

УДК 537.877

## ПРЯМЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН НА СЕВЕРНОМ КАВКАЗЕ

© 2022 г. Академик РАН Ю. Ю. Балега<sup>1,\*</sup>, Д. К.-С. Батаев<sup>2</sup>, Г. М. Бубнов<sup>3</sup>, В. Ф. Вдовин<sup>3,4,\*\*</sup>, П. М. Землянуха<sup>3</sup>, А. Б. Лолаев<sup>5</sup>, И. В. Леснов<sup>3</sup>, А. С. Марухно<sup>1,3</sup>, Н. А. Марухно<sup>3,6</sup>, член-корреспондент РАН А. К. Муртазаев<sup>7</sup>, В. С. Хайкин<sup>1</sup>, А. В. Худченко<sup>4</sup>

Поступило 30.11.2021 г.

После доработки 08.12.2021 г.

Принято к публикации 08.12.2021 г.

В сообщении кратко представлены первые результаты прямого натурного измерения атмосферного поглощения электромагнитных волн субтерагерцового диапазона частот — 0.1–1 ТГц, выполненных с целью подбора оптимального с точки зрения микроволнового астроклимата места для создания обсерватории, способной стать элементом радиоинтерферометра строящейся обсерватории Суффа и в перспективе войти в коллаборацию Телескопа горизонта событий (ТГС). ТГС, получивший не так давно изображение тени черной дыры, на сегодня состоит из десятка антенн, расположенных по всему земному шару, и не имеет пока элементов в своей сети в северной Евразии. Выполненные исследования могут быть полезны не только для задач радиоастрономии, но и для космических коммуникаций, радиолокации Луны, астероидов и обнаружения объектов космического мусора. Первые результаты выполненных прямых измерений поглощения субтерагерцовых волн на выбранных площадках подтвердили исходную гипотезу экспедиции. Эта гипотеза была сформулирована на основе анализа метеоданных, а также спутниковых данных о поглощении атмосферы в других диапазонах: оптике и низкочастотном радиодиапазоне. Предполагалась большая перспективность работы в субтерагерцовом диапазоне частот в восточной части северного Кавказа по сравнению с западным Кавказом. Запад привлекателен тем, что сегодня там уже работает целый ряд обсерваторий, и установка еще одной антенны была бы реализована много проще с точки зрения необходимой инфраструктуры и квалифицированных кадров. Гипотеза о преимуществе востока получила убедительное подтверждение сопоставлением поглощения в диапазонах 2 и 3 мм на ранее обследованных площадках западного Кавказа (пик Терскол, гора Пастухова, площадки КГО, БТА, РАТАН-600 и др.) с изученными в рамках прошедшей в 2021 г. экспедиции площадками на востоке региона — горах Маяк (Гуниб), Столовая и Шалбуздаг. Даже измерения на самой высокой вершине не только западного Кавказа, но и Европы — горе Эльбрус, выполненные в рамках представляемой экспедиции, дали результаты хуже восточных площадок в Дагестане и Северной Осетии, подтвердив бесполезность дальнейших поисков места для эффективного субтерагерцового инструмента в западной части северного Кавказа.

**Ключевые слова:** миллиметровые и субмиллиметровые волны, атмосферное поглощение, радиоастрономия, телекоммуникации, астроклимат, распространение радиоволн

DOI: 10.31857/S2686740022010023

<sup>1</sup> Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская республика, Россия

<sup>2</sup> Комплексный Научно-исследовательский институт Российской академии наук, Грозный, Россия

<sup>3</sup> Институт прикладной физики Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия

<sup>4</sup> Астрокосмический центр физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>5</sup> Владикавказский научный центр Российской академии наук, Владикавказ, Россия

<sup>6</sup> Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

<sup>7</sup> Дагестанский научный центр Российской академии наук, Махачкала, Россия

