

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 53.082

**РЕГИСТРАЦИЯ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АТМОСФЕРНОМ
ОКНЕ ПРОЗРАЧНОСТИ 8–14 мкм ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДЕЛА ПО НАУЧНОЙ АППАРАТУРЕ
“СОЛНЦЕ-ТЕРАГЕРЦ”**

**© 2026 г. М. В. Филиппов^{а, *}, В. С. Махмутов^а, Г. И. Кропотов^б,
А. А. Шахмин^б, В. К. Ильясов^б, М. В. Разумейко^а, Е. Д. Тульников^а,
С. В. Соков^а**

^а*Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук*

Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

^б*ООО “Тидекс”*

Россия, 194292, Санкт-Петербург, Домостроительная ул., 16

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

Поступила в редакцию 02.12.2025 г.

После доработки 11.12.2025 г.

Принята к публикации 12.01.2026 г.

На борту российского сегмента Международной космической станции с 2026 г. готовится к проведению космический эксперимент “Солнце-Терагерц”. Цели эксперимента – получение данных о терагерцевом излучении Солнца, а также изучение солнечных активных областей и солнечных вспышек в диапазоне 0.4–12.0 ТГц. Приведены предварительные экспериментальные результаты по измерению солнечного излучения в атмосферном окне прозрачности 8–14 мкм (примерно 20–40 ТГц) с помощью наземной установки на базе детектора, аналогичного применяемому в научной аппаратуре “Солнце-Терагерц”.

1. ВВЕДЕНИЕ

Наземные и внеатмосферные наблюдения охватывают почти весь солнечный спектр [1–4], за исключением терагерцевого диапазона (около 1–30 ТГц), недоступного наземному наблюдателю из-за сильного атмосферного поглощения, кроме узкого атмосферного окна прозрачности около 30 ТГц [5]. Для регистрации солнечного излучения в диапазоне 0.4–12 ТГц разработан космический эксперимент “Солнце-Терагерц” [6], направленный на получение данных, необходимых для уточнения моделей генерации мощных протонных вспышек и их прогнозирования [7–15].

Многодиапазонные наблюдения солнечных вспышек позволяют исследовать процессы в различных слоях солнечной атмосферы; в частности, субмиллиметровый диапазон информативен для изучения ускорения и переноса энергичных электронов в переходной зоне и хромосфере [16]. Для ряда вспышек зарегистрирована дополнительная спектральная компонента – возрастание потоков гиротропного излучения на частотах 212, 405 ГГц и выше вопреки ожидаемому убыванию [7, 12].

Ожидаемые результаты эксперимента включают получение новых данных о спектре солнечного излучения в диапазоне 1–10 ТГц, что позволит выявить природу аномального роста высокочастотной компоненты, а также определить частоты “перегибов”, на которых меняется наклон спектра при различных типах вспышек.

Разработанная научная аппаратура включает восемь детекторов – на частоты 0.4, 0.7, 1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 10.0 и 12.0 ТГц. Каждый детектор содержит оптический телескоп для концентрации излучения [17], каскад фильтров, обеспечивающих частотную селективность [18], оптический прерыватель для модуляции входного сигнала [19], а также приемный тракт на основе оптоакустического преобразователя (ОАП) (ячейки Голея) и усилителя [20]. Электронная часть научной аппаратуры описана в статье [21]. Старт космического эксперимента “Солнце-Терагерц” на борту МКС намечен на 2026 г.

Целью настоящей работы является экспериментальное тестирование чувствительности и стабильности приемного тракта научной аппаратуры на базе ОАП и отработка методики регистрации солнечного излучения с использованием наземной установки, работающей в атмосферном окне 8–14 мкм (около 20–40 ТГц). В настоящей работе измерялись лишь фоновые значения излучения Солнца без регистрации вспышечных событий. Соответственно, полученные сигналы отражают не вспышечную активность, а локальные условия прозрачности атмосферы, что ограничивает интерпретацию данных рамками тестирования приемного тракта.

Следует отметить, что наземные наблюдения солнечного излучения на частотах примерно 20–40 ТГц остаются редкостью: в литературе описаны лишь единичные события, например, вспышки на частоте 30 ТГц, выполненные на специализированных установках [22–24]. Таким образом, данная работа направлена на валидацию чувствительности и стабильности приемного тракта в реальных атмосферных условиях, в ней предоставляется полезная информация о порогах регистрации, при этом она не предназначена для количественного мониторинга солнечной активности.

