

УДК 53.082

ВОЗМОЖНОСТИ ДЕТЕКТОРОВ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ “СОЛНЦЕ-ТЕРАГЕРЦ” ПО РЕГИСТРАЦИИ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ: ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПО НАЗЕМНЫМ ДАННЫМ

© 2026 г. М. В. Филиппов^а, *, В. С. Махмутов^а, Г. И. Кропотов^б,
М. В. Разумейко^а, Е. Д. Тульников^а, С. В. Соков^а

^а Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), Москва, Россия

^б ООО “Тидекс”, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: mfilippov@frtk.ru, filippovmv@lebedev.ru

Поступила в редакцию 01.08.2025 г.

После доработки 15.08.2025 г.

Принята к публикации 18.08.2025 г.

Представлено описание космического эксперимента “Солнце-Терагерц”, запланированного на 2026–2027 гг. на борту российского сегмента Международной космической станции (МКС). Основными задачами эксперимента являются получение информации о терагерцевом излучении Солнца, а также исследование активных областей и солнечных вспышек. Научная аппаратура космического эксперимента “Солнце-Терагерц” включает восемь каналов (детекторов), чувствительных к излучению в диапазоне частот от 0.4 до 12.0 ТГц. Целью настоящего исследования является оценка величины напряжения на выходе приемников научной аппаратуры во время эксперимента на борту МКС по данным наземных измерений, определение минимальных величин возрастания потоков излучения, надежно регистрируемых научной аппаратурой на фоне собственных шумов.

Ключевые слова: Солнце, солнечные вспышки, терагерцевое излучение, оптическая система, ячейка Голя

DOI: 10.7868/S3034517026010035

ВВЕДЕНИЕ

Солнце представляет собой мощный источник электромагнитного излучения, охватывающего широкий диапазон частот и энергий. В настоящее время осуществляется как наземный, так и внеатмосферный мониторинг солнечного излучения практически во всем спектре, от радиоволн до гамма-излучения (Domingo и др., 1995; Davila и др., 1996; Howard и др., 2013; Kinnison и др., 2020). Однако терагерцевый диапазон остается наименее изученным из-за высокой степени его поглощения земной атмосферой. Исключения составляют: область от терагерцевого до среднего инфракрасного диапазона (THz–mid-IR) на частоте около 15 ТГц (Giménez

de Castro и др., 2020), где атмосфера не полностью непрозрачна, особенно на больших высотах, где содержание водяного пара значительно ниже, а также инфракрасное окно прозрачности с центральной частотой около 30 ТГц (примерно 21–38 ТГц), через которое возможна регистрация излучения (Kaufmann и др., 2015).

Космический эксперимент “Солнце-Терагерц” (Калинин и др., 2021) сфокусирован главным образом на детальном исследовании солнечного излучения в терагерцевом диапазоне, возникающего при вспышечной активности. Основной целью проекта является получение новых наблюдательных данных, необходимых для построения и совершенствования физических моделей генерации мощных

солнечных протонных вспышек, а также для разработки методов их оперативного прогнозирования (Kaufmann и др., 1985; 2001; 2003; 2004; Kaufmann, 1996; Makhmutov и др., 2003; Luthi и др., 2004; Махмутов и др., 2011; Krucker и др., 2013).

Изучение вспышечной активности на различных частотах позволяет исследовать физические процессы, протекающие на разных высотах уровнях солнечной атмосферы.

В инфракрасном и субтерагерцевом диапазонах наблюдается излучение как тепловой (“free-free emission”), так и нетепловой природы, связанное с ускорением электронов. В частности, наблюдения в субмиллиметровом диапазоне дают представление о механизмах ускорения и переноса потоков высокоэнергичных электронов в нижних слоях атмосферы — от переходной области до хромосферы (Wedemeyer и др., 2016). Субтерагерцевое излучение в ряде наблюдений демонстрирует спектральный компонент, нарастающий с частотой, что резко отличает его от классического убывающего синхротронного спектра в микроволновом диапазоне (Kontar и др., 2018). В некоторых случаях регистрируются компоненты, излучающие исключительно в субтерагерцевом диапазоне, без выраженной связи с микроволновыми всплесками, что указывает на возможные локализованные источники с высокой плотностью и температурой (Kaufmann и др., 2004; Krucker и др., 2013). Эти аномальные особенности спектра указывают на необходимость изучения в более высокочастотном терагерцевом диапазоне.

Получение новых экспериментальных данных в диапазоне 1–10 ТГц имеет важное значение для установления физической природы дополнительного спектрального компонента и локализации частот, на которых происходит изменение наклона спектра солнечных вспышек. Эти данные позволяют уточнить параметры источников излучения и механизмов его генерации, а также улучшить прогностические модели солнечной активности, включая оценку вероятности и интенсивности протонных вспышек.

АППАРАТУРА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА “СОЛНЦЕ-ТЕРАГЕРЦ”

Научная аппаратура эксперимента “Солнце-Терагерц” состоит из блока электроники (Филиппов и др., 2024а) и блока детекторов, включающего в себя восемь детекторов (каналов), чувствительных к излучению на частотах 0.4; 0.7;

1.0; 3.0; 5.0; 7.0; 10.0 и 12.0 ТГц. Каждый детектор состоит из оптического телескопа, содержащего большое и малое зеркала (Квашнин и др., 2021); системы фильтров (Кропотов и др., 2023), состоящую из отсекающего фильтра LPF 23.1 (https://www.tydexoptics.com/pdf/ru/THz_Low_Pass_Filter.pdf) и полосового фильтра BPF (http://www.tydexoptics.com/ru/products/tgc-ustrojstva/thz_band_pass_filter/); оптического прерывателя (Филиппов и др., 2023); приемника, представляющего собой ОАП — оптоакустический преобразователь “ячейка Голея” (Kaufmann и др., 2014; Кропотов, Кауфманн, 2013; Филиппов и др., 2024б) с входным окном из HDPE (https://www.tydexoptics.com/ru/products/thz_optics/thz_materials/); платы усилителя.

Бортовая реализация космического эксперимента “Солнце-Терагерц” запланирована на 2026–2027 гг.

МОДЕЛЬ АТМОСФЕРНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Для проверки функционирования научная аппаратура была установлена на специально изготовленную платформу (рис. 1). Измерения солнечного излучения проводились на территории Долгопрудненской научной станции (ДНС) ФИАН.



Рис. 1. Научная аппаратура эксперимента “Солнце-Терагерц” в процессе измерения солнечного излучения.

Для анализа результатов наземных испытаний летного образца научной аппаратуры, а также для оценки сигналов приемников спокойного Солнца во время проведения эксперимента на борту МКС, в данных наземных испытаний необходимо учитывать влияние атмосферы — рассеяние/поглощение, которое является следующей комбинацией нескольких основных механизмов.

1. Газовая составляющая: поглощение молекулами атмосферных газов на их характерных линиях и полосах, что описывается базами данных HITRAN (Rothman, 2021).

2. Рэлеевское рассеяние (Rayleigh, 1871): молекулярное рассеяние излучения, происходящее при взаимодействии с молекулами газа в атмосфере. Интенсивность рассеянного излучения обратно пропорционально четвертой степени длины волны: $I_R \sim 1/\lambda^4$.

