

УДК 53.088

ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ КАЛИБРОВОК НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ “СОЛНЦЕ-ТЕРАГЕРЦ”

Е. Д. Тульников¹, В. С. Махмутов^{1,2}, М. В. Филиппов¹

Для космического эксперимента “Солнце-Терагерц” в ФИАН была изготовлена научная аппаратура для установки на Российском сегменте МКС. Цели эксперимента – получение данных о терагерцевом излучении Солнца, а также изучение солнечных активных областей и солнечных вспышек. Научная аппаратура “Солнце-Терагерц” состоит из восьми детекторов, целевые частоты которых лежат в диапазоне 0.4–12.0 ТГц. Для экспериментальной калибровки научной аппаратуры использован имитатор черного тела (ИЧТ). Калибровочные коэффициенты для каждого канала определены как корреляция между интенсивностью излучения от ИЧТ, проходящего через систему фильтров, и рассчитанной методами численного интегрирования, с полученным экспериментально откликом прибора на излучение ИЧТ. Для проверки качества проведённой калибровки было произведено успешное восстановление исходного спектра ИЧТ.

Ключевые слова: калибровка, Солнце, вспышка, субмиллиметровое излучение.

Введение. В Лаборатории физики Солнца и космических лучей (ДНС ФИАН) была разработана и изготовлена научная аппаратура (НА) “Солнце-Терагерц” [1], предназначенная для проведения космического эксперимента на борту Российского сегмента МКС, по изучению Солнца и солнечных вспышек в терагерцевом диапазоне частот от 0.4 ТГц до 12 ТГц. Эти данные необходимы для выяснения природы солнечной активности, определения физического механизма ускорения заряженных частиц на Солнце и других астрофизических объектах [2–4].

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: tulnikov.ed@yandex.ru.

² МФТИ (национальный исследовательский университет), 141701 Россия, Московская обл., Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Разрабатываемая аппаратура представляет собой совокупность восьми детекторов, чувствительных к излучению различной частоты: 0.4; 0.8; 1.0; 3.0; 5.0; 7.0; 10.0 и 12.0 ТГц. Оптическая система [5] каждого из восьми детекторов включает в себя: фокусирующую излучение систему зеркал, поверхность которых обработана для рассеивания видимого излучения; отрезающий и полосовой фильтры, пропускающие излучение в заданном для оптической системы каждого канала частотном диапазоне; оптический прерыватель, модулирующий излучение на частоте 10 Гц для корректной работы детектора терагерцевого излучения; оптоакустический преобразователь (ОАП) “ячейка Голя” с усилителем, которые являются приёмником излучения [1]. Характеристики фильтров и оптической системы приведены в статье [6]. В качестве терагерцевого детектора выбрана ОАП “ячейка Голя” [7], так как она обладает постоянным откликом в целевом спектральном диапазоне. Электроника НА “Солнце-Терагерц” [8] включает в себя платы усилителей, драйверы оптических прерывателей, плату питания и автоматическую систему обеспечения теплового режима.

Возможность детектирования терагерцевого излучения солнечных вспышек подобной системой была подтверждена в ходе эксперимента GRIPS в Антарктиде 19–30 января 2016 г. [9, 10].

Целью данного исследования является анализ данных эксперимента по калибровке НА “Солнце-Терагерц” при помощи ИЧТ с целью определения калибровочных коэффициентов прибора.

Постановка эксперимента. Калибровка НА “Солнце-Терагерц” проведена при помощи ИЧТ с эффективной степенью черноты излучателя 0.88 и диапазоном воспроизводимых температур от 500 до 1000 К. В ходе эксперимента ИЧТ, подключенный к блоку питания, последовательно подносился к входам оптических систем всех 8 каналов и устанавливался через экранно-вакуумную теплоизоляцию (ЭВТИ) на металлическое кольцо, чтобы уменьшить разогрев оптической системы прибора за счёт теплопроводности.

