

### **О некоторых подходах к реализации субтерагерцового радиотелескопа на территории Российской Федерации.**

Ю.Ю. Балега<sup>1</sup>, В.А. Столяров<sup>1</sup>, С.А.Баранов<sup>2</sup>, А.С. Савинков<sup>2</sup>, А.А. Гунбина<sup>3</sup>, И.В. Леснов<sup>3</sup>, А.С. Марухно<sup>1,3</sup>, К.В. Минеев<sup>3</sup>, В.М. Алешков<sup>4</sup>, А.В. Медведев<sup>4</sup>, В.П. Кошелец<sup>6</sup>, М.А.Тарасов<sup>6</sup>, А.В. Худченко<sup>5,6</sup>, Ростокин И.Н<sup>7</sup> и В.Ф. Вдовин<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Карачаево-Черкесия, Нижний Архыз, E-mail: [balega@sao.ru](mailto:balega@sao.ru)

<sup>2</sup>Муромский машиностроительный завод, Карачаровское ш., 5Б, Муром, Владимирская обл., 602265

<sup>3</sup>Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46. E-mail: [vdovin@ipfran.ru](mailto:vdovin@ipfran.ru)

<sup>4</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126А.

<sup>5</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Ленинский пр., 53.

<sup>6</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва, ул. Моховая, 11

<sup>7</sup>Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых», 602264, г. Муром, Владимирской обл., ул. Орловская 23.

*В докладе представлены некоторые подходы к решению одной из актуальных радиофизических задач создания обсерватории субтерагерцового диапазона частот. Рассмотрены фундаментальные и технические ограничения решения этой задачи и проанализированы исходные данные к формированию технического задания на проект, в том числе по возможному месту размещения, атмосферным и иным характеристикам, а также путей реализации технических проблем, связанных с созданием телескопа: зеркало антенны, антенно-поворотного механизма, электроники, включая высокочувствительные криоэлектронные и сверхпроводниковые приемные системы.*

**Ключевые слова:** антенны, терагерцовые волны, радиотелескопы, астроклимат, радиоастрономия, распространение волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазона в атмосфере, криоэлектронные и сверхпроводниковые приемные системы

### **Some approaches to the development of a subterahertz radio telescope on the territory of the Russian Federation.**

Yu.Yu. Balega<sup>1</sup>, V.A. Stolyarov<sup>1</sup>, S.A. Baranov<sup>2</sup>, A.S. Savinkov<sup>2</sup>, A.A. Gunbina<sup>3</sup>, I.V. Lesnov<sup>3</sup>, A.S. Marukhno<sup>1,3</sup>, K.V. Mineev<sup>3</sup>, V.M. Aleshkov<sup>4</sup>, A.V. Medvedev<sup>4</sup>, V.P. Koshelets<sup>6</sup>, M.A. Tarasov<sup>6</sup>, A.V. Khudchenko<sup>5,6</sup> I.N. Rostokin<sup>7</sup> and V.F. Vdovin<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Karachay-Cherkessia, Nizhny Arkhyz, E-mail: [balega@sao.ru](mailto:balega@sao.ru)

<sup>2</sup> Murom Machine-Building Plant, Karacharovskoe sh., 5B, Murom, Vladimir region, 602265

<sup>3</sup> A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics named after RAS, Nizhny Novgorod, st. Ulyanova, 46. E-mail: [vdovin@ipfran.ru](mailto:vdovin@ipfran.ru)

<sup>4</sup> Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, 664033, Irkutsk, st. Lermontova, 126A.

<sup>5</sup> P.N. Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Lenin Ave., 53.

<sup>6</sup> V.A.Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Moscow, Mokhovaya st., 11

<sup>7</sup> Murom Institute (branch) of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "A.G. and N.G. Stoletovs Vladimir State University ", 602264, Murom, 23, Orlovskaya st.

The report presents some approaches to solving one of the actual radiophysical problems of development an observatory in the subterahertz frequency range. The fundamental and technical limitations of solving this problem are considered and the initial data for the formation of technical specifications for the project are analyzed, including the possible location, atmospheric and other characteristics of possible locations, as well as ways to implement technical problems associated with the development of a telescope: antenna mirror, antenna-rotating mechanism, electronics, including highly sensitive cryoelectronic and superconducting receiving systems.

**Key words:** antennas, terahertz waves, radio telescopes, astroclimate, radio astronomy, propagation of millimeter and submillimeter waves in the atmosphere, cryoelectronic and superconducting receiving systems.