3. Поглощение и рассеяние частицами (аэрозолями) (Bond, Bergstrom, 2006).

Для расчета газовой составляющей пропускания атмосферы с учетом высотных профилей давления, температуры и концентрации газов можно воспользоваться библиотекой NAPI (Kochanov и др., 2016) и моделью стандартной атмосферы (U.S. Standard Atmosphere, 1976).

Атмосфера была условно поделена на слои, соответствующие высотам h_i : 0, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000, 9000, 10000, 11000, 12000, 14000, 16000, 18000, 20000, 24000, 28000, 32000, 36000, 40000, 50000, 60000, 80000 и 100000 м. Таким образом, толщина i -го слоя задается как: $\Delta h_i = h_{i+1} - h_i$. Всего 28 слоев.

Для заданных значений высоты, согласно таблицам для стандартной атмосферы, получены значения атмосферного давления и температуры и выполнен расчет спектров поглощения для молекул: O_2 , CO_2 , CO , H_2O , N_2 , CH_4 , NO , NO_2 , O_3 , SO_2 , N_2O и их изотопов.

В нижних слоях атмосферы мольная доля H_2O , CO_2 , O_3 сильно меняется с высотой, поэтому учитывается распределение этих газов в атмосфере (высотный профиль). Мольная доля остальных молекул из газовой смеси атмосферы считается неизменной.

Сечение рассеяния $\sigma_R(\text{см}^{-2})$ для молекул (или малых частиц) на длинах волн, значительно превышающих размер частиц, можно записать через модифицированную формулу для рэлеевского рассеяния (Sneep, Ubachs, 2005):

$$\sigma_R(\lambda) = \frac{24\pi^3 (n^2 - 1)^2}{\lambda^4 N_c^2 (n^2 + 2)^2} F, \quad (1)$$

где n — показатель преломления воздуха ($n \approx 1.0003$); λ — длина волны (см); N_c — стандартная молекулярная концентрация воздуха (при нормальных условиях) ($N_c \approx 2.54 \times 10^{19}$ молекул/см³); F — фактор деполяризации ($F \approx 1$), так как в данном расчете не учитывается геометрия молекул.

Молекулярную концентрацию для i -го слоя воздуха, $N_{\text{воз}}^i$, (молекул/см³) можно записать как

$$N_{\text{воз}}^i = \frac{P_i}{kT_i} \times 10^{-6}, \quad (2)$$

где k — постоянная Больцмана ($k = 1.38 \times 10^{-23}$ Дж/К); P_i — атмосферное давление в i -м слое воздуха (Па); T_i — температура i -го слоя воздуха (К).

Оптическая толщина для i -го слоя воздуха:

$$\tau_i(\lambda) = \sigma_R(\lambda) N_{\text{воз}}^i \Delta h_i \times 10^2. \quad (3)$$

Согласно закону Бугера—Ламберта—Бера (Сивухин, 2002), результирующий спектральный коэффициент пропускания атмосферы $t_R(\lambda)$ (отн. ед.) записывается как

$$t_R(\lambda) = e^{-\left(\sum_{i=0}^{27} \tau_i(\lambda)\right)}. \quad (4)$$

При прохождении электромагнитного излучения через среду, содержащую частицы (например, пыль, капли воды, аэрозоль), происходит взаимодействие излучения с этими частицами, проявляющееся в процессах рассеяния и поглощения. Теория Ми (Bohren, Huffman, 1983) представляет собой точное решение уравнений Максвелла для сферических частиц с произвольными размерами относительно длины волны и комплексным показателем преломления: $m = n + ik$, где n — действительная часть показателя преломления, определяющая скорость распространения света в веществе, и влияет на преломление и отражение волн на границе веществ; k — коэффициент поглощения.

Рэлеевское рассеяние может рассматриваться как предельный случай теории Ми при малых размерах частиц. Однако эти две модели традиционно анализируются и применяются отдельно, что обусловлено значительным различием в масштабах частиц и физике взаимодействия: рэлеевское рассеяние актуально для молекул и мелких аэрозольных частиц, а теория Ми применяется для частиц, сопоставимых или больших по размеру с длиной волны, где необходимо учитывать не только рассеяние, но и поглощение.

Для расчета рассеяния/поглощения по теории Ми использована библиотека PyMieScatt (Sumlin и др., 2017; 2018a; 2018b). PyMieScatt предназначена для численного моделирования рассеяния электромагнитных волн на сферических частицах и позволяет вычислять коэффициенты рассеяния (n) и поглощения (k).

Сформирована мультифракционная модель аэрозолей в атмосфере, примерно соответствующая условиям умеренно загрязненного пригорода (Hussein и др., 2008). В модель входят следующие пять характерных фракций частиц, различающихся по размеру, молекулярной концентрации в приземном слое и предполагаемому химическому составу (Li и др., 2023; Morakinyo и др., 2016).

– Ультрамелкая сажа — частицы с радиусом 0.005 мкм и с концентрацией 800 частиц/см³. Эта фракция соответствует агломератам элементарного углерода, возникающим при сгорании топлива.

– Мелкая пыль — частицы с радиусом 0.03 мкм и с концентрацией 1000 частиц/см³. Вероятные компоненты включают неорганические соли (например, сульфаты, нитраты) и минеральную пыль (оксиды кремния, алюминия). Эти частицы могут быть как первичными (от дорожной пыли), так и вторичными, образованными из газов-предшественников.

– Капли воды/вторичный аэрозоль — с радиусом 0.1 мкм, 600 частиц/см³. Представляет собой гигроскопичные частицы, содержащие аммонийные соли, органические соединения, а также капли жидкой воды при высокой влажности. Основной источник — вторичные аэрозоли (SOA — Secondary Organic Aerosols), возникающие в результате атмосферной фотохимии.

– Крупные частицы (пыльца, споры, органика) с радиусом 0.7 мкм, 100 частиц/см³. Фракция включает биологические аэрозоли, а также органическую и минеральную пыль. Может содержать целлюлозу, белки, фрагменты растений и др.

– Очень крупные частицы (строительная пыль; например, кальцит CaCO₃) с радиусом 2.0 мкм, 2 частицы/см³. Включает в себя цементную пыль, золу, абразивные материалы, а также тяжелые неорганические соединения. Источник — строительные и дорожно-ремонтные работы, механическое разрушение материалов.

В модели учитывается дисперсия (зависимость от длины волны падающего излучения) комплексного показателя преломления $m(\lambda)$ (<https://refractiveindex.info>) для каждой фракции (Sumlin и др., 2018b; Malitson, 1965; Hale, Querry, 1973).

Высотный профиль аэрозольной концентрации учитывается с использованием экспоненциальной зависимости, которая описывает снижение концентрации аэрозольных частиц с увеличением высоты. При этом для каждой фракции аэрозоля задается своя характерная масштабная высота (h_m : 2500, 2000, 1500, 1000, 500 м соответственно) — параметр, отражающий, насколько высоко данная фракция способна подниматься в атмосфере (Hayasaka и др., 2007). Это позволяет учесть физические особенности различных частиц: мелкие и легкие частицы (такие как ультрамелкая сажа) остаются во взвешенном состоянии на больших высотах, тогда как тяжелые частицы (например, строительная пыль) быстро оседают и сосредоточены у поверхности.

