

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

УДК 53.082

**ИМИТАТОР ЧЕРНОГО ТЕЛА ДЛЯ КАЛИБРОВОК НАУЧНОЙ  
АППАРАТУРЫ “СОЛНЦЕ-ТЕРАГЕРЦ”**

**© 2025 г. М. В. Филиппов<sup>а,\*</sup>**

*<sup>а</sup>Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук*

*Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53*

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

Поступила в редакцию 15.03.2025 г.

После доработки 23.04.2025 г.

Принята к публикации 12.05.2025 г.

Космический эксперимент “Солнце-Терагерц” готовится к проведению на борту российского сегмента Международной космической станции с 2026 г. Цели эксперимента – получение данных о терагерцевом излучении Солнца, а также об изучении 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 первичных калибровок детекторов научной аппаратуры необходим тепловой источник. Для этого был разработан имитатор черного тела, позволяющий направлять в телескопы научной аппаратуры потоки от излучающего элемента при различных температурах. По результатам экспериментальной проверки сделаны выводы о точности задания температур измерителем-регулятором и о температурном градиенте от центра к краю зеркала излучателя.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проводятся наземные и внеатмосферные наблюдения излучения практически во всем солнечном спектре [1–4], кроме спектра терагерцевого излучения, частоты которого расположены в диапазоне между инфракрасным и микроволновым излучениями, примерно от 1 до 30 ТГц. Исследование излучения терагерцевого диапазона осложняется невозможностью его наблюдения с наземных станций, так как оно практически полностью поглощается земной атмосферой, за исключением окна прозрачности с центральной частотой около 30 ТГц [5]. Космический эксперимент “Солнце-Терагерц” разработан для исследования вспышечного излучения Солнца в диапазоне частот от 0.4 до 12 ТГц [6]. Главная цель эксперимента – получение новых экспериментальных данных для разработки и дальнейшего развития моделей физического механизма возникновения мощных

солнечных протонных вспышек и их прогнозирование [7–15].

Изучение солнечных вспышек на различных частотах позволяет исследовать процессы, происходящие на разных уровнях солнечной атмосферы. Например, данные по субмиллиметровому излучению Солнца позволяют изучать процессы ускорения и переноса потоков энергичных электронов в нижних слоях солнечной атмосферы от переходной области до хромосферы [16]. Некоторые вспышки имеют второй спектральный компонент: вместо ожидаемого уменьшения потоков гиротронного излучения с ростом частоты наблюдается их повышение на частотах 212, 405 ГГц и выше [7, 12].

Ожидаемые результаты исследования – получение новых экспериментальных данных о спектре солнечного излучения, особенно в терагерцевом диапазоне волн порядка 1–10 ТГц, что позволит изучить характеристики и физическую природу этой особенности (повышение потоков гиротронного излучения) частотного спектра, определить частоту, на которой происходят изменения наклона спектра в различных солнечных вспышках.

Разрабатываемая аппаратура представляет собой совокупность восьми детекторов, чувствительных к излучению на частотах 0.4, 0.7, 1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 10.0 и 12.0 ТГц.

В состав каждого детектора входят:

- оптический телескоп [17], концентрирующий излучение на приемнике;
- система последовательных фильтров, обеспечивающая частотную селективность детекторов [18];
- оптический прерыватель, модулирующий излучение во входном окне приемника [19];
- приемник, состоящий из оптоакустического преобразователя “ячейка Голя” (ОАП) и платы усилителя [20].

Блок электроники научной аппаратуры представляет собой совокупность электронных плат [21].

Старт космического эксперимента “Солнце–Терагерц” запланирован на 2026 г.

Вспомогательная аппаратура, используемая для проверок спектральных характеристик и калибровок детекторов, включает в себя имитатор черного тела (ИЧТ), который предназначен для проведения проверок и калибровок детекторов научной аппаратуры “Солнце–Терагерц” при наземной экспериментальной отработке.

В настоящей работе приведены описание, принципы работы и характеристики ИЧТ, а также методы проверки его характеристик с помощью инфракрасного пирометра и тепловизора, разработанного на базе инфракрасной камеры MLX90640.

