



Мануйлов К.К.

Активное тепловое зондирование грунта малых небесных тел. Метод, аппаратура, испытания

**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** Мануйлов К.К. Активное тепловое зондирование грунта малых небесных тел. Метод, аппаратура, испытания // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2011. № 74. 19 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2011-74>

ISSN 2071-2898



**Ордена Ленина**  
**ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ**  
**имени М.В. Келдыша**  
**Российской академии наук**

К.К. Мануйлов

**АКТИВНОЕ ТЕПЛОВОЕ**  
**ЗОНДИРОВАНИЕ ГРУНТА**  
**МАЛЫХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ**  
**МЕТОД, АППАРАТУРА, ИСПЫТАНИЯ**

(Эксперимент "Термофоб")

Препринт №    за 2011 г.

**Москва**

УДК 521.053

К.К. Мануйлов. Активное тепловое зондирование грунта малых небесных тел. Метод, аппаратура, испытания. Препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 2011.

Рассматривается метод определения теплофизических свойств реголита *in situ*, реализованный в эксперименте "Термофоб" космической программы ФОБОС-ГРУНТ. Приводятся расчет характеристик прибора, детальное описание его конструкции и результаты градуировочных испытаний.

K.K. Manuilov. Active thermal probing of small planets soil. Method, technique, calibration. Keldysh Institute of Applied mathematics (RAS) preprint. Moscow, 2011.

Method of direct *in situ* determination of regolith thermo-physical properties in THERMOPHOBO experiment and features of scientific instrument installed on PHOBOS-GRUNT lander are described including device design and calibration.

© ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, 2011 г.

## Введение

В последние годы к малым телам (астероидам, кометам и метеороидам) проявляется повышенный интерес, поскольку они содержат первичное вещество, из которого формировалась Солнечная система, включая большие планеты. Природа малых тел отличается рядом принципиальных особенностей. Вследствие слабой гравитации малые тела часто имеют несферическую форму. Отсутствие атмосферы препятствует эрозии поверхности, сохраняющей следы метеоритной бомбардировки, воздействия космических лучей, солнечного излучения и солнечного ветра. Поверхностный слой малых тел является летописью процессов соударения и представляет особый интерес. Анализ периодов собственного вращения астероидов свидетельствует о рыхлой структуре многих малых тел. При слабой гравитации и отсутствии атмосферы частицы метеоритов, захваченные малыми телами, в течение миллиардов лет остаются неизменными. Спектр размеров частиц связан с плотностью энергии деструктивных процессов при их образовании, поэтому дисперсный анализ грунта на разной глубине позволяет оценить скорости сталкивавшихся тел в разные периоды истории Солнечной системы.

Исследование метеоритов показало, что некоторые малые тела претерпели дифференциацию с участием воды и лавы. В то время как ядра комет состоят из примитивного вещества, многие астероиды можно рассматривать как значительно более сложные объекты. Есть много доказательств того, что в первые полмиллиарда лет после образования Солнечной системы процессы соударения шли чрезвычайно активно. Природа соударяющихся тел, богатых или бедных летучими элементами, имела большое значение в эволюции как планет, так и их атмосфер. Предполагается, например, что значительная доля некоторых газов в атмосферах планет земной группы привнесена кометами.

В силу широкого диапазона характеристик (ускорение свободного падения от 100 до менее чем  $0,1 \text{ см/сек}^2$ , состав поверхности от металла до льда), разнообразию размеров и формы, малые тела представляют собой уникальную лабораторию для калибровки базовых планетарных процессов в зависимости от широкого ряда параметров. В принципе, можно найти схожие тела, отличающиеся только составом (карбонаты, базальты, металл и лед) или скоростью вращения. Для реализации этих возможностей необходима широкая программа исследования околосолнечного пространства.

Элементом такой программы исследования малых тел является проект ФОБОС-ГРУНТ, осуществляемый наряду с программами США и Евросоюза. Важнейшей задачей проекта является забор и доставка на Землю образцов грунта, а также определение элементного состава пород. Проект должен ответить на многочисленные вопросы, связанные с эволюцией планет Солнечной системы и их спутников.

## **Эксперимент "Термофоб"**

Эксперимент "Термофоб" по заказу Федерального космического агентства РОСКОСМОС проводится ИПМ им. М.В. Келдыша РАН и ГЕОХИ им. В.И. Вернадского РАН в кооперации с ФГУП "НПО им. С.А. Лавочкина". В эксперименте также принимают участие специалисты Центра космических исследований (ЦКИ) академии наук Польши. Целью работы является проведение теплофизических измерений в поверхностном слое Фобоса в месте посадки космического аппарата (КА) "Фобос-Грунт". [Авдуевский и др., 2000; Marov et al., 2004]. Результаты измерений должны служить калибровкой для дистанционных измерений. Определение температурной зависимости для коэффициента теплопроводности реголита дает оценку его дисперсности. Эксперименты подобного рода на малых космических телах не проводились.

## **Тепловые модели грунта Луны и Фобоса**

Для выбора метода измерения необходимо задаться моделью грунта Фобоса. Естественным ориентиром при этом являются данные анализа лунного грунта. В табл. 1 приводятся теплофизические свойства лунных пород, доставленных на Землю из районов Моря Изобилия (Луна-16), Моря Спокойствия (Apollo-11), Океана Бурь (Apollo-12, 14), Моря Дождей (Apollo-15) и материковой области (Луна-20, Apollo-16).

Согласно этим данным, реголит Луны представляет собой рыхлый дисперсный материал из магматических пород типа базальтов. Он содержит спекшиеся, частично оплавленные, почти сферические частицы со среднечисленным размером, близким к 25 мкм, и среднемассовым размером порядка 160 мкм. Лунный грунт состоит из трех слоев. Верхний (2–3 см) слой с плотностью вещества около  $0,5 \text{ г/см}^3$  имеет дендритовую структуру и образован частицами, спеченными в ходе бомбардировки поверхности космиче-

Таблица 1. Характеристики образцов лунного грунта

Миссия	Источник данных	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\lambda \cdot 10^{-3}$ , Вт/(м·К)		$c \cdot \rho$ , Дж/(см <sup>3</sup> ·К)		$a \cdot 10^{-8}$ м <sup>2</sup> /с	
			293К	216К	293К	216К	293К	216К
Луна-16 [Авдуревский и др., 1974]		1,38	2,76	—	1,07	—	0,27	—
		2,25	2,0	—	1,66	—	0,12	—
Луна-20 [Головкин и др., 1979]		1,0	2,55	—	0,8	—	0,32	—
Apollo-11 [Cremers et al., 1970]		1,3	1,85	1,59	0,95	0,776	0,196	0,205
Apollo-12 [Cremers, Birkebak, 1971]		1,3	1,72	1,24	—	—	—	—
Apollo-14 [Hemingway et al., 1973]		1,5	1,35	0,97	1,14	0,94	0,119	0,104
		1,8	1,93	1,63	1,37	1,12	0,141	0,145
Apollo-15 [Hemingway et al., 1973]		1,1	0,795	0,58	0,84	0,71	0,095	0,082
		1,3	0,92	0,74	0,98	0,84	0,094	0,088
Apollo-16 [Hemingway et al., 1973]		1,5	0,97	0,71	1,13	0,97	0,085	0,073
		1,5	0,76	0,60	1,15	0,90	0,066	0,065

Примечание:  $\rho$  – плотность;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $c$  – удельная теплоемкость грунта;  $a$  – коэффициент температуропроводности среды.