\*E-mail: balega@sao.ru

\*\*E-mail: vdovin@ipfran.ru

Субтерагерцовый (субТГц) диапазон частот — 0.1–1 ТГц до недавнего времени был технологически очень слабо освоен. В последние годы он является сферой активного развития технологий создания приемников [1], передатчиков [2] и антенн [3–5] самого широкого назначения. Среди ключевых приложений этих технологий наиболее амбициозные по набору характеристик требования предъявляют радиоастрономия, радиолокация и космические коммуникации. Одни и те же антенны порой могут использоваться для всех трех указанных приложений, например, РТ-70 в Евпатории, 64 м антенны в Калязине и Медвежьих Озерах [6] и др. Ключевым ограничением диапазона является атмосферное поглощение. Оно весьма существенно, имеет драматические отличия в различных местах и определяется нали-

чием линий поглощения кислорода и воды, и окон прозрачности между ними. Существует обширный перечень теоретических исследований микроволнового астроклимата и моделей [7], построенных на метео и спутниковых данных по влагосодержанию атмосферы. Наиболее эффективным на сегодня инструментом изучения атмосферы стали измерения прозрачности атмосферы на более коротких, чем субТГц-волнах – оптика и ИК-диапазонах [8–10]. Хороший прогноз по влагосодержанию атмосферы могут дать измерения и на более длинных волнах (радиодиапазон от единиц до десятков ГГц) [11, 12], чем субТГц-волны. Все эти данные, довольно надежно определяющие одну из основных поглощающих субТГц-волны компонент – воду, дают основания строить предположения о перспективах тех или иных мест возможного расположения субТГц-инструментов. Однако картина микроволнового астроклимата отличается от давно исследуемого оптического астроклимата и радиочастотной диагностики и, безусловно, требует дополнения натурным прямым измерением на субТГц-волнах. Поглощение электромагнитных волн субТГц диапазона в атмосфере определяется тремя основными компонентами (вода, кислород и облака) и описывается формулой [7]:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{tot}}(\lambda, h, W, Q) = \\ = \alpha(\lambda) \cdot \exp\left(-\frac{h}{h_0}\right) + \beta(\lambda) \cdot W + \gamma(\lambda) \cdot Q, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\tau_{\text{tot}}$  – наблюдаемая оптическая толщина (Неп),  $h$  – высота над уровнем моря (км),  $h_0$  – характеристическая высота кислорода, 5.3 (км),  $W$  – количество осаждаемой воды, PWV (мм),  $Q$  – водозапас облаков (кг/м<sup>3</sup>),  $\alpha$  – кислородная часть поглощения на уровне моря (Неп),  $\beta$  – удельное поглощение в парах воды (Неп/мм),  $\gamma$  – удельное поглощение в облачности (Неп · м<sup>3</sup>/кг).

При этом оптические средства измерения или спутниковые данные, включая GNSS, “не видят” весьма широкие, в силу довольно высокой концентрации, кислородные линии поглощения в субТГц-диапазоне. Поэтому при всей значимости влажности атмосферы оценка перспектив площадки исключительно по влагосодержанию не вполне корректна. Требуются прямые измерения непосредственно на субТГц-волнах, на которых и будет работать впоследствии инструмент, установленный в месте проведения измерений.

В мире работают десятки обсерваторий субТГц-диапазона [5], в России на сегодня нет ни одного подобного инструмента. Однако в настоящий момент на базе новейших достижений в разработке антенн, приемников и генераторов субТГц-волн тоже готовится ряд программ развития инструментов в России и ближнем зарубежье [13]. Решения ожидаются в ближайшее время. Но

для принятия осознанного и обоснованного выбора места расположения такого дорогостоящего комплекса решение должно базироваться только на прямом инструментальном измерении атмосферной прозрачности непосредственно в месте планируемого размещения антенны. Наиболее адекватным прибором для измерения субТГц-поглощения в полевых условиях является двухчастотный радиометр МИАП – 2 [14], созданный в ИПФ РАН и ЗАО ГИКОМ. С его помощью был выполнен обширный цикл измерений микроволнового астроклимата в Северной Евразии от Шпицбергена до Узбекистана [15].