Данные, полученные в ходе эксперимента, представляют собой временные ряды отклика всех каналов прибора на поднесение ИЧТ последовательно к каждому детектору (см. рис. 1). Отличия в отклике каналов НА при поднесении ИЧТ объясняются как различными пропускными характеристиками оптических систем, так и различными чувствительностями приёмников излучения.

Результаты и их обсуждение. На временном ряду отклика каждого канала, полученного в ходе эксперимента, можно выделить 5 областей: область шумового сигнала,

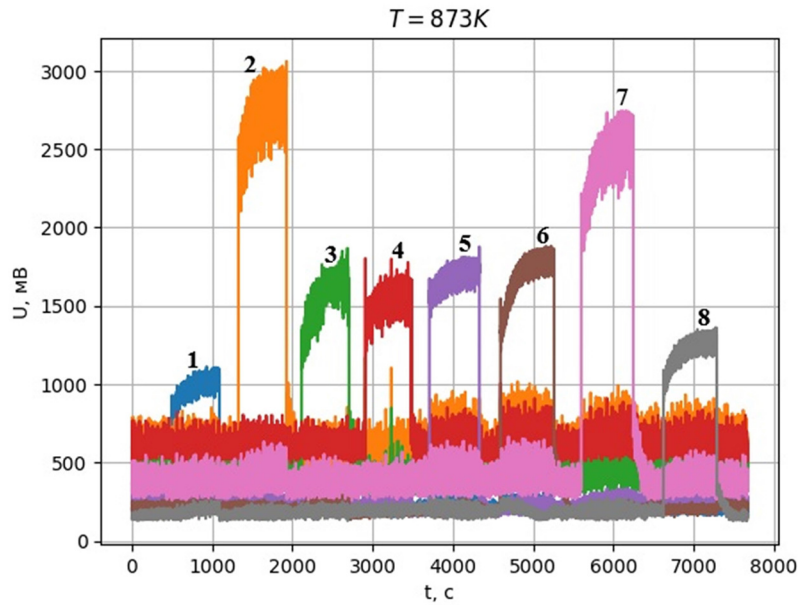


Рис. 1: Данные, полученные в ходе эксперимента по калибровке научной аппаратуры при температуре ИЧТ 773 K: 1 – отклик детектора канала 0.4 ТГц, 2 – 0.8 ТГц, 3 – 1.0 ТГц, 4 – 3.0 ТГц, 5 – 5.0 ТГц, 6 – 7.0 ТГц, 7 – 10.0 ТГц, 8 – 12 ТГц.

когда ИЧТ приставлен к другому каналу, область быстрого роста сигнала, связанного с поднесением ИЧТ, область медленного роста сигнала, связанного с нарастанием излучения от оптической системы прибора, разогревающейся под излучением ИЧТ, область быстрого спада сигнала, связанного с переносом ИЧТ на другой канал, и область медленного спада сигнала, связанного с охлаждением оптической системы прибора. Так как ранее производились расчёты прохождения излучения ИЧТ [6] без учёта разогрева оптической системы прибора, поэтому из временного ряда сигнала выделялся его прирост, связанный с поднесением ИЧТ, и спад, связанный с переносом ИЧТ. Это делалось, чтобы влияние разогрева и охлаждения оптической системы прибора было минимальным. Выделение участков быстрого роста и спада сигнала производилось по положению, соответственно, максимума и минимума численной производной сигнала, сглаженного методом скользящего среднего по 30 точек. На рис. 2 представлен характерный вид быстрого роста и спада сигнала на исходных (оранжевые точки) и сглаженных (синяя кривая) данных. По графику видно, что время роста и спада сглаженных данных значительно превосходит время роста и спада исходных данных. Это связано со сглаживанием методом скользящего среднего, которое приводит к тому, что время отклика на сглаженных данных оказывается примерно равно интервалу, по которому

проводится сглаживание, то есть примерно 3 с. Время отклика по исходным данным можно оценить как 1 с. Это время обусловлено временем установки ИЧТ на оптическую систему прибора, а не быстроедействие детектора. Это даёт основание полагать, что НА “Солнце-Терагерц” способна предоставлять данные с субсекундным разрешением.