ским и солнечным излучением. Второй слой включает 3–5 м пористого вещества с отдельными крупными включениями и средней плотностью около 1 г/см<sup>3</sup>. Далее идет довольно плотный слой, вероятно, скальный грунт.

В процессе подготовки эксперимента мы провели расчет суточного хода температуры в поверхностном слое экваториальных зон Луны и Фобоса, используя для соответствующих теплофизических параметров грунта средние значения табл. 1 [Маров и др., 2010]. При отсутствии внутренних тепловых источников и малой толщине слоя, в котором происходит поглощение и излучение, задача сводится к нахождению циклического решения одномерного уравнения теплопроводности в конечной области  $0 \leq x \leq X$ .

$$c\rho \partial_t T = \partial_x (\lambda(T) \partial_x T) \quad (1)$$

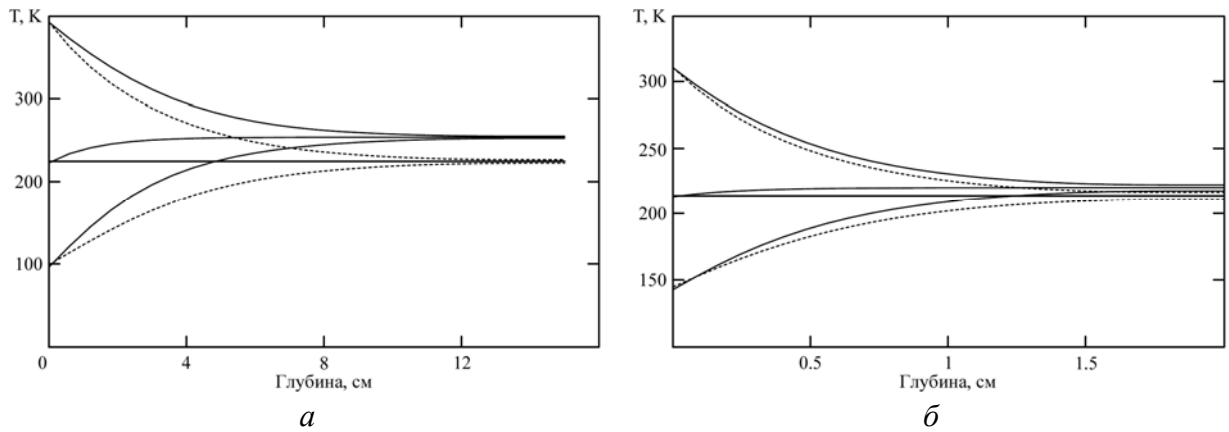
с граничным условием II рода

$$\lambda(T) \partial_x T|_{x=0} = P_i(t) - P_e(T(0, t)), \quad \partial_x T|_{x=X} = 0, \quad (2)$$

$$P_i(t) = \begin{cases} (1 - A)E \cos(\theta(t)) & \cos(\theta(t)) > 0 \\ 0 & \cos(\theta(t)) \leq 0 \end{cases},$$

$$P_e(T) = \int_0^{\infty} (1 - A(\nu)) \frac{2\pi h\nu^3}{C^2} \cdot \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1} d\nu$$

Здесь  $T(x, t)$  – температура грунта;  $\lambda(T)$ ,  $\rho$ ,  $c$  – его коэффициент теплопроводности, плотность и удельная теплоемкость;  $P_i(t)$  – тепловой поток инсоляции;  $P_e(T(0, t))$  – поток радиационной эмиссии;  $A$  и  $A(\nu)$  – интегральное и спектральное альбедо [Антипова-Каратаева и др., 1979];  $E$  – солнечная постоянная (1368 Вт/м<sup>2</sup> для Луны и 589 Вт/м<sup>2</sup> для Марса);  $\theta(t)$  – зенитный угол Солн-



**Рис. 1.** Температурные разрезы грунта Луны (а) и Фобоса (б) (максимальное, минимальное и среднесуточное значение) по данным [Маров и др., 2010] для вариантов расчета: (—)  $\lambda = 2,5 \cdot 10^{-3}$  Вт/(м·К) и (---)  $\lambda(T) = 1,65 \cdot 10^{-3}$  Вт/(м·К) +  $T^3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-10}$  Вт/(м·К<sup>4</sup>)

ца;  $k$  и  $h$  – постоянные Больцмана и Планка;  $C$  – скорость света.

На рис. 1 показаны циклические решения (1) для Луны (а) и Фобоса (б). Период обращения Фобоса  $T$  почти в 100 раз меньше лунного, поэтому глубина проникновения суточной тепловой волны  $\sqrt{\lambda T / c\rho}$  для Фобоса (0,58 см) на порядок меньше, чем для Луны (5,3 см). Для грунта с теплопроводностью, зависящей от температуры, среднесуточная температура растет с глубиной за счет большего прогрева внутренних слоев днем и меньшего выхолаживания ночью. Расчетные значения температуры поверхности Луны ( $T_{\max} = 393\text{K}$ ,  $T_{\min} = 99\text{K}$ ,  $T_{\text{cp}} = 225\text{K}$ ) согласуются с данными контактных измерений.

Характерные значения температуры поверхности Фобоса приведены в табл. 2. С нашими результатами хорошо согласуются данные инженерной модели Фобоса [Кузьмин и др., 2003 а,б], содержащие оценки вариаций температуры в районе посадки для трех вариантов состава грунта с учетом температурной зависимости его теплоемкости. Дистанционные измерения температуры Фобоса при помощи термоэмиссионного спектрометра (TES) на аппарате Mars Global Surveyor [Christensen et al., 2001] характеризуются меньшим значением дневного максимума температуры. Причиной рассогласования данных могут быть сезонные вариации температуры, а также регулярное прохождение Фобоса через тень Марса.