Для проведения наземных измерений использовался одноканальный макет – устройство, внутри которого устанавливаются телескоп, фильтры и приемник. Для ориентации одноканального макета на Солнце изготовлена поворотная платформа. В состав

платформы входит датчик облачности на базе инфракрасного (ИК) термометра MLX90614 [25], который используется для определения проницаемости атмосферы. Точность термометра составляет 0.5 °С. Апертура $\omega = 35^\circ$. Для проверки стабильности и корректности регистрации ИК-сигнала выполнено сравнение данных наземной установки с измерениями MLX90614.

2. НАЗЕМНАЯ УСТАНОВКА

В августе 2025 г. на территории ДНС ФИАН проведена серия измерений на одноканальном макете [26] с использованием германиевого фильтра в оптическом тракте детектора. Цели эксперимента заключались в определении чувствительности детектора для возможного непрерывного мониторинга Солнца в инфракрасном окне прозрачности: детектор на частоту 30 ТГц может использоваться как наземное дополнение к основной научной аппаратуре “Солнце-Терагерц”.

Фильтр (рис. 1) изготовлен в ООО “Тидекс” и представляет собой клиновидное окно из германия n-типа с удельным сопротивлением 3.05 Ом·см с нанесенными с двух сторон оптическими покрытиями. Первая (внутренняя, обращенная в сторону входного окна приемника) сторона покрыта спектральным фильтром, блокирующим излучение с длиной волны менее 6 мкм и обеспечивающим высокое пропускание в диапазоне 8–14 мкм. Таким образом, фильтр обеспечивает селективность и уменьшает влияние коротковолновых фоновых сигналов, что критично для повышения чувствительности детектора. Вторая (обращенная наружу из приемника) сторона покрыта широкополосным просветляющим (BBAR, Broadband Anti-Reflective) покрытием, оптимизированным для диапазона 8–14 мкм. Поверхности элемента обладают точностью 5λ на длине волны 633 нм и соответствуют классу чистоты 60/40. Клиновидная геометрия (24') служит для предотвращения обратных отражений и паразитных интерференционных эффектов, что особенно актуально в высокочувствительных инфракрасных системах. Такое сочетание покрытий обеспечивает высокое пропускание полезного сигнала при минимальных потерях на отражение.

Рис. 1. Фотография германиевого фильтра Ge D25.4×4.8 мм HR Filter BBAR 8–12 мкм...

Технические характеристики фильтра следующие.

Материал: германий (Ge) n-типа с удельным сопротивлением 3.05 Ом·см.

Геометрические параметры: диаметр 25.3±0.1 мм, толщина 4.8±0.1 мм, клиновидность 24'.

Оптические покрытия.

Сторона А (внутренняя): спектральный фильтр, блокирующий излучение с длиной волны менее 6 мкм, высокое пропускание в диапазоне 8–14 мкм.

Страна Б (внешняя): широкополосное просветляющее покрытие (BBAR) в диапазоне 8–14 мкм.

Качество поверхности: точность поверхности 5λ на длине волны 633 нм, класс чистоты поверхности 60/40 (scratch/dig).

На рис. 2 приведен график спектрального коэффициента $t_{Ge}(v)$ пропускания германиевого фильтра.

Рис. 2. Спектр пропускания германиевого фильтра в диапазоне 0–50 ТГц

В одноканальный макет были установлены приемник с ОАП GC-1P, входное окно которого изготовлено из HDPE [27], и оптический прерыватель. В телескопе использованы гладкие зеркала. Отрезающий LPF23.1 фильтр не устанавливался. Сигнал приемника поступает на вход USB-осциллографа АКПП-72204А.

Для данной конфигурации оптического тракта коэффициент пропускания (рис. 3) выражается формулой

$$t_{Ge\text{ рез}}(v, \theta) = t_{атм}(v)^{M(\theta)} \rho_3^2(v) t_{HDPE}(v) t_{Ge}(v) diff(v), \quad (1)$$

где $t_{атм}$ – спектральный коэффициент пропускания атмосферы, M – воздушная масса [26], θ – зенитный угол в градусах, ρ_3 – спектральный коэффициент отражения зеркал в телескопе, t_{HDPE} – спектральный коэффициент пропускания входного окна HDPE, t_{Ge} – спектральный коэффициент пропускания германиевого фильтра, $diff$ – спектральный коэффициент, характеризующий дифракционные потери в телескопе (все переменные, за исключением зенитного угла, приведены в относительных единицах).

Рис. 3. Спектральный коэффициент пропускания оптического тракта детектора при использовании германиевого фильтра

Результаты пробных измерений показали, что в данной конфигурации детектора плата усилителя в приемнике находится в режиме насыщения. Чтобы не вносить изменения на плату усилителя, для ослабления потока излучения, поступающего в приемник, в оптический тракт детектора дополнительно было установлено входное окно из TRX [28] толщиной 2 мм.

