления газа, а также составлены каталоги скоплений галактик. Заметим, что угловое разрешение Planck на частотах инструмента NFI 100–857 ГГц варьировалось от 10'.7 до 5'.5. Разрешение инструментов SPT и АСТ на 150 ГГц составляет 40'' и 70''.

Наблюдения теплового эффекта С–З на предлагаемом инструменте будут возможны в области его минимума на 130–150 ГГц (температурная депрессия), причем дополнительные измерения на 220–230 ГГц можно использовать для разделения собственно эффекта С–З от постороннего излучения, в основном РИ и теплового излучения пыли.

Разрешение инструмента порядка 30'' на частоте 150 ГГц сравнимо только с разрешением SPT, но при этом будет возможно наблюдать объекты северной небесной полусферы, недоступные SPT. Это позволит проводить качественные измерения скоплений, имеющих достаточный угловой размер.

Наблюдения эффекта С–З позволяют измерить профиль давления газа в межгалактической среде, что дает возможность получить информацию о ее термодинамической структуре, включая эффекты обратного влияния АЯГ (AGN feedback), глобальные и турбулентные движения, степень асферичности скоплений.

Комбинируя многочастотные наблюдения с разных инструментов, можно восстановить распределение электронной температуры T_e в скоплениях. Для этого при разделении вклада различных компонент нужно учесть релятивистские поправки к эффекту С–З (Chluba et al., 2013; Maillard et al., 2024). Для решения этой задачи необходимы наблюдения скопления как в депрессии на $\nu \sim 150$ ГГц, так и в максимуме эффекта на частоте $\nu \sim 350$ ГГц. Предлагаемый инструмент позволит обеспечить необходимый наблюдательный материал в нужном диапазоне для такого совместного анализа данных.

Еще отметим, что наблюдения в рентгеновском диапазоне дают непосредственную информацию о плотности и температуре газа в скоплениях, что значительно дополняет другие измерения эффекта С–З и позволяет получить согласованное представление о содержании газа в группах и скоплениях галактик. Такой комплексный подход может быть использован при совместном анализе данных с космическим аппаратом «Спектр-РГ», инструменты которого имеют сходную разрешающую способность (Sunyaev et al., 2021).

5.1.4. Построение кривых вращения спиральных галактик и картографирование темной материи

Достаточно давно было замечено, что кривые вращения спиральных галактик не ведут себя в соответствии с законом Кеплера, как если бы они состояли только из излучающей материи (см., например, Rubin et al., 1978). Внешние области спиральных галактик вращаются значительно быстрее, чем должны, исходя из оценки излучающей массы, поэтому было выдвинуто предположение, что галактики погружены в гало из темной материи. Природа темной материи представляет собой одну из главных проблем современной астрофизики (Zasov et al., 2017).

Обычно кинематику спиральных галактик и, в частности, кривые вращения изучают с помощью наблюдений линии нейтрального водорода HI, поскольку радиальная протяженность газа намного больше видимого диска. В дополнение к этому

¹⁰⁾South Pole Telescope

¹¹⁾Atacama Cosmology Telescope

методу для изучения кинематики внутреннего диска и центральных областей спиральных галактик широко используются наблюдения молекулярных линий CO в миллиметровом диапазоне, так как монооксид углерода обычно имеет более высокую концентрацию в этих областях, чем нейтральный водород HI, а также из-за малого поглощения пылью (Sofue, 2017).

Кроме того, из-за гораздо меньшей длины волны излучения вращательных переходов (например, CO $J = 1-0$ имеет $\lambda = 2.6$ мм) на небольшом инструменте можно достичь значительно большего разрешения, чем в случае наблюдения линии нейтрального водорода на $\lambda = 21$ см.

5.1.5. Наблюдения объектов нашей Галактики в континууме

Предлагаемый в данном проекте миллиметровый телескоп можно использовать для наблюдения радиоизлучения рентгеновских тесных двойных систем Галактики — микроквazarов. Их можно считать аналогами обычных квазаров на масштабах звезды. Они являются тесными рентгеновскими двойными системами, где происходит аккреция вещества со звезды-компаньона на нейтронную звезду или черную дыру. При этом у них наблюдается активность в радиодиапазоне за счет релятивистских струй. Типичным представителем этого класса объектов является GRS 1915+105 (Done et al., 2004).

За последние 40 лет в результате наблюдений в рентгеновском диапазоне было зарегистрировано несколько десятков микроквazarов, и в настоящее время проводится радиомониторинг некоторых из них (Kim and Kim, 2004; Trushkin et al., 2017). Однако эти объекты изучаются в основном в сантиметровом диапазоне, и дополнительные данные на миллиметровых волнах позволят точнее определить их радиосвойства, такие как спектральный индекс, распределение энергии по спектру (SED) и их изменения в процессе вспышечной активности.