**Таблица 2.** Характерные температуры поверхности Фобоса

Источник данных	$c$ , кал·г <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>	$\rho$ , г·см <sup>-3</sup>	$\lambda$ , Вт·м <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>	$T_{\max}$ , К	$T_{\min}$ , К	$T_{\text{cp}}$ , К
[Маров и др., 2010]	0,18	1,2	$2,5 \cdot 10^{-3}$	311	145	215
			$1,65 \cdot 10^{-3} + T^3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-10} \cdot \text{К}^{-3}$	311	143	214
[Кузьмин и др., 2003 а,б]	0,18	1,1–1,6	0,76–23	300	130	215
[Christensen et al., 2001]	—	—	—	269	161	—

## Метод измерений

В эксперименте "Термофоб" свойства грунта определяются в процессе его нагрева по данным термометрических измерений. Длительность сеанса ( $\Delta t = 3000$  сек) определяет глубину прогрева  $\Delta x = \sqrt{\lambda \Delta t / c \rho}$ . Ввиду малости  $\Delta x$  (для реголита  $\Delta x \approx 2$  мм) при любой схеме измерений теплоперенос описывается одномерной задачей (1) с начальным условием  $T(x, 0) = T_0$  и граничным условием II рода

$$\partial_x T|_{x=0} = -Q(t) \quad (0 \leq t \leq \Delta t).$$

Решение (1) при  $\lambda, c, \rho = \text{const}(T)$ ,  $Q(t) = \text{const}$  имеет известный вид

$$T_1(x, t) = -2Qa \sqrt{\frac{t}{\pi}} e^{-\frac{x^2}{4at}} + Qx \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) + T_0, \quad \operatorname{erfc}(z) \equiv 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-s^2} ds \quad (3)$$

Тепловой поток  $Q$  на границе ( $x = 0$ ) не должен превышать величину солнечной постоянной для Фобоса ( $0,06$  Вт/см<sup>2</sup>). При более сильном нагреве возможны химические процессы в реголите, изменяющие свойства грунта.

Метод проникающего зонда требует внедрения зонда в грунт. По такой схеме разрабатывался теплофизический эксперимент на борту пенетратора в проекте МАРС-96. В процессе нагрева измеряются значения температуры грунта вблизи нагревателя  $T(0, t)$ , на расстоянии  $x$  от нагревателя  $T(x, t)$  и в невозмущенной зоне  $T(\infty, t)$ . Коэффициент температуропроводности  $a$  определяется из однопараметрического соотношения

$$\frac{T(x, t) - T(\infty, t)}{T(0, t) - T(\infty, t)} = \exp(-z^2) - z\sqrt{\pi} \operatorname{erfc}(z), \quad \text{где } z^2 = x/4at. \quad (4)$$

К сожалению, этот метод не подходит для целей эксперимента на Фобосе в связи с крайне малым значением глубины теплового воздействия  $\Delta x$ . Используемый нами метод поверхностного зонда (рис. 2), позволяющий определить тепловую инерцию грунта  $I = (\lambda c \rho)^{0,5}$ , лучше соответствует специфике эксперимента в глубоком вакууме. Для двухдатчиковой схемы измеряется температура контрольной среды в двух точках:  $T(0, t)$  и  $T(L_0, t)$ . С заменой  $T(\infty, t)$  на  $T(L_0, t)$  метод поверхностного зонда эквивалентен методу проникающего зонда (роль слоя грунта между датчиками 1 и 2 выполняет среда с известными характеристиками). Среда, физически повторяющая реголит Фобоса, вряд ли может быть реализована, да это и не нужно. Теплопровод из



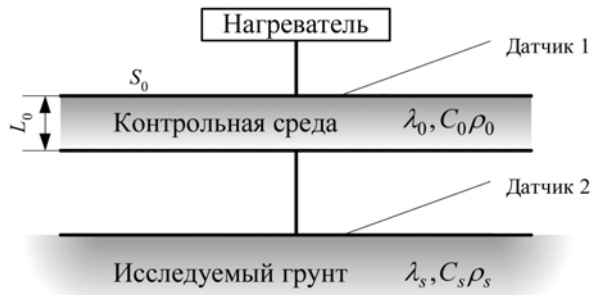


Рис. 2. Метод поверхностного зонда

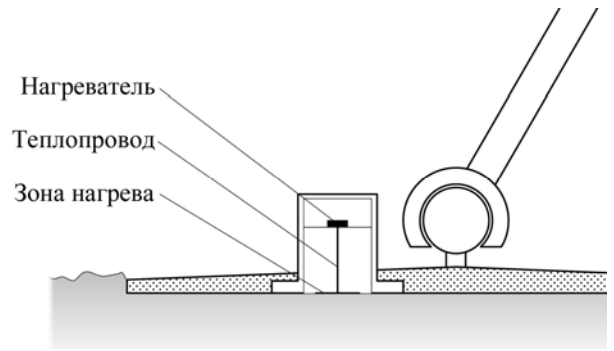


Рис. 3. Размещение блока датчиков на посадочной опоре КА

материала с параметрами  $\lambda_w, c_w \rho_w$  и сечением  $S_w$  и длиной  $L_w$  является тепловым эквивалентом среды с параметрами  $\lambda_0, c_0 \rho_0, S_0, L_0$  при условии

$$\frac{S_w}{S_0} = \sqrt{\frac{\lambda_0 c_0 \rho_0}{\lambda_w c_w \rho_w}} = \frac{I_0}{I_w}, \quad L_w = L_0 \sqrt{\frac{\lambda_w c_w \rho_w}{\lambda_0 c_0 \rho_0}} = L_0 \sqrt{\frac{a_w}{a_0}}. \quad (5)$$

Так, например, диск из лунного грунта диаметром 20 и толщиной 1 мм можно заменить медным теплопроводом сечением  $0,44 \text{ мм}^2$  и длиной 215 мм.