## 2. ИМИТАТОР ЧЕРНОГО ТЕЛА

Имитатор черного тела состоит из двух блоков: излучатель ИЧТ и блок управления и питания (БУП), он обеспечивает решение следующих задач научного эксперимента:

- формирование потока излучения в терагерцевом диапазоне волн, подобного излучению абсолютно черного тела;
- проверку работоспособности научной аппаратуры в широком диапазоне температуры излучателя ИЧТ;
- оценку чувствительности оптических трактов научной аппаратуры.

Принцип действия ИЧТ заключается в формировании потока энергии в терагерцевом диапазоне волн с помощью нагреваемого керамического излучателя и внеосевого параболического зеркала. Основные характеристики ИЧТ:

- диапазон воспроизводимой температуры составляет 373–973 К,
- дискретность цифровой индикации температуры равна 1.0 К,
- нестабильность поддержания температуры излучателя составляет  $\pm 0.2$  К.

Излучающим элементом служит шайба, изготовленная из алюмо-нитридной керамики AlN-230 с теплопроводностью 230 Вт/(м·К) и со степенью черноты в терагерцевом диапазоне волн не менее 0.88.

Измерение температуры (обратная связь) излучающего элемента осуществляется с помощью термопары хромель-алюмель.

Направленный поток энергии терагерцевого диапазона волн формируется внеосевым параболическим зеркалом с фокусным расстоянием 100 мм, в фокусе которого помещен излучающий элемент. Зеркало изготовлено из алюминиевого сплава с полированной поверхностью.

Состав БУП:

- печатная плата схемы управления мощностью питания нагревателя, собранная по схеме линейного стабилизатора напряжения;
- понижающий тороидальный трансформатор с четырьмя вторичными обмотками;
- измеритель-регулятор (ПИД) микропроцессорный одноканальный ТРМ10 [22];
- вентилятор.

Задание и поддержание температуры нагревателя ( $T_{ИЧТ}$ ) излучающего элемента осуществляется путем ПИД-регулирования напряжения, подаваемого на нагреватель, контроль температуры нагревателя осуществляется с помощью термопары хромель-алюмель.

Для логического устройства микропроцессорного регулятора установлена работа в режиме прямого гистерезиса (режим нагревателя).

### 3. ПРОВЕРКА ИМИТАТОРА ЧЕРНОГО ТЕЛА ПРИ ПОМОЩИ ИНФРАКРАСНОГО ПИРОМЕТРА

В качестве первичного средства контроля температуры излучающего элемента использован инфракрасный пирометр “Кельвин–Компакт Д” [23], с помощью которого было проведено сравнение температуры излучателя ИЧТ по данным измерителя-регулятора БУП и температуры, измеренной пирометром с поверхности зеркала излучателя ИЧТ.

Излучатель ИЧТ и пирометр были установлены на расстоянии 300 мм. Оптические оси были совмещены с помощью лазерного указателя пирометра. Поле зрения пирометра на данном расстоянии составляет 3 мм, что соответствует площади пятна  $S_{\text{КК}} = 7.07 \times 10^{-6} \text{ м}^2$ .

В табл. 1 приведены результаты измерений,  $T_{\text{ИЧТ}}$  – температура излучателя ИЧТ по данным измерителя-регулятора БУП,  $T_{\text{КК}}$  – максимальная (измеряемая с оптической оси зеркала) температура излучателя ИЧТ по данным инфракрасного пирометра,

$(T_{\text{ИЧТ}} - T_{\text{КК}})/T_{\text{ИЧТ}} \cdot 100\%$  – относительная погрешность температуры излучателя ИЧТ.

**Таблица 1.** Сравнение заданной по данным измерителя-регулятора БУП и измеряемой пирометром “Кельвин–Компакт” температур излучателя ИЧТ

$T_{\text{ИЧТ}}, \text{ К}$	$T_{\text{ТВ}}, \text{ К}$	$\frac{T_{\text{ИЧТ}} - T_{\text{ТВ}}}{T_{\text{ИЧТ}}} \cdot 100\%$
373	363	2.68
473	455	3.80
573	546	4.71
673	636	5.49
773	721	6.72
873	805	7.79

Разница между заданным и измеренным значениями температуры излучателя ИЧТ в интервале от 373 до 873 К находится в пределах 8%.

