

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

УДК 53.088

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В. И. Логачев¹, Е. Д. Тульников¹, В. С. Махмутов^{1,2}

В представленной работе обсуждается методика обработки данных измерений потоков терагерцевого излучения Солнца и солнечных вспышек в предстоящем эксперименте “Солнце–Терагерц” с помощью научной аппаратуры (НА) “Солнце–Терагерц” на борту МКС (международной космической станции). Обсуждаются возможные особенности результатов измерений за счет регистрации побочных излучений, не входящих в полосы пропускания каналов аппаратуры, и методы восстановления “первичного” спектра излучения.

Ключевые слова: терагерцевое излучение, Солнце, вспышка, обработка данных.

Введение. Для изучения механизма солнечных вспышек необходимо знать их спектр излучения в широком диапазоне частот от микроволнового до гамма-излучения. В настоящее время отсутствуют экспериментальные данные о спектре излучения в терагерцевом диапазоне ($10^{12} - 10^{13}$ Гц). Это излучение не может наблюдаться наземными телескопами, т. к. оно поглощается уже в верхних слоях атмосферы.

Для регистрации терагерцевого излучения Солнца в Лаборатории физики Солнца и космических лучей ФИАН (ДНС ФИАН) была разработана и изготовлена научная аппаратура “Солнце–Терагерц” (НА СТ), которая в ближайшее время будет доставлена на МКС и размещена на её поверхности на специальной подвижной платформе, которая обеспечит наведение приемников научной аппаратуры на Солнце.

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: logachevvi@lebedev.ru.
² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 117303 Россия, Москва.

Характеристики элементов научной аппаратуры. НА “Солнце–Терагерц” состоит из:

- блока детекторов, в состав которого входят восемь регистрирующих каналов, настроенных на частоты 0.4; 0.7; 1.0; 3.0; 5.0; 7.0; 10.0 и 12.0 ТГц;
- блока электроники, который производит первичную обработку сигнала, его хранение и передачу на телеметрическую систему МКС;
- автоматической системы поддержания температурного режима (АСОТР).

Общий вид блока детекторов и структура одиночных каналов НА СТ подробно представлены ранее в работе [1]. Здесь лишь отметим, что в состав каждого регистрирующего канала входит оптический телескоп, фокусирующий терагерцевое излучение на входное окно детектора – ячейки Голея, система фильтров, формирующая излучение в необходимом частотном диапазоне, оптический прерыватель, модулирующий входной сигнал с частотой 10 Гц на входном окне детектора излучения.

На рис. 1 показаны пропускные способности отдельных элементов регистрирующих каналов научной аппаратуры.

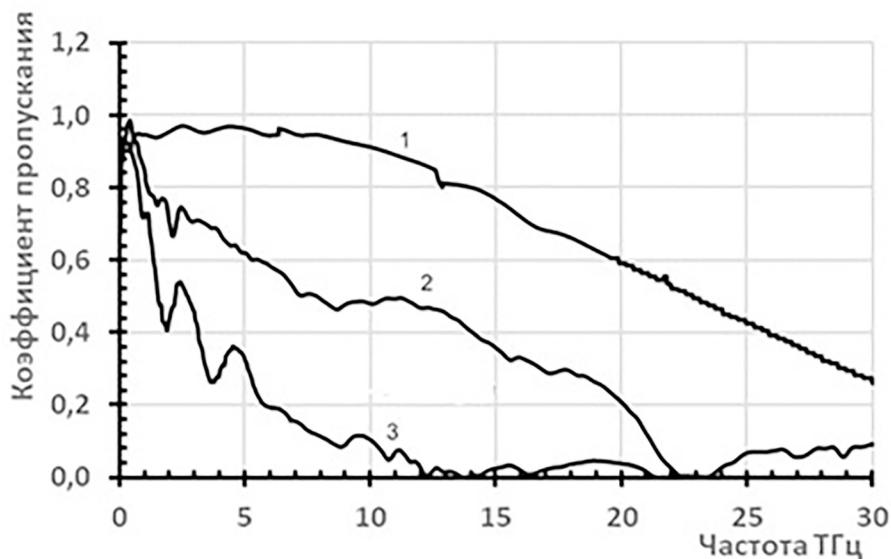


Рис. 1: Коэффициенты пропускания элементов оптической системы НА “Солнце–Терагерц”: 1 – система зеркал входного телескопа, 2 – входное окно детектора (ячейка Голея), 3 – черный фильтр.