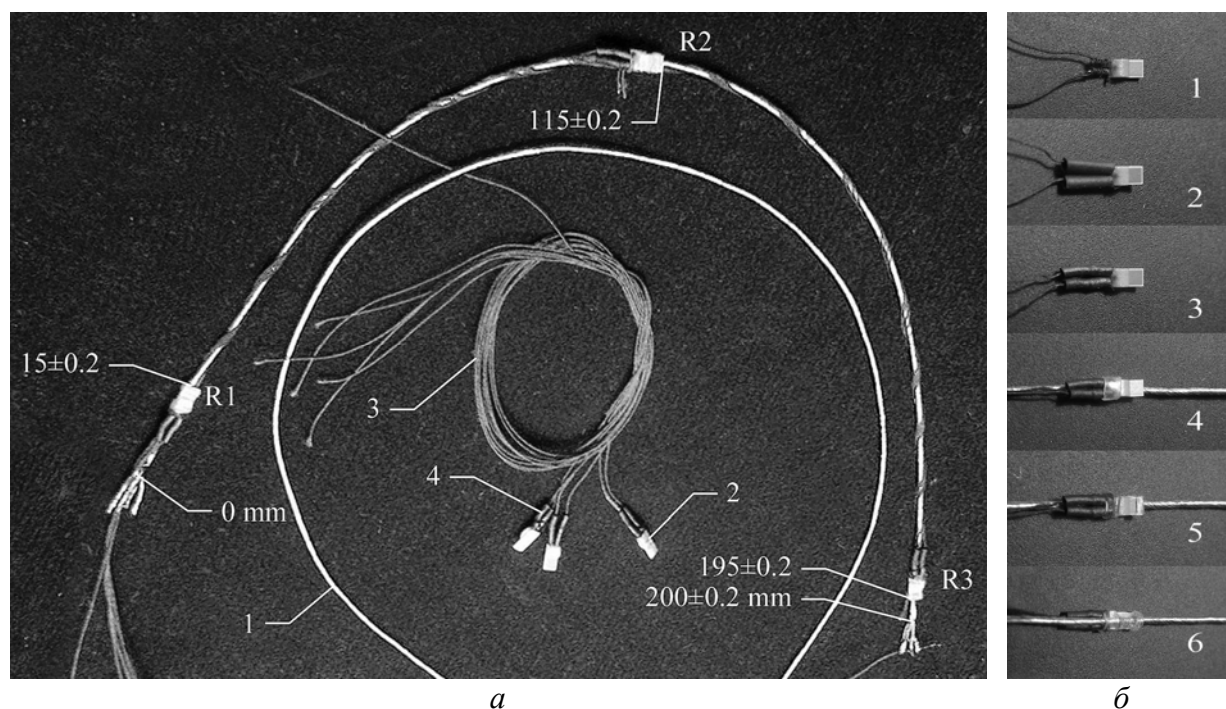
Принципиальным является обеспечение теплового контакта с грунтом. Естественным местом установки датчиков являются основания посадочных опор космического аппарата "Фобос-Грунт" (рис. 3). Благодаря шарнирной конструкции опор устраняются перекосы зоны нагрева по отношению к грунту. При скорости причаливания 0,5 м/с ускорение в момент посадки достигает  $-0,1g$ . При массе космического аппарата порядка 800 кг давление на грунт может составлять  $0,05 \text{ кгс/см}^2$ . Это чуть меньше давления  $0,07 \text{ кгс/см}^2$ , оказываемого на лунный грунт ногой космонавта в скафандре. Исходя из предположения о схожести реголита Луны и Фобоса, можно ожидать, что шероховатость рельефа под посадочными опорами будет выровнена этим давлением.

Важным преимуществом выбранного решения является защита грунта в окрестности зоны нагрева от прямого солнечного излучения и его термостабилизация за счет значительной тепловой инерции космического аппарата. Дополнительную информацию о свойствах реголита на глубине до 1 см можно получить, исследуя процесс релаксации теплового поля в течение нескольких местных суток после посадки КА.

## Прибор "Термофоб"

Основными компонентами блока датчиков являются узлы нагревателя и зоны нагрева грунта, размещенные в параллельных плоскостях на мембранах из полиимидной (ПИ) пленки и объединенные теплопроводом – основным теплоемким элементом конструкции (рис. 4). Для увеличения гибкости теплопровод выполнен в виде жгута сечением  $0,36 \text{ мм}^2$  и длиной  $4+200+4 \text{ мм}$  из 120 медных проволок, свитых с шагом 20 мм. Платиновые термометры сопротивления Pt1000 Hecaus C420 размещаются на теплопроводе на расстояниях 15, 115 и  $195 \pm 0,2 \text{ мм}$  от точки крепления теплопровода к узлу нагревателя и фиксируются отрезками термоусадочной трубки и уретановым компаундом. Для монтажа используется провод ПЭШО  $\text{Ø}0,1 \text{ мм}$ .

Базовым элементом узла нагревателя (рис. 5) является фольгированная полиимидная пленка толщиной 15 мкм, закрепленная на опорном кольце. Пленка является элементом гальванической развязки и одновременно осуществляет тепловой контакт между нагревателем (чип-резистором 20 кОм) и теплопроводом. Для этого в 6 мкм медной фольге с обеих сторон ПИ пленки вытравлены 10 мм площадки для крепления нагревателя и теплопровода, а также контактные площадки токоподводов. Токоподводы (рис. 5,в) совмещают функции элементов теплоизоляции и механической развязки и являют-



**Рис. 4.** Теплопровод в сборе (а): 1 – медный жгут, 2 – датчики температуры, 3 – соединительные провода, 4 – термоусадочная трубка; крепление датчиков к теплопроводу (б)

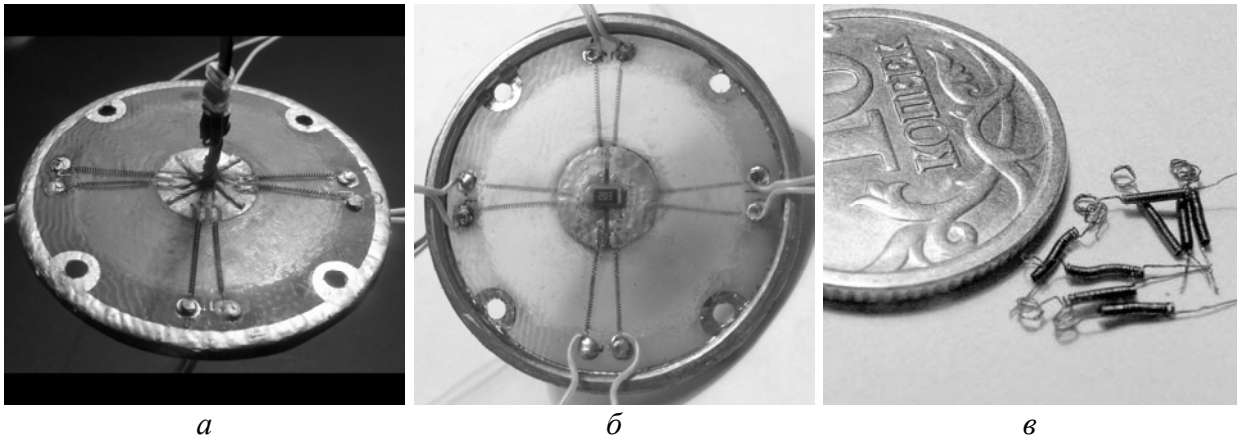


Рис. 5. Узел нагревателя со стороны теплопровода (а) и нагревателя (б). Токоподводы (в)

ся спиралями  $\varnothing 0,3 \times 3$  мм из эмалированного манганинового провода  $\varnothing 0,08$  мм с сопротивлением  $3,9 \pm 0,1$  Ом. Токоподводы припаиваются к контакт-ным площадкам в натянутом состоянии. Узел нагревателя закрыт изолирующими прокладками из полиимидной пленки толщиной 8 мкм.