Один из экземпляров этого прибора, поставленный в свое время НГТУ, был использован для измерений, выполненных за предшествующие годы в Карачаево-Черкесии, Кабардино-Балкарии и Ставропольском крае [16]. К сожалению, в итоге мест, близких по уровню поглощения к лучшим локациям мировых обсерваторий субТГц-диапазона: Атакама, Антарктический полюс, пик Мауна-Кеа, Тибет или хотя бы европейская Пико-Велетта, в западной части северного Кавказа не было выявлено. Даже по российским меркам изученные в экспериментах площадки на западе северного Кавказа уступают по качеству микроволнового астроклимата склонам гор в Якутии (пик Муус-Хая) или Саянах в Бурятии (станция ИСЗФ СО РАН “Монды”). Второй экземпляр МИАП-2, поставленный ЗАО ГИКОМ астрокосмическому центру ФИАН, примерно в то же время обеспечивал продолжительный цикл измерений на площадках в окрестностях плато Суффа (Узбекистан), где строится субТГц-обсерватория “Суффа” [13]. В июне 2021 г. прибор был возвращен в Россию для обеспечения представляемых здесь исследований. Дело в том, что место экспедиции выбрано в том числе с учетом скорректированных планов проекта “Суффа”. В рамках проекта будет создан субТГц-интерферометр, второй элемент которого будет расположен на территории России, и северный Кавказ здесь представляется оптимальным местом с точки зрения протяженности базы создаваемого интерферометра: свыше 2000 км от узбекского элемента интерферометра на Суффе. Неплохую связку антенна на Кавказе составит и с европейскими элементами ТГС, обеспечив дополнительное эффективное покрытие U–V плоскости интерферометра ТГС.

Представляемые здесь экспедиции начались с анализа микроволнового астроклимата по косвенным показателям: уровню осадков и влажности атмосферы, показывавшим довольно значительное отличие восточной и западной частей северного Кавказа. Кроме того, по данным реанализа ERA-5 и анализу данных, полученных со спутников GNSS [11], были построены пространственные распределения осаждаемого водя-

ного пара (PWV) по сезонам за период с 2011 по 2020 гг. В связи с тем, что реанализ ERA-5 ограничен по пространственному разрешению 30 км и не учитывает условия пересеченного рельефа, а именно гористая местность и представляет наибольший интерес для исследований астроклимата, была выполнена привязка данных PWV к высотам вершин оцениваемых перспективных гор согласно формуле:

$$PWV = PWV_0 \exp\left(\frac{C_{PWV} \delta z}{1000}\right), \quad (2)$$

где  $\delta z$  – перепад высот для рассматриваемого места,  $C_{PWV}$  – коэффициент пропорциональности.

Пятно разрешения покрывает и сухие и бескислородные горные вершины, и влажные, насыщенные кислородом ущелья. Более точные теоретические оценки можно было бы сделать, не просто учитывая экспоненту по формуле (2), а дополнив ее показателями шероховатости поверхности внутри пятна разрешения. Параметр, определяющий шероховатость, известен как среднеквадратическое отклонение – СКО, или по-английски RMS, но этих данных для гор не существует, как не существует, строго говоря, точных данных о площади поверхности республики Дагестан (с учетом его изрезанности), в отличие от площади территории в плане на карте. В связи с чем, учитывая куда большую изрезанность поверхности Дагестана по сравнению с Тибетом, невозможно ограничиться набором доступных спутниковых и метеоданных для достоверной оценки реального микроволнового астроклимата, как это сделано для Тибета [17].

И все же приведенные оценки по осажденной воде, даже без учета кислорода и облачности, позволили изначально просто из изучения карты осадков Кавказа предварительно сформулировать гипотезу, состоящую в том, что восток объективно лучше для субТГц запада Кавказа, требовавшую экспериментальной проверки. Для экспериментальной проверки гипотезы был выбран ряд перспективных по вышеизложенным соображениям площадок восточнее ранее обследованного региона [16] западного Кавказа: Чечня, Северная Осетия, Ингушетия и Дагестан.