Следует заметить, что данный метод проверки ИЧТ имеет существенный недостаток: испытанию подвергается только малая часть поверхности зеркала, ограниченная кругом площадью  $S_{\text{КК}}$ , и величина температурного градиента от центра до краев зеркала остается неисследованной.

### 4. ПРОВЕРКА ИМИТАТОРА ЧЕРНОГО ТЕЛА ПРИ ПОМОЩИ ТЕПЛОВИЗОРА

С целью уточнения параметров излучателя ИЧТ разработан тепловизор на основе инфракрасной камеры MLX90640 [24].

Изготавливаются два типа MLX90640: с углами обзора  $110^{\circ} \times 75^{\circ}$  (А) и  $55^{\circ} \times 35^{\circ}$  (В). Для данной работы выбран модуль типа В.

Паспортные значения основных характеристик инфракрасной камеры MLX90640:

- разрешение составляет  $32 \times 24$  пикселей;
- рабочая температура от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $85^{\circ}\text{C}$ ;
- диапазон измерений от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $300^{\circ}\text{C}$ ;
- погрешность составляет не более  $2^{\circ}\text{C}$  для типа А и не более  $1^{\circ}\text{C}$  для типа В.

MLX90640 взаимодействует с устройствами по интерфейсу I<sup>2</sup>C с поддержкой режима FM+ (до 1 МГц тактовой частоты). Выводы SDA и SCL толерантны к напряжению 5 В.

Для удобства взаимодействия с модулем существует отладочная плата GYMCU90640, включающая в себя модуль MLX90640 и дополнительный микроконтроллер, осуществляющий первичную обработку данных и их передачу по интерфейсу UART на частоте 115200 бод. Температура для каждого пикселя (в  $^{\circ}\text{C} \cdot 100$ ) передается в виде двухбайтовых чисел. Для сопряжения с компьютером в данной работе использован преобразователь интерфейсов UART $\leftrightarrow$ USB на базе микросхемы FT232. С частотой 3 кадра в секунду данные поступают на компьютер, где происходит их обработка и визуализация.

Погрешность измерения температуры камерой MLX90640 зависит от типа устанавливаемого объектива, а также от заданной кадровой частоты. На частоте 3 кадра в секунду погрешность измерения температуры для обоих типов камер не превышает  $0.5^{\circ}\text{C}$  [Ошибка! Источник ссылки не найден.24].

На рис. 1 показан процесс проведения измерения температуры излучателя ИЧТ с помощью тепловизора. Слева – фотография излучателя ИЧТ. Для визуализации использована библиотека алгоритмов компьютерного зрения и обработки изображений OpenCV (open source computer vision library) [25]. В центре – изображение, полученное по данным тепловизора. Справа – изображение после обработки интерполяционным алгоритмом передискретизации “cv.INTER\_AREA”. Данное изображение приводится для более наглядной визуализации.

**Рис. 1.** Процесс проведения измерения температуры ИЧТ

Изображение излучения ИЧТ раскладывается примерно на 44 пикселя тепловизора, которые можно выделить из полного кадра сортировкой в порядке снижения температуры.

Измерения были проведены для температур ИЧТ (по данным измерителя-регулятора БУП) 150, 200, 250, 300 и  $350^{\circ}\text{C}$  (423, 473, 523, 573 и 623 К соответственно). При этом массив данных для каждой из температур ИЧТ формировался как среднее по 100 измерениям (кадрам), т. е. за время около 30 с. Результаты приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Сравнение заданной по данным измерителя-регулятора БУП и измеряемой тепловизором температур излучателя ИЧТ

$T_{ИЧТ}, K$	$T_{ТВ}, K$	$\frac{T_{ИЧТ}-T_{ТВ}}{T_{ИЧТ}} \cdot 100\%$
373	355.81	4.61
423	397.46	6.04
473	438.99	7.19
523	480.83	8.06
573	525.96	8.21
623	567.54	8.90

Диаметр большого зеркала телескопа соответствует внутреннему диаметру излучателя ИЧТ, а площадь большого зеркала телескопа [17]  $S_{БЗ} = 4.53 \times 10^{-3} \text{ м}^2$ . На каждый пиксель тепловизора (в картинной плоскости, рис. 1) приходится доля площади зеркала излучателя ИЧТ, равная  $S_{ТВ_1} = S_{БЗ}/44 = 0.10 \times 10^{-3} \text{ м}^2$ .