5.1.6. Наблюдения миллиметровых линий сложных молекул в межзвездной среде

Миллиметровый диапазон хорошо подходит для наблюдений молекулярных линий сложных молекул, в том числе и органических. Молекулы найдены не только в звездных атмосферах, но и ассоциированы с плотным и холодным межзвездным и околозвездным веществом. Они наблюдаются как в небольших компактных объектах (глобулах), так и в гигантских молекулярных облаках (ГМС). Молекулы выступают в качестве индикатора физических условий в их окружении, а также дают информацию о времени жизни родительских объектов (Herbst and van Dishoeck, 2009).

К настоящему времени в межзвездной среде обнаружено более 300 различных молекул, большая часть из которых относится к органическим (McGuire, 2022). Многие из них, такие как CH_3OH , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, $(\text{CH}_3)_2\text{O}$, CH_3NH_2 и обладающие простой структурой, были открыты еще в 1970-х годах. Сложные органические молекулы, например гликольальдегид (CH_2OHCHO) или аминокетонитрил ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CN}$) (прекурсор глицина $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$), были открыты сравнительно недавно (Ohishi, 2016).

Наблюдения межзвездных молекул, в том числе и поиск предбиологических молекул, важны для понимания химической эволюции Вселенной. При частотном покрытии предлагаемого инструмента с верхней частотой 230 ГГц будут возможны измерения большого числа молекулярных линий сложных молекул.

5.1.7. Исследование областей звездообразования в Галактике

Считается, что образование звезд происходит в газопылевых облаках, находящихся в состоянии гравитационной неустойчивости. Под воздействием гравитации происходит фрагментация облака на участки различной плотности, и более плотные образования становятся ядрами для протообъектов.

Наблюдать области звездообразования имеет смысл преимущественно в тех диапазонах длин волн, в которых поглощение облаков будет минимальным, а именно в инфракрасном и микроволновом. Механизм эмиссии связан с переизлучением пылью УФ-излучения звезд в более длинноволновой области, в частности, в миллиметровом диапазоне.

Для уточнения химического состава, от которого зависит процесс охлаждения облака, и для изучения кинематики необходима информация, которую дают наблюдения молекулярных линий. С их помощью можно получить и другие данные о протообъекте, например температуру и концентрацию газа (Guilloteau, 2018).

Наблюдение пылевой компоненты на частотах 100–300 ГГц является важным элементом в изучении физических условий в облаках, где происходит звездообразование. Комбинируя измерения в этом диапазоне с более высокочастотными наблюдениями в районе максимума спектра излучения пыли, являющегося модифицированным чернотельным спектром, можно определить температуру пылинок, а также сделать оценку массы облака.

5.1.8. Исследование нетеплового излучения Солнца

Использование миллиметровых измерений совместно с сантиметровыми (наземные инструменты) позволит выполнить детальное исследование тепловой структуры хромосферы и переходной области к короне в солнечных пятнах. Привлечение данных оптического и УФ-диапазонов даст возможность интегрировать результаты в полную картину строения атмосферы солнечного пятна от самых нижних фотосферных слоев до корональных высот (Loukitcheva, 2019).

Инструмент, работающий в миллиметровом диапазоне, можно использовать для изучения процессов нагрева солнечной короны и хромосферы. Несмотря на значительный прогресс, достигнутый за последние десятилетия, ряд фундаментальных вопросов, касающихся строения и динамики солнечной хромосферы, до сих пор не решен. К таким вопросам относятся нагрев хромосферы и короны — в частности, какие механизмы ответственны за него и где он локализован. Наличие целого класса объектов типа рекомбинационных линий на коротких миллиметровых волнах открывает новую область спектральных исследований хромосферы Солнца.

Миллиметровая радиоастрономия предлагает ряд уникальных методов для оценки магнитного поля на высотах хромосферы и переходной области. В результате можно исследовать структуру магнитного поля в активных областях и мелкомасштабном спокойном Солнце.

В круг возможных задач входит модификация существующего критерия прогноза протонных событий в плазме Солнца, понимание механизмов, инициирующих их (Vogod et al., 2020), исследование природы субтерагерцовой компоненты вспышечного излучения.

Необходимо отметить, что наблюдения Солнца на инструментах такого класса возможны только при специальной конструкции антенны, например, на антеннах ALMA. В литературе описан случай, когда Солнце, случайно попавшее в поле зрения миллиметрового телескопа, вызвало пожар на вторичном зеркале (SEST, Leverington, 2016).

5.2. Использование инструмента в составе сети РСДБ

Круг научных задач можно значительно расширить включением миллиметрового инструмента в состав сети РСДБ как национальной, так и международной. Поскольку в перспективе планируется подключение существующих радиотелескопов РТ-13 к сети РСДБ (см., например, Ipatov, 2013;

Kol'tsov et al., 2020), полезно провести моделирование такой сети, объединяющей уже существующие (при условии улучшения поверхности антенн) и предполагаемые инструменты, которые будут работать в миллиметровом диапазоне.