Видно, что окно ячейки и особенно черный фильтр, имеют сильную частотную зависимость, что будет необходимо учитывать при определении энергии, поступающей в каждый из каналов.

Таким образом, во всех телескопах установки мы имеем одинаковый коэффициент пропускания канала, определяемый зеркалами, входным окном детектора и черным фильтром, отрезающим видимую часть оптического излучения Солнца или солнечной вспышки. Полоса пропускания каждого из восьми каналов НА определяется полосовым фильтром.

На рис. 2 для примера показаны коэффициенты пропускания регистрирующих каналов 1.0; 3.0; 5.0 и 7.0 ТГц.

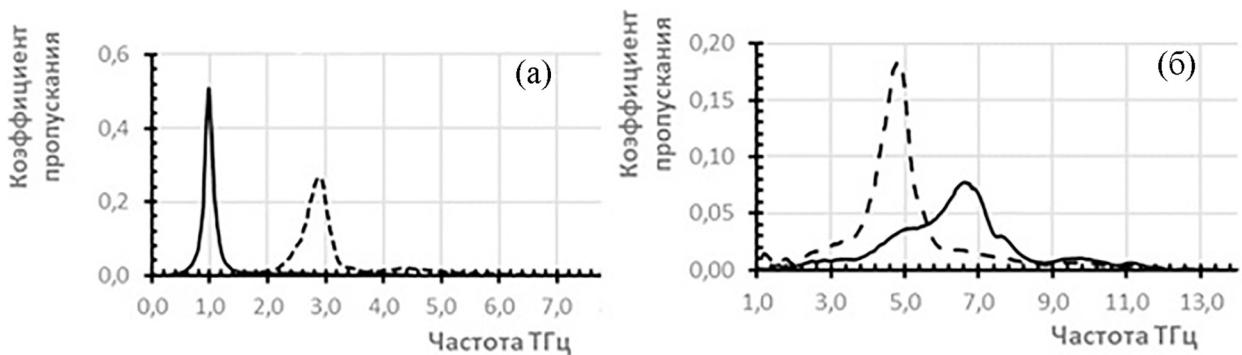


Рис. 2: Коэффициенты пропускания регистрирующих каналов 1.0; 3.0 (панель (а); сплошная линия и пунктир, соответственно) и 5.0 и 7.0 ТГц (панель (б); пунктир и сплошная линия).

Для калибровки аппаратуры во время проведения эксперимента на борту МКС, может быть использован поток излучения от спокойного Солнца. По закону Стефана–Больцмана поток излучения от черного тела, а Солнце можно считать черным телом, имеющим температуру 5873 К, равен $J = 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 \text{ Вт}/\text{м}^2 = 6.75 \cdot 10^7 \text{ Вт}/\text{м}^2$. На границе атмосферы по данным работы [2] эталонный поток энергии от Солнца равен 1366 Вт/м². Следовательно, коэффициент пересчета потока энергии от Солнца к границе атмосферы равен $k = 1366/6.75E + 07 = 2.03E - 05$.

Для контроля был рассчитан спектр излучения Солнца на границе атмосферы, считая Солнце черным телом с температурой 5873 К. Рассчитанный спектр излучения (гладкая кривая на рис. 3) хорошо совпадает с эталонным спектром Солнца ASTM E-490 [2], а полный поток энергии (площадь под гладкой кривой и эталонным спектром Солнца) совпадает с точностью до одной тысячной Вт/м².

