

УДК [520.8.056+535.8]:520-125

# ОПТИЧЕСКИЙ ТЕЛЕСКОП БТА КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ МИЛЛИМЕТРОВОЙ АСТРОНОМИИ: НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ

© 2026 И. И. Зинченко<sup>1, 2, 3\*</sup>, В. А. Столяров<sup>4, 5</sup>, М. А. Тарасов<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, Нижний Новгород, 603950 Россия

<sup>2</sup>Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, 603022 Россия

<sup>3</sup>Институт астрономии Российской академии наук, Москва, 119017 Россия

<sup>4</sup>Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>5</sup>Кавендишская лаборатория, Кембриджский университет, Кембридж, СВ3 0HE Великобритания

<sup>6</sup>Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук, Москва, 125009 Россия

Поступила в редакцию 1 ноября 2025 года; после доработки 5 декабря 2025 года; принята к публикации 15 декабря 2025 года

В период 2023–2026 гг. в САО РАН осуществляется реализация проекта миллиметровой обсерватории в составе оптического телескопа БТА, в рамках которого планируется установка субтерагерцовых приемников в фокусе Несмита и проведение тестовых наблюдений. В статье рассматриваются научные задачи, которые можно поставить как на начальном этапе проекта с болометрическими приемниками для наблюдений в континууме, так и в будущем с использованием приемных комплектов на основе НЕМТ и SiS для наблюдений в линиях молекул.

Ключевые слова: *методы: наблюдательные — телескопы — радиоизлучение с непрерывным спектром: общее — радиолинии: общее*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Миллиметровая и субмиллиметровая астрономия начала активно развиваться в 1960-х годах прошлого столетия и в настоящее время стала незаменимым источником информации о различных астрономических объектах и процессах (см., например, Zinchenko, 2003; Wilson and Guilloteau, 2018; Stolyarov et al., 2024). Это обусловлено несколькими факторами.

Во-первых, в данный диапазон попадает пик излучения холодных межзвездных облаков, в которых происходит образование новых звезд. Пока данный процесс вызывает много вопросов и его понимание — одна из ключевых проблем астрофизики. Важным обстоятельством, многократно повышающим информативность данного диапазона для исследований процессов звездообразования, является то, что в него попадает множество спектральных линий молекул и атомов, служащих зондами физических условий в этих областях.

В том же диапазоне находится и пик интенсивности микроволнового реликтового фонового

излучения; изучение особенностей его спектра и поляризации является одной из наиболее актуальных задач астрофизики (например, Novikov et al., 2025). Эти исследования требуют скрупулезного учета вклада различных галактических и внегалактических источников.

Во-вторых, благодаря рекордному угловому разрешению в данном диапазоне и меньшему рассеянию в межзвездной среде по сравнению с более длинными волнами, миллиметровый диапазон открывает уникальные возможности для исследования далеких компактных объектов. Особенно ярко это проявилось в наблюдениях сверхмассивных черных дыр в галактике M87 и в центре нашей Галактики при помощи Телескопа горизонта событий на длине волны 1.3 мм (Akiyama et al., 2019; 2021; 2022). Есть и другие задачи, не требующие столь высокого разрешения и связанные с особенностями спектров некоторых объектов в этом диапазоне (например, эффект Сюняева–Зельдовича).

Идея использования приемников миллиметрового диапазона в составе оптического телескопа БТА как промежуточного варианта до создания

\*E-mail: zin@ipfran.ru

специализированного миллиметрового инструмента обсуждалась в САО РАН еще в начале 1990-х годов. В работе Vystavkin et al. (2008) предлагался проект установки болометра в фокус БТА, который так и не был реализован. С 2023 года в САО РАН осуществляется проект РНФ «Разработка прототипа отечественной субтерагерцовой обсерватории в составе оптического телескопа». Его целью является тестирование криогенных СИНИС-детекторов в реальных наблюдениях на БТА в диапазонах 3 и 1.3 мм (Stolyarov et al., 2024). Конечно, возможности такого инструмента будут ограничены по сравнению со специализированными телескопами, например IRAM-30m (Sánchez-Portal, 2023) или LMT (Hughes et al., 2020). Тем не менее существует ряд задач, которые можно успешно решать на инструментах небольшого диаметра.

У СИНИС-детекторов диапазона длин волн 3 мм, планируемых для использования на БТА, мощность, эквивалентная шуму (noise equivalent power, NEP), составляет около  $10^{-16}$  Вт Гц $^{-1/2}$  (Stolyarov et al., 2024). При полосе приема около 10 ГГц это дает чувствительность по плотности потока примерно 100 мЯн при времени накопления 1 с. Чувствительность по яркостной температуре при этом приблизительно составит 1 мК. Шумы атмосферы при хороших погодных условиях будут меньше или сравнимы с шумами такого детектора.

Как отмечено в работе Stolyarov et al. (2024), источник с плотностью потока  $S_\nu$  (100 GHz) = 10 мЯн можно наблюдать с отношением  $S/N \approx 5$  при накоплении 30–40 минут, в зависимости от зенитного угла и погодных условий. Это означает, что в потенциально наблюдаемые объекты для БТА входит большое количество источников как галактических (например, молекулярные облака, источники мазерного излучения), так и внегалактических (например, активные ядра галактик (АЯГ), в т.ч. блазары).

Однако эти оценки не учитывают флуктуации излучения атмосферы, особенно сильные в облачную погоду, что делает наблюдения слабых источников в континууме практически невозможными. Но флуктуации присутствуют даже в безоблачной атмосфере, они сравнительно медленные, и их величина обычно описывается структурной функцией. Например, при очень хороших атмосферных условиях в пустыне Атакама амплитуда флуктуаций яркостной температуры неба достигает около 100 мК приблизительно за 10 мин, как видно из рис. 1 в работе Dünner et al. (2013), где анализируются данные на частоте 148 ГГц. Зависимость структурной функции от временного масштаба описывается степенной функцией с показателем 2/3. В случае условий Атакамы шумы приемника и флуктуации излучения атмосферы примерно

сравниваются при времени накопления в десятые доли секунды. Для площадки БТА исследования флуктуаций яркостной температуры атмосферы не проводились, но можно полагать, что они значительно сильнее, чем в Атакаме. Эти флуктуации необходимо учитывать при выборе методики наблюдений.