Узел зоны нагрева грунта представляет собой полиимидную мембрану толщиной 25 мкм, закрепленную на опорном кольце. Мембрана обратимо деформируется под действием давления грунта до  $1 \text{ кг/см}^2$ . Центральная область пленки диаметром 20 мм, окруженная кольцевым зазором шириной 5 мм, является контактной зоной нагрева грунта. Со стороны теплопровода зона нагрева покрыта медной фольгой толщиной 6 мкм. Со стороны грунта она имеет плазменное покрытие из аморфного углерода с коэффициентом черноты 0,9 в диапазоне длин волн  $0,5 \dots 20$  мкм.

Для теплоизоляции блока датчиков (рис. 8) выбран материал ЭВТИ-В с рабочей температурой до  $+150^\circ\text{C}$ , состоящий из алюминированной полиэти-

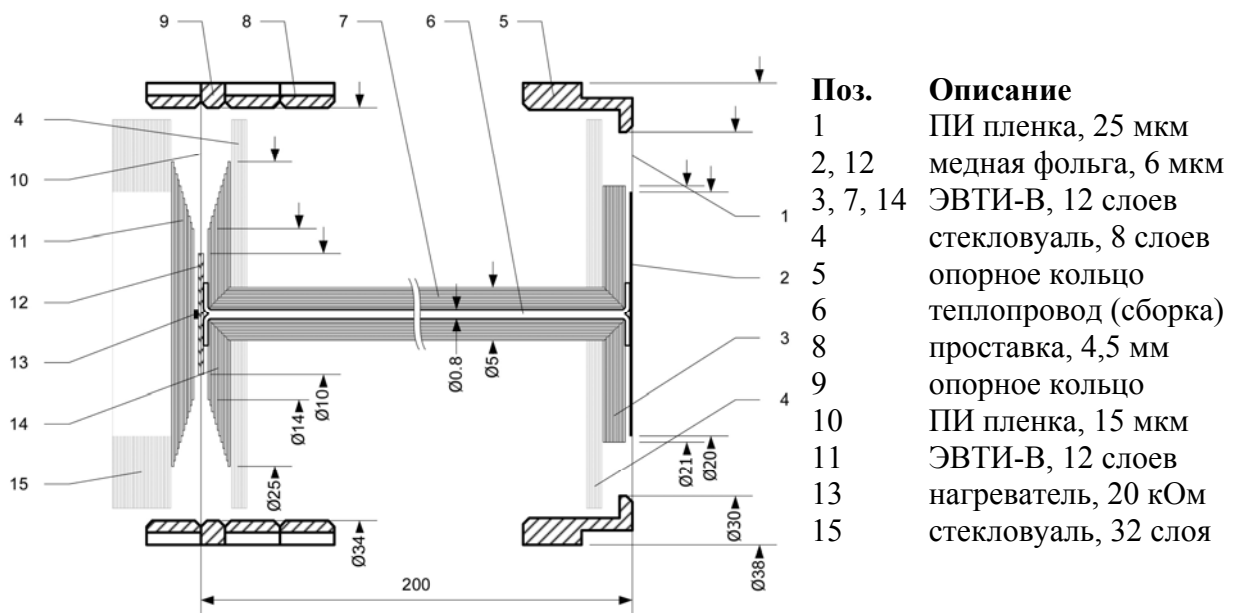


Рис. 8. Фрагмент конструкции и схема теплоизоляции блока датчиков

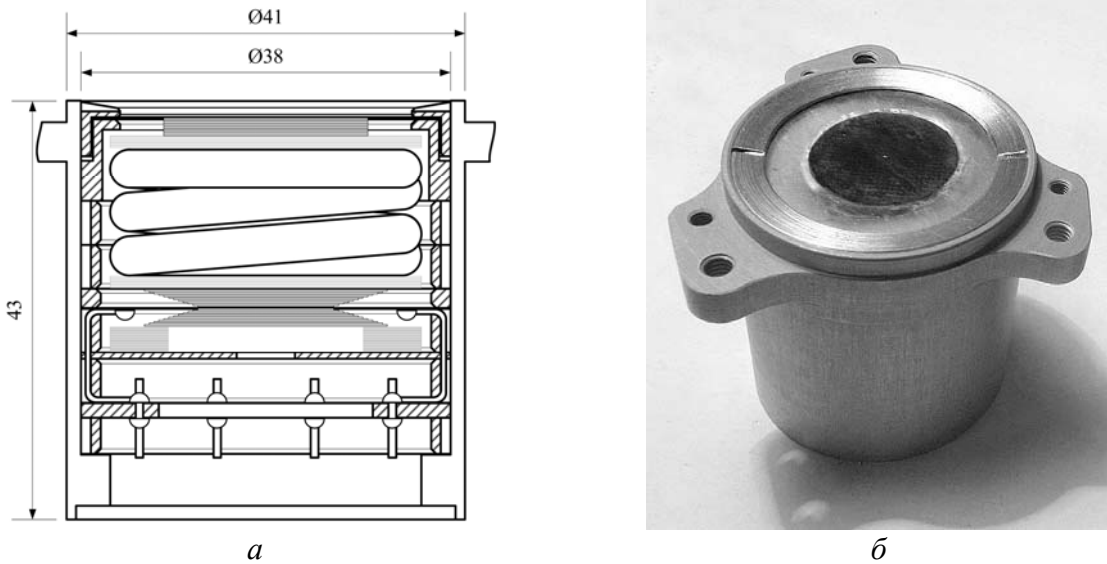


Рис. 9. Сборочный чертеж (а) и внешний вид (б) блока датчиков

лентерефталатной (лавсановой) пленки и подложки из стекловуали. Для снижения потерь теплоизоляция (в виде дисков для плоских поверхностей и лент шириной 4–8 мм для теплопровода) уложена послойно без пересечения разноуровневых слоев на стыках. Измеренная масса  $n$  слоя теплоизоляции аппроксимируется формулой  $m_n = (45 + 10n)$  мг  $\pm 10\%$ .

Теплопровод укладывается в бухту и помещается в корпус (рис. 9). Релаксация механических напряжений ЭВТИ происходит за неделю. В табл. 3 приведены данные измерений масс и расчет теплоемкости элементов блока датчиков, необходимые для построения его тепловой модели. В табл. 4 даны расчетные оценки предельных тепловых потерь в вакууме.