Таким образом, зная коэффициент пересчета $k = 2.03E - 05$ при измерении потоков энергии от Солнца на границе атмосферы, мы можем определить мощность излучения Солнца или солнечных вспышек на поверхности самого Солнца. Были проведены пред-

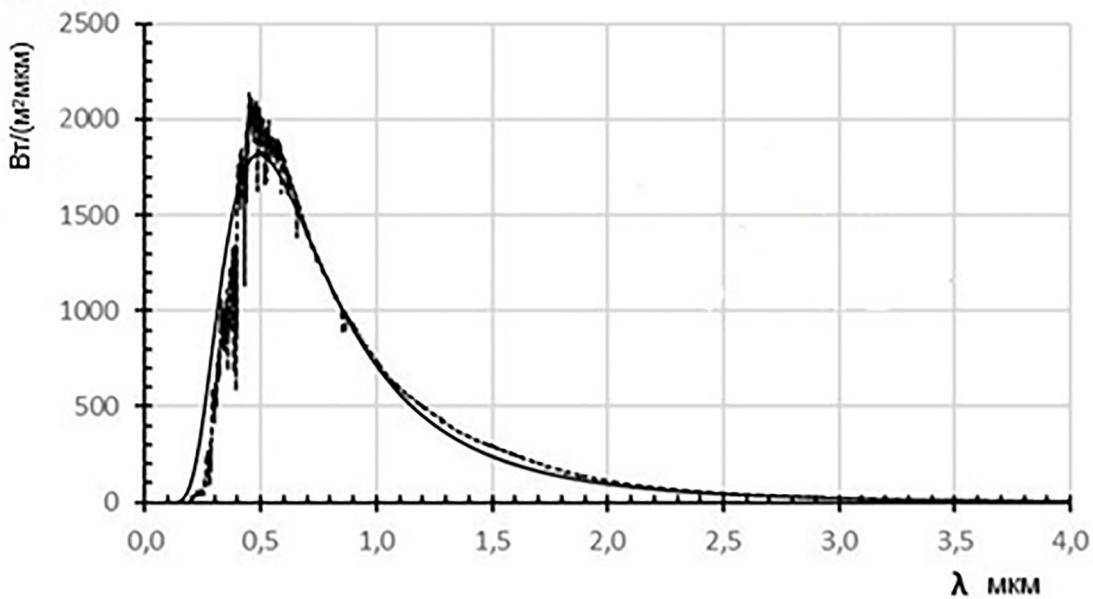


Рис. 3: Рассчитанный (гладкая кривая) и эталонный поток энергии излучения от Солнца на границе атмосферы.

варительные расчеты потоков энергии от спокойного Солнца и солнечных вспышек с различными показателями спектра излучения.

В настоящее время имеется работа [3], в которой на частоте 212 ГГц и 405 ГГц на высокогорном телескопе SST в Андах (высота 2550 м) был зарегистрирован ряд солнечных вспышек. В некоторых поток излучения достигал 1600 с.е.п. (sfu), что составляет $1.6 \cdot 10^{-18}$ Вт/(м²Гц). Есть предварительные оценки [4], которые показывают, что спектры радиоизлучения солнечных вспышек могут иметь *U*-образный характер, например, спад потоков с показателем спектра $\gamma = -3$, а затем возрастание с $\gamma = +2$. При этом минимум (или частота перегиба спектра) может располагаться в интервале частот от 0.2 до 3.0 ТГц.

Подробное описание калибровки установки “Солнце–Терагерц” от черного тела приведено в работе [5]. Мы же оценим ожидаемые потоки энергии в каждом из восьми каналов установки от спокойного Солнца и солнечных вспышек с различными показателями спектра излучения.

Предварительно все полосовые фильтры, черный фильтр, окно детектора и зеркала телескопов были оцифрованы с шагом 0.01 ТГц. Таким образом для каждого канала был рассчитан оцифрованный коэффициент пропускания. Затем был рассчитан поток энергии от Солнца, попадающий в НА “Солнце–Терагерц” (см. табл. 1, столбец 1).

Таблица 1

*Сводная таблица ожидаемого потока энергии по каналам НАСТ
от Солнца и солнечных вспышек с различными показателями спектра излучения*

