

УДК 629.787

Измерения плотности внутреннего теплового потока Луны проникающими термозондами

К.К. Дудкин^{1,2}, О.М. Алифанов¹

¹ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Россия

² АО «НПО Лавочкина», г. Химки, Московская обл., 141400, Россия
e-mail: lord-konst@mail.ru; o.alifanov@yandex.ru

Поступила в редакцию 9.03.2019

После доработки 6.04.2019

Принята к публикации 08.04.2019

Рассматривается схема проникающего термозонда для определения плотности внутреннего теплового потока Луны. Анализируются его схема и принцип работы. Представлены результаты имитационного моделирования работы такой схемы термозонда для различных моделей грунтов. Оценена возможная погрешность измерений.

Ключевые слова: лунный грунт, плотность теплового потока, термозонд, исследование Луны.

Введение. История измерений

До экспедиции «Аполлон» определение теплового потока из недр Луны (будем называть его «внутренним тепловым потоком») базировалось на наблюдениях с Земли теплового излучения поверхности Луны в микроволновом диапазоне. Благодаря частичной прозрачности лунного материала спектр излучения электромагнитных волн длиной более 1 мм зависит от температуры приповерхностного слоя. Зная электрические свойства лунных грунтов, можно по спектру теплового излучения построить распределение температуры в приповерхностном слое.

Наиболее успешные результаты по такой методике были получены В.С. Троицким и его коллегами в Институте радиофизики. В результате анализа спектра теплового излучения в микроволновом диапазоне от 1 мм до 3 см Т.Ф. Тихонова и В.С. Троицкий получили величины плотности теплового потока, равные $3 \cdot 10^{-2} - 4 \cdot 10^{-2}$ Вт/м², что составляет приблизительно 1/2 среднего теплового потока для Земли (приведенные данные заимствованы из статьи [1], первоначальные результаты исследований были получены в [2]).

Радиоизмерениями можно определить средние значения искомых величин (плотности по-

тока внутреннего тепла Луны, теплофизических характеристик грунта Луны и др.) в лучшем случае для области радиусом 50–60 км и с погрешностью не менее 20–25% [3], поэтому возникает потребность в их локальном определении.

Прямые измерения плотности теплового потока в тонком подповерхностном слое Луны были успешно проведены в двух районах: Хэдли Рилли на краю Моря Дождей («Аполлон-15»), и Тавр-Литтров в узком заливе на юго-восточной окраине Моря Ясности («Аполлон-17»).

Расчеты плотности теплового потока были проведены на основании измерения теплопроводности и температурного градиента: тепловой поток в Районе Хэдли Рилли составил $3.1 \cdot 10^{-2}$ Вт/м² и в районе Тавр-Литтров – $2.8 \cdot 10^{-2}$ Вт/м² [1].

По поводу значения плотности потока внутреннего тепла Луны в литературных источниках единого мнения нет.

Плотность внутреннего теплового потока $q_{\text{в}}$, полученная В.С. Троицким, В.Д. Кротиковым, Т.В. Тихоновой [4, 6, 7], лежит в диапазоне от $1.4 \cdot 10^{-2}$ до $5.443 \cdot 10^{-2}$ Вт/м². В работе [5] приводятся данные по величине плотности внутреннего теплового потока от $1.047 \cdot 10^{-2}$ до $1.4 \cdot 10^{-2}$ Вт/м². Непосредственные инструментальные измере-

ния плотности теплового потока на станции «Аполлон-15» дают значение $q_b = 2.2 \cdot 10^{-2}$ Вт/м², а на станции «Аполлон-17» $q_b = 3.1 \cdot 10^{-2}$ Вт/м², что достаточно близко к последним данным В.С. Троицкого [3] (первоначальные результаты исследований заимствованы из [7]).

В нашем исследовании, вслед за Н.В. Шумаковым [3], примем опорное значение плотности потока внутреннего тепла Луны равным $q_b = 3.14 \cdot 10^{-2}$ Вт/м².