Таким образом, высотный профиль аэрозольной концентрации $N_i(h)$ (частиц/см³) для i -й частицы можно записать как

$$N_i(h) = N_0^i e^{\frac{-h}{h_m}}, \quad (5)$$

где N_0^i — заданная концентрация i -й частицы в приземном слое (частиц/см³); h — высота над уровнем моря (м).

На рис. 2 приведен график результирующего спектрального коэффициента пропускания атмосферы $t_{\text{атм}}(\nu)$ (отн. ед.) в диапазоне частот 0.01–50 ТГц, учитывающий молекулярное поглощение (газовую составляющую), рэлеевское и аэрозольное (теория Ми) рассеяния, рассчитанные по описанной модели.

Необходимо отметить, что применение теории Ми к крупным, биологически сложным объектам (например, пыльца или споры) является приближенным ввиду их неоднородной структуры и несферической формы.

Также следует отметить, что в рабочем диапазоне частот детекторов научной аппаратуры ($\nu < 30$ ТГц) пропускание атмосферы, в основном, определяется молекулярным поглощением.

Для учета изменения пути солнечного излучения через атмосферу в зависимости от угла наблюдения используется концепция воздушной массы: M (отн. ед.), определяемая как отношение длины пути света через атмосферу к минимальной длине пути, когда Солнце находится в зените. В простейшем приближении воздушная масса вычисляется через косинус угла зенита θ : $M(\theta) = 1/\cos(\theta)$.

При больших углах зенита используется более сложная эмпирическая формула, предложенная Kasten и Young (1989):

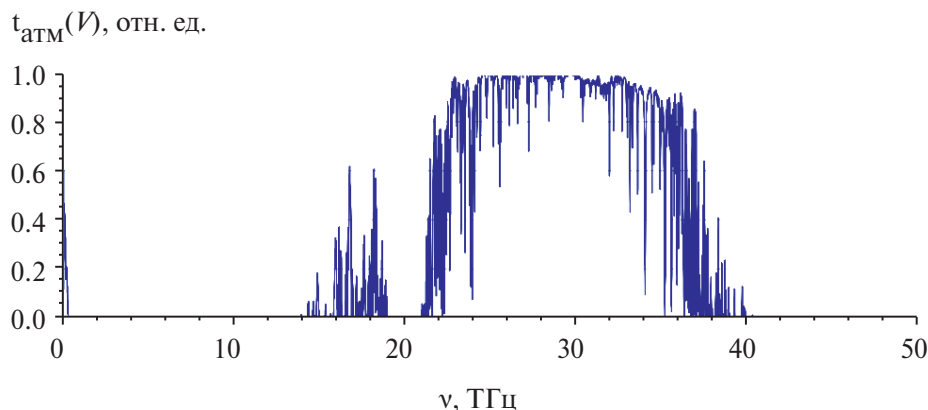


Рис. 2. График результирующего спектрального коэффициента пропускания атмосферы в диапазоне частот 0.01–50 ТГц и с шагом 0.01 ТГц.

$$M(\theta) = \frac{1}{\cos(\theta) + 0.50572 \times (96.07995 - \theta)^{-1.6364}}. \quad (6)$$

Данная формула учитывает кривизну Земли и изменение плотности атмосферы с высотой, что делает ее более точной для углов, близких к горизонту. Используя воздушную массу, можно скорректировать пропускание света через атмосферу, что важно для расчетов солнечного излучения при разных углах наблюдения. Воздушная масса $M(\theta)$ увеличивается с увеличением угла зенита и достигает максимума на горизонте (при угле $\theta = 90^\circ$).

Для коррекции спектрального коэффициента пропускания солнечного излучения через атмосферу с учетом угла наблюдения, после вычисления воздушной массы $M(\theta)$ вводится поправка:

$$t_{\text{атм}}(\nu, \theta) = t_{\text{атм}}(\nu)^{M(\theta)}. \quad (7)$$

Зенитный угол рассчитывается с помощью библиотеки Astropy (<https://www.astropy.org/>) на основе географического положения наблюдателя и времени наблюдения.

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ СИГНАЛОВ ПРИЕМНИКОВ ВОСЬМИ ДЕТЕКТИРУЮЩИХ КАНАЛОВ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЕРИМЕНТА НА БОРТУ МКС ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Серия наземных измерений фонового солнечного излучения летным образцом научной

аппаратуры была проведена 1 мая 2024 г. на территории ДНС ФИАН. В анализе данных далее использованы измерения, полученные в интервале 14:17–14:32 по московскому времени, поэтому в качестве исходных данных для определения угла θ выбрано время 11:25 (UTC). Согласно расчетам: $\theta = 46.10^\circ$; $M(\theta) = 1.44$.

Коэффициент пропускания оптического тракта $t_{om}(\nu)$ (отн. ед.) научной аппаратуры представлен общей формулой:

$$t_{\text{от}}(\nu) = \rho_3^2(\nu) \times t_{\text{HDPE}}(\nu) \times t_{\text{LPF}}(\nu) \times t_{\text{BPF}}(\nu) \times \text{diff}(\nu), \quad (8)$$

где $\rho_3^2(\nu)$ — спектральный коэффициент отражения телескопа (отн. ед.); $t_{\text{LPF}}(\nu)$ — спектральный коэффициент пропускания полосового фильтра LPF 23.1 (отн. ед.); $t_{\text{BPF}}(\nu)$ — спектральный коэффициент пропускания отрезающего фильтра BPF (отн. ед.); $t_{\text{HDPE}}(\nu)$ — спектральный коэффициент пропускания входного окна HDPE (отн. ед.); $\text{diff}(\nu)$ — спектральный коэффициент, характеризующий дифракционные потери в телескопе (отн. ед.).

Результирующий коэффициент пропускания $t_{\text{рез}}(\nu, \theta)$ (отн. ед.) всей системы представляет собой совокупное значение, учитывающее потери на каждом этапе прохождения света — от атмосферы до детектора, включая влияние зенитного угла, характеристик элементов оптического тракта научной аппаратуры и свойств входного окна приемника:

$$t_{\text{рез}}(\nu, \theta) = (t_{\text{атм}}(\nu))^{M(\theta)} \times t_{\text{от}}(\nu), \quad (9)$$

где $t_{\text{атм}}(\nu)$ — спектральный коэффициент пропускания атмосферы (отн. ед.), учитывающий

поглощения молекулами газов, рэлеевское рассеяние, поглощение и рассеяние частицами (аэрозолями).

Тогда спектральная плотность солнечного излучения, поступающего в приемники научной аппаратуры, с учетом влияния атмосферы и зенитного угла составит:

$$L_{\text{атм}}(\nu, \theta) = r_{E490-22}(\nu) \times t_{\text{рез}}(\nu, \theta), \quad (10)$$

где $r_{E490-22}(\nu)$ — энергетическая светимость Солнца ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ Гц})$), рассчитанная по модели ASTM E490-22 (<https://www.astm.org/e0490-22.html>).