## Введение

В последние десятилетия освоение терагерцового диапазона стало приоритетной задачей как развития фундаментальной науки [1], так и обширного перечня прикладных исследований. Главным фундаментальным ограничением использования обозначенного диапазона является существенное атмосферное поглощение волн этого диапазона, причем оно столь существенно, что о наиболее перспективных приложениях: коммуникации, локации и т.п. можно говорить лишь в нижней его части диапазона, именуемого субтерагерцовым (субТГц), лежащим от 0.1 до 1.0 ТГц, что соответствует длинам волн 3 мм – 300 мкм (рис. 1). Более высокие частоты ТГц диапазона (свыше 1 ТГц) испытывают на поверхности земли (на уровне моря) ослабление в десятки дБ на км и в данной работе рассматриваться не будут.

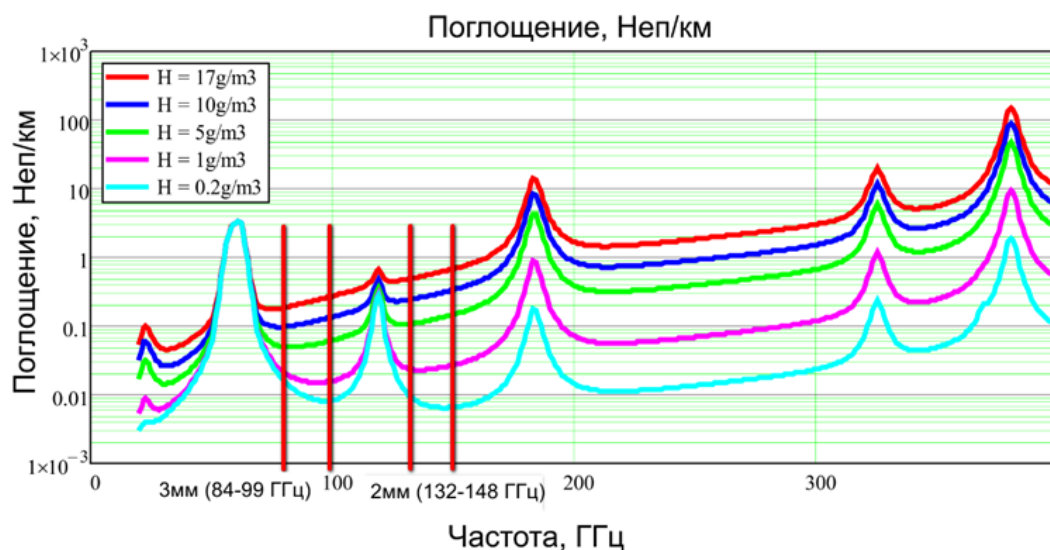


Рис. 1. Атмосферное поглощение субТГц волн [2]

Их наземное применение на сегодня представлены лишь очень высокогорными обсерваториями в местах с экстремально сухим климатом, например, обсерватория АЛМА (ALMA) в чилийской пустыне Атакама [3], а также подобные места в Тибете или на Памире. Российская Федерация не имеет на своей территории подобных мест, поэтому авторы ограничивают диапазон рассмотрения субТГц диапазоном частот. Хотя и для работы в его верхней части российские возможности очень ограничены.

Наряду с фундаментальным ограничением – высоким атмосферным поглощением, есть и значимые технические ограничения – слабая техническая освоенность диапазона

практическое отсутствие промышленных генераторов, усилителей, средств измерения, эталонов и антенных систем.

Нужно признать, что за последние годы в мире произошел ощутимый рывок в развитии технологий указанных компонентов. В том числе на сегодня в мире успешно работают несколько десятков крупных (свыше 10 м диаметром) антенн субТГц волн. В России их нет совсем. Хотя планы, уходящие корнями в 80-е годы прошлого века, существуют. В первую очередь это обсерватория Суффа [4] в Узбекистане и космический телескоп Миллиметрон [5], запланированный к запуску в начале следующего десятилетия. Научное сообщество неоднократно анонсировало разнообразные планы развития субТГц антенн и как программу миллиметровой астрономии, и как субмиллиметровую. Но реальных проектов, кроме двух упомянутых выше пока нет. В этом году журнал Космические исследования анонсировал еще один проект – лунная субТГц обсерватория [6]. Но и это не на российской земле и не скоро.

В настоящей работе представлен проект, который его участники на данном этапе взялись реализовывать на инициативной основе. Стороны обладают комплексом уникальных возможностей, заделом и ресурсом, которые позволяют буквально за два года выполнить технический проект, испытать прототип и приступить при благоприятной обстановке к его реализации на одной или нескольких площадках.

### **1. Исследования субтерагерцового астроклимата**

Задача создания на российской территории телескопа, работающего в субТГц диапазоне частот, породила с 2011 года определенный бум исследований атмосферного распространения электромагнитного излучения этого диапазона, а выход в свет блистательных результатов проекта Телескоп горизонта событий (ТГС) [7], обнаружившего тень черной дыры, в своих планах развития, сделала этот бум более концентрированным и определенным.