Статья организована следующим образом. В разделе 2 обсуждаются задачи для наблюдений в континууме, а также рассматриваются вопросы калибровки инструмента. В разделе 3 ставятся задачи для спектральных наблюдений, которые могут быть реализованы с использованием когерентных приемников на поздних стадиях проекта. В разделе 4 обсуждаются различные аспекты использования приемной системы субтерагерцового диапазона, а в разделе 5 приводятся заключительные замечания.

## 2. НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ В КОНТИНУУМЕ

Астроклиматические условия на площадке БТА таковы, что там возможны как регулярные наблюдения в окнах прозрачности 3 и 2 мм, так и эпизодические, в периоды низкого содержания водяного пара в атмосфере, в окне прозрачности 1.3 мм. Основные виды континуального излучения в этих диапазонах — это тормозное излучение ионизованного газа и излучение пыли. Могут наблюдаться и другие виды излучения, например синхротронное.

Источники излучения обычно делят на точечные (размер которых значительно меньше ширины диаграммы направленности) и протяженные. Ожидаемая ширина основного лепестка диаграммы направленности БТА на длине волны 3 мм — около двух угловых минут. К точечным источникам будут относиться такие объекты, как АЯГ и другие внегалактические объекты, например субмиллиметровые галактики, компактные источники в нашей Галактике, планеты и другие тела Солнечной системы. К протяженным — межзвездные облака, близкие галактики, скопления галактик.

В настоящее время для картирования протяженных источников в континууме на коротких миллиметровых волнах на ряде инструментов используются матрицы болометров с тысячами элементов, например NIKA2 на 30-м радиотелескопе IRAM (Perotto et al., 2020) и TolTEC на 50-м радиотелескопе LMT (Wilson et al., 2020). Оптическая схема размещения миллиметрового приемника на БТА предполагает довольно небольшое поле зрения, так что использование подобной многоэлементной матрицы невозможно. Соответственно, эффективность БТА для картирования протяженных источников будет сравнительно низка. Тем не менее такие работы могут проводиться для изучения отдельных объектов, представляющих научный

интерес. Наиболее эффективным в данном случае является исследование источников с размером, сопоставимым с шириной диаграммы направленности, когда невозможность использования многоэлементной матрицы не имеет большого значения. Например, это могут быть достаточно компактные межзвездные облака. Надо заметить, что излучение пыли в диапазоне длин волн 3 мм в таких облаках очень слабо. Характерные лучевые концентрации молекулярного водорода в плотных сгустках —  $N(\text{H}_2) \sim 10^{23} \text{ см}^{-2}$  (см., например, Zinchenko et al., 2009). При стандартном отношении массы газа к массе пыли, равном 100, масса пыли в столбе единичного сечения достигает  $5 \text{ мг см}^{-2}$ . Для типичных величин коэффициента поглощения на единицу массы пыли (Ossenkopf and Henning, 1994) оптическая толщина такого облака будет  $\tau \sim 5 \times 10^{-4}$ . При характерной температуре пыли (около 20 К (например, Razukhin et al., 2022)) яркостная температура достигает 10 мК. При ожидаемой чувствительности БТА в континууме это измеряемая величина, но только в хороших атмосферных условиях. Для наблюдений излучения пыли лучше использовать диапазон 1.3 мм, где оптическая толщина и яркость пылевых облаков почти на порядок выше.

В диапазоне 3 мм можно наблюдать тормозное излучение ионизованного газа в зонах Н II. Существует несколько типов таких зон (Kurtz, 2005). Для наблюдений на БТА наиболее подходят компактные зоны Н II с мерой эмиссии более  $10^7 \text{ пк см}^{-6}$  и размерами в десятые доли парсека, что на расстоянии около 1 кпк дает угловой размер, близкий к ожидаемой ширине диаграммы направленности БТА. Научные задачи могут заключаться в исследовании малоизученных межзвездных облаков, благодаря этому будет получена новая информация в обзоре неба.

Другой класс сравнительно небольших протяженных источников — это скопления галактик, в которых может наблюдаться эффект Сюняева—Зельдовича (ЭСЗ). Хорошими примерами исследования таких источников являются работы, выполненные на 6-м радиотелескопе АСТ (Atacama Cosmology Telescope) в Чили (Hilton et al., 2021) и на 10-м телескопе SPT (South Pole Telescope) на Южном полюсе (Kornelje et al., 2025). Также отметим проекты FYST (Fred Young Submillimeter Telescope, Parshley et al., 2022) и SO LAT (Simons Observatory Large Aperture Telescope, Lee et al., 2019), в рамках которых запланировано создание телескопов диаметром 6 м для наблюдения ЭСЗ в субтерагерцовом диапазоне. По наблюдениям ЭСЗ на АСТ на длинах волн 3 и 2 мм был составлен каталог из более чем 4000 скоплений галактик. На SPT выполнен глубокий обзор площадки 100 кв. градусов в диапазонах длин волн 3, 2 и

1.3 мм, в результате которого идентифицировано около 500 кандидатов в скопления галактик. Конечно, атмосферные условия в местах расположения этих телескопов значительно лучше, чем на площадке БТА. Тем не менее в ясную погоду такая работа на БТА в принципе возможна. Она может расширить обзоры АСТ и SPT на Северное небо. При этом угловое разрешение будет заметно лучше, чем у космической обсерватории Planck, которая зарегистрировала ЭСЗ во многих скоплениях галактик (Ade et al., 2016a). Величина декремента температуры в ЭСЗ составляет сотни мК, поэтому для его регистрации требуется длительное время накопления. Такая программа могла бы выполняться в рамках наземной поддержки космической рентгеновской обсерватории СРГ (Sunyaev et al., 2021), которая детектирует скопления галактик по излучению горячего газа в их центрах в рентгеновском диапазоне.