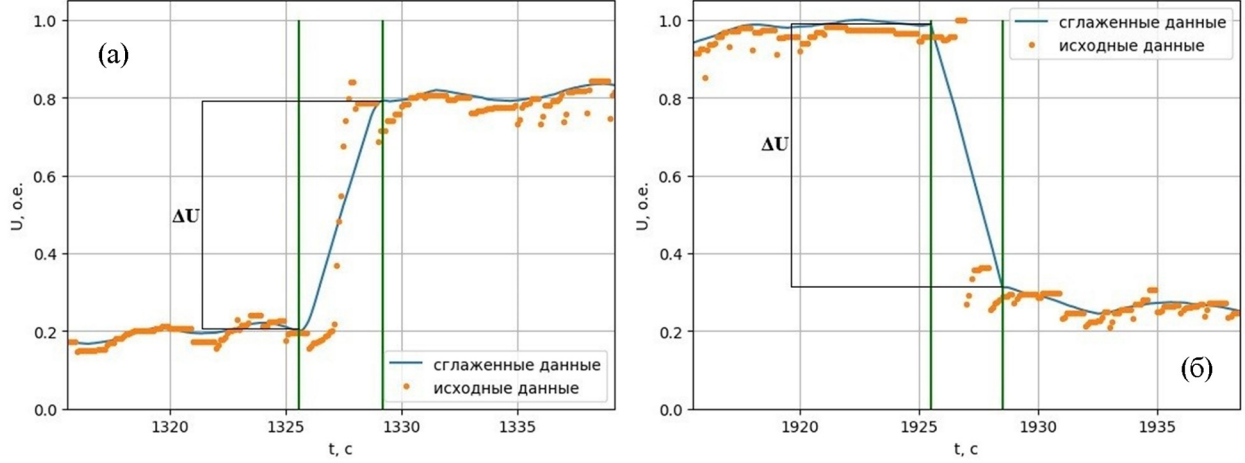


Рис. 2: Область быстрого (а) роста и (б) спада сигнала на канале 0.8 ТГц при температуре ИЧТ, равной 873 К. Оранжевые точки – нормированные данные, полученные с прибора, синяя кривая – данные, сглаженные методом скользящего среднего по 30 точкам, зелёные вертикальные прямые – интервал быстрого (а) роста и (б) спада сигнала.

В каждом эксперименте (для каждой температуры ИЧТ) для каждого канала НА определялся калибровочный коэффициент по росту и спаду сигнала:

$$k_{i,T} = \frac{I_{i,T}^{\text{adb}}}{\Delta U_{i,T}}, \quad i = \overline{1,8}, T \in \{573 \text{ K}, 673 \text{ K}, 773 \text{ K}, 873 \text{ K}\}, \quad (1)$$

где $I_{i,T}^{\text{adb}}$ – интенсивность излучения, поступающего в оптическую систему i -го канала, при температуре ИЧТ, равной T , рассчитанная в работе [6], $\Delta U_{i,T}$ – прирост/спад сигнала для i -го канала при температуре ИЧТ, равной T , полученный из эксперимента. Полученные значения калибровочных коэффициентов представлены на рис. 3. Как видно из графика, полученные калибровочные коэффициенты не зависят от температуры ИЧТ и совпадают при росте и спаде сигнала, что указывает на корректность метода их определения. Имеющиеся отличия могут быть объяснены абсолютной погрешностью прибора, значение которой пока что определяется. Значения калибровочных коэффициентов по росту и спаду сигнала, усредненные по 4 измерениям, приведены в табл. 1,

приведенная погрешность учитывает разброс, полученных экспериментальных данных, и погрешность численного расчёта, представленного в работе [6].