ТГС сделал свое открытие методом наблюдения в режиме радиоинтерферометра со сверхдлинной базой (РСДБ) десятка наземных радиотелескопов, размещенных по всей территории Земли. Наблюдение проводилось в окне прозрачности атмосферы на длине волны ~1.3 мм. Новые планы проекта ТГС наряду с желательностью продвижения в более короткие волны (в окно прозрачности атмосферы 0.8 мм), предполагало и развитие пространственной сети этого крупномасштабного (в размерах земного шара) инструмента. Приводимая авторами концепции карта [7] земной поверхности демонстрировала и главный дефект созданной сети: практическое отсутствие работающих антенн на территории Северной Евразии. Такого рода пробелы в сети РСДБ делают инструмент неэффективным. Покрытие U-V плоскости, как основной критерий эффективности сети РСДБ резко падает, пропадает связность наблюдений между отдельными телескопами и ограничивает одновременное наблюдение лишь на близких к горизонту углах. Телескопы, расположенные на точках – антиподах на земной поверхности вообще не могут одновременно наблюдать один объект, а очень удаленные лишь на пригоризонтных трассах. Это вынуждает собирать сигнал, прошедший не по кратчайшему пути в активно его поглощающей атмосфере, а многократно более длинному, что для субТГц волн, имеющих удельное поглощение на частотах 200-300 ГГц до десятка дБ, драматически ограничивает чувствительность приемной системы за счет вклада шумов атмосферы, что не позволяет наблюдать предельно слабые астрономические объекты. Статья [7] демонстрирует наиболее простой, но и наименее точный метод оценки атмосферного поглощения на основе данных дистанционного зондирования земли. Квадрат обзора при этом равен примерно 20 км и в измерении интегрируется как вклад вершин, так и вклад долин. Так плато Суффа обозначено 2000 м вместо 2300 м, и его перспективы оказались заниженными. Только прямые измерения

поглощения на требуемой волне и в нужном месте дают точное значение, и длительные циклы (не менее года) позволяет судить об общей перспективности площадки.

Текущий статус ТГС в спектре электромагнитного излучения (1.3 мм) и перспективный план (0.8 мм) практически формирует техническое задание (ТЗ) на будущий субТГц телескоп в части рабочего диапазона по частоте. А для исследователей микроволнового астроклимата – задает участок спектра электромагнитного излучения наибольшего интереса.

За последние 12 лет исследователи изучили различными методами [8-10] все наиболее перспективные с точки зрения ТГц площадки. Нет необходимости приводить здесь анализ полученных результатов, но хотелось бы отметить наиболее перспективные: гора Муус-Хая (~2000 м) вблизи северного полюса холода, ряд удачных площадок в центральной части горного Дагестана (2000-3500 м) и буквально недавно представленные площадки в Саянах и на Алтае. Среди последних особое внимание следует уделить площадкам ИСЗФ СО РАН, которые были исследованы за последние полгода (первые результаты направлены в Доклады Академии наук и будут опубликованы вскоре). Две из трех расположены на высоте 2000 – 3000 м и могут быть использованы для субТГц наблюдений, но требуется продолжение исследований астроклимата. Третья площадка, в урочище Бадары, Тункинского района Республики Бурятия, на которой расположена Радиоастрофизическая обсерватория (РАО) располагается невысоко над уровнем моря и не пригодна для субТГц исследований, но дала наглядный пример успешной реализации возможностей отечественных разработчиков антенной и приемной техники.

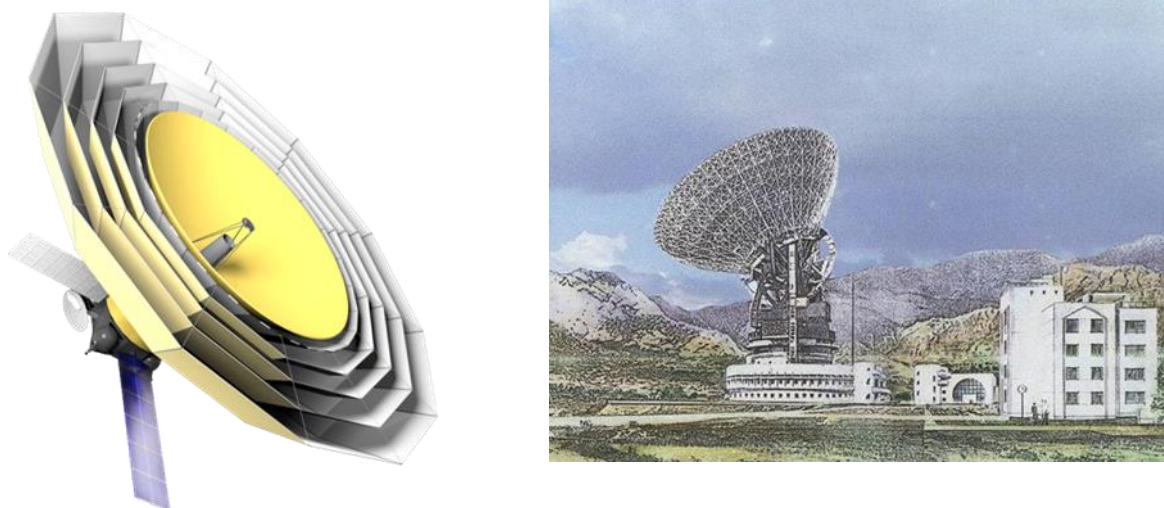
## **2. Развитие аппаратуры и методов субТГц астрономии**