Канал	Солнце, Вт	Вспышка $\gamma = +2$, Вт	Вспышка $\gamma = -3$ до 0.25 ТГц далее	Вспышка $\gamma = -3$ до 0.4 ТГц далее	Вспышка $\gamma = -3$ до 1.0 ТГц далее	Вспышка $\gamma = -3$ до 3.0 ТГц далее
Ф0.4	$W_{\text{п}} = 5.70\text{E-}07$ $W_{\text{пв}} = 5.26\text{E-}09$ $\kappa = 0.9\%$	$W_{\text{п}} = 5.22\text{E-}08$ $W_{\text{пв}} = 4.60\text{E-}10$ $\kappa = 1.0\%$	$W_{\text{п}} = 5.23\text{E-}08$ $W_{\text{пв}} = 4.60\text{E-}10$ $\kappa = 1.0\%$	$W_{\text{п}} = 5.29\text{E-}08$ $W_{\text{пв}} = 5.05\text{E-}10$ $\kappa = 1.0\%$	$W_{\text{п}} = 1.66\text{E-}09$ $W_{\text{пв}} = 4.05\text{E-}10$ $\kappa = 24.4\%$	$W_{\text{п}} = 1.15\text{E-}09$ $W_{\text{пв}} = 4.05\text{E-}10$ $\kappa = 35.3\%$
Ф0.7	$W_{\text{п}} = 3.97\text{E-}07$ $W_{\text{пв}} = 7.28\text{E-}09$ $\kappa = 1.8\%$	$W_{\text{п}} = 3.65\text{E-}08$ $W_{\text{пв}} = 6.38\text{E-}10$ $\kappa = 1.7\%$	$W_{\text{п}} = 3.65\text{E-}08$ $W_{\text{пв}} = 6.38\text{E-}10$ $\kappa = 1.7\%$	$W_{\text{п}} = 3.66\text{E-}08$ $W_{\text{пв}} = 6.38\text{E-}10$ $\kappa = 1.7\%$	$W_{\text{п}} = 5.39\text{E-}10$ $W_{\text{пв}} = 4.35\text{E-}11$ $\kappa = 8.1\%$	$W_{\text{п}} = 1.88\text{E-}10$ $W_{\text{пв}} = 4.35\text{E-}11$ $\kappa = 23.1\%$
Ф1.0	$W_{\text{п}} = 5.19\text{E-}07$ $W_{\text{пв}} = 2.98\text{E-}08$ $\kappa = 5.7\%$	$W_{\text{п}} = 4.76\text{E-}08$ $W_{\text{пв}} = 2.62\text{E-}09$ $\kappa = 5.5\%$	$W_{\text{п}} = 4.76\text{E-}08$ $W_{\text{пв}} = 2.62\text{E-}09$ $\kappa = 5.5\%$	$W_{\text{п}} = 4.76\text{E-}08$ $W_{\text{пв}} = 2.62\text{E-}09$ $\kappa = 5.5\%$	$W_{\text{п}} = 6.00\text{E-}10$ $W_{\text{пв}} = 3.05\text{E-}11$ $\kappa = 5.1\%$	$W_{\text{п}} = 1.63\text{E-}10$ $W_{\text{пв}} = 2.90\text{E-}11$ $\kappa = 1.8\%$
Ф3.0	$W_{\text{п}} = 1.39\text{E-}06$ $W_{\text{пв}} = 3.31\text{E-}07$ $\kappa = 24\%$	$W_{\text{п}} = 1.25\text{E-}07$ $W_{\text{пв}} = 2.93\text{E-}08$ $\kappa = 23\%$	$W_{\text{п}} = 1.25\text{E-}07$ $W_{\text{пв}} = 2.93\text{E-}08$ $\kappa = 23.4\%$	$W_{\text{п}} = 1.26\text{E-}07$ $W_{\text{пв}} = 2.93\text{E-}08$ $\kappa = 23\%$	$W_{\text{п}} = 1.32\text{E-}09$ $W_{\text{пв}} = 2.93\text{E-}10$ $\kappa = 22\%$	$W_{\text{п}} = 7.08\text{E-}11$ $W_{\text{пв}} = 1.56\text{E-}12$ $\kappa = 22\%$