В рамках подготовки данной статьи было произведено моделирование наблюдений многокомпонентного источника с расстоянием между компонентами несколько сотен микросекунд дуги для разных конфигураций сети РСДБ, включающей в свой состав антенну, установленную на ВНП САО РАН. Для моделирования отклика радиointерферометра использовался программный пакет OSKAR¹²⁾, а восстановление изображений методом CLEAN проводилось с помощью программы wsclean¹³⁾ (Offringa et al., 2014). В данной модели использовалась центральная частота $\nu = 230$ ГГц, $\Delta\nu = 1$ ГГц, время наблюдения $t_{\text{obs}} = 6$ часов. Ошибки по амплитуде и фазе не моделировались, то есть предполагались идеальные калибровки, поскольку целью являлась демонстрация предела разрешения той или иной конфигурации сети РСДБ и влияния числа антенн на покрытие uv -плоскости и, как следствие, на качество восстановленного изображения.

На рис. 7 приведены синтетические восстановленные изображения многокомпонентного источника с минимальным угловым расстоянием между компонентами 100 микросекунд дуги при наблюдениях в двух конфигурациях сети миллиметровой РСДБ. Первая конфигурация включает в себя уже существующие три инструмента РТ-13 (Светлое, Зеленчукская, Бадары), миллиметровую антенну на ВНП САО РАН, антенну радиобсерватории «Суффа» и миллиметровый инструмент, который, возможно, будет построен в Дагестане в районе г. Шалбуздаг (Balega et al., 2022) или на другой площадке в этом регионе (Khaikin et al., 2022). Такая конфигурация может рассматриваться как национальная сеть миллиметровой РСДБ.

Вторая конфигурация включает в себя все шесть вышеперечисленных антенн и дополнительно четыре инструмента, которые могут быть установлены в КНР на площадках, обозначенных в работе Tian et al. (2016) как потенциально пригодные для проведения миллиметровых наблюдений — Наншань (Синьцзян), Али (Тибет), Янгбаджин (Тибет), а также Дэлинха (Цинхай), при условии модернизации имеющейся в Дэлинхе антенны для работы в диапазоне 1.3 мм (Yang et al., 2012).

¹²⁾<https://github.com/OxfordSKA/OSKAR>

¹³⁾<https://gitlab.com/aroffringa/wsclean>

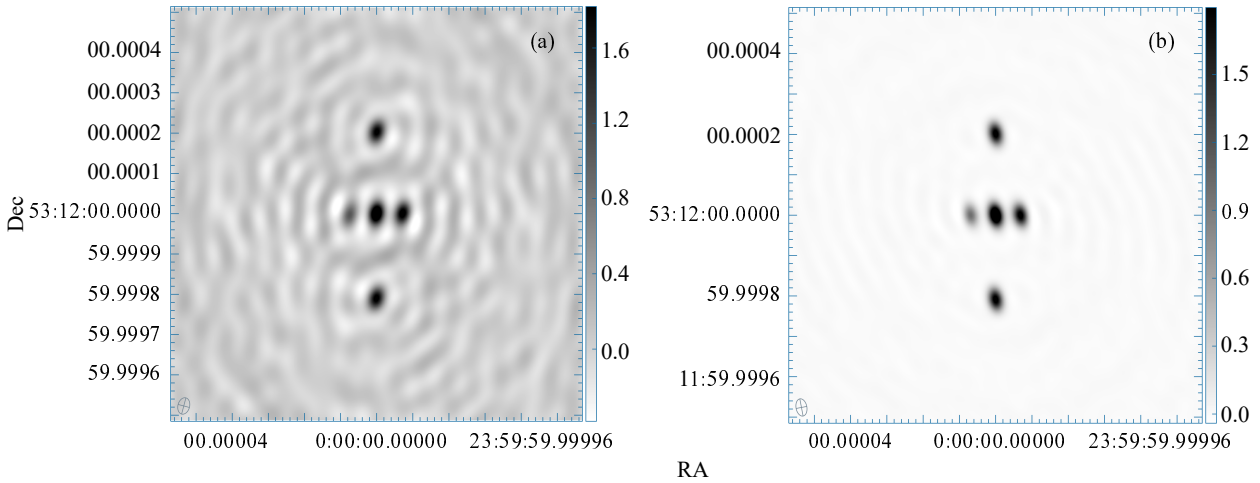


Рис. 7. Моделирование наблюдений многокомпонентного объекта с угловым расстоянием 100–300 микросекунд дуги между компонентами в различных конфигурациях миллиметровой РСДБ-сети: (а) — 6 антенн; (б) — 10 антенн.