Блок электроники (рис. 10), расположенный в термостабилизированном отсеке КА, содержит набор преобразователей, согласующих характеристики датчиков и телеметрической системы. Для повышения надежности преобра-



Рис. 10. Блок электроники "Термофоб"

**Таблица 3.** Бюджет активных масс и теплоемкостей

Узел	Элемент	Материал	Масса, мг	$C$ , мДж/К
	Жгут	Медь	680 ± 10	231
Теплопровод	3 датчика в сборе	керамика + ПВХ	45 + 36	39 + 36
	Провод ПЭШО 0.1	медь + шелк	61 + 30	21 + 54
Узел нагревателя	ПИ пленка + клей	—	2 + 3	2 + 3
	Фольга	Медь	4	2
	Нагреватель	металл, керамика	5	4
Узел грунта	ПИ пленка + клей	—	11 + 8	12 + 8
	Фольга	Медь	17	7
Всего:			902 ± 20	419

**Таблица 4.** Расчетный баланс тепловых потерь при  $T_0 = 300\text{K}$ ,  $\Delta T = 80\text{K}$ 

Узел	Механизм (канал) теплопереноса	$Q$ , мВт	%
Узел нагревателя	Источник тепла (40,6 мВт)	—	—
	Теплопроводность ПИ пленки	1,4	3,4
	Суммарные утечки по 8 токоподводам	2,9	7,1
	Лучистый перенос	3,1	7,6
Узел грунта	Теплопроводность ПИ пленки	3,0	7,4
	Лучистый перенос	1,6	3,8
Теплопровод	Лучистый перенос	4,7	11,5
Всего:		16,7	40,8

**Таблица 5.** Технические и информационные характеристики прибора

Масса и габариты блока электроники	0,30 кг, 100 × 80 × 60 мм
Габариты блоков датчиков	Ø 41 × 43 мм (3 шт.)
Средняя потребляемая мощность	=28,5 В, 2 Вт
Диапазон измеряемых температур	160 ... 380К
Длительность и количество сеансов измерения	3000 с, 10 сеансов
Количество и тип информационных каналов, частота опроса	10 (аналог), 1 Гц
Разрешающая способность, ограниченная телеметрией	0,5К

зователи являются независимыми, объединяясь только цепями питания. Три блока датчиков, установленные в основаниях посадочных опор, подключаются к блоку электроники кабелями длиной 1,5–3 м. Прибор работает по жесткой программе. Значения температуры в трех точках теплопровода каждого из трех блоков датчиков преобразуются в электрические сигналы, обрабатываются и вводятся в запоминающее устройство посадочного модуля, после чего передаются на Землю. Основные характеристики прибора "Термофоб" приводятся в табл. 5.

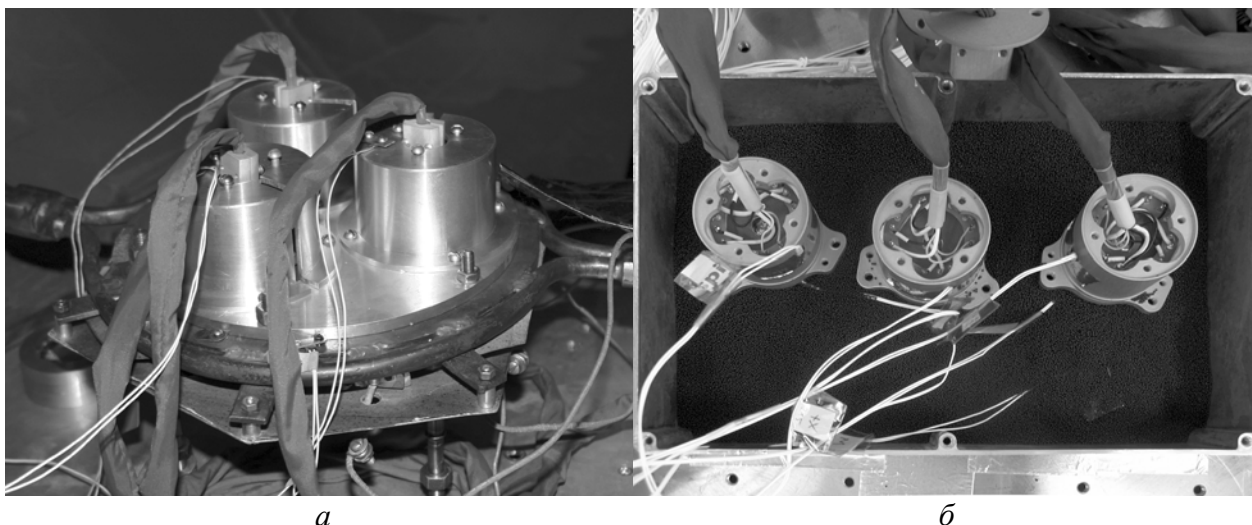
Прибор прошел все предусмотренные этапы испытаний в процессе изготовления, автономной проверки и работы в составе комплекса научной аппаратуры десантного аппарата "Фобос-Грунт" без замечаний.

## Градуировка прибора

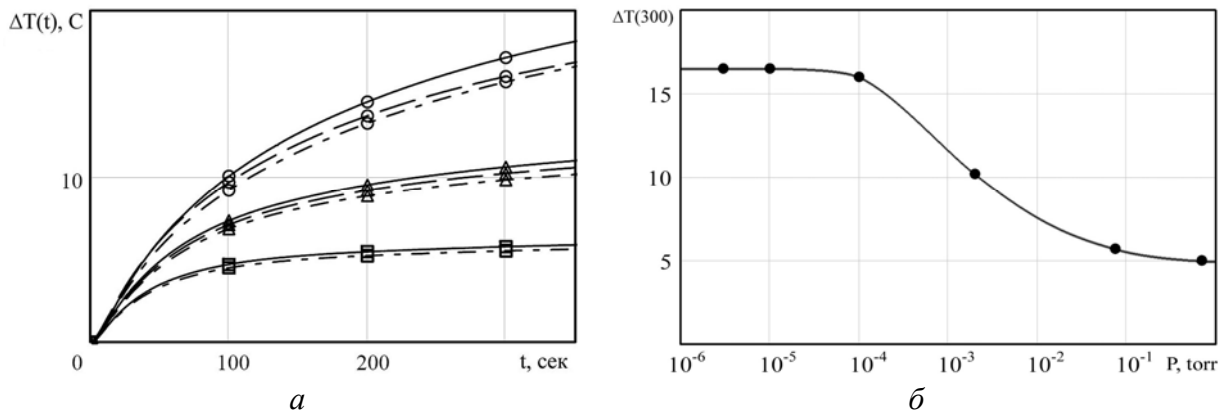
В научной части программы испытаний исследовалась зависимость показаний прибора "Термофоб" от давления, температуры и характеристик среды в зоне контакта. Испытаниям подвергался полный аналог летного прибора – образец для научных настроек (ПНН). Работа была проведена в ФГУП ГНЦ "Центр имени М.В. Келдыша" (ГНЦК) в Москве и через полгода повторена в Центре космических исследований (ЦКИ ПАН) в Варшаве. Диффузионные вакуумные камеры обеих организаций имеют близкие параметры. Контрольная аппаратура обеспечивала измерение давления с погрешностью  $\pm 20\%$ . Регистрация температуры с погрешностью менее  $0,5\text{K}$  производилась для трех точек вакуумной камеры ГНЦК и двенадцати точек камеры ЦКИ (рис. 10). Сигналы прибора регистрировались с частотой 1 Гц 16-разрядным аналого-цифровым преобразователем и вводились в компьютер. Приведенная погрешность преобразования (2 мВ) соответствует  $0,2\text{K}$ .