В Чечне было организовано две поездки. Первая пробная поездка по выбору возможного места расположения обсерватории и инструментальных измерений астроклимата состоялась в юго-западную часть республики (ближе к границе с Ингушетией, Осетией и Грузией) в направлении горы Тебулосмта, 4493 м. Поскольку это приграничные с Грузией регионы и доступ туда ограничен, инструментальные обследования отложены до 2022 г. Но неподалеку в Галанчожском районе выявлен ряд пригодных для измерений перспективных площадок с сухим климатом и дорогами

удовлетворительного качества. Вторая поездка в направлении юго-восток в окрестности пограничного с Дагестаном озера Казен-ой также продемонстрировала наличие перспективных площадок с высотой около 3000 м над уровнем моря с развитой инфраструктурой.

Следующий экспедиционный цикл, состоявшийся в первой декаде ноября 2021 г., охватывал две площадки в Дагестане: в Гунибском районе (гора Маяк, 2700 м) и на горе Шалбуздаг (4142 м). Завершался цикл измерениями в Северной Осетии (Столовая гора, ~3000 м).

Предварительные результаты измерений на всех трех площадках показали обнадеживающие вплоть до окна прозрачности 1.3 мм результаты по уровню атмосферного поглощения, учитывая неоптимальность сезона. Микроволновый астроклимат испытывает хорошо изученные сезонные вариации, и кратковременные измерения несложно сопоставить с долговременным внесением поправки на текущий сезон. Вместе с тем все измерения, включая предшествовавшие экспедиции и выполненные сразу по ее окончании в CAO, были проведены в довольно короткий период (всего неделя – с 4 по 10 ноября), когда сезонной вариабельностью астроклимата можно пренебречь. Окно прозрачности 1.3 мм оценивалось экстраполяцией по прямым измеренным данным в окнах прозрачности 3 и 2 мм. Разумеется, на перспективу предполагается доработать измерительный комплекс двумя дополнительными каналами, работающими в окнах 1.3 и 0.8 мм – по сути основными окнами прозрачности атмосферы в субТГц-диапазоне. Именно в окне прозрачности 1.3 мм ныне работает ТГС и предполагается развитие мировой интерферометрической сети в окне прозрачности 0.8 мм. Дальнейшее продвижение субТГц-наземных инструментов вверх по частоте представляется перспективным лишь для уникальных по астроклимату мест наподобие пустыни Атакама, в России таких нет. Два наиболее длинноволновых субТГц-окна прозрачности (2 и 3 мм), строго говоря, не требуют поиска высокогорной площадки. На волне 3 мм можно довольно эффективно работать и на уровне моря, для окна 2 мм вполне достаточно подъема на высоту 1–2 км. Полученные в экспедиции результаты в настоящий момент обрабатываются и будут представлены в более подробном анализе.

Вместе с тем, в рамках прошедшего цикла исследований пока не удалось посетить ряд еще более перспективных площадок на востоке Кавказа, что запланировано на следующий сезон. В частности, если влажность западного Кавказа определяется близостью (~100 км) Черного моря, то крайний восток Дагестана уже находится в зоне климатического влияния Каспия. И Шалбуздаг, лучшая из трех обследованных площадок, нахо-

дится ближе 100 км от Каспия, что не может не приносить влагу. По данным реанализа ERA 5 и использования обработки фазовых измерений двухчастотных сигналов с GNSS-приемников, получена оценка весьма малой тропосферной задержки и влагосодержания несколько дальше от Каспия. Из чего следует предложение сместиться чуть западнее в направлении Чечни, чтобы обеспечить не менее 200 км от Каспия. Здесь предлагается изучить два района горного Дагестана — Рутульский и Агульский. В Агульском это сравнительно легко доступные горы Хорай (3521 м) и Карах (2876 м). В Рутульском районе следует обратить внимание на окружающие Аракуль и Хачаралу холмы и горы, в частности, Синдаку (2847 м) и Хунзундалилбак (3676 м). Пока нельзя снимать с рассмотрения приграничные с Азербайджаном самые высокие горы Дагестана Ерыдаг (3925 м) и Базардюзю (4466 м). Но здесь могут помешать, даже для проведения тестовых измерений, особенности приграничного режима, да и Каспий тут недалек.