Что касается точечных источников, то основным типом объектов для исследований на БТА, очевидно, будут АЯГ. Имеется значительное количество АЯГ с плотностью потока в миллиметровом диапазоне длин волн достаточной для уверенной регистрации на БТА. Например, на 30-м радиотелескопе IRAM реализуется проект POLAMI (Polarimetric Monitoring of AGN at Millimetre Wavelengths), в рамках которого ведется мониторинг на длинах волн 3 мм и 1.3 мм всех четырех параметров Стокса у выборки из 37 АЯГ (Agudo and Thum, 2022; Agudo et al., 2018). Плотность потока АЯГ в этой выборке на длине волны 3 мм составляет от 0.44 до 24 Ян. Большинство из них можно наблюдать на БТА с высоким отношением сигнал/шум.

Мониторинг сотен АЯГ, в частности блазаров, выполняется на ПАТАН-600 (например, Kovalev and Kovalev, 2006; Kovalev et al., 2020; Sotnikova et al., 2022). Среди них также могут быть источники с достаточно сильным излучением на миллиметровых волнах. Большая выборка АЯГ из каталога Planck Early Release Compact Source Catalogue с результатами наблюдений на ПАТАН-600 опубликована в работе Aatrokoski et al. (2011). Мониторинг этих объектов на ПАТАН-600 может быть дополнен наблюдениями на БТА, что значительно расширит частотный диапазон данных. Было бы полезно иметь возможность поляриметрии, как в упомянутом выше проекте POLAMI. В целом такой многочастотный поляриметрический мониторинг АЯГ позволяет выбирать и уточнять модели их строения и активности, механизмы формирования джетов и пр. В последнее время появляются свидетельства связи вспышек блазаров в радиодиапазоне с испусканием нейтрино (Plavin et al., 2023).

Одним из важных направлений исследования АЯГ является наблюдение быстрой переменности

на масштабах нескольких часов (intraday variability, или IDV). К настоящему времени предложено несколько теоретических моделей для объяснения механизма быстрой переменности, среди которых можно отметить модели аккреционного диска с неоднородностями и вспышками (Abramowicz et al., 1991), доплеровское усиление релятивистских джетов (Blandford and Königl, 1979), а также межзвездную сцинтилляцию (Rickett, 1990). Преимущество наблюдений в миллиметровом диапазоне в том, что влияние межзвездной сцинтилляции незначительно на высоких частотах и ее можно не учитывать для  $\nu > 22$  ГГц. Быстрая переменность АЯГ в миллиметровом диапазоне вызвана исключительно внутренними процессами в этих объектах (Lee et al., 2015). Например, наблюдаемые высокие значения яркостной температуры,  $T_b \simeq 10^{18}$  К, превышающие на несколько порядков предел температуры релятивистской плазмы, который ограничен значением  $T_b \lesssim 10^{12}$  К за счет охлаждения обратным комптоновским рассеянием (Kellermann and Pauliny-Toth, 1969), можно объяснить релятивистской фокусировкой джетов, сопровождаемой быстрой внутренней переменностью АЯГ.

Наблюдения быстрой переменности АЯГ могут быть организованы на небольших инструментах, как демонстрируется в работе Kim and Tripp (2013), где авторы проводили мониторинг быстрой переменности АЯГ на частоте 230 ГГц, используя антенну Сеульского национального университета (Южная Корея) диаметром 6 м.

В ходе обзоров неба на субмиллиметровых волнах было выявлено значительное число так называемых субмиллиметровых галактик, которые являются очень яркими именно в этом диапазоне длин волн (Blain et al., 2002). Их излучение генерируется нагретой пылью, а высокая светимость на этих волнах обусловлена, по-видимому, вспышкой звездообразования, которая может быть вызвана слиянием галактик. Большая часть субмиллиметровых галактик находится на красных смещениях  $z \sim 2-4$ , и пик их излучения, расположенный в собственной системе отсчета на волнах около 100 мкм, смещается, соответственно, на более длинные волны. Для БТА они будут точечными источниками. Субмиллиметровые галактики вместе с яркими ИК-галактиками образуют класс запыленных звездообразующих галактик (DSFG — Dusty Starforming galaxies; Casey et al., 2014). Исследование таких объектов представляет большой интерес, но на длине волны 3 мм их излучение слишком слабо. Более подходящим является диапазон длин волн 1.3 мм.

## 2.1. Режим наблюдения на приемном комплекте в составе оптического телескопа

Поскольку первоначальные наблюдения планируется проводить в режиме одного пиксела, необходимо проработать режим сопровождения объекта. Для задачи измерения плотности потока ярких объектов самый простой вариант — это «догоняющий» режим, когда телескоп сопровождает объект некоторое время  $t_{\text{obs}}$ , достаточное для накопления сигнала, затем останавливается, и объект уходит из центра диаграммы. Далее при неподвижном инструменте в течение интервала  $t_{\text{bg}}$  происходит измерение уровня фона. По окончании измерения фона телескоп снова наводится на объект, и цикл повторяется столько раз, сколько необходимо для накопления сигнала с заданным соотношением  $S/N$ .