Формальное разрешение сети РСДБ определяется максимальной базовой линией, которая в обоих случаях равна расстоянию между двумя самыми дальними антеннами (РТ-13 Зеленчукская и РТ-13 Бадары, 4400 км, Shuygina et al., 2019), и на частоте 230 ГГц составляет порядка 60 микросекунд дуги.

В первой конфигурации, с шестью антеннами, имеется 15 базовых линий. Короткая база ВМП (САО РАН) — РТ-13 (Зеленчукская) обеспечивает чувствительность к большим масштабам порядка долей угловой секунды. Артефакты на восстановленном методом CLEAN изображении на рис. 7а связаны с малым количеством базовых линий и недостаточным покрытием uv -плоскости. В случае второй конфигурации, с десятью антеннами, разрешение сети РСДБ примерно такое же (поскольку добавленные антенны находятся западнее самой восточной точки в Бадарах), но при увеличении числа базовых линий до 45 и гораздо более плотном покрытии uv -плоскости очевидно улучшение качества восстановленного изображения (см. рис. 7б).

Поскольку проекты сетей миллиметровой РСДБ предлагались и ранее (см., например, Asada et al., 2017), задачи для таких инструментов озвучивались разными исследовательскими группами. Ниже рассмотрим вкратце лишь некоторые из них.

5.2.1. Исследование компактных внегалактических объектов

При включении миллиметрового инструмента в сеть РСДБ возможно решение круга задач, где требуется высокое угловое разрешение, например:

- исследование радиоизлучения и динамики плазмы в компактных областях джетов АЯГ в режиме РСДБ;

- изучение структуры и процессов формирования релятивистских струй в АЯГ по данным мониторинга блазаров;
- изучение морфологии компактных молодых объектов вплоть по эпохи, когда они становятся радиогромкими ($z > 6$).

Такие программы могли бы стать важным дополнением к вышеперечисленным задачам в режиме одиночной антенны.

Более подробно возможности сетей миллиметровой РСДБ при наблюдениях АЯГ рассмотрены в работе Voccardi et al. (2017).

5.2.2. Участие в коллаборации Event Horizon Telescope

Успешная визуализация тени вокруг сверхмассивной черной дыры в ядре галактики М87 телескопом ЕНТ на 230 ГГц (Fish et al., 2016) открыла новую эру в прямом экспериментальном исследовании геометрии пространства — времени Вселенной. Угловое разрешение ЕНТ $\Delta\theta \approx 20$ микросекунд дуги достаточно только для исследования масштабов радиуса тени. Для успеха эксперимента ЕНТ необходимы дальнейшие измерения, в том числе, в сети космического миллиметрового интерферометра («Миллиметр»). Предлагаемый инструмент может обеспечить такому эксперименту независимую базу для покрытия uv -плоскости, альтернативы которой в настоящее время нет.

5.2.3. Участие в РСДБ наблюдениях источников мазерного излучения

Известно, что мазерные линии ассоциированы с галактическими и внегалактическими объектами, такими как протозвезды, ударные волны в областях звездообразования и в остатках сверхновых, околозвездные оболочки вокруг АГВ-звезд и красных

сверхгигантов, а также с газовыми дисками вокруг АЯГ. Области мазерного излучения имеют компактную структуру с исключительно высокими яркостными температурами (более 10^{10} К), поэтому они являются идеальными объектами для РСДБ-наблюдений. Источники мазерного излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах постоянно наблюдаются на разных инструментах, в частности на ALMA (Zinchenko et al., 2017). Также есть сообщения об успешных наблюдениях мазеров на прототипе сети миллиметровой РСДБ, например, Shibata et al. (2004) опубликовали результаты наблюдений мазерного источника в линии SiO 86 ГГц в околосредней оболочке яркого сверхгиганта VY CMa, используя два телескопа с длиной базовой линии порядка 1000 км.

Ключевой особенностью РСДБ-наблюдений мазеров является возможность измерения скоростей сразу по всем трем координатам, чего можно достичь, наблюдая источник в разные эпохи. Используя сеть миллиметровой РСДБ, можно получить точность определения положения и собственного движения объекта на порядок лучше, чем дают обычные РСДБ-наблюдения в сантиметровом диапазоне.

5.2.4. Коллаборация по проекту «Миллиметрон»

Космическая обсерватория «Миллиметрон» (Novikov et al., 2021) — это проект Астрокосмического центра Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (АКЦ ФИАН), в рамках которого будет запущен космический аппарат с антенной 10-м для наблюдения в диапазоне длин волн от 0.07 мм до 10 мм. В нем будет реализован как режим одиночной антенны, так и режим интерферометра «космос—Земля».

Миллиметровый телескоп САО РАН может быть использован в проекте «Миллиметрон» как для обеспечения наземной поддержки (для мониторинга целевых объектов исследования), так и в виде дополнительного пункта для создания независимой базы в Северном полушарии, что значительно улучшит покрытие *uv*-плоскости космического интерферометра. Большим плюсом будет вовлечение отечественных научных организаций, таких как САО РАН, в этот крупный международный эксперимент.