Основной результат прошедшей в 2021 г. экспедиции: перспективность площадок восточного Кавказа доказана, но требует более детального и длительного инструментального исследования для принятия решения о размещении высокоэффективного инструмента, работающего в субТГц-диапазоне частот.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят руководство и сотрудников CAO РАН Г.Г. Валявина, М.Г. Мингалиева, В.К. Дубровича и др.; Владикавказского НЦ РАН, Дагестанского НЦ РАН, КНИИ РАН г. Грозный за активную поддержку экспедиции и участие в ней; А.П. Миронова и коллектив ГАИШ МГУ за помощь в верификации по базам данных GNSS результатов микроволнового зондирования атмосферы; А.Ю. Шиховцева и коллектив ИСЗФ СО РАН за полезные идеи и готовность принять участие в дальнейших работах по обоснованию выбора лучшего места для субТГц-инструмента. Особая благодарность В.И. Носову и всей команде ИПФ РАН — ГИКОМ за создание уникальной аппаратуры для измерения микроволнового поглощения, почти 10 лет безупречно работающей, и лично И.И. Зинченко, неизменно поддерживавшего наши исследования.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-79-30071).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Balega Yu. Yu., Baryshev A. M., Bubnov et al.* Superconducting Receivers for Space, Balloon, and Ground — Based Sub — Terahertz Radio Telescopes. *RADIO-PHYSICS AND QUANTUM ELECTRONICS*, 2020, WOS:000663485900001
2. *Litvak A., Denisov G., Glyavin M.* Russian Gyrotrons: Achievements and Trends // *IEEE Journal of Microwave*. 2021. Т. 1. № 1. P. 260–268.
3. ALMA—Atacama Large Millimeter/submillimeter Array. [www.eso.org](http://www.eso.org).
4. *Wild W., Kardashev N. S. et al.* On behalf of the *Millimetre consortium*: Millimetre — a large Russian-European submillimeter space observatory. *Exp Astron* 23. 2009. P. 221–244. <https://doi.org/10.1007/s10686-008-9097-6>
5. *Raymond A. M., Palumbo D., Paine S. N. et al.* Evaluation of New Submillimeter VLBI Sites for the Event Horizon Telescope // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 2021. V. 253. № 1. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/abc3c3>
6. *Vdovin V. F., Grachev V. G., Dryagin S. Yu. et al.* Cryogenically cooled low-noise amplifier for radio-astronomical observations and centimeter-wave deep-space communications systems // *Astrophysical Bulletin*. 2016. V. 71. № 1. P. 125–128. <https://doi.org/10.1134/S1990341316010132>
7. *Liebe H. J., Rosenkranz P. W., Hufford G. A.* Atmospheric 60-GHz oxygen spectrum: New laboratory measurements and line parameters // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 1992. V. 48. № 5–6. P. 629–643.
8. *Гришин М.Я., Леднев В.Н., Першин С.М., Канрапов П.О.* Ультракомпактный флуоресцентный лидар // *Доклады РАН. Физика, технические науки*. 2021. Т. 498. С. 3–6.
9. *Pershin S. M. et al.* Aerosol layers sensing by an eye-safe lidar near the Elbrus summit // *Laser Phys. Lett.* 2020. V. 17. № 2. P. 026003.
10. *Nadezhdinskii A. I., Ponurovskii Ya. Ya.* Diode laser spectrometer for high-precision measurements // *Quantum Electron*. 2019. V. 49. № 7. P. 613–622. <https://doi.org/10.1070/QEL16776>
11. *Khaikin V. B., Lebedev M. K., Shmagin V. E. et al.* On the Eurasian submillimeter telescopes project (ESMT) / *IEEE Xplore Digital Library*: January 8, 2021. Moscow. <https://doi.org/10.1109/RMC50626.2020.9312233>
12. *Nosov V. I. et al.* A dual-wave atmosphere transparency radiometer of the millimeter wave range // *Instruments Exp. Tech*. 2016. May. V. 59. № 3. P. 374–380. <https://doi.org/10.1134/S0020441216020111>
13. *Artemenko Y. et al.* The Suffa project and high capacity channels for deep space communications systems incorporating cryogenic elements / 2019 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems (COMCAS). 2019. P. 1–3. <https://doi.org/10.1109/COMCAS44984.2019.8958058>
14. *Bubnov G. M., Abashin E. B., Balega Y. Y., et al.* Searching for new sites for THz observations in Eurasia //

- IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2015. V. 5. № 1. P. 64–72.
15. *Bubnov G., Marukhno A.S., Vozyakova O.V. et al.* Analysis of the Millimeter-Band Astroclimate at the Caucasus Mountain Observatory / Conference: Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century. 2020. V. 1. № 1. P. 184–188.
16. *Deng L., Yang F., Chen X. et al.* Lenghu on the Tibetan Plateau as an astronomical observing site // 2021. Nature. V. 596. P. 353–356.  
<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03711-z>

## DIRECT MEASUREMENTS OF THE ATMOSPHERIC ABSORPTION OF THE SUBTERAHERTZ WAVES IN THE NORTHERN CAUCASUS

Academician of the RAS **Yu. Yu. Balega<sup>a</sup>**, **D. K-S. Bataev<sup>b</sup>**, **G. M. Bubnov<sup>c</sup>**, **V. F. Vdovin<sup>c,d</sup>**, **P. M. Zemlyanukha<sup>c</sup>**, **A. B. Lolaev<sup>e</sup>**, **I. V. Lesnov<sup>c</sup>**, **A. S. Marukhno<sup>a,c</sup>**, **N. A. Marukhno<sup>a,f</sup>**,  
 Corresponding Member of the RAS **A. K. Murtazaev<sup>g</sup>**, **V. S. Khaykin<sup>a</sup>**, and **A. V. Khudchenko<sup>d</sup>**

<sup>a</sup> *Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhny Arkhys, Russian Federation*

<sup>b</sup> *Complex Scientific Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Russian Federation*

<sup>c</sup> *Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

<sup>d</sup> *Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>e</sup> *Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz, Russian Federation*

<sup>f</sup> *FITMO National University, Saint-Petersburg, Russian Federation*

<sup>g</sup> *Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russian Federation*

The report briefly presents the first results of direct expedition measurements of atmospheric absorption of electromagnetic waves in the sub-terahertz frequency range – 0.1–1 THz, carried out in order to select an optimal site from the point of view of the microwave astroclimate for development an observatory that can become an element of the radio interferometer of the Suffa observatory and, in the future, enter the collaboration Event horizon telescope (EHT). The EHT, presented an image of the shadow of a black hole, today consists of a dozen antennas located around the globe, and now has no elements in its network in northern Eurasia. The performed studies can be useful not only for radio astronomy problems, but also for space communications, radar of the Moon, asteroids, and the detection of space debris objects. The first results of direct measurements of propagation of subterahertz waves at the selected sites confirmed the initial hypothesis of the expedition. This hypothesis was formulated on the basis of an analysis of meteorological data, as well as satellite data on atmospheric absorption in other ranges: optics and low-frequency radio bands. It was assumed that the work in the subterahertz frequency range in the eastern part of the northern Caucasus is more promising than in the western Caucasus. The West is attractive because today there are a number of observatories already operating, and the installation of another antenna would have been much easier in terms of the necessary infrastructure and qualified personnel. The hypothesis of the predominance of the east was convincingly confirmed by comparing the absorption in the 2 and 3 mm bands at the previously surveyed areas of the western Caucasus (Terskol peak, Pastukhov mout., KGO, BTA, RATAN-600 sites, etc.) with those studied during the expedition in 2021 eastern sites on the mountains Mayak (Gunib), Stolovaya moutain and Shalbuzdag. Even measurements at the highest peak not only in the Western Caucasus, but also in Europe – Mount Elbrus, carried out as part of the expedition presented, gave results worse than those in Dagestan and North Ossetia, confirming the futility of further searches for a place for an effective subterahertz instrument in the eastern part of the North Caucasus.

*Keywords:* millimeter and submillimeter waves, atmospheric absorption, radio astronomy, telecommunications, astroclimate, radio wave propagation