Развитию аппаратуры и методов субТГц астрономии в последние годы уделяют обширное внимание не только исследователи академических институтов и наиболее продвинутые ВУЗы (МГУ, МПГУ, МИСИС, ИГТУ и др.), но и промышленность. Уход с рынка западных и иных недружественных поставщиков микроволновой электроники и криогеники дали серьезный импульс развитию этих направлений в России. К настоящему моменту имеется полный комплект необходимых для создания высокочувствительной приемной аппаратуры, работающей в окнах прозрачности 1.3 и 0.8 мм [4,11-14]. Криогенные системы экстремально глубокого холода (вплоть до субкельвинного уровня температур), необходимые для эффективной работы криоэлектронных и сверхпроводниковых приемников субТГц диапазона, также разрабатываются отечественными разработчиками. Оригинальное, но не системное решение реализуется в настоящее время в рамках проекта РНФ23-62-10013 "Разработка прототипа отечественной субтерагерцовой обсерватории в составе оптического телескопа". Качество поверхности оптического телескопа БТА на два порядка превосходят требования к среднеквадратическому отклонению (СКО) субТГц антенны. Сомнения имели место лишь в части толщины скин-слоя алюминиевого покрытия оптического рефлектора. Она также примерно на два порядка меньше, чем требуется для эффективного отражения металлом субТГц волн. Однако, исследования показали, что совокупность тонкого алюминиевого покрытия и отражение на границе стекло – воздух интегрально обеспечивает эффективное отражение до 98% мощности субТГц сигнала от оптического зеркала. В связи с чем второй год реализуемый проект позволит отработать все необходимые методы и аппаратуру для будущей отечественной субТГц обсерватории. Реально остается лишь одна проблема при создании эффективного инструмента для субТГц диапазона, и она состоит в антенне должного качества и размера.

### 3. Анализ возможных решений создания субТГц антенны

Еще в советские годы основным и понятным способом решения данной проблемы было просто ее разработка и строительство. Необходимые технологии и компетенции к середине 80-х годов в стране имелись, и не возникало вопроса «как?»

По сути оба реализуемых в том или ином виде проекта антенн такого рода для субТГц волн не что иное, как остатки тех самых разработок 80-х годов. Эти системы представлена на рис. 2.



**Рис. 2. Космическая антенна Миллиметрон и РТ-70 радиобсерватории Суффа**

Однако, в 90-е годы эти проекты были практически заморожены, а в нулевые вообще восторжествовал подход: «зачем все делать у себя, все купим». И действительно в 90-е и в нулевые мировые конкуренты активно продолжали развивать субТГц антенностроение. На Южном полюсе в Антарктиде появился 10 метровый телескоп, в пустыне Атакама – свыше полусотни 12 метровых зеркал, от европейских производителей с 12-18 метровыми зеркалами (Vertex, Германия, ЕИЕ, Италия и др.) Их начали подпирать японцы, корейцы и китайцы. И если до начала 2022 г. европейцы предлагали поставки субТГц антенн диаметром 13 м за 5-8 млн Евро, то сейчас этих предложений нет, на смену пришли китайские, но за 10 млн. Отчетливо понимаем, что астрономия лишь одно и не самое важное для народного хозяйства приложение субТГц диапазона, но такие антенны дадут мощный импульс развития отечественных телекоммуникаций как космической, так и наземной мобильной связи 6G и 7G поколений. Не будем забывать про важнейшие локационные приложения. В частности, в назначении антенны РТ-70 обсерватории Суффа прямо были записаны радиолокационные задачи. Сейчас они интерпретируются как решение угрожающей парализовать всю космическую отрасль проблемы космического мусора, но нет секрета в том, что военные, разведывательные и иные задачи могут успешно решаться подобными инструментами. Текущий момент, давший мощный импульс к развороту на развитие отечественных технологий, дает уникальный шанс в короткие сроки реализовать проект создания отечественной антенны субТГц диапазона.