Спектральный коэффициент пропускания оптического тракта в данной конфигурации выражается формулой

$$t_{Ge\text{ TRX рез}}(v, \theta) = t_{Ge\text{ рез}}(v, \theta) t_{TRX}(v), \quad (2)$$

где $t_{Ge\text{ TRX рез}}$ [отн. ед.] – результирующий спектральный коэффициент пропускания оптического тракта одноканального макета детектора при установленном входном окне из TRX.

На рис. 4 приведен график $t_{Ge\text{ TRX рез}}(v)$ в диапазоне частот 0.01–50 ТГц с учетом атмосферного поглощения (при $\theta = 90^\circ$).

Рис. 4. Спектральный коэффициент пропускания оптического тракта при установленных германиевом фильтре

На графике видно, что в диапазоне 22–31 ТГц формируются 4–5 окон, в которых детектор регистрирует солнечное излучение. Кроме того, детектор чувствителен к излучению в диапазоне 16–19 ТГц, что коррелирует с результатами, приведенными в работе [26], где при наземных измерениях с использованием полосовых фильтров на 0.4–12 ТГц в приемник в основном поступает излучение в диапазоне частот 14–19 ТГц.

Снижение чувствительности детектора вследствие установки входного окна ТРХ можно оценить, как отношение расчетных потоков излучения от Солнца для обеих конфигураций оптических трактов:

$$\alpha = \frac{\Phi_{\text{Ge рез}}(\nu, \theta)}{\Phi_{\text{Ge ТРХ рез}}(\nu, \theta)} = \frac{S_{\text{тел}} \int_{\nu_1}^{\nu_2} r_{\text{E490-22}}(\nu) t_{\text{Ge рез}}(\nu, \theta) d\nu}{S_{\text{тел}} \int_{\nu_1}^{\nu_2} r_{\text{E490-22}}(\nu) t_{\text{Ge ТРХ рез}}(\nu, \theta) d\nu}, \quad (3)$$

где $\Phi_{\text{Ge рез}}$ – поток солнечного излучения, поступающего в приемник детектора; $\Phi_{\text{Ge ТРХ рез}}$ – поток солнечного излучения, поступающего в приемник детектора при установленном входном окне ТРХ; $r_{\text{E490-22}}$ [Вт/(м²·Гц)] – энергетическая светимость Солнца, рассчитанная по модели ASTM E490-22 [29]; $S_{\text{тел}} = 3.84 \cdot 10^{-3}$ м² – площадь входного окна телескопа. Согласно данным библиотеки Astropy [30], зенитный угол для данного времени $\theta = 42.60^\circ$, а воздушная масса $M(\theta) = 1.42$. При $\nu_1 = 0.01$, $\nu_2 = 2000$ ТГц с шагом интегрирования 0.01 ТГц для данного эксперимента $\alpha = 63.84$ отн. ед.

3. ИЗМЕРЕНИЯ

15 августа 2025 г., начиная с 11:49 по московскому времени, были проведены эксперименты по измерению доли солнечного излучения в полном сигнале приемника. Одноканальный макет был ориентирован на Солнце таким образом, чтобы в некоторый момент времени солнечный диск оказался полностью в апертуре телескопа, что будет соответствовать максимуму сигнала приемника.

На рис. 5 приведены результаты одного из измерений временного хода сигнала приемника $U_{\text{п}}$.

Рис. 5. Временной ход сигнала приемника для измерения солнечного излучения при использовании германиевого фильтра 15 августа 2025 г.

Апертура телескопа $\psi \approx 1.5^\circ$, следовательно, время нахождения солнечного диска в апертуре телескопа $t_{\text{сол}} = 84600 \text{ с} \cdot \psi / 360^\circ = 360 \text{ с}$.

По данным приемника, максимум сигнала отмечается при $t_{\text{max}} = 449.68 \text{ с}$ и равен $U_{\text{п max}} = 21029.04 \text{ мВ}$. На рис. 5 вертикальными штриховыми линиями показаны два интервала длительностью $t_{\text{сол}} = 360 \text{ с}$. Диапазон в максимуме выбран так, что его середина лежит в точке $t_{\text{сол}}$. Таким образом, данный интервал соответствует времени пребывания

солнечного диска в апертуре телескопа. Диапазон справа выбран как спокойный участок, соответствующий измерениям фона (в отсутствие Солнца в апертуре телескопа).

Среднее значение сигнала в интервалах максимума и минимума составляет соответственно $U_{п \max \text{cp}} = 20191.59$ мВ и $U_{п \min \text{cp}} = 2087.41$ мВ. Таким образом, отношение сигнал/шум приемника выражается формулой

$$SNR = \frac{U_{п \max \text{cp}} - U_{п \min \text{cp}}}{U_{п(\text{шум})}} \approx 471.33 \text{ отн. ед.}, \quad (4)$$

где $U_{п(\text{шум})} = 38.42$ мВ – средний шумовой сигнал, измеренный на приемнике при установленной алюминиевой заглушке во входном окне [31].