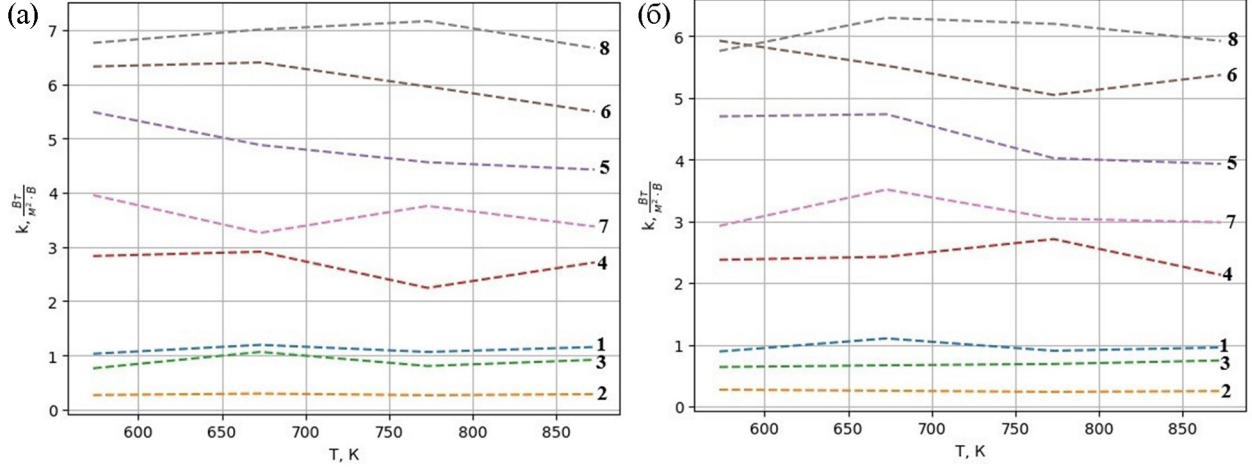


Рис. 3: Зависимость калибровочных коэффициентов от температуры ИЧТ в эксперименте (а) по росту и (б) по спаду сигнала: 1 – калибровочные коэффициенты канала 0.4 ТГц, 2 – 0.8 ТГц, 3 – 1.0 ТГц, 4 – 3.0 ТГц, 5 – 5.0 ТГц, 6 – 7.0 ТГц, 7 – 10.0 ТГц, 8 – 12 ТГц.

Т а б л и ц а 1

Усредненные значения калибровочных коэффициентов

Канал, ТГц	0.4	0.8	1	3	5	7	10	12
k_+ , Вт/(м ² ·В)	1.1±0.1	0.27±0.03	0.9±0.1	2.7±0.3	4.8±0.5	6.0±0.6	3.6±0.4	6.9±0.7
k_- , Вт/(м ² ·В)	1.0±0.1	0.25±0.03	0.7±0.1	2.4±0.3	4.3±0.5	5.5±0.6	3.1±0.3	6.0±0.6

Для восстановления спектральной плотности излучения ИЧТ при температуре T использовалась формула:

$$f_T(i) = \frac{\Delta U_{i,T} k_i P_{\text{art}}^{i,T}}{\Delta v_{\text{eff}}^i}, \quad i = \overline{1,8}, T \in \{573 \text{ K}, 673 \text{ K}, 773 \text{ K}, 873 \text{ K}\}, \quad (2)$$

где $\Delta U_{i,T}$ – прирост/спад сигнала для i -го канала при температуре ИЧТ, равной T , полученный из эксперимента, k_i – средний по 4 экспериментам калибровочный коэффициент для i -го канала, $P_{\text{art}}^{i,T} = \frac{I_{i,T}^{\text{adb},0.5}}{I_{i,T}^{\text{adb}}}$ – отношение интенсивности, проходящей в оп-