Погрешность температуры при измерении инфракрасным пирометром “Кельвин–Компакт Д” оказалась ниже вследствие того, что  $S_{ТВ_1}/S_{КК} = 14.14$ , т. е. на один пиксель тепловизора приходится площадь, на порядок большая, чем площадь пятна для пирометра. С учетом снижения температуры от центра зеркала усредненная температура по большей площади  $S_{ТВ_1}$  оказалась существенно ниже.

Согласно закону Стефана–Больцмана [26], энергетическая светимость абсолютно черного тела ( $R_{ИЧТ}$ ) при температуре  $T$  задается формулой

$$R_{ИЧТ}(T) = \sigma T^4, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана,  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

Для излучателя ИЧТ при использовании данных тепловизора закон Стефана–Больцмана можно записать в виде

$$\sigma T_{\text{э}}^4 = \frac{\sigma}{N} \sum_{i=1}^N T_i^4, \quad (2)$$

где  $T_{\text{э}}[\text{К}]$  – эффективная температура излучателя ИЧТ,  $T_i[\text{К}]$  – температура  $i$ -го пикселя из числа входящих в изображение излучателя ИЧТ,  $N$  – число пикселей, входящих в изображение излучателя ИЧТ,  $N = 44$ .

Эффективная температура излучателя ИЧТ, выраженная из формулы (2), задается выражением

$$T_{\text{э}} = \sqrt[4]{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i^4}, \quad (3)$$

Для температур 373, 423, 473, 523, 573 и 623 К излучателя ИЧТ по данным измерителя-регулятора БУП, согласно формуле (3) получены расчетные значения эффективных температур, равные 337.22, 366.63, 397.62, 430.15, 463.53 и 497.05 К соответственно.

На рис. 2 приведены графики зависимости температуры трех произвольных пикселей (№ 1, № 10, № 20 в порядке убывания температуры для пикселя) тепловизора от температуры излучателя ИЧТ по данным измерителя-регулятора БУП. Точками отмечены следующие измеренные значения при проведении измерений на температурах излучателя ИЧТ: 423, 473, 523, 573 и 623 К. Прямые проведены с помощью линейной экстраполяции по методу наименьших квадратов. Коэффициент детерминации для каждой прямой  $R^2 = 0.99$ . Таким образом удастся преодолеть ограничение данного тепловизора на максимальную измеряемую температуру 300 °С (573 К) и расчетными методами определить температуру каждого пикселя, входящего в изображение зеркала излучателя ИЧТ при температурах излучателя ИЧТ, превышающих максимальную для тепловизора.

**Рис. 2.** Графики зависимостей температур для трех произвольных пикселей изображения зеркала излучателя ИЧТ

Для температур излучателя ИЧТ 673 К, 723 К, 773 К, 823 К и 873 К, по данным измерителя-регулятора БУП, с помощью линейной экстраполяции и формулы (3). была рассчитана эффективная температура излучателя ИЧТ, она составила 527.71 К, 560.55 К, 593.47 К, 626.47 К, 659.53 К, соответственно.

Энергетическая светимость  $R$  (Вт/м<sup>2</sup>) для ИЧТ в диапазоне частот от  $\nu_1$  до  $\nu_2$  вычисляется из соотношения

$$R(T) = \int_{\nu_1}^{\nu_2} r(\nu, T_{\text{ИЧТ}}) d\nu, \quad (4)$$

где  $\nu$  [Гц] – частота излучения,  $T_{\text{ИЧТ}}$  [К] – температура излучателя ИЧТ,  $r(\nu, T_{\text{ИЧТ}})$  [Вт/(м<sup>2</sup> · Гц)] – спектральная плотность излучения на единицу площади в интервале частот ( $\nu$ ;  $d\nu$ ).