Возможности этой методики можно значительно улучшить, если использовать ее в сочетании с диаграммной модуляцией, когда вторичное зеркало небольшого размера отклоняется с помощью актуатора на угол, соответствующий ширине диаграммы направленности. Частоту модуляции в этом случае необходимо оптимизировать в соответствии с характерным масштабом атмосферных турбулентностей. Так, в работе Sayers et al. (2009) показано, что шум атмосферы, возникающий за счет прохождения неоднородностей перед апертурой телескопа, становится малым на частотах больше 0.5 Гц, поэтому имеет смысл установить частоту модуляции того же порядка.

Другой возможный режим наблюдений — это сканирование. Он может использоваться как для точечных, так и для протяженных источников. При этом необходимо оптимизировать скорость сканирования с учетом характеристик атмосферных турбулентностей. На рис. 1 приведены результаты моделирования влияния флуктуаций излучения атмосферы при построении карты объекта путем сканирования площадки  $64' \times 64'$ . Характеристики спектральной плотности мощности флуктуаций взяты из работы Sayers et al. (2009). На рис. 1с представлена карта, построенная при скорости сканирования  $0.25 \text{ c}^{-1}$ , где каждый пиксел  $2' \times 2'$  наблюдается в течение  $t_{\text{int}} = 8$  с один раз за время наблюдений  $t_{\text{map}} = 2^{\text{h}}16^{\text{m}}$ . На рис. 1d показан результат построения карты при быстром сканировании,  $10' \text{ c}^{-1}$ , где каждый пиксел наблюдается  $t_{\text{int}} = 0.2$  с, но за это же время делается 40 проходов, а затем данные осредняются. Конечно, в реальности скорость сканирования будет ограничена возможностями самого инструмента. Оценки показывают, что оптимальным режимом является быстрое сканирование с многократным наблюдением площадки и последующим осреднением результирующих карт. Этот подход также

можно использовать в сочетании с диаграммной модуляцией.

Нужно отметить, что приведенные оценки влияния атмосферных флуктуаций базируются на модели для условий Мауна Кеа на частоте 143 ГГц. На площадке БТА флуктуации заведомо будут сильнее, и для их оценки нужно проводить дополнительные измерения.

## 2.2. Калибровка инструмента при наблюдениях в континууме

Для калибровки инструментов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов часто используются планеты. Спектральная плотность потока планет измерялась в процессе калибровки в экспериментах WMAP (Bennett et al., 2013) и АСТ (Louis et al., 2014). В работе Akrami et al. (2017) описана методика калибровки комплекта болометров HFI в эксперименте Planck и приведены результаты измерений спектральной плотности потока, а также оценки термодинамической температуры для Марса, Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна во время наблюдений 2009–2012 гг. Особый интерес при калибровке СИНИС-детектора для БТА представляют оценки термодинамической температуры планет в диапазоне 100–217 ГГц (таблица 4 в Akrami et al., 2017), которая варьируется от 100 К для внешних планет-гигантов до 200 К для Марса. Спектральная плотность потока зависит от телесного угла  $\Omega_p$  для данной планеты и в случае Юпитера может достигать около 7000 Ян на частоте 217 ГГц (рис. 1 в Akrami et al., 2017). Оценки, проведенные в рамках подготовки данной статьи, показывают, что на частоте 100 ГГц спектральная плотность потока для планет, видимых в конце 2025 года, изменяется от 3.5 Ян (Нептун) до почти 1700 Ян (Юпитер). В таблице 1 в качестве примера приведены значения спектральной плотности потока планет на частотах 100 и 230 ГГц, которые можно использовать для калибровки СИНИС-приемника, в ноябре 2025 г.

Другой класс используемых для калибровки в миллиметровом диапазоне объектов — это яркие внегалактические объекты, большой список которых доступен в каталоге калибровочных источников для ALMA<sup>1)</sup>. Многие из них также содержатся в каталоге PCCS2 (Second Planck Catalogue of Compact Sources, Ade et al., 2016b), где можно выбрать несколько ярких источников с потоками 5–20 Ян в диапазонах 100–217 ГГц на склонениях, доступных для наблюдений на БТА (для примера см. таблицу 2). Расчетная чувствительность приемного комплекта позволяет наблюдать и планеты,

**Таблица 1.** Условия видимости планет в диапазонах 100 и 230 ГГц, которые можно использовать для калибровки СИНИС-приемника, в ноябре 2025 года. В колонках таблицы представлены: (1) — название исследуемого объекта, (2) — видимый угловой диаметр планеты, (3) — термодинамическая температура поверхности планеты, (4) — спектральная плотность потока на 100 ГГц, (5) — спектральная плотность потока на 230 ГГц

Планета	Диаметр, arcsec	Температура, К	$S_\nu$ , Jy 100 GHz	$S_\nu$ , Jy 230 GHz
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Юпитер	41.7	172.6	1650.3	8572.5
Сатурн	18.7	145.7	283.1	1465.8
Уран	3.8	120.5	9.7	49.9
Нептун	2.3	117.4	3.6	18.4