Поскольку чувствительность приемника была снижена в α раз, вследствие установки в оптический тракт входного окна ТРХ фактическое отношение сигнал/шум приемника $\alpha \cdot SNR \approx 30089.70$.

Принимая минимально детектируемый приемником сигнал равным $U_{п(\text{шум})}$, находим, что минимальное регистрируемое приемником возрастание потока солнечного излучения составляет $(\alpha \cdot \beta \cdot SNR)^{-1} \approx 0.003\%$, что, по данным модели ASTM E490, соответствует потоку солнечного излучения примерно 24000 SFU.

По данным работ [22–25] наземными установками ранее зарегистрированы возрастания потоков солнечного излучения от 322 SFU до 35000 SFU во время вспышечной активности. Таким образом, в текущей конфигурации с установленным германиевым фильтром детектор одноканального макета может быть достаточно чувствительным для регистрации некоторых событий классов M и X .

Для повышения чувствительности детектора можно уменьшить апертуру ψ телескопа и использовать сканирующую Солнце систему, либо использовать в приемнике ОАП с большей чувствительностью в целевом диапазоне частот, например, с ОАП GC-1D с алмазным входным окном [27].

На рис. 6 приведен график спектрального коэффициента пропускания $t_{D-Ge \text{ рез}}(v)$ оптического тракта детектора при установленном германиевом ТГц-фильтре при использовании ОАП GC-1D с алмазным входным окном. Для оценки чувствительности ОАП GC-1D относительно исходной GC-1P можно рассчитать следующим образом:

$$\beta = \frac{\Phi_{D-Ge \text{ рез}}(v, \theta)}{\Phi_{Ge \text{ рез}}(v, \theta)} = \frac{S_{\text{тел}} \int_{v_1}^{v_2} r_{E490-22}(v) t_{D-Ge \text{ рез}}(v, \theta) dv}{S_{\text{тел}} \int_{v_1}^{v_2} r_{E490-22}(v) t_{Ge \text{ рез}}(v, \theta) dv}, \quad (5)$$

где $\Phi_{D-Ge \text{ рез}}$ – поток солнечного излучения, поступающего в приемник с алмазным входным окном; $\Phi_{Ge \text{ рез}}$ – поток солнечного излучения, поступающего в приемник с входным окном из HDPE.

Рис. 6. Спектральный коэффициент пропускания оптического тракта с установленным германиевым фильтром

При $M(\theta) = 1.42$, $v_1 = 0.01$, $v_2 = 2000$ ТГц и шаге интегрирования имеем 0.01 ТГц, $\beta = 12.69$ отн. ед.

Таким образом, минимальное регистрируемое приемником с ОАП GC-1D возрастание потока солнечного излучения составляет $(\alpha \cdot \beta \cdot SNF)^{-1} \cdot 100\% \approx 0.00026\%$, что, по данным модели ASTM E490, соответствует потоку солнечного излучения примерно 1900 SFU.

Рассмотрим другое измерение, сделанное 15 августа 2025 г., но в более раннее время, начиная с 10:49 (рис. 7). В окрестности 200-й секунды наблюдается повышение температуры по данным термометра MLX90614, что можно трактовать как снижение прозрачности атмосферы вследствие появления облачности. Этому событию соответствует снижение уровня сигнала в детекторе, но более скоротечное, так как отношение апертур $\omega/\psi \approx 23$. Вероятно, также по причине меньшей апертуры (облачность не попала в поле зрения телескопа) повышение сигнала термометра MLX90614, наблюдающееся после 2100-й секунды, не внесло существенного вклада в величину сигнала приемника. Аналогичное событие происходило по данным термометра MLX90614 (рис. 7) примерно в интервале от 400 до 500 с.

Рис. 7. Временной ход сигнала приемника для второго измерения солнечного излучения при использовании германиевого фильтра 15 августа 2025 г.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены описание и конструкция научной аппаратуры “Солнце-Терагерц”, а также наземной измерительной установки, созданной на базе одноканального макета детектора данной аппаратуры с использованием полосового германиевого фильтра.

С помощью наземной установки выполнена серия измерений солнечного излучения на фоне атмосферного рассеяния.

Сопоставление временных рядов сигнала установки с данными ИК-термометра MLX90614 показало согласованную динамику, что подтверждает влияние локальных атмосферных условий на амплитуду регистрируемого излучения и корректность работы установки в наземных условиях.