5.2.5. Проект «Суффа»

В рамках этого проекта предполагается постройка 70-м полноповоротной антенны с рабочим диапазоном частот от 1 до 300 ГГц на плато Суффа в Узбекистане (Nojaev et al., 2007). Для отработки методик наблюдения и тестирования приемной аппаратуры было бы полезно дополнительно установить несколько малых инструментов диаметром до 15 м как на самом плато в Узбекистане, так и

на территории России для создания РСДБ-сети, элементом которой мог бы стать и миллиметровый телескоп САО РАН.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены предложения по развитию инструментальной базы в миллиметровом диапазоне в САО РАН.

В настоящее время в САО РАН при поддержке Российского научного фонда реализуется проект субтерагерцовой обсерватории в составе оптического телескопа БТА. Проект, в рамках которого будет проведено тестирование приемной аппаратуры для миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, в первую очередь нацелен на демонстрацию самой возможности наблюдений в этом диапазоне длин волн и служит «прекурсором» специализированного инструмента — полноповоротной антенны, предназначенной для решения ряда научных задач.

В статье рассмотрена возможность создания и эксплуатации такого миллиметрового телескопа на верхней научной площадке Специальной астрофизической обсерватории РАН. Задачи для этого инструмента рассмотрены как в режиме одиночной антенны, так и в режиме коллаборации с наземными и космическими интерферометрами.

Авторы уверены, что создание миллиметрового телескопа будет большим шагом вперед в развитии астрономической инструментальной базы не только для САО РАН, но и для всего российского астрономического сообщества.

БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта «Наука и университеты».

Изготовление образцов исследуемых приемных структур СИНИС-детекторов выполнено на оборудовании УНУ № 352529 «Криоинтеграл».

Разработка и изготовление различных электрических и механических интерфейсов для проведения исследования приемных структур, а также разработка системы криостатирования выполняются на базе УНУ № 3589084 «ЦКП-7».

Авторы признательны коллегам Н. В. Борисову, В. В. Власюку, С. В. Драбеку, М. А. Лукичевой, Ю. Ю. Ковалеву и С. А. Трушкину за предоставленные материалы и плодотворные дискуссии.