Согласно формуле (4), при условии, что поток излучения  $\Phi_d(T_{\text{ИЧТ}})$ , поступающий на входное окно телескопа детектора, равномерен вдоль поверхности большого зеркала телескопа, верно выражение

$$\Phi_d(T_{\text{ИЧТ}}) = S_{\text{тел}} \int_{\nu_1}^{\nu_2} r(\nu, T_{\text{ИЧТ}}) d\nu, \quad (5)$$

где  $S_{\text{тел}}$  – площадь входного окна телескопа (она рассчитана как разность площади большого зеркала с площадью малого зеркала и крестовины [17]),  $S_{\text{тел}} = 3.84 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ .

Тогда поток излучения от ИЧТ, поступающий в приемник  $\Phi_n$ , равен

$$\Phi_n(T_{\text{ИЧТ}}) = S_{\text{тел}} \int_{\nu_1}^{\nu_2} d(\nu) r(\nu, T_{\text{ИЧТ}}) t_{\text{рез}}(\nu) d\nu, \quad (6)$$

где  $d(\nu)$  – отношение потока излучения, падающего на входное окно приемника, к потоку излучения, падающего на входное окно телескопа, вследствие дифракционных потерь на зеркалах [17],  $t_{\text{рез}}(\nu)$  – коэффициент пропускания оптического тракта детектора: телескоп, система фильтров и входное окно [18].

Выражение для потока излучения от ИЧТ (6) можно преобразовать с учетом данных тепловизора следующим образом: как видно на рис. 1, наибольшая температура соответствует четырем центральным пикселям излучателя ИЧТ, что соответствует площади  $4S_{\text{ТВ}_1} = 0.40 \times 10^{-3} \text{ м}^2$  от большого зеркала телескопа. В свою очередь, площадь малого зеркала телескопа задается выражением  $S_{\text{МЗ}} = 0.49 \times 10^{-3} \text{ м}^2$ . Таким образом, излучение четырех центральных пикселей ИЧТ полностью экранируется малым зеркалом телескопа. Также экранируется площадь, примерно соответствующая еще одному пикселю вблизи четырех центральных. Для определенности можно считать его пятым по порядку. С учетом условного разбиения поверхности зеркала излучателя ИЧТ на пиксели и экранирования пяти пикселей обратной стороной малого зеркала телескопа, формула (6) запишется в следующем виде:

$$\Phi_{\text{п}}(T_{\text{ИЧТ}}) = S_{\text{ТВ}_1} \sum_{i=5}^{44} \int_{\nu_1}^{\nu_2} d(\nu) r(\nu, T_{\text{ИЧТ}}^i) t_{\text{рез}}(\nu) d\nu, \quad (7)$$

где  $T_{\text{ИЧТ}}^i$  [К] – температура для  $i$ -го пикселя излучателя ИЧТ по данным тепловизора.

Формула (7) интерпретирует излучатель ИЧТ как 44 источника (по числу пикселей в изображении зеркала ИЧТ), из числа которых в итоговой сумме не учитываются первые 5, так как они экранируются малым зеркалом телескопа. Поток каждого пикселя ИЧТ поступает на соответствующий ему элемент телескопа. Таким образом, входное окно телескопа также разделяется на 44 независимых элемента (пикселя).

С учетом того, что малое зеркало телескопа перекрывает часть площади большого зеркала, пиксели №№ 1–5 соответствуют температуре 20 °С (293 К), что примерно соответствует собственной температуре малого зеркала в условиях помещения. Для температур излучателя ИЧТ, равных 373, 423, 473, 523, 573, 623, 673, 723, 773, 823 и 873 К, по данным измерителя-регулятора БУП эффективная температура излучателя ИЧТ составляет 332.06, 358.45, 386.60, 416.61, 447.21, 478.55, 506.65, 537.18, 567.84, 598.61 и 629.46 К соответственно.

Далее проведены измерения температуры на стенде, в основе которого использован одноканальный макет детектора научной аппаратуры [18]. Тепловизор устанавливался вместо приемника, таким образом он измерял излучение малого зеркала телескопа. Отрезающие LPF23.1 и полосовые фильтры не устанавливались, чтобы минимизировать влияние на спектр излучения ИЧТ, поступающий в приемник через оптический тракт детектора. В телескопе использованы гладкие зеркала, коэффициент отражения которых

$\rho_3(\nu)$  можно считать примерно равным 0.9. Также необходимо учитывать спектр пропускания входного окна HDPE в ОАП:  $t_{\text{HDPE}}(\nu)$  [18] в одноканальном макете.