На основании полученных экспериментальных данных и модели солнечного спектра ASTM E490-22 установлено, что в климатических условиях Московской области установка позволяет регистрировать возрастания потока солнечного излучения порядка 1900 SFU и выше, что соответствует солнечным вспышкам M- и X-классов.

Для повышения чувствительности системы возможна модернизация оптического тракта, а также внедрение механизма сканирования солнечного диска.

Представленная наземная установка в сочетании с системой автоматического слежения за Солнцем может служить дополнением к экспериментальным данным научной аппаратуры “Солнце-Терагерц”, и может также расширить рабочий диапазон наблюдений в область более высоких терагерцевых частот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kinnison J., Vaughan R., Hill P., Raouafi N., Guo Y., Pinkine N.* // IEEE Aerospace Conference. 2020. P. 1. <https://doi.org/10.1109/AERO47225.2020.9172703>
2. *Howard R.A., Vourlidas A., Korendyke C.M. et al.* // Solar Physics and Space Weather Instrumentation. 2013. V. 8862. <https://doi.org/10.1117/12.2027657>
3. *Domingo V., Fleck B., Poland A.I.* // Space Sci. Rev. 1995. V. 72. P. 81. <https://doi.org/10.1007/BF00768758>
4. *Davila J.M., Rust D.M., Pizzo V.J., Liewer P.C.* // Proc. SPIE. 1996. V. 2804. <https://doi.org/10.1117/12.259724>
5. *Kaufmann P., White S.M., Marcon R. et al.* // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2015. V. 120. P. 4155. <https://doi.org/10.1002/2015JA021313>
6. *Калинин Е.В., Филиппов М.В., Махматов В.С. и др.* // Космические исследования. 2021. Т. 59. № 1. С. 3. <https://doi.org/10.31857/S0023420621010040>
7. *Kaufmann P., Raullin J.-P., de Castro C.G.G. et al.* // Astrophys. J. 2004. V. 603. P. L121. <https://doi.org/10.1086/383186>
8. *Kaufmann P., Correia E., Costa J.E.R., Zodi Vaz A.M., Dennis B.R.* // Nature. 1985. V. 313. P. 380. <https://doi.org/10.1038/313380a0>
9. *Kaufmann P.* // AIP Conf. Proc. 1996. V. 374. P. 379. <https://doi.org/10.1063/1.50945>
10. *Kaufmann P., Costa J.E.R., Castro C.G.G. et al.* // Proc. of the 2001 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference. 2001. V. 1. P. 439. <https://doi.org/10.1109/SBMOMO.2001.1008800>
11. *Kaufmann P., Castro C.G.G., Makhmutov V.S. et al.* // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. P. 1280. <https://doi.org/10.1029/2002JA009729>
12. *Krucker S., Castro C.G.G., Hudson H.S. et al.* // Astron. Astrophys. Rev. 2013. V. 21. P. 58. <https://doi.org/10.1007/s00159-013-0058-3>
13. *Luthi T., Magun A., Miller M.* // A & A. 2004. V. 415. P. 1123. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20034624>

14. *Makhmutov V.S., Raulin J.P., Castro C.G.G., Kaufmann P., Correia E.* // *Solar Phys.* 2003. V. 218. P. 211. <https://doi.org/10.1023/B:SOLA.0000013047.26419.33>
15. *Махмутов В.С., Курт В.Г., Юшков Б.Ю. и др.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2011. Т.75. № 6. С. 796. <https://www.elibrary.ru/nxqnjp>
16. *Wedemeyer S., Bastian T, Brajša R. et al.* // *Space Sci. Rev.* 2016. V. 200. P. 1. <https://doi.org/10.1007/s11214-015-0229-9>
17. *Квашин А.А., Логачев В.И., Филиппов М.В. и др.* // *Космическая техника и технологии.* 2021. Т. 35. № 4. С. 22. <https://www.elibrary.ru/hgxxgn>
18. *Филиппов М.В., Логачев В.И., Махмутов В.С., Разумейко М.В., Гайфутдинова А.Г., Криволапова О.Ю.* // *Космическая техника и технологии.* 2024. Т. 45. № 2. С. 68. <https://www.elibrary.ru/xdheun>
19. *Филиппов М.В., Махмутов В.С., Максумов О.С. и др.* // *Космическая техника и технологии.* 2023. Т.40. № 1. С. 8. <https://www.elibrary.ru/wzamjn>
20. *Филиппов М.В., Махмутов В.С., Разумейко М.В.* // *Измерительная техника.* 2024. № 3. С. 20. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2024-3-20-25>
21. *Филиппов М.В., Махмутов В.С., Максумов О.С., Квашин А.А., Квашин А.Н., Разумейков М.В., Логачев В.И., Мизин С.В., Соков С.В.* // *ПТЭ.* 2024. № 3. С. 108. <https://elibrary.ru/ousxkn>
22. *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., Marun A., Pereyra P., de Souza R.V.* Bright 30 THz impulsive solar bursts. // *J. Geophys. Research: Space Physics.* 2015. V. 120. P. 4155. <https://doi.org/10.1002/2015JA021313>
23. *Miteva R., Kaufmann P., Cabezas D.P. et al.* // *A & A.* 2016. V. 586. P. A91. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201425520>
24. *López F.M., Giménez de Castro C.G., Mandrini C.H. et al.* // *A & A.* 2022. V. 657. P. A51. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141967>
25. Характеристики инфракрасного термометра MLX90614. URL: <https://www.melexis.com/en/product/mlx90614/digital-plug-play-infrared-thermometer-to-can>
26. *Philippov M.V., Makhmutov V.S., Kropotov G.I., Razumeyko M.V., Tulnikov E.D., Sokov S.V.* // *Sol. Syst. Res.* 2025. V. 59. № 7. P. 95. <https://doi.org/10.1134/S0038094625600635>
27. Документация на оптоакустический преобразователь. https://www.tydexoptics.com/ru/products/thz_devices/golay_cell/
28. Документация на терагерцевые окна ТРХ. https://www.tydexoptics.com/pdf/ru/THz_Windows.pdf