Что касается величины теплопроводности, то характер реголита (рыхлого, с пустыми порами и точечными межзерновыми контактами и на море, и на материке) определяет свойства лунного грунта как прекрасного теплоизолятора: он имеет весьма низкие значения коэффициента теплопроводности λ [8].

Теплофизические свойства реголита в значительной степени зависят от температуры. В обобщенном виде для среднего реголита с объемным весом 1.3 г/см³ [9] данные по теплопроводности, полученные в лабораторных условиях, приведены в табл. 1 [10].

Стоит сказать, что в статье [1] указываются значения теплопроводности от $1 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м·К) для приповерхностного слоя до Вт/(м·К) на

Таблица 1. Теплопроводность лунного реголита в зависимости от температуры (измерения проводились в вакууме 10^{-6} тор)

Температура, °C	Теплопроводность, 10^{-3} , Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/(кг·К)
-173	0.7	275.7
-123	0.8	433.9
-23	1.1	672.4
127	1.4	758.1
177	1.7	848.9

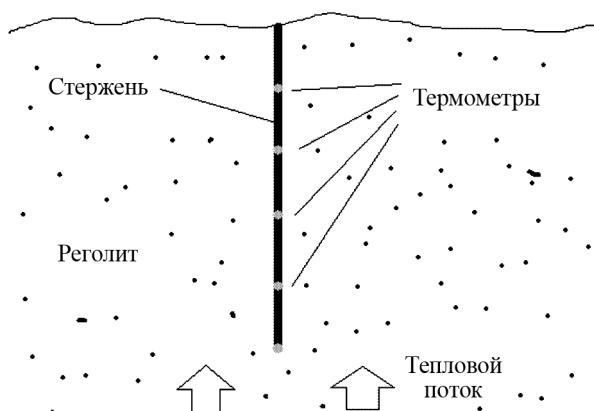


Рис. 1. Схема проникающего термозонда

глубине ~2.2 м. Это хорошо согласуется с моделью лунного грунта, описанной в [10].

Для наших оценочных расчетов примем величину теплопроводности лунного грунта $\lambda = 2 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м·К).

Проникающий термозонд

Схема зонда

Рассмотрим схему измерения теплового потока с помощью проникающего зонда (рис. 1). Принцип его работы заключается в следующем: термозонд помещается в заранее пробуренную скважину, измеряется температура на различных глубинах и, если известна теплопроводность грунта, по закону Фурье можно получить плотность теплового потока. Например, можно воспользоваться формулой теплопроводности для стационарного случая в одномерном виде:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}, \quad (1)$$

где q – плотность теплового потока; λ – коэффициент теплопроводности; T – температура; x – координата [11].

Однако встает вопрос, из какого материала должен быть изготовлен стержень.

Если он будет изготовлен из материала с высокой теплопроводностью, то, учитывая сверхнизкую теплопроводность грунта ($\lambda = 0.001–0.03$ Вт/(м·К)), тепло будет перетекать через стержень из нижней более теплой части в верхнюю. А она, в свою очередь, будет передавать тепло прилегающим участкам грунта. Грунт в верхних слоях вокруг стержня будет локально нагреваться, а это значит, что термометры будут показывать не реальные перепады температур, соответствующие естественным условиям, а искаженные.

Поэтому материал стержня должен иметь как можно более низкую теплопроводность, чтобы минимизировать искажения.

По данной схеме непосредственные измерения на лунной поверхности уже проводились NASA. Для измерения температуры и теплопроводности в грунт были заглублены два зонда: на станции «Аполлон-15» – до глубин 1.0 и 1.4 м, на «Аполлон-17» – до глубины 2.3 м. Каждый зонд состоял из стеклопластиковых стержней с 8 платиновыми термометрами со противления и 4 термопарами и был приспо-

соблен для измерений на 11 уровнях глубины под поверхностью [1].

Оценка влияния теплопроводности стержня на определение теплового потока для модели однородного грунта

В наших расчетах, вслед за NASA, примем в качестве материала стержня стеклопластик, так как он обладает достаточной прочностью для поставленных задач и при этом низкой теплопроводностью. Теплопроводность стержня примем равной $\lambda = 0.2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$, теплопроводность лунного грунта $\lambda = 0.002 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$, естественный тепловой поток $q = 0.0314 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Диаметр стержня 10 мм, длина 1 м.