Задачей этапа вакуумных испытаний являлось определение степени разрежения, необходимой для правильной работы прибора и кинетики дегазации экранно-вакуумной теплоизоляции. Испытания подтвердили зависимость показаний прибора от давления, характерную для перехода от конвективного к молекулярному и, далее, вакуумному режиму теплопереноса (рис. 11). При давлении ниже  $10^{-5}$  торр показания прибора стабилизируются.

Процесс откачки паров воды, сорбированной поверхностью ЭВТИ (около  $0,5\text{ м}^2$ ) при давлении около 0,1 торр занимает несколько часов. Для после-



**Рис. 10.** Испытания аналога летного прибора в ГНЦ "Центр Келдыша" (а).  
Размещение датчиков при исследовании аналогов грунта Фобоса в ЦКИ ПАН (б)



**Рис. 11.** Вакуумные испытания блоков датчиков. Кривые нагрева узла нагревателя (датчик R1 на рис. 4) для давлений 0,7(□),  $2 \cdot 10^{-3}$ (Δ) и  $10^{-5}$ (○) торр (а). Зависимость перепада температуры для узла нагревателя ( $\Delta T(t)$ ,  $t = 300$ сек) от давления в камере (б)

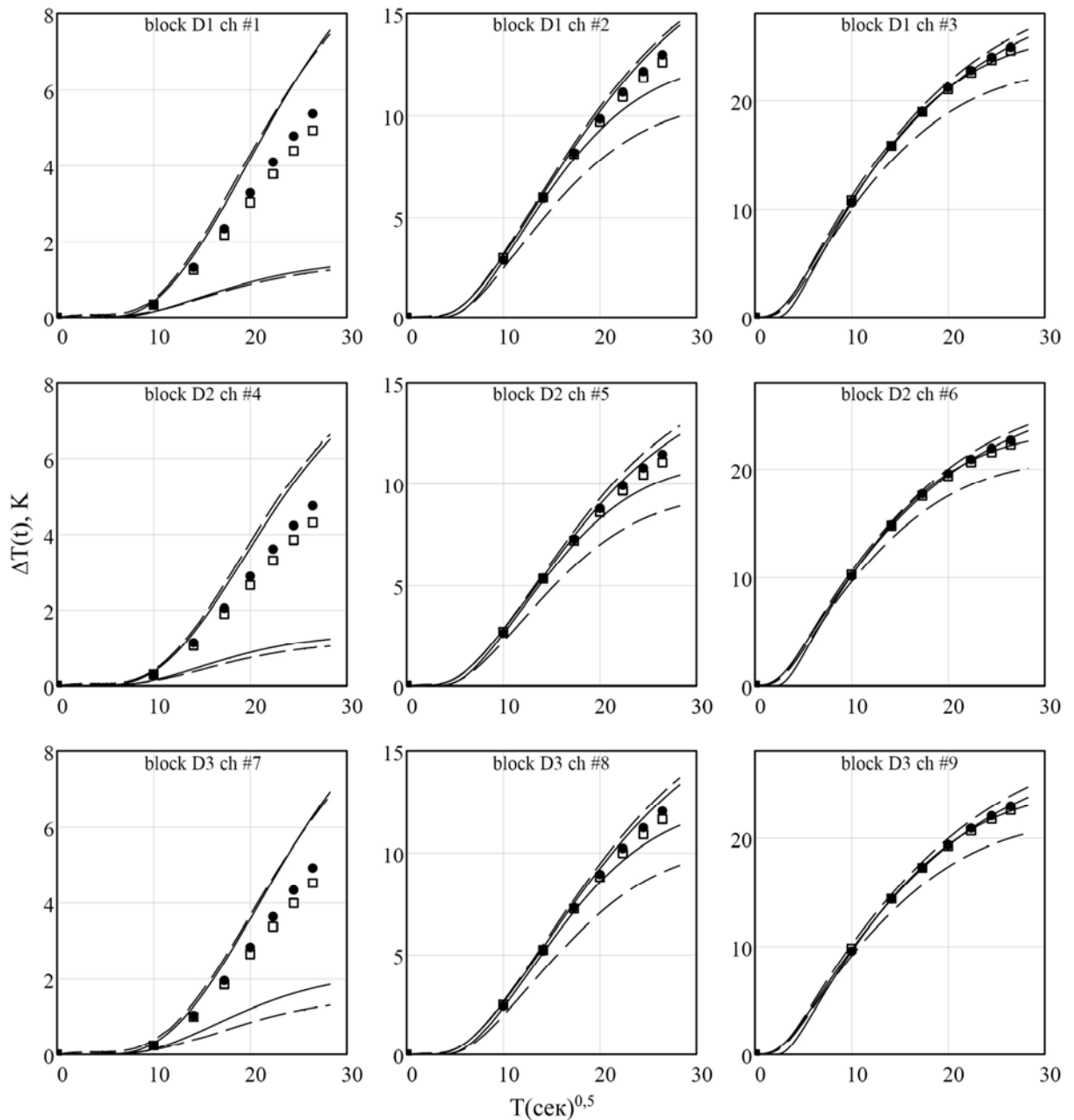
дующих экспериментов была принят порядок, когда после фазы форвакуумной откачки камера закрытая оставлялась на ночь, а фаза диффузионной откачки осуществлялась на следующий день.

Для градуировки прибора мы использовали методику двух испытаний, исключая метрологические проблемы, связанные с использованием эталонных дисперсных сред. В режиме холостого хода (ХХ) вблизи зоны контакта каждого блока датчиков устанавливалась экранно-вакуумная теплоизоляция (10 слоев ЭВТИ-Г в ГНЦК и 8 слоев польского аналога в ЦКИ ПАН). При испытаниях в режиме короткого замыкания (КЗ) чувствительные площадки блоков датчиков соприкасались с теплопроводящей массой. Тепловой контакт обеспечивался пастой КПТ-8 и ее польским аналогом.

В качестве отдельного этапа работы были исследованы модельные аналоги грунта Фобоса в виде черных стеклянных сфер диаметром  $0,9 \pm 0,1$  мм и полидисперсных частиц пыли, предложенные польскими коллегами.

В результате испытаний получены записи около 100 циклов работы прибора с синхронными измерениями температуры в реперных точках. Эти данные позволили провести температурную тарировку датчиков прибора.