Ф5.0	$W_{\text{п}} = 4.15\text{E-}06$ $W_{\text{пв}} = 1.32\text{E-}06$ $\kappa = 39\%$	$W_{\text{п}} = 3.75\text{E-}07$ $W_{\text{пв}} = 1.17\text{E-}07$ $\kappa = 31.3\%$	$W_{\text{п}} = 3.75\text{E-}07$ $W_{\text{пв}} = 1.17\text{E-}07$ $\kappa = 31.3\%$	$W_{\text{п}} = 3.75\text{E-}07$ $W_{\text{пв}} = 1.17\text{E-}07$ $\kappa = 31.3\%$	$W_{\text{п}} = 3.80\text{E-}09$ $W_{\text{пв}} = 1.17\text{E-}09$ $\kappa = 31\%$	$W_{\text{п}} = 7.39\text{E-}11$ $W_{\text{пв}} = 4.8\text{E-}12$ $\kappa = 6.50\%$
Ф7.0	$W_{\text{п}} = 4.81\text{E-}06$ $W_{\text{пв}} = 2.03\text{E-}06$ $\kappa = 42.3\%$	$W_{\text{п}} = 4.35\text{E-}07$ $W_{\text{пв}} = 1.82\text{E-}07$ $\kappa = 41.9\%$	$W_{\text{п}} = 4.35\text{E-}07$ $W_{\text{пв}} = 1.82\text{E-}07$ $\kappa = 41.9\%$	$W_{\text{п}} = 4.35\text{E-}07$ $W_{\text{пв}} = 1.82\text{E-}07$ $\kappa = 41.9\%$	$W_{\text{п}} = 4.42\text{E-}09$ $W_{\text{пв}} = 1.82\text{E-}09$ $\kappa = 41.3\%$	$W_{\text{п}} = 8.85\text{E-}11$ $W_{\text{пв}} = 7.46\text{E-}12$ $\kappa = 8.42\%$
Ф10.0	$W_{\text{п}} = 4.19\text{E-}06$ $W_{\text{пв}} = 1.73\text{E-}06$ $\kappa = 41.3\%$	$W_{\text{п}} = 3.82\text{E-}07$ $W_{\text{пв}} = 1.57\text{E-}07$ $\kappa = 41.2\%$	$W_{\text{п}} = 3.82\text{E-}07$ $W_{\text{пв}} = 1.57\text{E-}07$ $\kappa = 41.2\%$	$W_{\text{п}} = 3.83\text{E-}07$ $W_{\text{пв}} = 1.57\text{E-}07$ $\kappa = 41.2\%$	$W_{\text{п}} = 4.09\text{E-}09$ $W_{\text{пв}} = 1.57\text{E-}09$ $\kappa = 38.4\%$	$W_{\text{п}} = 2.90\text{E-}10$ $W_{\text{пв}} = 6.44\text{E-}12$ $\kappa = 2.22\%$
Ф12.0	$W_{\text{п}} = 4.37\text{E-}06$ $W_{\text{пв}} = 2.31\text{E-}06$ $\kappa = 52.9\%$	$W_{\text{п}} = 4.01\text{E-}07$ $W_{\text{пв}} = 2.11\text{E-}07$ $\kappa = 52.6\%$	$W_{\text{п}} = 4.01\text{E-}07$ $W_{\text{пв}} = 2.11\text{E-}07$ $\kappa = 52.6\%$	$W_{\text{п}} = 4.01\text{E-}07$ $W_{\text{пв}} = 2.11\text{E-}07$ $\kappa = 52.6\%$	$W_{\text{п}} = 4.09\text{E-}09$ $W_{\text{пв}} = 2.11\text{E-}09$ $\kappa = 51.6\%$	$W_{\text{п}} = 9.62\text{E-}11$ $W_{\text{пв}} = 8.63\text{E-}12$ $\kappa = 9\%$