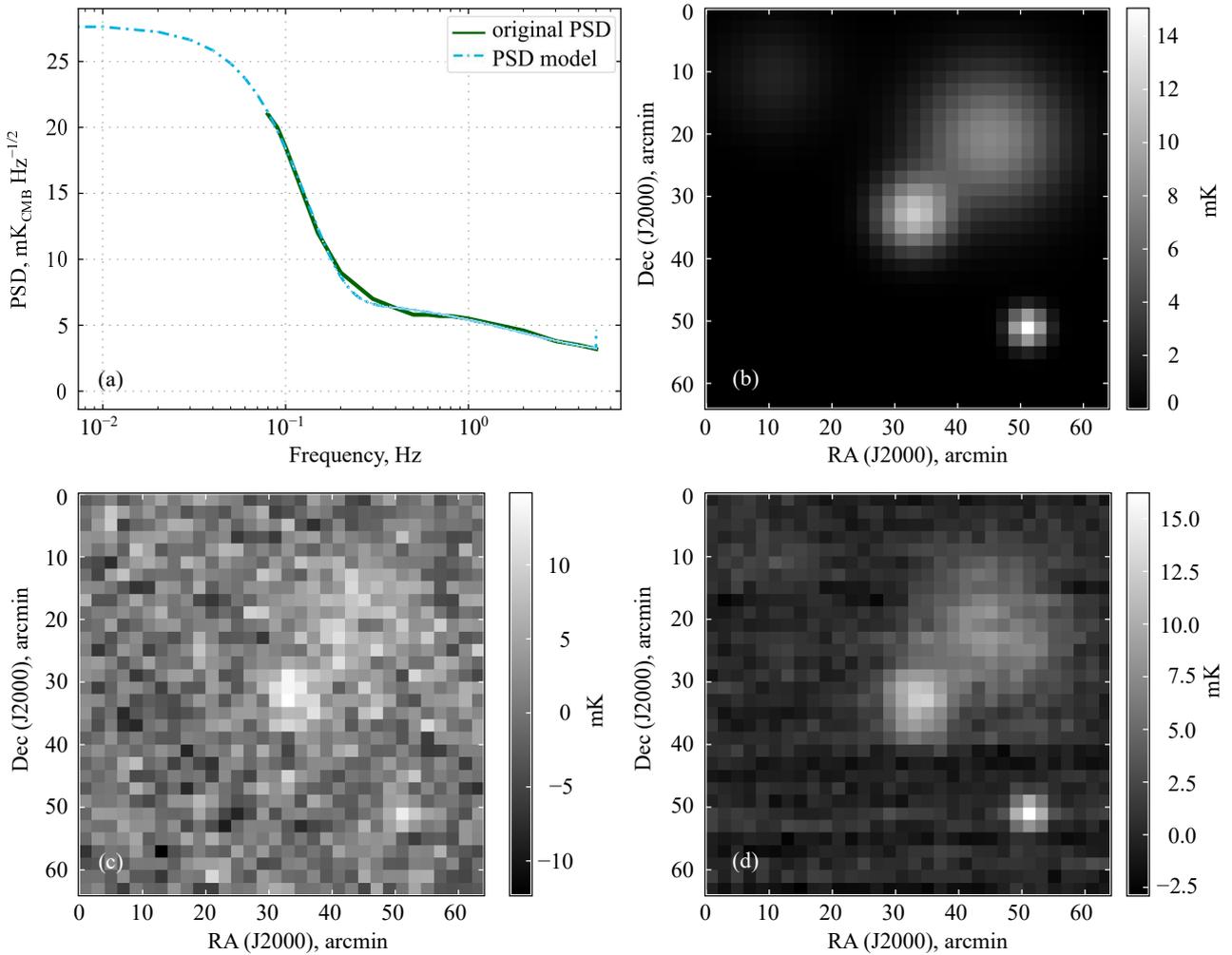
и калибровочные источники без длительного накопления.

## 3. НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

В перспективе на БТА может быть установлен приемник для наблюдений спектральных линий в миллиметровом диапазоне длин волн. Основная его задача — исследование строения, кинематики, физических характеристик и химического состава межзвездных молекулярных облаков, в частности областей звездообразования. В этой сфере остается много нерешенных вопросов, особенно в отношении механизма образования массивных звезд (с массой более  $8 M_\odot$ ), которые начинают сильно влиять на окружающую среду уже во время формирования. Изучению данного процесса уделяется большое внимание (см., например, Zinchenko, 2023, и ссылки в этой работе). Антенна малого размера может быть вполне эффективна для решения такого рода задач — это показывает, например, опыт работы 3-м радиотелескопа KOSMA (Köln Observatory für Submillimetre Astronomie; Kramer et al., 1998), установленного на горе Горнерграт в Швейцарии, а затем перенесенного в Тибет и получившего название CCOSMA (China-Cologne Observation for SubMillimeter Astronomy; Wang, 2015).

Подобная антенна может использоваться для наблюдений облаков сравнительно большого размера. Скорость обзора заданной площадки при одинаковой чувствительности по яркости пропорциональна телесному углу диаграммы направленности. Для относительно близких молекулярных облаков на расстоянии порядка 100 пк угловое

<sup>1)</sup><https://almascience.eso.org/alma-data/calibrator-catalogue>



**Рис. 1.** Влияние скорости сканирования с одинаковым общим временем наблюдения  $t_{\text{map}} = 2^{\text{h}}16^{\text{m}}$  при построении карты  $32 \times 32$  пиксела; размер пиксела  $2' \times 2'$  соответствует размеру диаграммы направленности на 3 мм. На панели (a) показан спектр мощности атмосферных флуктуаций. Панель (b) иллюстрирует модельное распределение яркости. На панели (c) продемонстрировано одно прохождение на пиксел,  $t_{\text{int}} = 8 \text{ с}$ , а на панели (d) — 40 прохождений на пиксел,  $t_{\text{int}} = 0.2 \text{ с}$ .