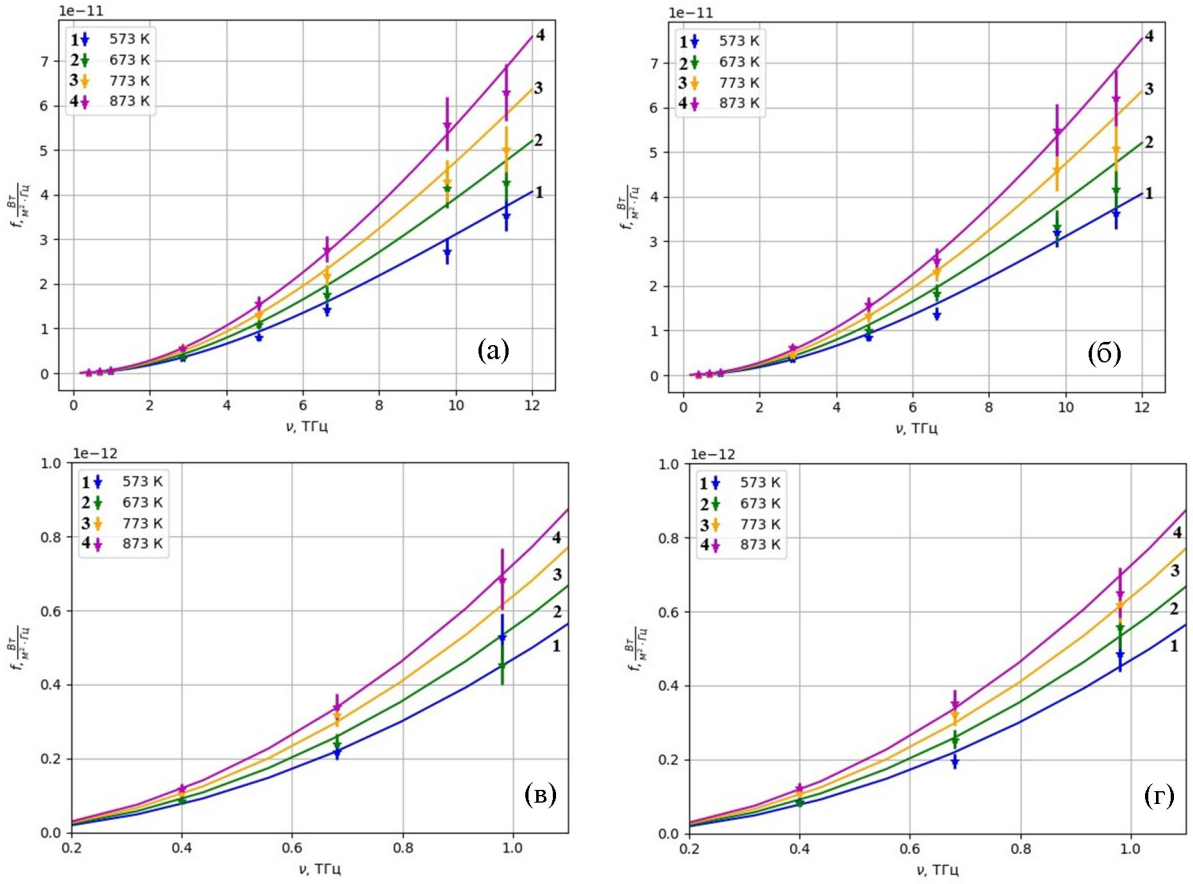


Рис. 4: Спектр, восстановленный по коэффициентам, полученным (а), (в) по росту и (б), (г) по спаду сигнала в интервале (а), (б) 0 – 12 ТГц и (в), (г) 0.2 – 1.1 ТГц. Сплошными кривыми указаны спектры ИЧТ, точками отмечены восстановленные значения.

тическую систему i -го канала в диапазоне, ограниченном частотами, соответствующими полувысоте пика пропускания оптической системы, к интенсивности, проходящей в оптическую систему i -го канала во всем диапазоне, при температуре ИЧТ, равной T , рассчитанное в работе [4]; $\Delta v_{\text{eff}}^i = \int_{v_{i1}}^{v_{i2}} p_i(v) dv$ – эффективная ширина спектральной линии i -го канала ($p_i(v)$ – пропускание оптической системы i -го канала, где v_{i1} , v_{i2} – границы по полувысоте пика пропускания оптической системы i -го канала). Произведение $\Delta U_{i,T} k_i$ представляет собой значение интенсивности излучения, прошедшего через оптическую систему канала, произведение $\Delta U_{i,T} k_i P_{\text{art}}^{i,T}$ является оценкой величины интенсивности, прошедшей через оптическую систему канала в диапазоне по полувысоте пика пропускания оптической системы, Δv_{eff}^i показывает, какому частотному интервалу