Градуировка подтвердила работоспособность метода и отсутствие грубых ошибок при конструировании прибора. Сравнение результатов испытаний в ГНЦК и ЦКИ ПАН (рис. 12) свидетельствует о долговременной стабильности характеристик прибора. Различия характеристик трех блоков датчиков не превышает 15%. Отклонения в показаниях, обнаруженные при тестировании в ЦКИ ПАН в режиме КЗ, вероятно, обусловлены недостаточно надежным тепловым контактом поверхности датчика с металлом. Испытания в режиме холостого хода в ЦКИ ПАН оказались несколько более успешными, что может быть связано с качеством экранирующей теплоизоляции.



**Рис. 12.** Динамические характеристики блоков датчиков "Термофоб" в испытаниях ХХ и КЗ при  $T = +20\text{C}$ ,  $P < 10^{-5}$  торр. Слева направо данные датчиков R3, R2, R1 (рис. 4). Верхние кривые соответствуют испытаниям ХХ, нижние – КЗ: (--) испытания в ГНЦК, (–) данные ЦКИ ПАН. Модельные грунты: (●) стеклянные сферы, (□) пылевые частицы.

Динамические характеристики для аналогов грунта Фобоса существенно различаются как от данных испытаний в предельных режимах КЗ и ХХ, так и между собой, что позволяет рассчитывать на однозначность интерпретации данных измерений.

Результаты испытаний обнаруживают различие с расчетами в наклоне динамических характеристик, что можно объяснить значительным влиянием присоединенной теплоемкости ЭВТИ. При понижении температуры до  $-100\text{C}$  наклон динамических характеристик датчиков увеличивается в 1,5–2 раза в результате одновременного снижения теплоемкости и теплопроводности ма-



териалов конструкции. Установлено, что величина тепловых утечек, определенная баллистическим методом по изменению температуры блока датчиков, вдвое превышает расчетную оценку, приведенную в табл. 4.

Данные градуировки должны послужить основой тепловой модели прибора, используемой в дальнейшем для восстановления значений теплофизических параметров среды по результатам космических измерений. Мы планируем использовать оригинальную методику обработки данных.

Определение характеристик глубинного разреза грунта в эксперименте "Термофоб" является обратной некорректной задачей нестационарной теплопроводности. Известно, что такие задачи требуют разработки специальных методов регуляризации в силу чувствительности решения к погрешностям измерений [Тихонов, Арсенин, 1979, Алифанов, 1988]. Все это заставляет оценивать найденные значения с определенной долей осторожности.

## Заключение

Теплофизические исследования поверхностного слоя Фобоса, представляющие большой научный интерес, сопряжены с целым рядом методических и технических трудностей. С целью выбора методов измерений и конструктивных особенностей прибора проведено математическое моделирование поверхностного слоя грунта Фобоса, использующее данные лабораторного анализа грунта Луны как доступного аналога Фобоса. Расчёты для обоих тел выполнены по аналогичной методике при соответствующих значениях параметров моделей, результаты сопоставлены с данными независимых измерений. Рассмотрены возможные контактные методы определения теплофизических характеристик (методы проникающего и поверхностного зонда), проанализированы их преимущества и недостатки применительно к условиям измерений на космическом аппарате. Выбор метода сделан исходя из соображений простоты прибора, надежности измерений и специфики конструкции КА. Детально описаны принцип работы прибора "Термофоб", его конструкция, технические характеристики и особенности функционирования на космическом аппарате.

## Литература

- Авдуевский В.С., Анфимов Н.А., Маров М.Я. и др. (1974) *Теплофизические свойства лунного вещества, доставленного на Землю автоматической станцией "Луна-16"* // В сб.: *Лунный грунт из моря Изобилия*. М.: Наука, 1974.
- Авдуевский В.С., Куликов С.Д., Кремнев Р.С. и др. (2000) *Космический проект "Фобос-Грунт": Основные характеристики и стратегия развития* // *Космонавтика и ракетостроение*. 2000. Т 6. С. 31–38.
- Алифанов О.М. (1988) *Обратные задачи теплообмена* / М.: Машиностроение. 1988. 280 с.
- Антипова-Каратаева И.И., Ахманова М.В., Деменьтьев Б.В. и др. (1979) *Оптические параметры реголита из морских и материковых районов Луны* // В сб.: *Грунт из материкового района Луны*. М.: Наука, 1979. С. 585–588.
- Головкин А.Р., Дмитриев А.П., Духовской Е.А. и др. (1979) *Исследование тепловых свойств грунта "Луны-20"* // В сб.: *Грунт из материкового района Луны*. М.: Наука, 1979. С. 635–639.
- Кузьмин Р.О., Шингарева Т.В., Забалуева Е.В. (2003) *Инженерная модель поверхности Фобоса* // *Астрон. вестн.* 2003. Т. 37. № 4. С. 292–309.
- Кузьмин Р.О., Забалуева Е.В. (2003) *Характер температурного режима поверхностного слоя реголита Фобоса в районе потенциального места посадки космической станции "Фобос–Грунт"* // *Астрон. вестн.* 2003. Т. 37. № 6. С. 526–535.
- Маров М.Я., Колесниченко А.В., Мануйлов К.К., Осипов В.П. (2010) *Эксперимент "Термофоб": прямые исследования теплофизических свойств грунта Фобоса* // *Астрон. вестн.* 2010. Т. 44. № 5. С. 1–9.
- Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. (1979) *Методы решения некорректных задач*. М.: Наука, 1979. 285 с.
- Christensen P.R., Bandfield J. L., Hamilton V. E. et al. (2001) *Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer experiment: Investigation description and surface science results* // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. № E10. P. 23823–23871.
- Cremers C.J., Birkebak R.C., Dawson J.P. (1970) *Thermal conductivity of fines from Apollo 11* // *Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., Geochim. Cosmochim. Acta Suppl.* 1, 1970. V 3. P. 2045–2050.
- Cremers C.J., Birkebak R.C. (1971) *Thermal conductivity of fines from Apollo 12* // *Proc. II Lunar Sci. Conf., Geochim. Cosmochim. Acta Suppl.* 2, 1971. V. 3. P. 2311–2315.
- Cremers C.J. (1975) *Thermophysical properties of Apollo 14 fines* // *J. Geophys. Res.* 1975, V. 80. №32. P. 4466–4470.
- Hemingway B.S., Robie R.A., Wilson W.H. (1973) *Specific heats of lunar soils, basalt and breccias from Apollo 14, 15 and 16 landing sites between 90 and 350° Kelvin* // *Proc. IV Lunar Sci. Conf.* 1973. V 3. P. 2481–2487.
- Marov M.Ya., Avduevsky V.S., Akim E.L. et al. (2004) *Phobos-Grunt: Russian sample return mission* // *Advance Space Research.* 2004. V. 33. P. 2276–2280.
- Robie R.A., Hemingway B.S., Wilson W.H. (1970) *Specific Heats of Lunar Surface Materials from 90 to 350 Degrees Kelvin* // *Science.* 1970. V. 167. №3918. P. 749–750.