На рис. 3 (слева) приведена фотография малого зеркала телескопа со стороны приемника. Как видно, центральная часть малого зеркала отражает обратно излучение, поступающее со стороны приемника, а излучение от большого зеркала поступает на оставшуюся часть малого зеркала в виде кольца. В центре – изображение малого зеркала, полученное по данным тепловизора при температуре на БУП 623 К. Справа – изображение малого зеркала после обработки.

**Рис. 3.** Процесс измерения излучения, отражаемого от малого зеркала телескопа

Изображение малого зеркала телескопа можно разделить приблизительно на 52 пикселя, из которых 8 пикселей составляют центральный круг. Поскольку площадь малого зеркала телескопа задается выражением  $S_{\text{МЗ}} = 0.49 \times 10^{-3} \text{ м}^2$ , на один пиксель тепловизора приходится площадь  $S_{\text{ТВ}_2} = S_{\text{МЗ}}/52 = 0.94 \times 10^{-5} \text{ м}^2$ .

С одной стороны, поток излучения в приемнике (без учета величины дифракционных потерь –  $d(\nu)$ ) вычисляется по формуле, производной от формулы (7):

$$\Phi_{\text{п}}^{\text{тел}}(T_{\text{ИЧТ}}) = S_{\text{ТВ}_1} \sum_{i=5}^{44} \int_{\nu_1}^{\nu_2} r(\nu, T_{\text{ИЧТ}}^i) t_{\text{рез}}(\nu) d\nu, \quad (8)$$

где  $\Phi_{\text{п}}^{\text{тел}}(T_{\text{ИЧТ}})$  – поток излучения, поступающий в ОАП, рассчитанный с учетом температур излучателя ИЧТ по данным тепловизора,  $t_{\text{рез}}(\nu) = \rho_3^2(\nu) \cdot t_{\text{HDPE}}(\nu)$  – спектральный коэффициент пропускания для оптического тракта.

С другой стороны, по данным тепловизионных измерений излучения малого зеркала телескопа можно записать следующим образом:

$$\Phi_{\text{п}}^{\text{МЗ}}(T_{\text{ИЧТ}}) = S_{\text{ТВ}_2} \sum_{i=1}^{52} \int_{\nu_1}^{\nu_2} r(\nu, T_{\text{ИЧТ}}^i) t_{\text{HDPE}}(\nu) d\nu, \quad (9)$$

где  $\Phi_{\text{п}}^{\text{МЗ}}(T_{\text{ИЧТ}})$  – поток излучения, поступающий в ОАП, рассчитанный из тепловизионных измерений излучения ИЧТ от малого зеркала телескопа.

Таким образом, можно ввести интегральный коэффициент потерь на телескопе  $d(T_{\text{ИЧТ}}) = \Phi_{\text{п}}^{\text{МЗ}}(T_{\text{ИЧТ}})/\Phi_{\text{п}}^{\text{тел}}(T_{\text{ИЧТ}})$  для оптического тракта без системы фильтров, включающий в себя дифракционные потери, потери на поглощение излучения воздухом и потери вследствие расхождения пучка от излучателя ИЧТ.

Для температур излучателя ИЧТ, равных 373, 423, 473, 523, 573, 623, 673, 723, 773, 823 К и 873 К, по данным измерителя-регулятора БУП коэффициент  $d_1(T_{\text{ИЧТ}})$  равен 0.1223, 0.1226, 0.1231, 0.1240, 0.1233, 0.1233, 0.1261, 0.1228, 0.1225, 0.1221, 0.1215 соответственно.