**Таблица 2.** Яркие объекты из каталога PCCS2-100 ГГц, которые можно использовать для тестирования СИНИС-приемников на БТА. В колонках таблицы приведены: (1) и (2) — название исследуемого объекта, (3) — тип, (4) и (5) — экваториальные координаты, (6) — спектральная плотность потока на 100 ГГц

Имя объекта PCCS2-100	Другие обозначения	Тип объекта	$\alpha_{2000}$ , hh mm ss.ss	$\delta_{2000}$ , dd mm ss.ss	$S_{\nu}$ , mJy на 100 ГГц
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
G305.10+57.06	3C 279	Блазар	12 56 11.62	-05 47 10.60	$15710 \pm 140$
G289.98+64.36	3C 273	Блазар	12 29 10.70	+02 03 02.27	$14958 \pm 27$
G086.04-38.17	3C 454.3	Блазар	22 53 46.09	+16 07 19.94	$12682 \pm 90$
G150.57-13.27	3C 84	АЯГ	03 19 45.05	+41 29 58.82	$11111 \pm 118$
G283.78+74.47	3C 274	АЯГ	12 30 48.81	+12 22 46.50	$7713 \pm 81$

разрешение БТА на длине волны 3 мм ( $2'$ ) соответствует линейному разрешению 0.06 пк, что вполне достаточно для исследования многих компонентов

их структуры. К примеру, характерная ширина волокон, наблюдаемых в подобных облаках, составляет 0.1 пк (André et al., 2014). По современным

представлениям именно такие волокна играют основную роль в процессе звездообразования. Достаточное разрешение позволит также изучать высокоскоростные биполярные истечения от молодых звездных объектов (Auge et al., 2007). Кстати, на упомянутом выше радиотелескопе KOSMA была исследована большая выборка таких истечений. Потенциальные объекты для наблюдений рассмотрены, например, в работах Nojaev and Zinchenko (2021; 2025).

Наиболее сильные спектральные линии, наблюдаемые в межзвездной среде в диапазоне длин волн 3 мм, — это линии молекул CO, CS, HCN, HCO<sup>+</sup>, N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>, SiO и их изотопологов, а также линии метанола CH<sub>3</sub>OH. Для оценки температуры газа часто используют линии молекул типа симметричного волчка: CH<sub>3</sub>CN и CH<sub>3</sub>CCH. Измерения этих спектральных линий позволяют определить основные физические характеристики облаков, исследовать их морфологию и кинематику. При этом химический состав облаков может сильно меняться в зависимости от физических условий и стадии эволюции (например, Zinchenko et al., 2009). Исследование особенностей химического состава — это отдельная задача, для решения которой используются, в частности, глубокие спектральные обзоры отдельных объектов (см., например, Kalenskii et al., 2022; Kalenskii and Mikheeva, 2023). При этом проводится длительное накопление сигнала в широкой полосе частот, что позволяет регистрировать очень слабые линии. Часть из них пока не удается идентифицировать. К настоящему времени в межзвездной и околозвездной среде обнаружено более 300 различных молекул, не считая изотопологов<sup>2)</sup> (McGuire, 2022). Поиск новых молекул, особенно связанных с биологическими процессами, является важной задачей, которая также может решаться на БТА.

В некоторых молекулярных линиях, в том числе в диапазоне длин волн 3 мм, наблюдается мазерный эффект. Это прежде всего линии SiO  $J = 2-1$  в возбужденном колебательном состоянии и некоторые линии CH<sub>3</sub>OH (например, Val'tts et al., 1995). Наблюдения мазерных линий также дают информацию о физических условиях в источниках и об их кинематике. Сильные мазеры SiO часто используются для проверки наведения антенн.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Как показано в разделах 2 и 3, научные задачи для субтерагерцовой обсерватории в составе БТА в диапазонах 3 и 1.3 мм делятся на две большие

группы: задачи для наблюдений в континууме и для спектральных наблюдений.

Задачи для некогерентного приемника (СИНИС-детектора) предполагают наблюдения в континууме. Среди них можно отметить:

- построение карт низкого разрешения протяженных источников, таких как межзвездные молекулярные и пылевые облака;
- наблюдения тормозного излучения H II-областей;
- наблюдения эффекта Сюняева—Зельдовича в скоплениях галактик в районе температурного декремента;
- измерения потоков АЯГ в миллиметровом диапазоне совместно с другими инструментами, в частности ПАТАН-600;
- наблюдения быстрой переменности АЯГ (IDV);
- наблюдения субмиллиметровых и звездообразующих галактик (DSFG).

На следующем этапе проекта с использованием когерентных приемников на основе НЕМТ или SIS могут быть поставлены следующие задачи:

- наблюдения межзвездных молекулярных облаков в линиях CO  $J = 1-0$ ,  $J = 2-1$  и других спектральных линиях;
- исследования областей звездообразования;
- поиск новых органических молекул в межзвездной среде;
- наблюдения мазерного эффекта в молекулярных линиях.

Поскольку на первом этапе предполагается использование СИНИС-детектора, наблюдения в континууме являются приоритетными на ближайшее время. Как показано выше, существует ряд небольших инструментов с апертурой, сравнимой с БТА, где такого рода задачи успешно решаются (KOSMA, ACT, SPT, антенна Сеульского университета). Кроме того, реализуются новые проекты по созданию небольших инструментов для работы в субтерагерцовом диапазоне (FYST, SO LAT). В случае БТА астроклиматические условия позволяют проводить наблюдения вплоть до диапазона 1.3 мм, что даст возможность регистрировать не только излучение нетепловой природы, например от АЯГ, но и тепловое излучение пыли в областях звездообразования.

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе обсуждаются научные задачи для субтерагерцового приемного комплекта, установленного в фокусе оптического телескопа БТА с диаметром главного зеркала 6 м. В мире существует ряд инструментов с аналогичной апертурой небольшого диаметра, 3–10 м, позволяющих проводить научные исследования с помощью как

<sup>2)</sup><https://cdms.astro.uni-koeln.de/classic/molecules>.

некогерентных приемников (болметры TES, KID, СИНИС), так и когерентных (HEMT, SIS).

Основными задачами для болометрического приемного комплекта являются наблюдения в континууме различных галактических и внегалактических объектов, таких как активные ядра галактик (включая наблюдения короткопериодической переменности АЯГ), наблюдения излучения молекулярных облаков и областей звездообразования, а также измерения эффекта Сюняева–Зельдовича в скоплениях галактик. С помощью приемного комплекта с когерентным приемником можно проводить наблюдения излучения в линиях молекулярных облаков, выполнять поиск новых органических молекул в МЗС, а также исследовать источники мазерного излучения.