На рис. 3 приведен график спектральной плотности солнечного излучения для канала № 5 (5.0 ТГц) при $\theta = 46.10^\circ$. Красная пунктирная линия — спектральная плотность излучения на границе атмосферы. Синяя линия — спектральная плотность излучения с учетом потерь в атмосфере. Как видно, при наземных измерениях в приемник, в основном, поступает излучение нецелевого диапазона частот, примерно 14–19 ТГц, из-за практически полного поглощения более низкочастотной компоненты солнечного терагерцевого излучения молекулами атмосферы, что соответствует области от терагерцевого до среднего инфракрасного диапазона (Giménez de Castro и др., 2020). Таким образом, можно сделать предварительный вывод, что в климатических условиях Москвы возможна регистрация терагерцевого излучения в примерном диапазоне 14–19 ТГц при использовании полосовых фильтров с центральной частотой в окрестности 15 ТГц при помощи детекторов, аналогичных детекторам научной аппаратуры

“Солнце-Терагерц”. Для остальных каналов графики практически не отличаются.

Сигнал наземного терагерцевого детектора, направленного на Солнце, представляет собой совокупность следующих нескольких компонентов.

– Прямое солнечное излучение — целевой сигнал.

– Рассеянное солнечное излучение (переизлучение атмосферой) — возникает за счет взаимодействия солнечного излучения с молекулами воздуха и водяного пара; может вносить вклад в регистрируемый сигнал, особенно при высокой влажности (Slocum и др., 2013).

– Тепловое излучение Земли и атмосферы — источник фонового сигнала в терагерцевом диапазоне. Атмосфера (приземный слой) и земная поверхность в среднем излучают как тела с температурой около 288 К в примерном диапазоне 4–100 мкм, и с максимумом спектральной плотности излучения около 15 мкм (20 ТГц) (Petty, 2006).

Для оценки величины вклада фонового излучения использован одноканальный макет детектора (рис. 4), установленный на поворотную платформу, на которой также установлен датчик облачности на базе ИК-термометра MLX90614 (<https://www.melexis.com/en/product/mlx90614/digital-plug-play-infrared-thermometer-to-can>). Измерения проводились дифференциальным методом: регистрируется сигнал при наведении детектора на Солнце, далее детектор отворачивается от Солнца вокруг вертикальной оси на угол, примерно равный 90° , чтобы зарегистрировать фоновое атмосферное излучение. Измерения

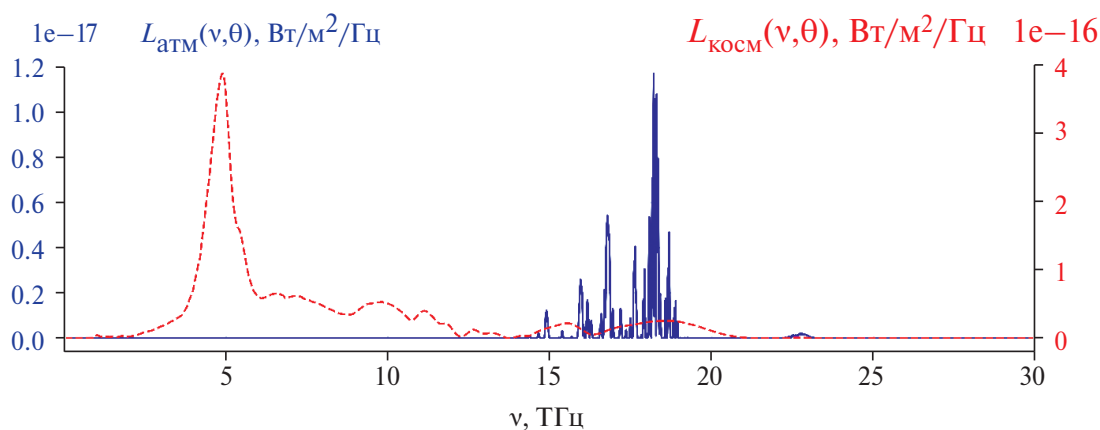


Рис. 3. График спектральной плотности солнечного излучения для канала № 5 (5.0 ТГц) при $\theta = 46.10^\circ$ в диапазоне частот 0.01–30 ТГц и с шагом 0.01 ТГц. Красной пунктирной линией показана спектральная плотность излучения на границе атмосферы. Синей линией показана спектральная плотность излучения с учетом потерь в атмосфере.

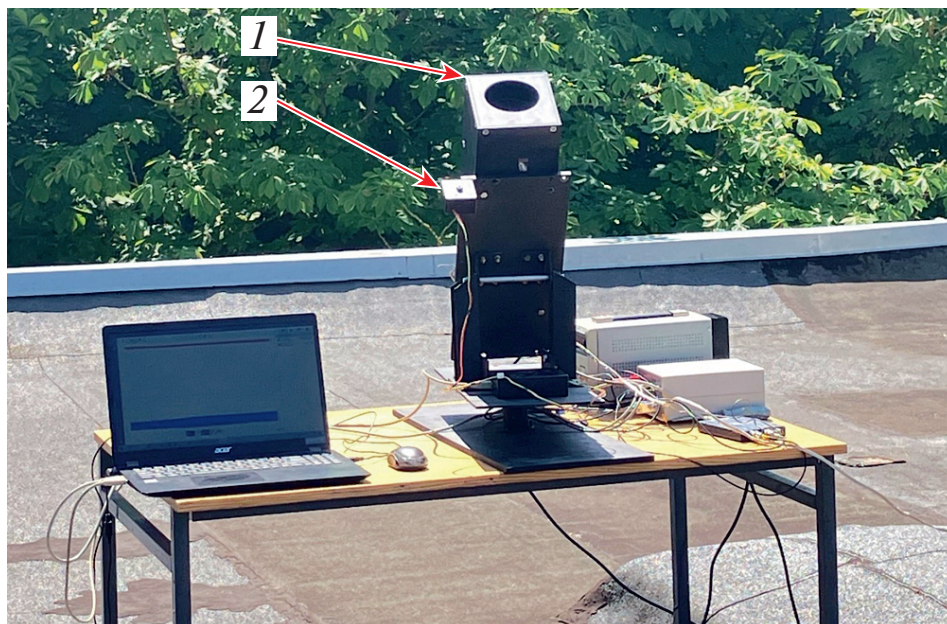


Рис. 4. Аппаратура для процесса измерения фонового атмосферного излучения, установленная на поворотную платформу: (1) — Одноканальный макет детектора; (2) — датчик облачности.

проведены последовательно для каждого канала с помощью замены полосовых фильтров ВРФ. Продолжительность эксперимента — около трех часов.

На рис. 5 приведен график измерений сигнала для канала № 6 (7.0 ТГц). Оранжевым цветом выделена область, соответствующая наведенному на Солнце детектору. Голубым цветом выделена область — плато, соответствующая отвернутому от Солнца детектору в начальный момент

времени. Между ними — сигнал при проведении разворота платформы. Так как ОАП крайне чувствительна к вибрациям — в этой области наблюдаются всплески сигнала. Далее сигнал начинает плавно снижаться, что, вероятно, связано с охлаждением элементов конструкции детектора, которые также являются источником излучения. Тепло перераспределяется на другие поверхности детектора вследствие разворота, и через некоторое время сигнал начнет возрастать.