В таблице используются обозначения: $W_{\text{п}}$ – полный поток энергии, регистрируемой в соответствующем канале установки; $W_{\text{пв}}$ – поток энергии в частотном интервале, соответствующем полувысоте полосового фильтра; κ – отношение потока энергии на полувысоте полосового фильтра к полному потоку энергии в соответствующем канале (телескопе) установки.

Эти значения можно взять как предварительные для калибровки аппаратуры в предстоящих измерениях. Затем были рассчитаны значения ожидаемых потоков энергии в каналах установки при разных спектрах излучения во время солнечных вспышек. Нормировка проводилась по потокам энергии, зарегистрированным во время солнечных вспышек в работе [3]: $W = 1.6 \cdot 10^{-18} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{Гц})$.

Рассматривались возможные вспышки с различными формами спектров излучения: с растущим показателем спектра $\gamma = 2$ и с U-образным видом спектра излучения [3].

При этом рассматривались различные варианты: спектр спадает с показателем степени $\gamma = -3$ до минимального значения при частоте $\nu = 0.25$ ТГц, а затем растет с показателем спектра $\gamma = +2$, спадает с показателем спектра $\gamma = -3$ до значения частоты $\nu = 0.4$ ТГц (или 1.0 ТГц и 3.0 ТГц), а затем растет с показателем спектра $\gamma = +2$ и др. (см. табл. 1).



Рис. 4: Распределение потока излучения от Солнца внутри детектора по частоте при полосовом фильтре 1.0 ТГц.

Нужно отметить, что при работе установки с полосовыми фильтрами, выбирающими нужный интервал частот, могут появляться значительные посторонние “примеси” в результаты измерений. Даже при хороших полосовых фильтрах, выделяющих необходимый нам частотный диапазон с точностью до нескольких процентов, из-за растущего спектра излучения от Солнца и вспышек, на выбранном нами участке измерения 0.4–12.0 ТГц, поток энергии от Солнца и солнечных вспышек увеличивается на три-четыре порядка, а значит полосовой фильтр, который, например, в диапазоне частот 1.0 ± 0.2 ТГц имеет полосу пропускания (см. рис. 4) лучше 0.01, из-за роста потока энергии в интервале частот от 1.0 до 20.0 ТГц на три порядка, пропускает часть этого излучения в детектор, что может привести к ошибкам в определении мощности излучения вспышки. Зависимость спектральной энергии в детекторе установки “Солнце–Терагерц” от спокойного Солнца показана на рис. 4.

Большая часть энергии, зарегистрированной в диапазоне 2.0–20.0 ТГц, не имеет отношения к каналу 1.0 ТГц и является побочной примесью, загрязняющей результаты измерений.

Рассмотрим один из возможных вариантов решения этой задачи. На рис. 5 показана зависимость энерговыделения в детекторе установки от различного типа вспышек.

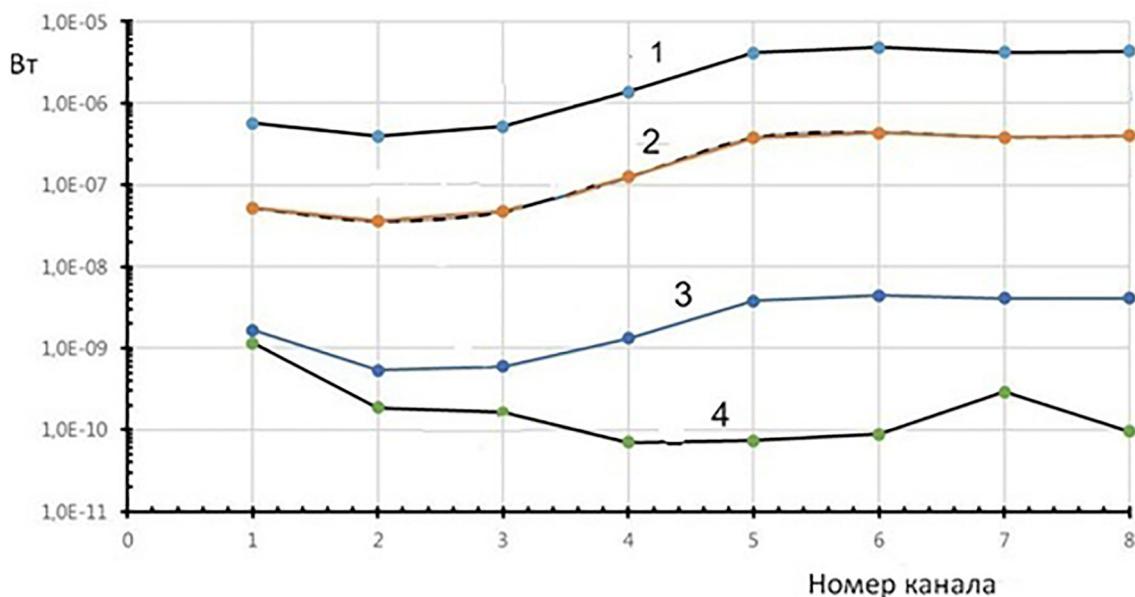


Рис. 5: Зависимость выделения энергии в детекторах установки “Солнце–Терагерц”, от номера регистрирующего канала НА при различных спектрах излучения солнечных вспышек и Солнца: 1 – Солнце, 2 – спектры с $\gamma = +2$ и U-образные спектры с минимумом потока энергии, 3 – U-образный спектр с минимумом потока энергии при частоте 1.0 ТГц, 4 – U-образный спектр с минимумом потока энергии при частоте 3.0 ТГц.