### 4. Наземная антенна субТГц диапазона на окна прозрачности 1.3 и 0.8 мм: исходные данные и техническое задание

Наиболее простым и проработанным на сегодня вариантом решения представляется адаптация технического проекта космической обсерватории Миллиметрон с зеркалом 10

м для наземной антенны. До недавнего времени позиционировалась разработка зеркала диаметром 12 метров, но из-за задержки создания адекватных средств выведения на орбиту антенна была уменьшена до нынешних 10 м, хотя очевидно, что вернуться к 12 м не составляет проблемы. Также очевидно, что все равно, согласно регламенту разработки космической техники, для наземной отработки будут неизбежно создаваться несколько экземпляров антенны, которые можно было бы использовать для решения текущей проблемы отсутствия наземных антенн. Однако наряду с очевидными техническими трудностями, к примеру, состоящими в том, что антенна Миллиметра должна работать в отсутствие силы тяжести, есть и обширные организационные и межведомственные проблемы.

В связи с чем в данной работе предлагается в чём-то чуть менее проработанный, но как представляется авторам, надежный подход к решению проблемы. Сама антенна представляет собой совокупность трех основных компонент: опорно-поворотная система, само зеркало и электроника.

Здесь, также, как и во всех иных разработках, авторы предлагают отталкиваться от прототипов. В части набора требований, составляющих исходные данные к проекту технического задания трудностей практически нет. В качестве стартового ключевого параметра принимаем диаметр антенны в 13 метров. На данном этапе допуская как снижение до 12 (прототип «большого Миллиметра»), так и увеличение до 15 – 18 метров (прототипы, предлагавшиеся различными партнерами с запада и востока. Второй ключевой параметр исходных данных к ТЗ – рабочий диапазон частот.

Наряду с определенным интересом в новых наземных инструментах для двух первых субТГц окон прозрачности атмосферы (3 и 2 мм), и отсутствием перспективных мест со сколько-нибудь длительными (>10% времени) периодами возможности для эффективной работы в окнах прозрачности 0.7 мм (420 ГГц) и короче однозначно задаем верхний рабочий диапазон антенны двумя окнами прозрачности 1.3 и 0.8 мм. Понятно, что на более длинных волнах (в т.ч. в двух первых субТГц окнах на 2 и 3 мм) такая антенна, подобно оптическому рефлектору БТА на субТГц, работать будет, и с большим запасом по качеству поверхности и наведения. Следовательно, верхняя частота будет составлять 380 – 390 ГГц или 0.8 мм.

Это условие ведет к требованию СКО поверхности не хуже 40 мкм. Столь же очевидно, что это не просто шероховатость панелей зеркала, а их суммарное отклонение от формы параболы (выбираем проверенную схему Кассегрена в качестве оптической схемы антенны). Достижение и поддержание в процессе работы такого совершенства поверхности невозможно без адаптивной системы контроля поверхности и термостабилизации, иначе вариации весовой нагрузки во время движения телескопа, а также ветровые нагрузки и тепловые деформации от Солнца приведут к куда большим чем заявленные выше отклонениям поверхности от заданной формы. Зеркало диаметром 15 метров в субТГц диапазоне будет иметь ширину диаграммы направленности менее угловой минуты, что приводит к соответствующим требованиям к приводам и системе контроля антенны в целом.

В этой части в качестве отечественного прототипа снова вернемся к инструментам ИСЗФ СО РАН. В обсерватории Бадары ИСЗФ СО РАН собран и работает инструмент – многоволновый радиогелиограф (рис. 3), состоящий из более чем 500 зеркальных антенн дециметрового и сантиметрового диапазона. Разумеется, требования к антеннам субТГц диапазона на два порядка выше, чем при создании этого инструмента, но полный набор требуемых технологий командой разработчиков освоен. Поэтому можно потенциально рассматривать Муромский механический завод как разработчика антенно-поворотного устройства, возможно включая и саму антенну. В радиогелиографе сами антенны были изготовлены на одном из предприятий холдинга ИСС им. Академика Решетнева НПО

ПМ Развитие. И наконец, не последнее дело в антенне - электроника. Здесь систему полутысячи антенн обеспечило АО НПФ Микран. И по сути это почти готовое решение для проекта, исключая высокочувствительные сверхпроводниковые приемные системы субТГц диапазона, отсутствующие в линейке возможностей Микрана, но хорошо освоенные кооперацией ИРЭ РАН, ИПФ РАН, САО РАН, ИФП РАН и ФИАН.