принадлежит сигнал, и учитывает его ослабление при прохождении через оптическую систему канала. Восстановленные таким образом спектры ИЧТ представлены на рис. 4. По рисунку видно, что указанные сплошными кривыми спектры ИЧТ и восстановленные значения, отмеченные точками, совпадают в пределах погрешности. Это говорит об успешном восстановлении спектра ИЧТ по показаниям прибора.

Заключение. В данной работе описана методика проведения промежуточной калибровки НА “Солнце-Терагерц” при помощи ИЧТ. Для выделения полезного сигнала из данных, полученных в ходе калибровки, была разработана методика, основанная на расчёте численных производных сглаженных экспериментальных данных. Применение этой методики позволило определить промежуточные калибровочные коэффициенты для всех каналов НА “Солнце-Терагерц”, необходимые для обработки результатов измерений. При помощи калибровочных коэффициентов удалось восстановить спектр ИЧТ, что подтверждает возможность применения разработанной методики.

Для дальнейшего улучшения качества калибровок необходимо проведение расчётов прохождения излучения ИЧТ через оптическую систему прибора, учитывающих её нагрев и ослабление излучения. Это позволит включить в рассмотрение участок с разогревом оптической системы, точнее определить интенсивность излучения, попадающего на детектор, и уточнить калибровочные коэффициенты.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Е. В. Калинин, М. В. Филиппов, В. С. Махмутов и др., Космические исследования **59**(1), 3 (2021). DOI: 10.31857/S0023420621010040.
- [2] S. Wedemeyer, T. Bastian (on behalf of ALMA Collaboration), Space Sci. Rev. **200**, 1 (2016). DOI: 10.1007/s11214-015-0229-9.
- [3] P. Kaufmann, J. P. Raulin, C. G. G. De Castro, et al., ApJ. Lett. **603**(2), L121 (2004). DOI: 10.1086/383186.
- [4] S. Krucker, C. G. G. De Castro, H. S. Hudson, et al., A&A Rev. **21**(1), 1 (2013). DOI: 10.1007/s00159-013-0058-3.
- [5] А. А. Квашнин, В. И. Логачев, М. В. Филиппов и др., Космическая техника и технологии **35**(4), 22 (2021). DOI: 10.33950/spacetechn-2308-7625-2021-4-22-30.
- [6] Е. Д. Тульников, В. И. Логачев, В. С. Махмутов и др., Космические исследования **62**(6), 557 (2024). DOI: 10.31857/S002342062101004.
- [7] М. В. Филиппов, В. С. Махмутов, М. В. Разумейко, Измерительная техника, № 3, 20 (2024). DOI: 10.32446/0368-1025it.2024-3-20-25.

- [8] М. В. Филиппов, В. С. Махмутов, О. С. Максумов и др., Приборы и техника эксперимента, № 3, 108 (2024). DOI: 10.31857/S0032816224030147.
- [9] P. Kaufmann, A. Abrantes, E. C. Bortolucci, et al., *THz solar observations on board of a trans-Antarctic stratospheric balloon flight*. In: 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz) (Copenhagen, 2016), p. 1. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2016.7758395.
- [10] Nicole Duncan, P. Saint-Hilaire, A. Y. Shih, et al., *First flight of the Gamma-Ray Imager/Polarimeter for Solar flares (GRIPS) instrument*. In: *Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray* (Edinburgh, 2016), vol. 9905, p. 876. DOI: 10.1117/12.2233859.

Поступила в редакцию 17 апреля 2025 г.

После доработки 2 августа 2025 г.

Принята к публикации 4 августа 2025 г.