Аналогичные расчеты проведены для случая использования шероховатых зеркал в телескопе. Для температур излучателя ИЧТ, равных 373, 423, 473, 523, 573, 623, 673, 723,

773, 823 и 873 К, по данным измерителя-регулятора БУП коэффициент  $d_2(T_{\text{ИЧТ}})$  равен 0.1258, 0.1231, 0.1215, 0.1206, 0.1206, 0.1211, 0.1265, 0.1257, 0.1257, 0.1285, 0.1301 соответственно.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены описание и схемотехническая реализация имитатора черного тела для калибровок научной аппаратуры “Солнце-Терагерц”, а также тепловизора, разработанного для определения температурного градиента на зеркале излучателя ИЧТ. По данным измерений были рассчитаны калибровочные коэффициенты для корреляции температуры излучателя ИЧТ, установленной на измерителе-регуляторе БУП, с реальной температурой по данным тепловизора для 44 пикселей изображения зеркала излучателя ИЧТ. Также был рассчитан интегральный коэффициент потерь телескопа. Данный подход также позволяет в полной мере учитывать особенности геометрии оптических трактов и вносить поправку в расчеты на потоки излучения, экранируемые, в частности, малым зеркалом телескопа. Данная статья может быть полезна экспериментаторам, занимающихся теплофизическими измерениями и спектрометрическими научными приборами на базе оптоакустических преобразователей (ячейка Голея) и других чувствительных элементов.

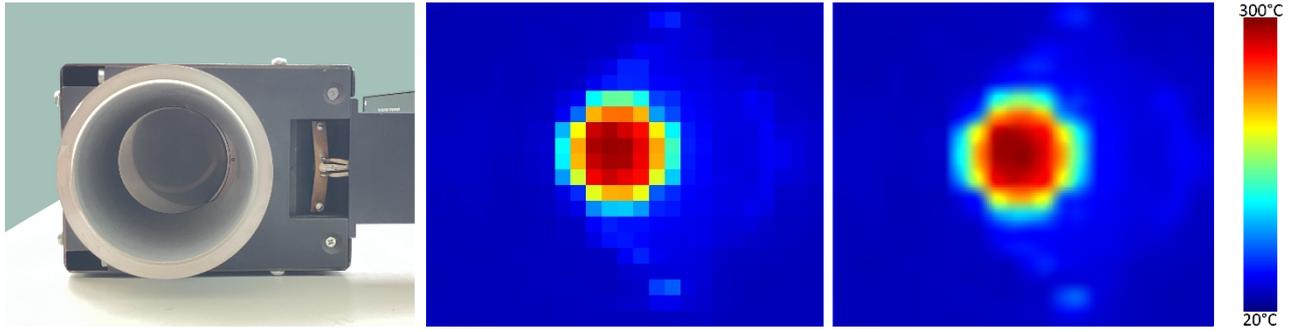
## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kinnison J., Vaughan R., Hill P. et al.* // 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.* // Proc. SPIE. 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. V. 2804. 1996. <https://doi.org/10.1117/12.259724>
5. *Kaufmann P., White, S.M., Marcon 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., Махмутов 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 Conference Proc. V. 374. P. 379. 1996. <https://doi.org/10.1063/1.50945>
10. *Kaufmann P., Costa J.E.R., Castro C.G.G. et al.* // Proc. 2001 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference. Belem, Brazil. 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.* // Astron. Astrophys. 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.* // Sol. 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. №75(6). С. 796. <https://elibrary.ru/item.asp?edn=NXQNJ>
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. *Квашинин А.А., Логачев В.И., Филиппов М.В. и др.* // Космическая техника и технологии. 2021. № 4(35). С. 22. <https://www.elibrary.ru/hgxxgn>
18. *Филиппов М.В., Логачев В.И., Махмутов В.С. и др.* // Космическая техника и технологии. 2024. № 2(45). С. 68. <https://www.elibrary.ru/xdheun>
19. *Филиппов М.В., Махмутов В.С., Максумов О.С. и др.* // Космическая техника и технологии. 2023. №1(40). 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. и др.* // ПТЭ. 2024. № 3. С. 108. <https://elibrary.ru/ousxkn>
22. Характеристики измерителя-регулятора (ПИД) ТРМ10;  
<https://owen.ru/product/trm10/specifications>
23. Характеристики инфракрасного пирометра Кельвин-Компакт Д;  
<https://zaoeuromix.ru/files/docs/KelvinD.pdf>
24. Характеристики инфракрасной камеры MLX90640;  
<https://www.melexis.com/en/documents/documentation/datasheets/datasheet-mlx90640>
25. Библиотека алгоритмов компьютерного зрения OpenCV;  
<https://pypi.org/project/opencv-python/>
26. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Т. 3. Оптика. Москва: Физматлит, 2002.