Видно, что эта зависимость имеет разный характер для Солнца и солнечных вспышек и зависит от их спектров. Следовательно, во время проведения эксперимента мы сможем подобрать для зарегистрированного события, такой вид спектра, который полностью с ним совпадет. Тем самым можно будет определить вид характеристики спектра излучения на входе НА.

На рис. 6 показаны спектры, пересчитанные к входу установки с учетом полосы пропускания полосового фильтра и коэффициента пропускания каналов НА “Солнце–Терагерц”.

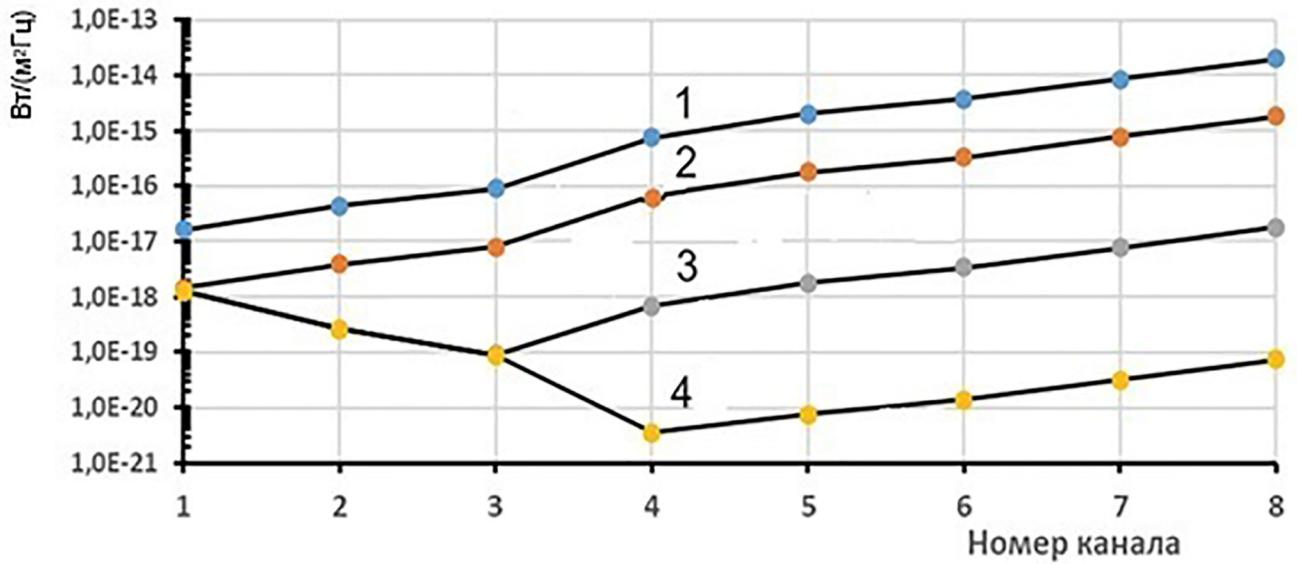


Рис. 6: Спектры излучения Солнца и солнечных вспышек на входе апертуры телескопов в полосе пропускания соответствующих каналов НА. 1 – спектр излучения Солнца, 2 – спектры с $\gamma = +2$ и U-образные спектры с минимумом потока энергии при частоте 0.25 и 0.4 ТГц, 3 – U-образный спектр с минимумом потока энергии при частоте 1.0 ТГц, 4 – U-образный спектр с минимумом потока энергии при частоте 3.0 ТГц.

Для наглядности на рис. 6 все спектры солнечных вспышек снормированы к первому каналу спектра с показателем $\gamma = +2$.

Нужно отметить, что спектр с показателем $\gamma = +2$ и U-образные спектры с частотами перегиба при 0.25 и 0.4 ТГц ложатся на одну кривую. Это отражает характеристики НА “Солнце–Терагерц”, канала которого настроены на регистрацию излучения, начиная с частоты выше 0.4 ТГц. Следовательно, прибор будет регистрировать только восходящие ветви спектров с $\gamma = +2$, и U-образные спектры с минимумом потока энергии при 0.25 и 0.4 ТГц, имеющие показатель восходящей ветви $\gamma = +2$. Спектры с минимумом потока энергии при 1.0 ТГц, 3.0 ТГц и выше будут давать разные кривые.