В заключение отметим, что реализация проекта субтерагерцовой обсерватории в составе оптического телескопа БТА станет значительным достижением в разработке приемной аппаратуры и важным шагом к созданию специализированного инструмента для работы в миллиметровом диапазоне.

#### 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».

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-62-10013 «Разработка прототипа отечественной субтерагерцовой обсерватории в составе оптического телескопа».

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Aatrokoski et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **536**, id. A15 (2011). DOI:10.1051/0004-6361/201116466
2. M. A. Abramowicz, G. Bao, A. Lanza, and X. H. Zhang, *Astron. and Astrophys.* **245**, 454 (1991).
3. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **594**, id. A27 (2016a). DOI:10.1051/0004-6361/201525823
4. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **594**, id. A26 (2016b). DOI:10.1051/0004-6361/201526914
5. I. Agudo and C. Thum, *Galaxies* **10** (4), id. 87 (2022). DOI:10.3390/galaxies10040087
6. I. Agudo, C. Thum, S. N. Molina, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **474** (2), 1427 (2018). DOI:10.1093/mnras/stx2435
7. K. Akiyama et al. (Event Horizon Telescope Collab.), *Astrophys. J.* **930** (2), id. L12 (2022). DOI:10.3847/2041-8213/ac6674
8. K. Akiyama et al. (Event Horizon Telescope Collab.), *Astrophys. J.* **875** (1), article id. L1 (2019). DOI:10.3847/2041-8213/ab0ec7
9. K. Akiyama et al. (Event Horizon Telescope Collab.), *Astrophys. J.* **910** (1), id. L13 (2021). DOI:10.3847/2041-8213/abe4de
10. Y. Akrami et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **607**, id. A122 (2017). DOI:10.1051/0004-6361/201630311
11. P. André, J. Di Francesco, D. Ward-Thompson, et al., “*From Filamentary Networks to Dense Cores in Molecular Clouds: Toward a New Paradigm for Star Formation*,” in *Protostars and Planets VI*, Ed. by H. Beuther, R. Klessen, C. Dullemond, Th. Henning (University of Arizona Press, Tucson, 2014), pp. 27–51. DOI:10.2458/azu\_uapress\_9780816531240-ch002
12. H. G. Arce, D. Shepherd, F. Gueth, et al., “*Molecular Outflows in Low- and High-Mass Star-forming Regions*,” in *Protostars and Planets V*, Ed. by B. Reipurth, D. Jewitt, and K. Keil (University of Arizona Press, Tucson, 2007), pp. 245–260. DOI:10.48550/arXiv.astro-ph/0603071
13. C. L. Bennett, D. Larson, J. L. Weiland, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **208** (2), 20 (2013). DOI:10.1088/0067-0049/208/2/20
14. A. W. Blain, I. Smail, R. J. Ivison, et al., *Physics Reports* **369** (2), 111 (2002). DOI:10.1016/S0370-1573(02)00134-5
15. R. D. Blandford and A. Königl, *Astrophys. J.* **232**, 34 (1979). DOI:10.1086/157262
16. C. M. Casey, D. Narayanan, and A. Cooray, *Physics Reports* **541** (2), 45 (2014). DOI:10.1016/j.physrep.2014.02.009
17. R. Dünner, M. Hasselfield, T. A. Marriage, et al., *Astrophys. J.* **762** (1), article id. 10 (2013). DOI:10.1088/0004-637X/762/1/10
18. M. Hilton, C. Sifón, S. Naess, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **253** (1), article id. 3 (2021). DOI:10.3847/1538-4365/abd023
19. A. S. Hojaev and I. I. Zinchenko, *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* **48** (9), 272 (2021). DOI:10.3103/S1068335621090098
20. A. S. Hojaev and I. I. Zinchenko, *Astrophysical Bulletin* **80** (1), 140 (2025). DOI:10.1134/S1990341324601011