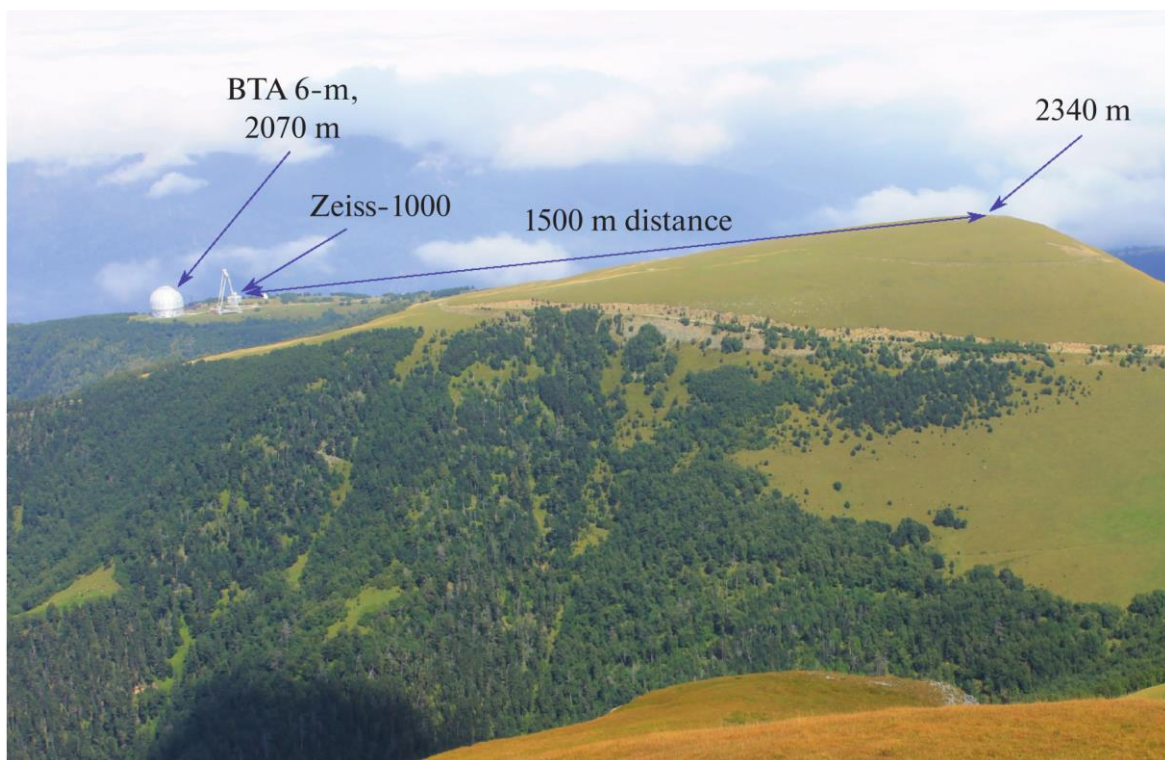


**Рис. 3. Антенный комплекс радиогелиографа ИСЗФ СО РАН**

Важным аспектом проекта является оценка его стоимости. Поскольку цены прототипов обозначены в евро (долларах) то попытаемся в этих ценах выполнить предварительную оценку. И стоимость коммерческого инструмента, предлагавшегося поставщиками (без приемника) составляла 5-10 млн. евро, то несложно спрогнозировать, что разработка встанет примерно в такую же цену. Цена 2-4 гетеродинных и детекторных приемников на оба диапазона встанет в 2-3 млн., включая криогенику и вакуумное обеспечение, а также комплект мазерных стандартов времени и частоты для обеспечения РСДБ режима. Но обычно такой проект подразумевает сопоставимую по стоимости с инструментом цену инфраструктурных вложений. Поэтому выбор места диктуется и этой экономической частью оценок.

В этом плане неплохие площадки Дагестана имеют заметный дефект: даже хорошо освоенный маршрут около г. Маяк (Гуниб) потребует значительных капитальных вложений в освоение площадки: дорога и энергетика могут встать в соизмеримую с инструментом цену. Чуть более перспективные площадки в высокогорной части Дагестана (например, Чираг), потребуют еще больших капитальных вложений. С другой стороны, есть неплохая площадка на высоте чуть выше площадки телескопа БТА (2340 м, холм Семиродники, рис. 4), тут не потребуются значимых капвложений. Квалифицированный персонал САО РАН имеется, но астроклимат окрестностей САО заметно уступает площадкам в Дагестане. И если на волне 1.3 мм возможны довольно продолжительные циклы наблюдений в зимний период с высокой прозрачностью атмосферы, то уровень поглощения водяными парами на волне 0.8 мм ограничат наблюдения буквально несколькими днями в году.