29. Стандартные таблицы спектра солнечного излучения ASTM E490-22.
<https://www.astm.org/e0490-22.html>
30. Astropy – библиотека для астрономических вычислений. <https://www.astropy.org/>
31. Филиппов М.В., Махмутов В.С., Разумейко М.В., Кропотов Г.И., Николаев В.А. // Астрономический вестник. 2025. Т. 59. № 2. С. 148. <https://www.elibrary.ru/kxkffe>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Фотография германиевого фильтра Ge D25.4×4.8 мм HR Filter BVAR 8–12 мкм с обеих сторон.
- Рис. 2.** Спектр пропускания германиевого фильтра в диапазоне 0–50 ТГц.
- Рис. 3.** Спектральный коэффициент пропускания оптического тракта детектора при использовании германиевого фильтра в диапазоне частот 0.01–50 ТГц с учетом атмосферного поглощения (при $\theta = 90^\circ$).
- Рис. 4.** Спектральный коэффициент пропускания оптического тракта при установленных германиевом фильтре и входном окне из ТРХ в диапазоне частот 0.01–50 ТГц с учетом атмосферного поглощения.
- Рис. 5.** Временной ход сигнала приемника для измерения солнечного излучения при использовании германиевого фильтра 15 августа 2025 г. Красная кривая – исходные данные $U_{\text{п}}$ с усреднением по методу скользящего среднего для 100 точек; зеленая кривая – данные измерений приемника $U_{\text{п}}$ с учетом температурной коррекции по формуле (3) из статьи [20]; синяя кривая – температура на корпусе ОАП в приемнике с усреднением по методу скользящего среднего для 100 точек; желтая кривая – температура по данным датчика облачности на базе инфракрасного термометра MLX90614, установленного на одноканальном макете, с усреднением по 5 точкам.
- Рис. 6.** Спектральный коэффициент пропускания оптического тракта с установленным германиевым фильтром в диапазоне частот 0.01–50 ТГц при использовании ОАП GC-1D с алмазным входным окном.
- Рис. 7.** Временной ход сигнала приемника для второго измерения солнечного излучения при использовании германиевого фильтра 15 августа 2025 г. (обозначения такие же, как на рис. 5).



Рис. 1.

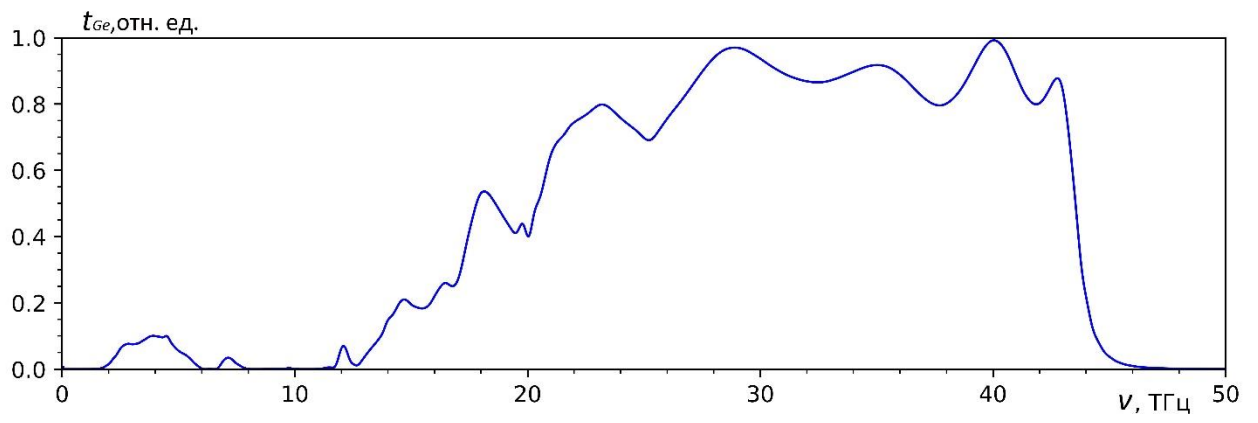


Рис. 2.