Если вместо номера канала поставить соответствующую ему частоту полосового фильтра, мы получим частотные спектры солнечных событий в привычных координатах – поток ($\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{Гц}$) и частота (ТГц) рис. 7.

Таким образом, несмотря на значительный вклад в каналы НА “Солнце–Терагерц” побочных излучений, не входящих в полосу частот канала, спектры излучений доста-

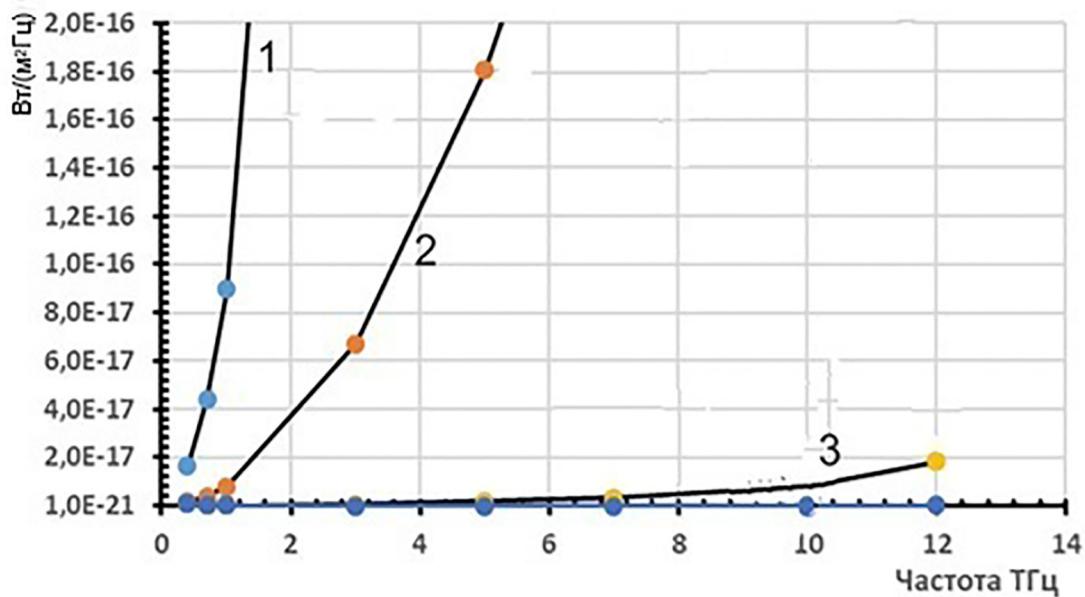


Рис. 7: Частотный спектр Солнца и солнечных вспышек. 1 – Солнце, 2 – U-образный спектр с минимумом потока энергии при частоте 0.25 и 0.4 ТГц, 3 – U-образный спектр с минимумом потока энергии при частоте 1.0 ТГц. Синие точки соответствуют спектру с минимумом.

точно надежно идентифицируются (рис. 5) и позволяют построить спектр зарегистрированного события (рис. 6 и 7).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] В. Калинин, М. В. Филиппов, В. С. Махмутов и др., Космические исследования **59**(1), 3 (2021). DOI: 10.31857/S0023420621010040.
- [2] ASTM. Designation: E 490 – 00a (Reapproved 2006 Standard). Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- [3] P. Kaufmann, J.-P. Raulin, C. G. Giménez de Castro, et al., The Astrophysical Journal **603**, L121 (2004). DOI: 10.1086/383186.
- [4] А. В. Степанов, Терагерцовое излучение Солнца. Достижения и новые вызовы. Лекция. БШФФ-2019. С. 30–34 (Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург).

- [5] М. В. Филиппов, В. И. Логачёв, В. С. Махмутов и др., Космическая техника и технологии **2**(45), 68 (2024).

Поступила в редакцию 6 июля 2025 г.

После доработки 3 декабря 2025 г.

Принята к публикации 4 декабря 2025 г.