Восточно-Сибирский кластер по предварительным данным исследований астроклимата также перспективен, но также требует более детального исследования,



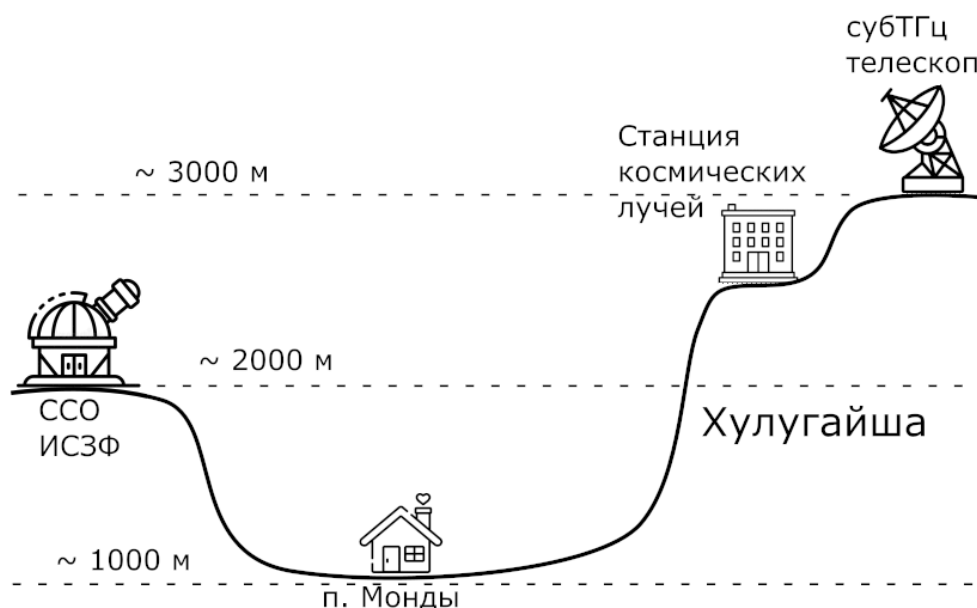
**Рис. 4. Холм Семиродники (2340 м) рядом с ВПН САО РАН**

как и площадка над БТА. И если площадка в районе села Ташанта (Алтай), лежит практически на дороге федерального значения на Чуйском тракте и обеспечена энергетикой, то прямых измерений поглощения на волнах 1.3 и 0.8 мм пока там не проводилось вообще.

Несколько более детально изучены и освоены площадки в окрестностях п. Монды (Бурятия) ИСЗФ СО РАН. Схематично место проведения майских экспериментов 2024 г. изображено на рис. 5. Тункинская долина с рекой Иркут в этом месте уже довольно узкая и зажата двумя грядами высот. Слева плато на уровне 2000 м, на котором расположена Саянская солнечная обсерватория ИСЗФ СО РАН, выбранная в качестве базы для проживания экспедиции, по другую сторону долины горы заметно выше, в т.ч. и высочайшая вершина Восточных Саян г. Мунку Сардык (~3500 м), и куда более доступная г. Хулугайша (3015 м), причем на площадке чуть ниже (~200 м по высоте) плоской вершины горы размещена станция космических лучей, где есть электроснабжение, связь и домик для проживания. Разумеется, для нового субТГц радиотелескопа желательно использовать верхнее плато размером примерно 700\*200 м.

Исследования астроклимата в течение зимнего полугодия (радиометр был поставлен в ноябре 2023 г. на площадке станции космических лучей) показали, что поглощение на этой площадке вполне удовлетворительное и для 1.3 и для 0.8 мм. В мае дополнив измерительный комплекс бензогенератором участники поднялись уже на вершину 3015 м и увидели заметное снижение поглощения по сравнению с нижней площадкой. После чего прибор был снят и доставлен на базовую площадку на ССО ИСЗФ (высота 2000 м) и в течение полутора суток вел мониторинг атмосферного поглощения. Важный вывод, хотя и предварительный, был сделан из сопоставления поглощения на Хулугайше и на площадке ССО, но для выбора места потребуются еще много циклов длительных измерений. Площадка ССО оказалась всего на 10-15% хуже пика горы. Конечно, порой и это важно, тем не менее, не будем забывать, что это оценка приведена к зениту, если наблюдать объекты ближе к горизонту эти проценты удваиваются и утраиваются.





**Рис. 5. Схематическое изображение площадок для выбора места субТГц обсерватории в п. Монды, Бурятия.**

Подъем на вершину Хулугайши показал, что дороги туда по факту нет. Есть туристическая тропа от базовой станции (см. рис. 6), и только пешие или конные могут подняться и поднять оборудование. Установка антенны 15 метров потребует строительства дороги, и она может встать в запредельную, сопоставимую или даже превышающую цену инструмента стоимость. А дорога на ССО уже построена и там также есть свободное место, инфраструктура, энергетика и квалифицированный персонал. Возможно стоит пожертвовать этими 10-15% прозрачности и установить первое зеркало именно тут. Вообще проект подразумевает отработку первого прототипа, а затем создание серии субТГц антенн для РСДБ сети. Будет развитие – возможно и получение ресурсов для инфраструктуры для второго – третьего телескопа, но первый, вероятно, лучше разместить на более легко осваиваемой площадке.