Результаты моделирования представлены на рис. 2 и 3, где показано распределение температуры для установившегося теплового потока.

На рис. 2 видно некоторое перетекание тепла из грунта в стержень зонда. В частности, на нижнем конце стержня температура ниже на один градус, чем температура грунта на той же глубине. Величина «измеренной» плотности теплового потока равна $q_{\text{изм}} = 0.0256 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Эта величина получена следующим образом: были взяты «измеренные» (т.е. полученные в результате расчета) температуры на нижнем и верхнем концах стержня, и по формуле (1) найдена плотность теплового потока. При этом отклонение от изначально заданного значения плотности теплового потока составило 18.5%.

Напомним, что использовалась модель с однородной теплопроводностью грунта по всему объему, причем принятая величина теплопроводности грунта $\lambda = 0.002 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$ – это самое низкое значение, взятое на основе измерения верхнего слоя реголита.

Оценка влияния теплопроводности стержня на определение теплового потока для модели многослойного грунта

Теплопроводность лунного грунта в зависимости от глубины была определена только в миссиях «Аполлон». Данные об этих измерениях приведены на рис. 4. Как видно из рис. 4, теплопроводность лунного грунта на глубинах от 30 см до 2.4 м равна $(1.4\text{--}3.0)\cdot10^{-4} \text{ Вт}/(\text{см}\cdot\text{K})$ (или $\lambda = 0.014\text{--}0.03 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$), что примерно в десять раз выше, чем на поверхности. Увеличение теплопроводности на глубине 2 см обусловлено главным образом уплотнением грунта с глубиной [1].

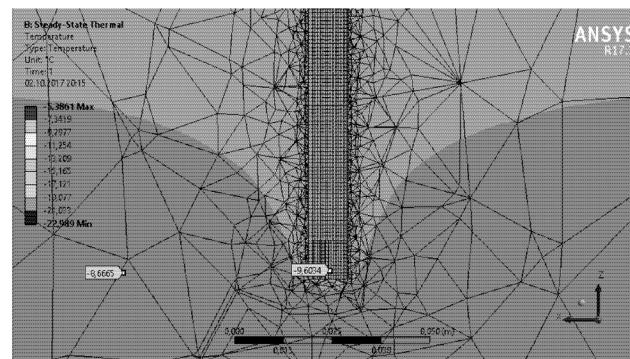


Рис. 2. Распределение температуры в нижней части проникающего термозонда на глубине 1 м

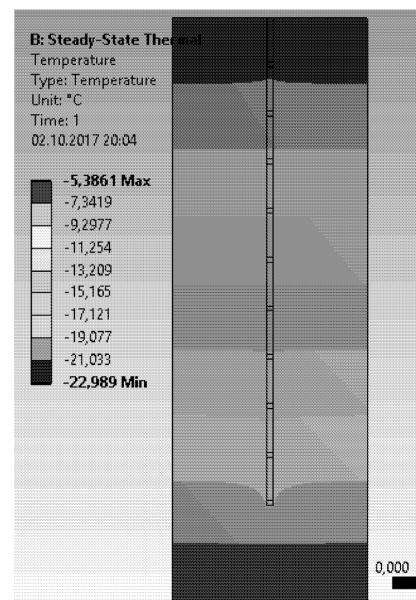


Рис. 3. Распределение температуры для проникающего термозонда при использовании модели грунта с постоянными теплофизическими характеристиками