Авторы благодарны уважаемым рецензентам за ценные замечания и рекомендации, которые позволили значительно улучшить эту статью.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 23-62-10013 «Разработка прототипа отечественной субтерагерцовой обсерватории в составе оптического телескопа».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. Adam, A. Adane, P. A. R. Ade, et al., *Astron. and Astrophys.* **609**, id. A115 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201731503
2. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **594**, id. A26 (2016a). DOI:10.1051/0004-6361/201526914
3. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **594**, id. A27 (2016b). DOI:10.1051/0004-6361/201525823
4. N. Aghanim et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **594**, id. A22 (2016c). DOI:10.1051/0004-6361/201525826
5. K. Akiyama et al. (Event Horizon Telescope Collaboration), *Astrophys. J.* **875** (1), article id. L2 (2019). DOI:10.3847/2041-8213/ab0c96
6. K. Asada, M. Kino, M. Honma, et al., *arXiv e-prints astro-ph:1705.04776* (2017). DOI:10.48550/arXiv.1705.04776
7. Y. Balega, O. Bolshakov, A. Chernikov, et al., *Photonics* **10** (11), 1263 (2023). DOI:10.3390/photonics10111263
8. Y. Balega, G. Bubnov, A. Chekushkin, et al., *Sensors* **24** (2), 359 (2024). DOI:10.3390/s24020359
9. Y. Y. Balega, A. M. Baryshev, G. M. Bubnov, et al., *Radiophysics and Quantum Electronics* **63** (7), 479 (2020). DOI:10.1007/s11141-021-10073-z
10. Y. Y. Balega, D. K. S. Bataev, G. M. Bubnov, et al., *Doklady Physics* **67** (1), 1 (2022). DOI:10.1134/S1028335822010013
11. B. Boccardi, T. P. Krichbaum, E. Ros, and J. A. Zensus, *Astron. and Astrophys.* **25** (1), article id. 4 (2017). DOI:10.1007/s00159-017-0105-6
12. V. M. Bogod, T. I. Kal'tman, and M. A. Lukicheva, *Geomagnetism and Aeronomy* **59** (7), 783 (2020). DOI:10.1134/S0016793219070077
13. G. M. Bubnov, E. B. Abashin, Y. Y. Balega, et al., *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* **5** (1), 64 (2015). DOI:10.1109/TTHZ.2014.2380473
14. V. S. Bychkova, A. E. Volvach, L. N. Volvach, et al., *Astrophysical Bulletin* **73** (3), 293 (2018). DOI:10.1134/S1990341318030033
15. D.-Y. Byun, *13th East Asian VLBI Workshop 2021 (EAVW21)* (Chiang Mai, Thailand, 2021) (online at <https://indico.narit.or.th/event/152/contributions/313/attachments/184/413/EAVW21-DoYoungByun.pdf>).
16. J. Chluba, E. Switzer, K. Nelson, and D. Nagai, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **430** (4), 3054 (2013). DOI:10.1093/mnras/stt110
17. Y. Chol Minh, H.-G. Kim, S.-T. Han, and D.-G. Roh, in *Proc. Intern. General Meeting VLBI Service for Geodesy and Astrometry, Ottawa, Canada, 2004*, Ed. by N. R. Vandenberg and K. D. Baver, NASA/CP-2004-212255, p. 156 (2004).
18. P. E. Dewdney, P. J. Hall, R. T. Schilizzi, and T. J. L. W. Lazio, *Proceedings of the IEEE* **97** (8), 1482 (2009). DOI:10.1109/JPROC.2009.2021005
19. C. Done, G. Wardziński, and M. Gierliński, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **349** (2), 393 (2004). DOI:10.1111/j.1365-2966.2004.07545.x
20. S. Dougherty, *Abstracts of the 235th AAS Meeting*, 235, id. 255.01 (2020).
21. V. S. Edelman, *Instruments and Experimental Techniques* **55** (1), 145 (2012). DOI:10.1134/S0020441212010277
22. H. Eklund, S. Wedemeyer, M. Szydlarski, et al., *Astron. and Astrophys.* **644**, id. A152 (2020). DOI:10.1051/0004-6361/202038250
23. W. B. Everett, L. Zhang, T. M. Crawford, et al., *Astrophys. J.* **900** (1), id. 55 (2020). DOI:10.3847/1538-4357/ab9df7
24. V. Fish, K. Akiyama, K. Bouman, et al., *Galaxies* **4** (4), id. 54 (2016). DOI:10.3390/galaxies4040054
25. M. Guélin and J. Cernicharo, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* **9**, id. 787567 (2022). DOI:10.3389/fspas.2022.787567
26. S. Guilloteau, *Millimeter Astronomy, Saas-Fee Advanced Course* **38**, 111 (2018). DOI:10.1007/978-3-662-57546-8_2
27. A. Gunbina, S. Mahashabde, M. Tarasov, et al., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **31** (5), id. 3068999 (2021). DOI:10.1109/TASC.2021.3068999
28. A. Gunbina, M. Tarasov, M. Fominsky, et al., *Advances in Microelectronics: Reviews*, vol. 3, (IFSA Publishing, Barcelona, 2021), p. 183.
29. E. Herbst and E. F. van Dishoeck, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **47** (1), 427 (2009). DOI:10.1146/annurev-astro-082708-101654
30. M. Hilton, C. Sifón, S. Naess, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **253** (1), article id. 3 (2021). DOI:10.3847/1538-4365/abd023
31. H. Hirabayashi, in *Proc. IAU Symp.* No. 112, Ed. by M. D. Papagiannis (D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, 1985), p. 425.
32. A. Hojaev, G. I. Shanin, and Y. N. Artyomenko, in *Proc. IAU Meeting* No. 26, Ed. by J. B. Hearnshaw and P. Martinez (Cambridge University Press, Cambridge, 2007), p. 177. DOI:10.1017/S1743921307006965