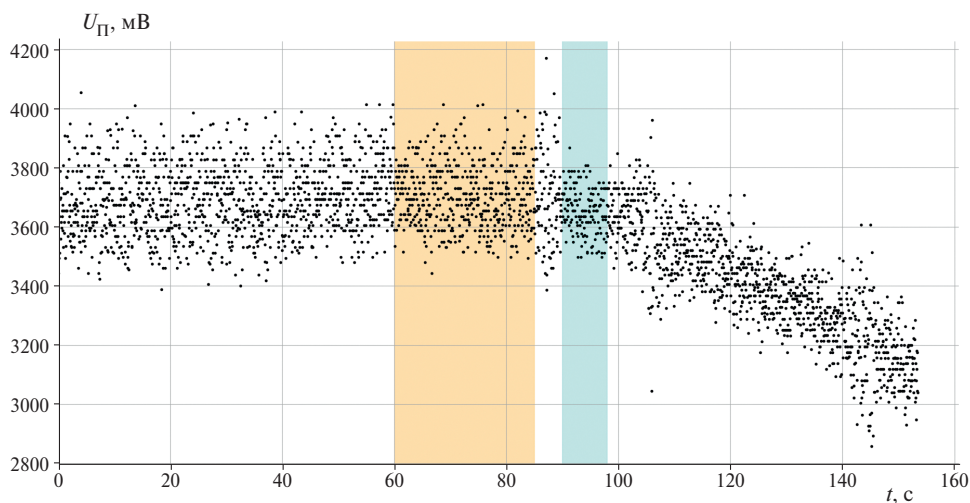


Рис. 5. График сигнала приемника в составе детектора Одноканального макета: оранжевым цветом показана область, соответствующая наведенному на Солнце детектору; голубым цветом показана область, соответствующая отвернутому от Солнца детектору.

Таблица 1. Результаты оценки вклада солнечного излучения в сигнал научной аппаратуры в условиях наземного эксперимента

Канал, №	$\nu_{\text{макс}}$, ТГц	$U_{\text{п1}}$, Вт	$U_{\text{п2}}$, Вт	α , отн. ед.	$T_{\text{н}}$, °С
1	0.40	2348.080	2302.038	0.020	5.56 ± 2.50
2	0.68	1443.476	1428.382	0.010	7.00 ± 2.77
3	0.98	1965.141	1926.752	0.020	7.08 ± 1.09
4	2.90	2905.569	2871.915	0.012	7.05 ± 0.63
5	4.84	3631.540	3548.684	0.023	9.93 ± 3.16
6	6.61	3702.962	3656.995	0.022	9.21 ± 3.00
7	9.69	2899.051	2886.985	0.004	10.80 ± 3.34
8	11.16	3893.515	3867.572	0.007	12.49 ± 3.46

Таким образом, для оценки относительной величины солнечного излучения использованы средние значения сигнала в оранжевой и голубой областях, как показано на рис. 5.

В табл. 1 приведены результаты расчетов вклада солнечного излучения в сигнал научной аппаратуры на границе атмосферы и в условиях наземного эксперимента. $\nu_{\text{макс}}$ — центральная частота пропускания оптического тракта данного канала (ТГц). $U_{\text{п1}}$ — усредненный сигнал наведенного на Солнце приемника (Вт). $U_{\text{п2}}$ — усредненный сигнал отвернутого от Солнца приемника (Вт). $\alpha = 1 - U_{\text{п2}}/U_{\text{п1}}$ — оценка доли солнечного излучения в детекторах (отн. ед.). $T_{\text{н}}$ — эффективная яркостная температура неба (°С) по данным датчика облачности, которая служит обратной мерой прозрачности атмосферы в инфракрасном диапазоне. При этом данный параметр представляет собой интегральное значение, зависящее от множества факторов, включая температурный профиль атмосферы, содержание водяного пара, наличие облачности, аэрозолей и т.д. Поэтому эффективная яркостная температура неба является лишь ориентировочным показателем.

Поскольку во время проведения измерений облачность отсутствовала, рост $T_{\text{н}}$, вероятно, связан с накоплением водяного пара в нижних слоях атмосферы и/или присутствием слабо выраженной аэрозольной дымки, что приводит к снижению прозрачности атмосферы в инфракрасном диапазоне.

Можно сделать вывод, что в течение эксперимента погодные условия постепенно ухудшались, поэтому, в частности, для каналов №№ 7–8 результаты эксперимента могут быть несколько заниженными относительно измерений для канала № 1.

В табл. 2 приведены результаты расчетов потоков солнечного излучения, поступающих в приемники научной аппаратуры на границе атмосферы и в условиях наземного эксперимента. $\nu_{\text{макс}}$ — центральная частота пропускания оптического тракта данного канала (ТГц). $\Phi_{\text{косм}}(\nu)$ — поток солнечного излучения, поступающего в приемник научной аппаратуры на границе атмосферы во время орбитального полета (Вт), рассчитанный в диапазоне частот $\nu_1 = 0.01$ ТГц и $\nu_2 = 2000$ ТГц (формула (11)) можно записать как

$$\Phi_{\text{косм}} = S_{\text{тел}} \int_{\nu_1}^{\nu_2} r_{\text{ASTME}}(\nu) t_{\text{от}}(\nu) d\nu. \quad (11)$$

$\Phi_{\text{атм}}(\nu, \theta)$ — поток солнечного излучения (Вт), поступающего в приемник научной аппаратуры с учетом влияния атмосферы и зенитного угла, рассчитанный в диапазоне частот $\nu_1 = 0.01$ ТГц и $\nu_2 = 2000$ ТГц (формула (12)). $\beta = \Phi_{\text{косм}}(\nu)/\Phi_{\text{атм}}(\nu, \theta)$ — расчетное отношение потока солнечного излучения в детекторах на границе атмосферы к потоку солнечного излучения при наземных измерениях. $U_{\text{атм}}$ — сигнал приемников при наземных измерениях фонового солнечного сигнала (мВ) по данным за 1 мая 2024 г. в интервале 14:17–14:32 по московскому времени. В измеренных значениях сигнала приемников была учтена температурная поправка (Филиппов и др., 2024б), а итоговое значение $U_{\text{атм}}$ получено усреднением данных за указанный временной интервал. $U_{\text{косм}} = \alpha\beta U_{\text{атм}}$ — оценка величины сигнала приемников летного образца научной аппаратуры (мВ) на основании данных наземных экспериментов.

$$\Phi_{\text{атм}}(\nu, \theta) = S_{\text{тел}} \int_{\nu_1}^{\nu_2} r_{\text{ASTME}}(\nu) t_{\text{рез}}(\nu, \theta) d\nu. \quad (12)$$

Таблица 2. Результаты расчетов потоков солнечного излучения, поступающих в приемники научной аппаратуры на границе атмосферы и в условиях наземного эксперимента