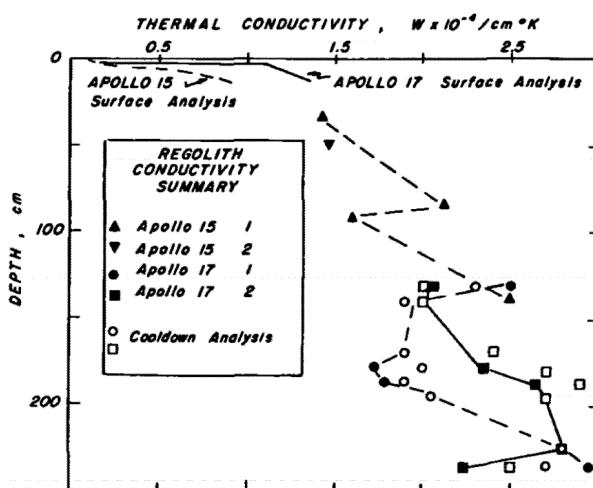
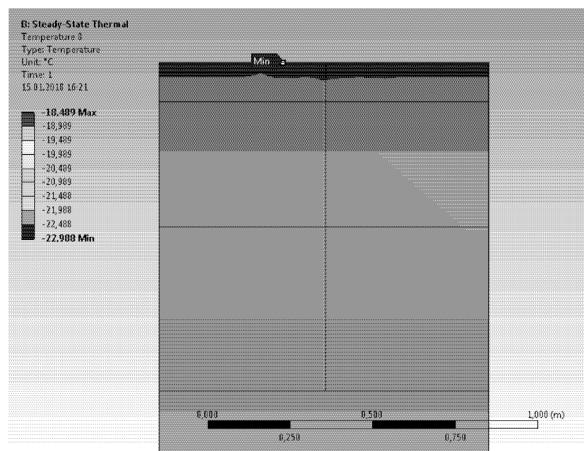
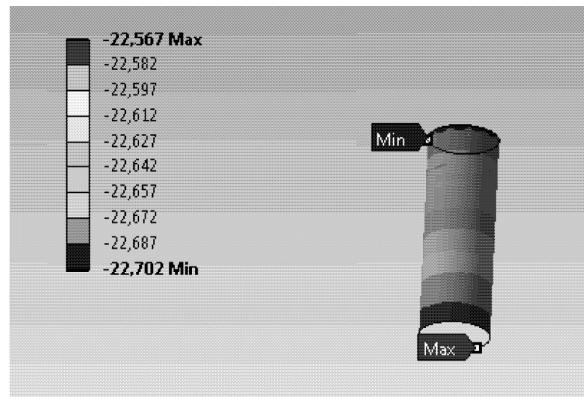


Рис. 4. График зависимости теплопроводности лунного грунта от глубины, по результатам миссий «Аполлон 15» и «Аполлон 17»

Таблица 2. Значения параметров многослойной модели грунта

№ слоя	Толщина слоя, мм	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Глубины начала и конца слоя, см
1	30	0.002	0–3
2	90	0.013	3–12
3	380	0.015	12–50
4	500	0.017	50–100
5	500	0.02	100–150
6	500	0.023	150–200
7	500	0.025	200–250

**Рис. 5.** Проникающий термозонд. Распределение температуры при многослойной модели грунта**Рис. 6.** Проникающий термозонд. Распределение температуры на контакте стержня и грунта. Верхний слой грунта**Таблица 3.** Результаты расчета тепловой задачи

Величина конечного элемента, мм	Температура первого слоя, °C		Температура второго слоя, °C		Температура третьего слоя, °C		Температура четвертого слоя, °C	
	min	max	min	max	min	max	min	max
100	-22.696	-22.568	-22.569	-22.311	-22.311	-21.51	-21.51	-20.594
50	-22.697	-22.569	-22.57	-22.31	-22.31	-21.51	-21.51	-20.594
20	-22.715	-22.571	-22.567	-22.309	-22.309	-21.509	-21.509	-20.584
10	-22.712	-22.57	-22.566	-22.309	-22.309	-21.509	-21.509	-20.607
5	-22.711	-22.571	-22.57	-22.311	-22.311	-21.509	-21.509	-20.609
3	-22.702	-22.567	-22.568	-22.311	-22.311	-21.509	-21.509	-20.61

На основе этих данных была принята следующая многослойная модель грунта (табл. 2).