33. T. Hovatta, E. Lindfors, S. Kiehlmann, et al., *Astron. and Astrophys.* **650**, id. A83 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202039481
34. D. H. Hughes, F. P. Schloerb, I. Aretxaga, et al., *SPIE Conf. Proc.* **11445**, id. 1144522 (2020). DOI:10.1117/12.2561893
35. B. T. Indermuehle and M. G. Burton, *Publ. Astron. Soc. Australia* **31**, id. e032 (2014). DOI:10.1017/pasa.2014.25
36. B. K. Ioannisianni, E. M. Neplokhov, I. M. Kopylov, et al., in *Proc. IAU Coll. No. 67*, Ed. by C. M. Humphries (D. Reidel Publishing Co. Dordrecht, 1982), p. 3. DOI:10.1007/978-94-009-7787-7_1
37. A. V. Ipatov, *Physics—Uspekhi* **56** (7), article id. 729 (2013). DOI:10.3367/UFNe.0183.201307i.0769
38. V. B. Khaikin, A. Y. Shikhovtsev, A. P. Mironov, and X. Qian, in *Proc. Conf. on Multifaceted Universe: Theory and Observations-2022, Nizhny Arkhyz, Spec. Astrophys. Obs. RAS, Russia, 2022*, id. 72 (2022) (online at <https://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=425>). DOI:10.22323/1.425.0072
39. J.-S. Kim and S.-W. Kim, *AIP Conf. Proc.*, **714**, 160 (2004). DOI:10.1063/1.1781020
40. N. Kol'tsov, S. Grenkov, and L. Fedotov, *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics* **23** (2), 6 (2020). DOI:10.32603/1993-8985-2020-23-2-6-18
41. D. Kubo, C.-C. Han, H. Nishioka, et al., *SPIE Conf. Proc.* **10708**, id. 1070816 (2018). DOI:10.1117/12.2312241
42. S. Leclercq, https://www.iram.fr/~leclercq/Reports/About_NEP_photon_noise.pdf (2017).
43. D. Leverington, *Observatories and Telescopes of Modern Times* (Cambridge University Press, Cambridge, 2016). DOI:10.1017/9781139051507
44. M. Loukitcheva, *Advances in Space Research* **63** (4), 1396 (2019). DOI:10.1016/j.asr.2018.08.030
45. F. J. Lovas, D. R. Johnson, and L. E. Snyder, *Astrophys. J. Suppl.* **41**, 451 (1979). DOI:10.1086/190626
46. J. Magnum, <https://library.nrao.edu/public/memos/alma/main/memo602.pdf> (2017).
47. J. P. Maillard, A. Mihalchenko, D. Novikov, et al., *Phys. Rev. D* **109** (2), article id. 023523 (2024). DOI:10.1103/PhysRevD.109.023523
48. B. A. McGuire, *Astrophys. J. Suppl.* **259** (2), id. 30 (2022). DOI:10.3847/1538-4365/ac2a48
49. K.-I. Morita, *ASP Conf. Ser.* **59** 18 (1994).
50. T. Mroczkowski, D. Nagai, K. Basu, et al., *Space Science Reviews* **215** (1), article id. 17 (2019). DOI:10.1007/s11214-019-0581-2
51. R. Neri, in *9th IRAM Millimeter Interferometry School, Grenoble, 2016* (online at <https://web-archives.iram.fr/IS/IS2016/presentations/neri-noema.pdf>).
52. I. D. Novikov, S. F. Likhachev, Y. A. Shchekinov, et al., *Physics—Uspekhi* **64** (4), 386 (2021). DOI:10.3367/UFNe.2020.12.038898
53. A. R. Offringa, B. McKinley, N. Hurley-Walker, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **444** (1), 606 (2014). DOI:10.1093/mnras/stu1368
54. M. Ohishi, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 728, article id. 052002 (2016). DOI:10.1088/1742-6596/728/5/052002
55. A. Otárola, T. Travoignon, M. Schöck, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **122** (890), 470 (2010). DOI:10.1086/651582
56. Y. N. Parijskij, *IEEE Antennas and Propagation Magazine* **35**, 7 (1993). DOI:10.1109/74.229840
57. A. Pellegrini, J. Flygare, I. P. Theron, et al., *IEEE Journal of Microwaves* **1** (1), 428 (2021). DOI:10.1109/JMW.2020.3034029
58. T. Plagge, B. A. Benson, P. A. R. Ade, et al., *Astrophys. J.* **716** (2), 1118 (2010). DOI:10.1088/0004-637X/716/2/1118
59. A. Plavin, Y. Y. Kovalev, Y. A. Kovalev, and S. Troitsky, *Astrophys. J.* **894** (2), id. 101 (2020). DOI:10.3847/1538-4357/ab86bd
60. I. Prandoni, M. Murgia, A. Tarchi, et al., *Astron. and Astrophys.* **608**, id. A40 (2017). DOI:10.1051/0004-6361/201630243
61. V. C. Rubin, W. K. Ford Jr., and N. Thonnard, *Astrophys. J.* **225**, L107 (1978). DOI:10.1086/182804
62. K. I. Rudakov, P. N. Dmitriev, A. M. Baryshev, et al., *Radiophysics and Quantum Electronics* **62** (7–8), 547 (2020). DOI:10.1007/s11141-020-10001-7
63. M. Sánchez-Portal, in *Proc. Scientific Meeting of the Spanish Astronomical Society, La Laguna, Spain, 2022*, Ed. by M. Manteiga, L. Bellot, P. Benavidez, A. de Lorenzo-Caceres, M. A. Fuente, M. J. Martínez, M. Vázquez Acosta, C. Dañonte (online at <https://zenodo.org/records/7047921#.Y78Dg0zMKek>), 2023.
64. K. F. Schuster, R. Neri, F. Gueth, et al., *SPIE Conf. Proc.* **10700**, p. 107000R (2018). DOI:10.1117/12.2313489
65. R. Shetty, S. C. Glover, C. P. Dullemond, and R. S. Klessen, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **412** (3), 1686 (2011). DOI:10.1111/j.1365-2966.2010.18005.x
66. Y.-S. Shiao, L. W. Looney, D. P. Woody, et al., *SPIE Conf. Proc.* **6275**, id. 62750Y (2006). DOI:10.1117/12.672245
67. K. M. Shibata, H.-S. Chung, S. Kamenoi, et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **56**, 475 (2004). DOI:10.1093/pasj/56.3.475
68. N. Shuygina, D. Ivanov, A. Ipatov, et al., *Geodesy and Geodynamics* **10** (2), 150 (2019). DOI:10.1016/j.geog.2018.09.008
69. Y. Sofue, *Publ. Astron. Soc. Japan* **69** (1), id. R1 (2017). DOI:10.1093/pasj/psw103
70. R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babyshkin, et al., *Astron. and Astrophys.* **656**, id. A132 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202141179
71. R. A. Sunyaev and Y. B. Zeldovich, *Comments on Astrophysics and Space Physics* **4**, 173 (1972).