Канал, №	$v_{\text{макс}}$, ТГц	$\Phi_{\text{косм}}(v)$, Вт	$\Phi_{\text{атм}}(v, \theta)$, Вт	β , отн. ед.	$U_{\text{атм}}$, мВ	$U_{\text{косм}}$, мВ	$U_{\text{шум}}$, мВ	γ , %
1	0.40	4.01×10^{-7}	4.74×10^{-9}	84.62	344.94	583.78	2.22	0.38
2	0.68	2.73×10^{-7}	3.71×10^{-9}	73.45	1144.85	840.89	2.15	0.26
3	0.98	3.57×10^{-7}	5.70×10^{-9}	62.66	734.07	919.94	2.15	0.23
4	2.90	1.02×10^{-6}	6.77×10^{-9}	151.21	940.85	1707.19	1.92	0.11
5	4.84	3.13×10^{-6}	1.54×10^{-8}	203.52	519.31	2430.87	2.22	0.09
6	6.61	3.61×10^{-6}	1.30×10^{-8}	277.50	478.36	2920.39	2.15	0.07
7	9.69	3.13×10^{-6}	1.49×10^{-8}	210.23	819.32	1033.47	2.15	0.21
8	11.16	3.23×10^{-6}	2.46×10^{-8}	131.39	436.19	401.18	1.92	0.48

$U_{\text{шум}}$ — измеренная с выхода приемника величина собственных шумов (мВ) (Филиппов и др., 2025), скорректированная с учетом передаточного коэффициента на плате электроники (Филиппов и др., 2024а,) научной аппаратуры, подобранно-

го для каждого канала. $\gamma = \frac{U_{\text{шум}}}{U_{\text{косм}}} \times 100\%$ — отно-

шение собственных шумов приемника к фоновому солнечному сигналу. Так как для надежного детектирования вклад вспышечной компоненты ($U_{\text{вспыш}}$) в сигнал приемника должен превышать

его собственные шумы: $\frac{U_{\text{вспыш}}}{U_{\text{шум}}} > 1$, следовательно-

но, а является оценкой минимального регистрируемого вспышечного сигнала для данного канала.

В работе (Kontar и др., 2018) рассматриваются аномальные спектры солнечных вспышек в субтерагерцевом диапазоне: 0.2–0.4 ТГц по данным SST (Kaufmann и др., 2004), при которых наблюдается возрастание интенсивности с увеличением частоты. При этом во время солнечных вспышек класса X возможны возрастания потока излучения на частоте 0.4 ТГц вплоть до $1\text{--}5 \times 10^4$ SFU ($1 \text{ SFU} = 10^{-22} \text{ Вт м}^{-2} \text{ Гц}^{-1}$). Такие существенные возрастания потока излучения не могут быть объяснены исключительно тормозным излучением. В этой связи рассматриваются различные нетепловые механизмы. В работе (Fleishman, Kontar, 2010) предложены альтернативные источники субтерагерцевого компонента, включая синхротронное излучение релятивистских частиц, а также диффузионное и черенковское излучение. В работе (Silva и др.,

2007) показано, что в ряде вспышек класса X субтерагерцевая компонента коррелирует с высокоэнергетическим рентгеновским излучением, что свидетельствует в пользу синхротронного излучения нетепловых электронов. С другой стороны, в работе (Kontar и др., 2018) предложена модель теплового свободно-свободного излучения (“free-free emission”) из вспышечных лент (“flare ribbons”) с температурами $10^4\text{--}10^6$ К, способную воспроизводить возрастающий с частотой спектр. В работе (Trottet и др., 2015) на примере вспышки 13 марта 2012 г. для частоты 30 ТГц показано, что основная часть излучения является тепловым, однако эта эмиссия — следствие нагрева плазмы потоком нетепловых частиц.

Согласно модели ASTM E490–22, поток излучения от спокойного Солнца $\Phi_{\text{ASTME}}(0.4 \text{ ТГц}) \approx 208000 \text{ SFU}$, а отношение

$$\delta = \frac{\Phi_{\text{вспыш}}(0.4 \text{ ТГц})}{\Phi_{\text{ASTME}}(0.4 \text{ ТГц})} \times 100\%$$

таким образом достигает значения 24%. С учетом оценки для γ , минимально возможное значение δ , надежно регистрируемое научной аппаратурой, составляет 790 SFU. Для частотного диапазона 0.8–12.0 ТГц экспериментальные данные отсутствуют, поэтому для остальных каналов научной аппаратуры оценка возможных потоков во время вспышечной активности не приводится.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным наземных калибровок научной аппаратуры “Солнце-Терагерц”, выполнена оценка сигналов приемников во время орбитального эксперимента. Расчет атмосферного

поглощения включает в себя учет молекулярного поглощения (основной вклад), рэлеевского рассеяния и рассеяния по теории Ми, а также учет зенитного угла Солнца. Следует отметить, что калибровка детекторов научной аппаратуры “Солнце-Терагерц” в условиях наземного эксперимента, в основном, осуществляется излучением в примерном диапазоне 14–19 ТГц, так как целевое излучение в диапазоне частот 0.4–12 ТГц, с учетом характеристик детекторов и спектра пропускания атмосферы, практически не вносит вклад в сигнал приемников.

Для оценки величины вклада солнечного излучения в сигнал научной аппаратуры при наземных калибровках на фоне атмосферного излучения использован одноканальный макет детектора, установленный на поворотную платформу. Измерения проводились дифференциальным методом.

Проведена оценка величин минимальных возрастных потоков излучения от Солнца, надежно регистрируемых (превышающие собственные шумы на выходе приемников научной аппаратуры) научной аппаратурой с учетом собственных шумов приемников. В условиях орбитального эксперимента и в зависимости от частоты детектирующего канала регистрируемый сигнал солнечной вспышки или активной области должен превышать характерную величину 0.07%–0.48% от излучения спокойного Солнца. Следует отметить, что данный расчет является предварительной оценкой чувствительности научной аппаратуры, а ее фактические характеристики могут существенно отличаться от расчетных из-за невозможности учесть все влияющие факторы при интерпретации результатов атмосферных измерений на будущие внеатмосферные измерения.

Полученные результаты представляют интерес для будущих наземных терагерцевых наблюдений, особенно в атмосферных окнах прозрачности.