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Процесс проведения измерения температуры ИЧТ: слева – фотография излучателя, в центре – снимок, полученный с помощью тепловизора, справа – снимок после обработки. На БУП выставлена температура излучателя 350 °С.
- Рис. 2.** Графики зависимостей температур для трех произвольных пикселей изображения зеркала излучателя ИЧТ (1 – пиксель № 1, 2 – пиксель № 10, 3 – пиксель № 20) тепловизора от температуры излучателя ИЧТ по данным измерителя-регулятора БУП. Точками отмечены измеренные значения при проведении измерений на следующих температурах излучателя ИЧТ: 423, 473, 523, 573 и 623 К. Прямые проведены с помощью линейной экстраполяции до температуры излучателя ИЧТ, равной 873 К.
- Рис. 3.** Процесс измерения излучения, отражаемого от малого зеркала телескопа: слева – фотография малого зеркала со стороны приемника, в центре – снимок, полученный с помощью тепловизора, справа – аналогичный снимок, полученный после обработки. На БУП ИЧТ установлена температура, равная 623 К.



**Рис. 1.**

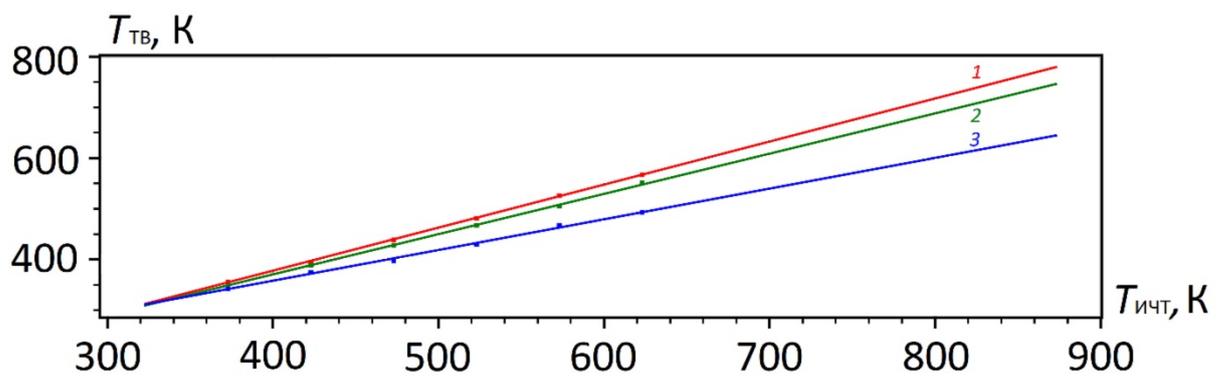
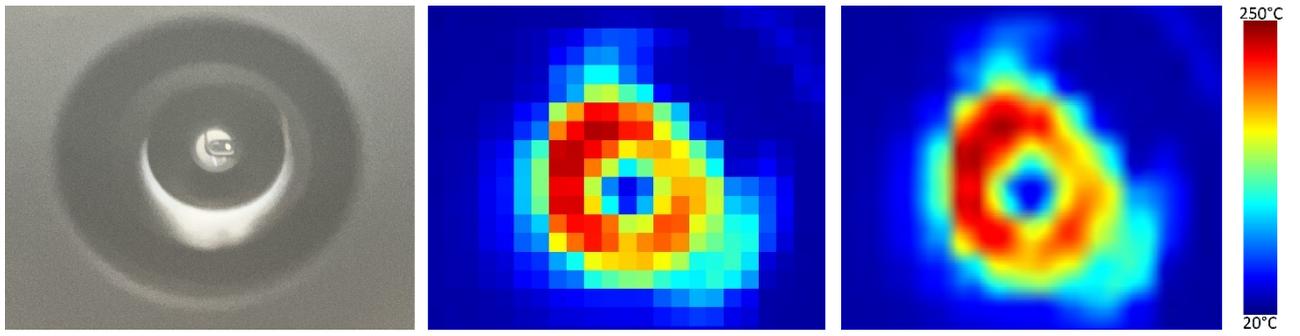


Рис. 2.



**Рис.3.**