72. M. Tarasov, A. Gunbina, A. Chekushkin, et al., *Applied Sciences* **11** (20) id. 9649 (2021). DOI:10.3390/app11209649
73. M. Tarasov, A. Gunbina, A. Chekushkin, et al., *Applied Sciences* **12** (20), id. 10525 (2022). DOI:10.3390/app122010525
74. M. A. Tarasov, A. A. Gunbina, S. Mahashabde, et al., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **30** (3), id. 2941857 (2020). DOI:10.1109/TASC.2019.2941857
75. J. F. Tian, L. C. Deng, X. B. Zhang, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **128** (968), 105003 (2016). DOI:10.1088/1538-3873/128/968/105003
76. S. Trushkin, N. Nizhelskij, P. Tsybulev, and G. Zhekanis, *Galaxies* **5** (4), id. 84 (2017). DOI: 10.3390/galaxies5040084
77. A. Tzioumis, <http://handle.itu.int/11.1002/pub/809847c8-en>.
78. A. N. Vystavkin, A. G. Kovalenko, S. V. Shitov, et al., *SPIE Conf. Proc.* **7020**, article id. 702024 (2008). DOI:10.1117/12.788744
79. A. N. Vystavkin, S. V. Shitov, S. E. Bankov, et al., *Radiophysics and Quantum Electronics* **50** (10–11), 852 (2007). DOI:10.1007/s11141-007-0077-x
80. T. L. Wilson and S. Guilloteau, *Millimeter Astronomy* (Springer, Berlin, 2018). DOI:10.1007/978-3-662-57546-8
81. P. Yagoubov, T. Mroczkowski, V. Belitsky, et al., *Astron. and Astrophys.* **634**, id. A46 (2020). DOI:10.1051/0004-6361/201936777
82. D. Yang, Y. Zhang, G. Zhou, et al., *SPIE Conf. Proc.* **8444**, article id. 84444B (2012). DOI:10.1117/12.925789
83. R. A. Yusupov, A. A. Gunbina, A. M. Chekushkin, et al., *Physics of the Solid State* **62** (9), 1567 (2020). DOI:10.1134/S106378342009036X
84. A. V. Zasov, A. S. Saburova, A. V. Khoperskov, and S. A. Khoperskov, *Physics—Uspekhi* **60** (1), 3 (2017). DOI:10.3367/UFNe.2016.03.037751
85. I. Zinchenko, S. Y. Liu, Y. N. Su, and A. M. Sobolev, *Astron. and Astrophys.* **606**, id. L6 (2017). DOI:10.1051/0004-6361/201731752

Prospects of Millimeter Astronomy Development at the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences (SAO RAS)

V. A. Stolyarov¹, Y. Y. Balega^{1,2}, M. G. Mingaliev^{1,3,4}, Y. V. Sotnikova^{1,3}, V. F. Vdovin^{5,1}, A. A. Gunbina⁵, D. E. Kukushkin^{1,6}, M. A. Tarasov⁷, M. Y. Fominsky⁷, A. M. Chekushkin⁷, V. S. Edelman⁸, R. A. Yusupov⁷

¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

²China Branch of BRICS Institute of Future Networks, Shenzhen, 518000 China

³Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, 420008 Russia

⁴Institute of Applied Astronomy, Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 191187 Russia

⁵Federal research center A. V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, 603950 Russia

⁶ITMO University, Saint Petersburg, 197101 Russia

⁷Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Moscow, 125009 Russia

⁸P. L. Kapitza Institute for Physical Problems Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia

The article discusses the prospects for developing the observational base at the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences (SAO RAS) for astrophysical research in the millimeter-wave range. As a first step, a project is proposed to create a set of sub-terahertz receiving equipment to operate on the optical telescope BTA. Additionally, the possibility of installing a new instrument to operate in the frequency range up to 230 GHz ($\lambda = 1.3$ mm) on the Upper Research Site of the SAO RAS is considered. Technical and operational characteristics of the instrument, site selection for the installation of a fully steerable millimeter-wave antenna, statistics of meteorological data and atmospheric absorption are discussed. A list of potential scientific tasks addressed by instruments of this class is provided.

Keywords: atmospheric effects—instrumentation: detectors—instrumentation: interferometers—methods: observational