**Рис. 6. Команда участников экспедиции на пик Хулугайша, 20 мая 2024 г.**

## **Заключение**

Представленные выше соображения и аргументы, обосновывающие предлагаемый подход к созданию телескопа субТГц диапазона, позволят решить проблему отсутствия подобных инструментов в России в кратчайшие сроки (2-3 года). При этом будет создан необходимый научно-технологический задел важнейшего для развития телекоммуникаций и радиолокации направления – освоение терагерцового диапазона. Выводы, представленные в докладе, носят весьма предварительный характер, и объединение участников уже имеет договоренности продолжить исследования и одновременно начать разработку инструмента. Команда участников (рис. 5) испытывает оптимизм в успехе этого дела.

Направление микроволновых радиометрических исследований атмосферы в Муромском институте имеет исторические и методологические основы, базирующиеся на долговременном опыте проектных разработок и натурных измерений. Современный этап развития направления микроволновых исследований характеризуется реализацией современных принципов приема и обработки сигналов и оригинальных подходов к усовершенствованию СВЧ радиометрических систем, обусловленных принципом их функционирования - приема широкополосного шумового сигнала с необходимостью реализации его пространственной селекции. Реализация в многодиапазонной микроволновой радиометрической системе компенсации влияния фоновых шумов позволила перейти к наклонному зондированию приземного слоя атмосферы при больших углах визирования и решить аппаратные задачи дистанционного зондирования при прогнозировании опасных атмосферных явлений [15].

Исследование поддержано из гранта Российского научного фонда № 23-79-00006.

## **Литература**

1. Распоряжение Правительства РФ от 31 декабря 2020 г. № 3684-р. Программа фундаментальных научных исследований на долгосрочный период 2021-2030.
2. Liebe H.J. Atmospheric 60-GHz oxygen spectrum: New laboratory measurements and line parameters / Liebe H.J., Rosenkranz P.W., Hufford G.A. // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* – 1992. – Т. 48 – № 5–6 – С.629–643.
3. <https://www.almaobservatory.org/en/home/>
4. 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.
5. Смирнов А.В., Барышев А.М., Де Бернардис П., В и др. Текущий этап разработки приемного комплекса космической обсерватории Миллиметрон. // *Известия вузов. Радиофизика* – 2011. – Т. 54 – № 8–9 – С.Том LIV, № 8–9.
6. S.Likhachev, A.Rudnitsky et al. Subterahertz Astronomy in the Russian Federation: Prospects and Directions. — *Cosmic Research*, 2024, vol. 62, № 1, P. 117-131 DOI 10.1134/s0010952523700764
7. Doeleman, S.S.; Barrett, J.; Blackburn, L.; et al. Reference Array and Design Consideration for the next-generation Event Horizon Telescope. arXiv 2023, arXiv:2306.08787
8. Zinchenko I.I., Lapinov A.V., Vdovin V.F. et al. Measurements and Evaluations of the Atmospheric Transparency at Short Millimeter Wavelengths at Candidate Sites for Millimeter- and Sub-Millimeter-Wave Telescopes. — *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, P. 11706 DOI 10.3390/app132111706

9. Vdovin V.F., Bubnov G.M., Zemlyanukha et al. Direct Measurements of Atmospheric Absorption of Subterahertz Waves in the Northern Caucasus. — *Doklady Physics*, 2022, vol. 67, № 1, P. 1-4 DOI 10.1134/s1028335822010013
10. Balega Yu., Glyavin M., Denisov G. et al. Atmospheric Propagation Studies and Development of New Instrumentation for Astronomy, Radar, and Telecommunication Applications in the Subterahertz Frequency Range. — *Applied Science*, 2022, v. 12, p.1
11. Столяров В.А., Балега Ю.Ю., Мингалиев М.Г. и др. Перспективы развития миллиметровой астрономии в CAO РАН. — *Астрофизический бюллетень*, 2024, том 79, № 2, С. 331-349
12. Balega Yu, et al. Microwave Receiving System Based on Cryogenic Sensors for the Optical Big Telescope Alt-Azimuth. — *Sensors*, 2024, vol. 24, P. 359.
13. Тарасов М.А., Гунбина А.А., Лемзяков и др. Матрицы детекторов сверхпроводник-изолятор-нормальный металл-изолятор-сверхпроводник для терагерцовой радиоастрономии. — *Краткие сообщения по физике ФИАН*, 2021, том 48, № 9, С. 10-18
14. Балега Ю.Ю., Барышев А.М., Бубнов Г.М. и др. Сверхпроводниковые приемники для космических, аэростатных и наземных субтерагерцовых радиотелескопов. — *Известия вузов. Радиофизика*, 2020, том 63, № 7, С. 533-556
15. Шукин Г.Г., Федосеева Е.В., Булкин В.В., Ростокин И.Н. Микроволновая радиометрическая система в задачах прогнозирования опасных атмосферных явлений — *Радиотехника и электроника*, 2023, том 68, № 6, с. 598–607.