21. D. H. Hughes, F. P. Schloerb, I. Aretxaga, et al., *SPIE Conf. Proc.* **11445**, id. 1144522 (2020). DOI:10.1117/12.2561893
22. S. V. Kalenskii, R. I. Kaiser, P. Bergman, et al., *Astrophys. J.* **932** (1), id. 5 (2022). DOI:10.3847/1538-4357/ac63ce
23. S. V. Kalenskii and E. A. Mikheeva, *Astronomy Reports* **67** (12), 1303 (2023). DOI:10.1134/S106377292312003X
24. K. I. Kellermann and I. I. K. Pauliny-Toth, *Astrophys. J.* **155**, L71 (1969). DOI:10.1086/180305
25. J.-Y. Kim and S. Trippe, *Journal of Korean Astronomical Society* **46** (2), 65 (2013). DOI:10.5303/JKAS.2013.46.2.65
26. K. Kornoelje, L. E. Bleem, E. S. Rykoff, et al., *arXiv e-prints astro/ph:2503.17271* (2025). DOI:10.48550/arXiv.2503.17271
27. Y. A. Kovalev and Y. Y. Kovalev, *ASP Conf. Ser.* **360**, 137 (2006).
28. Y. A. Kovalev, G. V. Zhekanis, Y. Y. Kovalev, et al., in *Proc. All-Russian Conf. on Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, Nizhny Arkhyz, Russia, 2020*, Ed. by I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, and D. O. Kudryavtsev (Spec. Astrophys. Obs. Russian Acad. Sci., Nizhnij Arkhyz, 2020), pp. 355–363. DOI:10.26119/978-5-6045062-0-2\_2020\_355
29. C. Kramer, C. G. Degiacomi, U. U. Graf, et al., *SPIE Conf. Proc.* **3357**, 711–720 (1998).
30. S. Kurtz, *Proc. IAU Symp. No. 227*, Ed. by R. Cesaroni, M. Felli, E. Churchwell, and M. Walmsley (Cambridge University, Cambridge Press, 2005), pp. 111–119.
31. A. Lee, M. H. Abitbol, S. Adachi, et al., *Bulletin of the American Astronomical Society*, **51**, id. 147 (2019). DOI: 10.48550/arXiv.1907.08284
32. T. Lee, S. Trippe, J. Oh, et al., *Journal of Korean Astronomical Society* **48** (5), 313 (2015). DOI:10.5303/JKAS.2015.48.5.313
33. T. Louis, G. E. Addison, M. Hasselfield, et al., *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2014** (07), article id. 016 (2014). DOI:10.1088/1475-7516/2014/07/016
34. B. A. McGuire, *Astrophys. J. Suppl.* **259** (2), id. 30 (2022). DOI:10.3847/1538-4365/ac2a48
35. D. I. Novikov, A. G. Doroshkevich, T. I. Larchenkova, et al., *Physics Uspekhi* **68** (10), 987(2025). DOI:10.3367/UFNe.2025.08.040006
36. V. Ossenkopf and T. Henning, *Astron. and Astrophys.* **291**, 943 (1994).
37. S. C. Parshley, S. Gramke, R. Higgins, et al., *SPIE Conf. Proc.* **12182**, id. 121821J (2022).
38. A. G. Pazukhin, I. I. Zinchenko, E. A. Trofimova, and C. Henkel, *Astronomy Reports* **66** (12), 1302 (2022). DOI:10.1134/S1063772922110154
39. L. Perotto, N. Ponthieu, J. F. Macías-Pérez, et al., *Astron. and Astrophys.* **637**, id. A71 (2020). DOI:10.1051/0004-6361/201936220
40. A. V. Plavin, Y. Y. Kovalev, Y. A. Kovalev, and S. V. Troitsky, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **523** (2), 1799 (2023). DOI:10.1093/mnras/stad1467
41. B. J. Rickett, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **28**, 561 (1990). DOI:10.1146/annurev.aa.28.090190.003021
42. M. Sánchez-Portal, in *Proc. XV Scientific Meeting on Highlights of Spanish Astrophysics XI, La Laguna, Spain, 2022*, Ed. by M. Manteiga, L. Bellot, P. Benavidez, A. de Lorenzo-Cáceres, M. A. Fuente, M. J. Martínez, M. Vázquez Acosta, C. Dafontep (Sociedad Española de Astronomía, La Laguna, 2023), p. 397. DOI:10.5281/zenodo.7047921
43. J. Sayers, S. R. Golwala, P. A. R. Ade, et al., *Astrophys. J.* **708** (2), 1674 (2009). DOI:10.1088/0004-637X/708/2/1674
44. Y. V. Sotnikova, T. V. Mufakharov, M. G. Mingaliev, et al., *Astrophysical Bulletin* **77** (4), 361 (2022). DOI:10.1134/S1990341322040149
45. V. A. Stolyarov, Y. Y. Balega, M. G. Mingaliev, et al., *Astrophysical Bulletin* **79** (2), 321 (2024). DOI:10.1134/S1990341324600467
46. R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babyshkin, et al., *Astron. and Astrophys.* **656**, id. A132 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202141179
47. I. E. Val'ts, A. M. Dzura, S. V. Kalenskii, et al., *Astron. and Astrophys.* **294**, 825 (1995).
48. A. N. Vystavkin, A. G. Kovalenko, S. V. Shitov, et al., *SPIE Conf. Proc.* **7020**, 702024 (2008).
49. J.-J. Wang et al. (GLASS Teame), in *Proc 29th General Assembly of the IAU Symp. on Focus Meeting 21: Mitigating Threats of Light Pollution & Radio Frequency Interference, 2015* (Cambridge University Press, Cambridge, 2016) p. 776. DOI:10.1017/S1743921316006785
50. G. W. Wilson, S. Abi-Saad, P. Ade, et al., *SPIE Conf. Proc.* **11453**, id. 1145302 (2020). DOI:10.1117/12.2562331
51. T. L. Wilson and S. Guilloteau, *Millimeter Astronomy* (Springer, Berlin, 2018). DOI:10.1007/978-3-662-57546-8
52. I. Zinchenko, P. Caselli, and L. Pirogov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **395** (431), 2234 (2009). DOI:10.1111/j.1365-2966.2009.14687.x
53. I. I. Zinchenko, *Radiophysics and Quantum Electronics* **46** (8), 577 (2003). DOI:10.1023/B:RAQE.0000024989.12653.a0
54. I. I. Zinchenko, *Astronomical and Astrophysical Transactions* **33** (4), 355 (2023). DOI:10.48550/arXiv.2211.15586

## The BTA Optical Telescope as an Instrument for Millimeter Astronomy: Scientific Objectives

I. I. Zinchenko<sup>1,2,3</sup>, V. A. Stolyarov<sup>4,5</sup>, and M. A. Tarasov<sup>6</sup>

<sup>1</sup>A. V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Novgorod, 603950 Russia

<sup>2</sup>Lobachevsky State University of Nizhnii Novgorod, Nizhnii Novgorod, 603022 Russia

<sup>3</sup>Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

<sup>4</sup>Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

<sup>5</sup>Cavendish Laboratory, University of Cambridge, Cambridge, CB3 0HE United Kingdom

<sup>6</sup>V. A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125009 Russia

During the period 2023–2026, the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences (SAO RAS) is implementing a project to create a millimeter-wave observatory based on the BTA optical telescope. The project involves the installation of sub-terahertz receivers at the Nasmyth focus and the performance of test observations. This paper discusses the scientific objectives that can be addressed both at the initial stage of the project using bolometric receivers for continuum observations and, in the future, using receiver systems based on HEMT and SIS technologies for molecular line observations.

Keywords: *methods: observational; telescopes; radio continuum: general; radio lines: general*