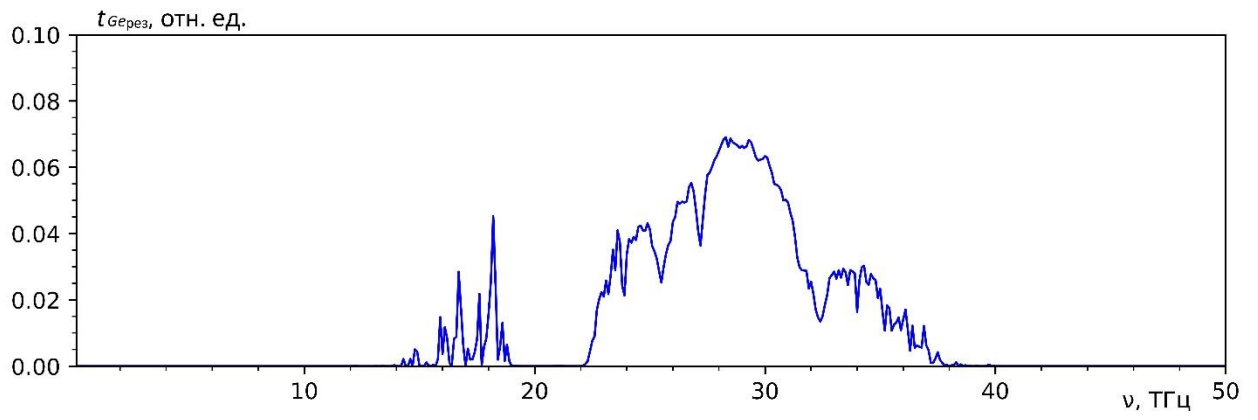


Рис.3.

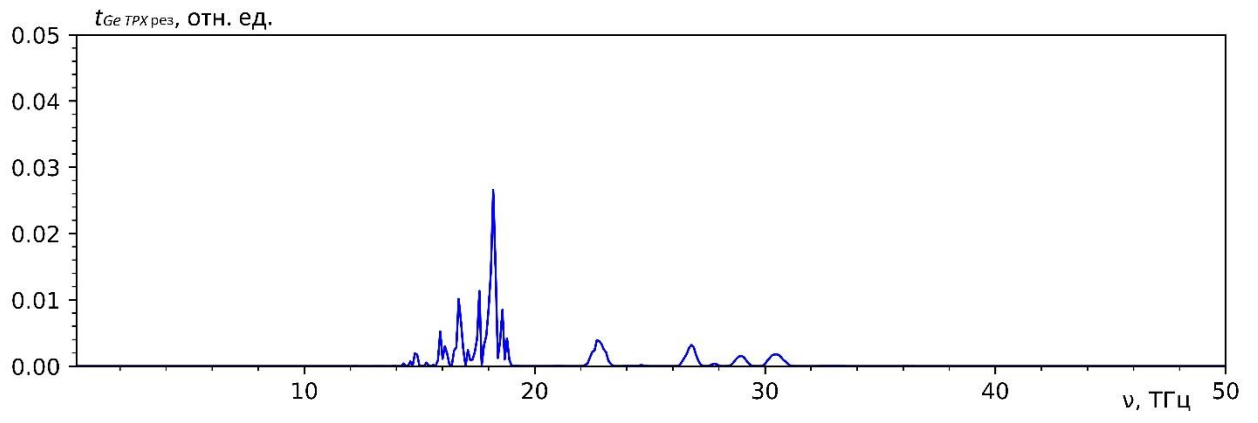


Рис.4.