Работа финансировалась за счет бюджета Физического института имени П.Н. Лебедева РАН. Никаких дополнительных грантов для выполнения этого исследования не получено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин Е.В., Филиппов М.В., Махмутов В.С., Максумов О.С., Стожков Ю.И., Квашинин А.А., Измайлов Г.Н., Озолин В.В. Исследование характеристик детектора терагерцевого излучения для научной аппаратуры “Солнце-Терагерц” // Космич. исслед. 2021. Т. 59. № 1. С. 3–8. <https://doi.org/10.31857/S0023420621010040>
2. Квашинин А.А., Логачев В.И., Филиппов М.В., Махмутов В.С., Максумов О.С., Стожков Ю.И., Калинин Е.В., Орлов А.А., Озолин В.В., Измайлов Г.Н., Криволапова О.Ю., Гайфутдинова А.Г. Оптическая система прибора для измерения солнечного терагерцевого излучения // Космич. техника и технологии. 2021. Т. 4. № 35. С. 22–30. <https://www.elibrary.ru/hgxxgn>
3. Кропотов Г., Кауфманн П. Терагерцевые фотометры для наблюдений солнечных вспышек из космоса // Фотоника. 2013. Т. 5. № 41. С. 40–50.
4. Кропотов Г.И., Шахмин А.А., Каплунов И.А., Роголин В.Е. Применение спектральных приборов в оптическом производстве и научных исследованиях // Фотоника. 2023. Т. 5. № 17. С. 378–393. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2023.17.5.378.392>
5. Махмутов В.С., Курт В.Г., Юшков Б.Ю., Гречнев В.В., Кауфманн П., Ролан Ж.-П., Базилевская Г.А., Стожков Ю.И. Спектральные особенности высокоэнергичного рентгеновского, гамма-излучения и субмиллиметрового радиоизлучения в импульсной фазе солнечной вспышки // Изв. Российской академии наук. Сер. физич. 2011. Т. 75. № 6. С. 796–799.
6. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 4. Оптика. М.: Физматлит МФТИ, 2002. 792 с.
7. Филиппов М.В., Махмутов В.С., Максумов О.С., Квашинин А.А., Калинин Е.В., Логачев В.И., Гайфутдинова А.Г., Криволапова О.Ю., Соков С.В., Мизин С.В. Исследование температурного эффекта резонансных оптических прерывателей в космической научной аппаратуре // Космич. техника и технологии. 2023. Т. 1. № 40. С. 30–40. <https://www.elibrary.ru/wzamjn>
8. Филиппов М.В., Махмутов В.С., Максумов О.С., Квашинин А.А., Квашинин А.Н., Разумейко М.В., Логачев В.И., Мизин С.В., Соков С.В. Блок электроники для научной аппаратуры “Солнце-Терагерц” // Приборы и техника эксперимента. 2024а. № 3. С. 108–117.
9. Филиппов М.В., Махмутов В.С., Разумейко М.В. Научная аппаратура для космического эксперимента “Солнце-Терагерц”: исследование температурного эффекта ячейки Голя // Измерит. техника. 2024б. № 3. С. 20–25. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2024-3-20-25>
10. Филиппов М.В., Махмутов В.С., Разумейко М.В., Кропотов Г.И., Николаев В. А. Методика проверки спектральной чувствительности оптических трактов космической научной аппаратуры

- “Солнце-Терагерц” в диапазоне частот 0.4–20 ТГц // *Астрон. вестн.* 2025. Т. 59. № 2. С. 148–155. <https://doi.org/10.31857/S0320930X25020038> (*Philippov M.V., Makhmutov V.S., Razumeyko M.V., Kropotov G.I., Nikolaev V.A.* Method for checking the spectral sensitivity of optical paths of the Sun Terahertz scientific instrumentation in the frequency range 0.4–20 THz // *Sol Syst Res.* 2025. V. 59. № 26. <https://doi.org/10.1134/S0038094624601683>).
11. *Bohren C.F., Huffman D.R.* Absorption and scattering of light by small particles. New York: Wiley, 1983. 530 p.
 12. *Bond T.C., Bergstrom R.W.* Light absorption by carbonaceous particles: An investigative review // *Aerosol Sci. and Technol.* 2006. V. 40. № 1. P. 27–67. <https://doi.org/10.1080/02786820500421521>
 13. *Davila J.M., Rust D.M., Pizzo V.J., Liewer P.C.* Solar Terrestrial Relations Observatory (STEREO) // *Proc. SPIE's 1996 Int. Symp. Optical Sci. Engineering and Instrumentation.* V. 2804. Missions to the Sun. 1996. <https://doi.org/10.1117/12.259724>
 14. *Domingo V., Fleck B., Poland A.I.* SOHO: The Solar and Heliospheric Observatory // *Space Sci. Rev.* 1995. V. 72. P. 81–84. <https://doi.org/10.1007/BF00768758>
 15. *Fleishman G.D., Kontar E.P.* Sub-THz radiation mechanisms in solar flares // *Astrophys. J. Lett.* 2010. V. 709. № 2. P. L127–132. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/709/2/L127>
 16. *Giménez de Castro C.G., Raulin J.P., Valio A. Alaia G., Alvarenga V., Bortolucci E.C., Fernandes S.H., Francile C., Giorgetti T., Kudaka A.S., López F.M., and 3 co-authors* HATS: A ground-based telescope to explore the THz domain // *Sol. Phys.* 2020. V. 295. № 4. ID 56. <https://doi.org/10.1007/s11207-020-01621-3>
 17. *Hale G.M., Querry M.R.* Optical constants of water in the 200-nm to 200- μ m wavelength region // *Appl. Optics.* 1973. V. 12. № 3. P. 555–563. <https://doi.org/10.1364/AO.12.000555>
 18. *Hayasaka T., Murayama T., Shimizu A., Sugimoto N.* Vertical distribution and optical properties of aerosols observed over Japan during the Atmospheric Brown Clouds–East Asia Regional Experiment 2005 // *J. Geophys. Res.: Atmospheres.* 2007. V. 112. № D22. ID D22S35. <https://doi.org/10.1029/2006JD008086>
 19. *Howard R.A., Vourlidas A., Korendyke C.M., Plunkett S.P., Carter M.T., Wang D., Rich N., Lynch S., Thurn A., Socker D.G., and 37 co-authors.* The solar and heliospheric imager (SoloHI) instrument for the Solar Orbiter mission // *Sol. Phys. and Space Weather Instrument.* 2013. V. 8862. ID 88620H. <https://doi.org/10.1117/12.2027657>
 20. *Hussein T., Martikainen J., Junninen H., Sogacheva L., Wagner R., Dal Maso M., Riipinen I., Aalto P.P., Kulmala M.* Observation of regional new particle formation in the urban atmosphere // *Tellus B: Chemical and Phys. Meteorology.* 2008. V. 60 № 4. P. 509–521. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2008.00365.x>
 21. *Kasten F., Young P.J.* Revised optical air mass tables and approximation formula // *Appl. Optics.* 1989. V. 28. № 22. P. 4735–4738. <https://doi.org/10.1364/AO.28.004735>
 22. *Kaufmann P., Raulin J.-P., de Castro C.G.G., Levato H., Gary D.E., Costa J.E.R., Marun A., Pereyra P., Silva A.V.R., Correia E.* A new solar burst spectral component emitting only in the terahertz range // *Astrophys. J.* 2004. V. 603. P. L121–L124. <https://doi.org/10.1086/383186>
 23. *Kaufmann P., Correia E., Costa J.E.R., Zodi Vaz A.M., Dennis B.R.* Solar burst with millimetre-wave emission at high frequency only // *Nature.* 1985. V. 313. P. 380–382. <https://doi.org/10.1038/313380a0>
 24. *Kaufmann P.* Submillimeter/IR solar bursts from high energy electrons // *Proc. AIP Conf.* 1996. V. 374. P. 379–392. <https://doi.org/10.1063/1.50945>
 25. *Kaufmann P., Costa J.E.R., Gimenez De Castro C.G., Hadano Y.R., Kingsley J.S., Kingsley R.K., Levato H., Marun A., Raulin J.-P., Rovira M., Correia V., Silva A.V.R.* The new submillimeter-wave solar telescope // *Proc. 2001 SBMO/IEEE MTT-S Int. Microwave and Optoelectron. Conf.* 2001. P. 439–442. <https://doi.org/10.1109/SBMOMO.2001.1008800>
 26. *Kaufmann P., Castro C.G.G., Makhmutov V.S., Raulin J.-P., Schwenn R., Levato H., Rovira M.* Launch of solar coronal mass ejections and submillimeter pulse bursts // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № A7. ID 1280. <https://doi.org/10.1029/2002JA009729>
 27. *Kaufmann P., Marcon R., Abrantes A., Bortolucci E.C., Fernandes L.O.T., Kropotov G.I., Kudaka A.S., Machado N., Marun A., Nikolaev V., and 3 co-authors.* THz photometers for solar flare observations from space // *Exp. Astron.* 2014. V. 37. P. 579–598. <https://doi.org/10.1007/s10686-014-9389-y>
 28. *Kaufmann P., White S.M., Marcon R., Kudaka A.S., Cabezas D.P., Cassiano M.M., Francile C., Fernandes L.O.T., Hidalgo Ramirez R.F., Luoni M., and 3 co-authors.* Bright 30 THz impulsive solar bursts // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015. V. 120. P. 4155–4163. <https://doi.org/10.1002/2015JA021313>
 29. *Kinnison J., Vaughan R., Hill P., Raouafi N., Guo Y., Pinkine N.* Parker Solar Probe: A mission to touch the Sun // *IEEE Aerospace Conf.* 2020. P. 1–14. <https://doi.org/10.1109/AERO47225.2020.9172703>