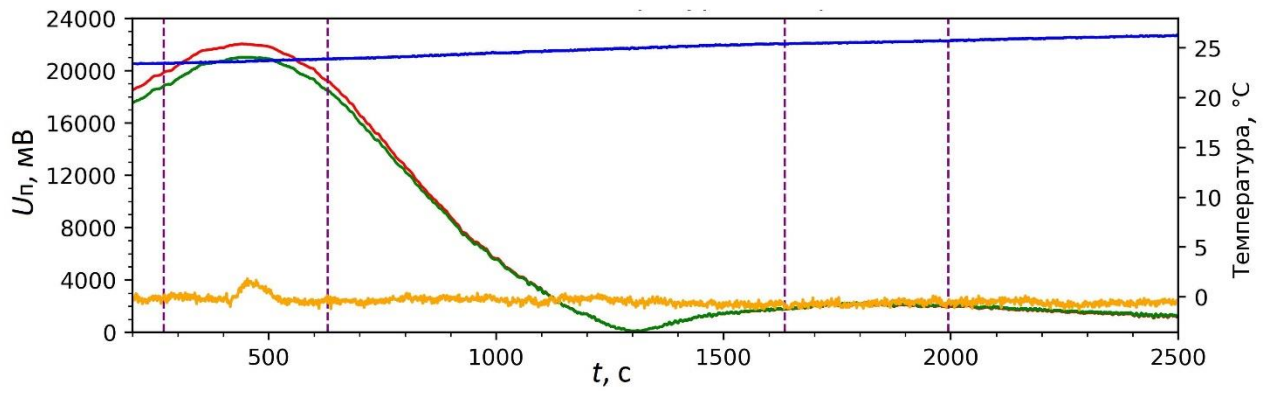


Рис.5.

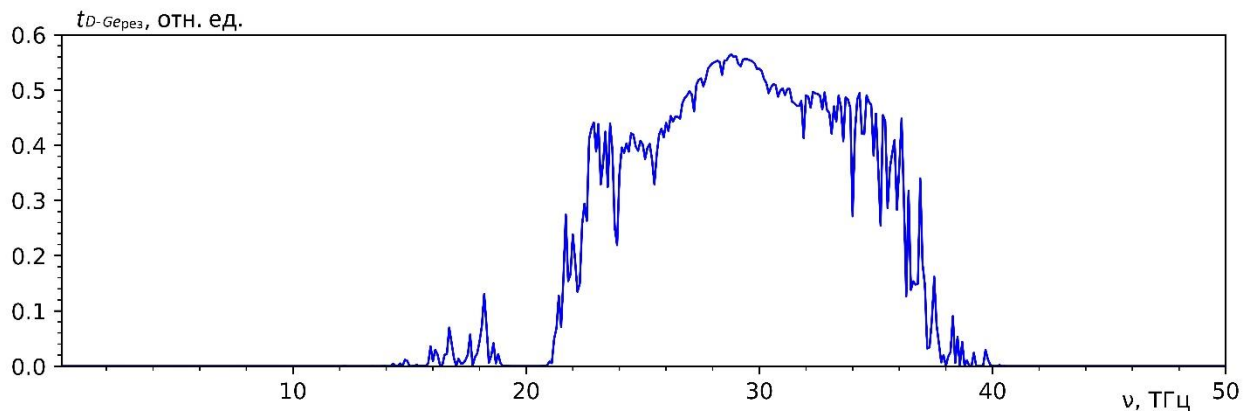


Рис.6.

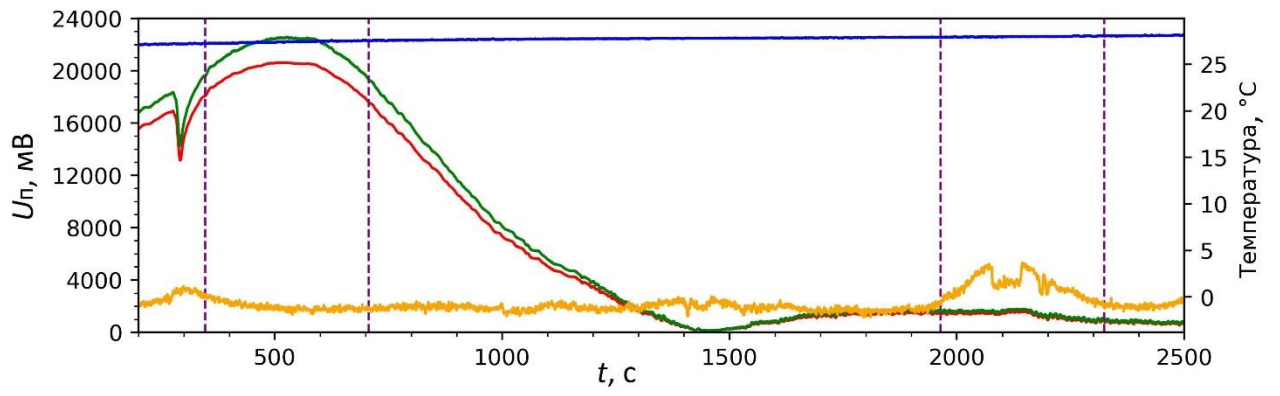


Рис.7.