30. Kochanov R.V., Gordon I.E., Rothman L.S., Wcislo P., Hill C., Wilzewski J.S. HITRAN Application Programming Interface (HAPI): A comprehensive approach to working with spectroscopic data // *J. Quantitat. Spectrosc. and Radiative Transfer*. 2016. V. 177. P. 15–30.
<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.03.005>
31. Kontar E.P., Motorina G.G., Jeffrey N.L.S., Tsap Y.T., Fleishman G.D., Stepanov A.V. Frequency rising sub-THz emission from solar flare ribbons // *Astron. and Astrophys.* 2018. V. 620. ID A95.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834124>
32. Krucker S., Castro C.G.G., Hudson H.S., Trotter G., Bastian T.S., Hales A.S., Kašparová J., Klein K.-L., Kretschmar M., Lüthi T., and 3 co-authors. Solar flares at submillimeter wavelengths // *Astron. and Astrophys. Rev.* 2013. V. 21. ID 58.
<https://doi.org/10.1007/s00159-013-0058-3>
33. Li Q.-Q., Guo Y.-T., Yang J.-Y., Liang C.-S. Review on main sources and impacts of urban ultrafine particles: Traffic emissions, nucleation, and climate modulation // *Atmosph. Environment: X*. 2023. V. 9. ID 100221.
<https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2023.100221>
34. Lüthi T., Magun A., Miller M. First observation of a solar X-class flare in the submillimeter range with KOSMA // *Astron. and Astrophys.* 2004. V. 415. P. 1123–1132.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361:20034624>
35. Makhmutov V.S., Raulin J.P., Castro C.G.G., Kaufmann P., Correia E. Wavelet decomposition of submillimeter solar radio bursts // *Sol. Phys.* 2003. V. 218. P. 211–220.
<https://doi.org/10.1023/B:SOLA.0000013047.26419.33>
36. Malitson I.H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica // *J. Optical Soc. America*. 1965. V. 55. № 10. P. 1205–1209.
<https://doi.org/10.1364/JOSA.55.001205>
37. Morakinyo O.M., Mokgobu M.I., Mukhola M.S., Hunter R.P. Health outcomes of exposure to biological and chemical components of inhalable and respirable particulate matter // *Int. J. Environ. Res. and Public Health*. 2016. V. 13. № 6. ID 592.
<https://doi.org/10.3390/ijerph13060592>
38. Petty G.W. A first course in atmospheric radiation. Madison: Sundog Publishing, 2006. 68 p.
39. Silva A.V.R., Share G.H., Murphy R.J., Costa J.E.R., Giménez de Castro C.G., Raulin J.-P., Kaufmann P. Evidence that synchrotron emission from nonthermal electrons produces the increasing submillimeter spectral component in solar flares // *Sol. Phys.* 2007. V. 245. № 2. P. 311–326.
<https://doi.org/10.1007/s11207-007-9044-0>
40. Sneep M., Ubachs W. Direct measurement of the Rayleigh scattering cross section in various gases // *J. Quantitat. Spectrosc. and Radiative Transfer*. 2005. V. 92. № 3. P. 293–310.
<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2004.07.025>
41. Rayleigh J.W. On the light from the sky, its polarization and color // *Philosoph. Magazine*. 1871. V. 41. № 4. P. 107–120.
42. Rothman L.S. History of the HITRAN Database // *Nature Rev. Phys.* 2021. V. 3. P. 302–304.
<https://doi.org/10.1038/s42254-021-00309-2>
43. Slocum D.M., Slingerland E.J., Giles R.H., Goyette T.M. Atmospheric absorption of terahertz radiation and water vapor continuum effects // *J. Quantitat. Spectrosc. and Radiative Transfer*. 2013. V. 127. P. 49–63.
<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.04.022>
44. Sumlin B.J., Pandey A., Walker M.J., Pattison R.S., Williams B.J., Chakrabarty R.K. Atmospheric photooxidation diminishes light absorption by primary brown carbon aerosol from biomass burning // *Environment. Sci. and Technol. Lett.* 2017. V. 4. № 12. P. 540–545.
<https://doi.org/10.1021/acs.estlett.7b00393>
45. Sumlin B.J., Heinson W.R., Chakrabarty R.K. Retrieving the aerosol complex refractive index using PyMieScatt: A Mie computational package with visualization capabilities // *J. Quantitat. Spectrosc. and Radiative Transfer*. 2018a. V. 205. P. 127–134.
<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.10.012>
46. Sumlin B.J., Heinson Y.W., Shetty N., Pandey A., Pattison R.S., Baker S., Hao W.M., Chakrabarty R.K. UV–Vis–IR spectral complex refractive indices and optical properties of brown carbon aerosol from biomass burning // *J. Quantitat. Spectrosc. and Radiative Transfer*. 2018b. V. 206. P. 392–398.
<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.12.009>
47. Trotter G., Raulin J.-P., Mackinnon A., Giménez de Castro G., Simões P.J.A., Cabezas D., de La Luz V., Luoni M., Kaufmann P. Origin of the 30 THz emission detected during the solar flare on 2012 March 13 at 17:20 UT // *Sol. Phys.* 2015. V. 290. № 10. P. 2809–2826.
<https://doi.org/10.1007/s11207-015-0782-0>
48. Wedemeyer S., Bastian T., Brajša R., Hudson H., Fleishman G., Loukitcheva M., Fleck B., Kontar E.P., De Pontieu B., Yagoubov P., and 28 co-authors. Solar science with the Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array — A new view of our Sun // *Space Sci. Rev.* 2016. V. 200. P. 1–73.
<https://doi.org/10.1007/s11214-015-0229-9>
49. U.S. Standard Atmosphere, 1976. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1976. 227 p.