На этой модели грунта были проведены расчеты со стержнем с такими же параметрами, как и в предыдущем моделировании: теплопроводность стержня $\lambda = 0.2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, тепловой поток $q = 0.0314 \text{ Вт}/\text{м}^2$, диаметр стержня 10 мм, длина 1 м. Результаты расчетов приведены на рис. 5.

Эти расчеты представляли собой серию вычислений методом конечных элементов. В каждом последующем вычислении размер конечного элемента уменьшался с целью найти такой, при котором точность расчетов становится приемлемой. В данном случае удалось достигнуть точности расчетов порядка одной сотой градуса Цельсия. В качестве величин, по которым отслеживалась точность решения задачи, были взяты максимальные и минимальные значения температур верхних четырех слоев грунта. В табл. 3 представлены результаты расчетов.

Как видно из рис. 5, стержень практически не вносит каких-либо заметных искажений температурного поля.

Анализ результатов расчетов проводился следующим образом. Сначала на каждом отдельном слое в месте контакта грунта и стержня брались «измеренные» (т.е. полученные в результате расчета) температуры (рис. 6). Для каждого слоя использовались температуры в двух точках: верхней и нижней. После этого, для каждого слоя по формуле (1) вычислялась плотность теплового потока. Затем данные усреднялись по всей длине стержня. Таким образом моделировалась плотность теплового потока, соответствующая математической модели измерений с использованием рассматриваемого термозонда.

По результатам этих расчетов плотность теплового потока $q_{\text{изм}} = 0.0271 \text{ Вт}/\text{м}^2$, а величина отклонения от заданного значения составила 13,8%.

Как можно заметить, величина отклонения меньше, чем при использовании однородной модели грунта, и это логично: с увеличением глубины увеличивается и теплопроводность грунта. А это означает, что теплопроводность стержня приближается к теплопроводности грунта, и эффект перетекания тепла становится ниже, что, в свою очередь, снижает и величину отклонения.

Заключение

По результатам численного моделирования для двух разных моделей грунта проникающий термозонд дает отклонение при определении плотности теплового потока в 18.5% и 13.8% соответственно. Основными плюсами использования данного термозонда являются: простота конструкции, надежность, широкий спектр получаемых данных и способов их анализа. Подобный термозонд можно оснастить нагревателями для измерения теплофизических характеристик грунта на разных глубинах [12], что необходимо для оценки теплового потока, а теплофизические характеристики грунта, в свою очередь, являются дополнительными ценными научными данными. Также с помощью данного термозонда можно обеспечить длительные (до нескольких лет) измерения температуры на разных глубинах.

Безусловно при использовании проникающего термозонда требуется бурение скважины, что вызывает дополнительные трудности при реализации подобной экспедиции.

Подводя общий итог, можно сказать, что термозонд такой схемы имеет перспективы применения для изучения Луны. В данной статье получено представление о влиянии конструкции термозонда на естественное распределение тем-

ператур и, как следствие, на определение плотности внутреннего теплового потока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лангсет М.С., Кейм С.Д. Непосредственные измерения теплового потока на Луне. В кн.: Космохимия Луны и планет. М.: «Наука», 1975. С. 200–209.
- Tikhonova T.V., Troitskii V.S. Effect of heat from within the Moon on its radio emission for the case of lunar properties which vary with depth // Sov. Astron. 1969. V. 13. N 1. P. 120–128.
- Шумаков Н.В. Метод последовательных интервалов в теплометрии нестационарных процессов. М.: Атомиздат, 1979. 216 с.
- Кротиков В.Д., Троицкий В.С. Радиоизлучение и природа Луны // Успехи физ. наук. 1963. Т. 81. Вып. 4. С. 589–639.
- Иванов Н.С. Методы измерения тепловых потоков в горных породах. В кн.: Тепло и массообмен в мерзлых почвах и горных породах. М.: АН СССР, 1961. С. 91–104.
- Троицкий В.С. Результаты исследования Луны по ее собственному излучению // Известия вузов. Радиофизика. 1967. Т. 10. № 9–10. С. 1266–1282.
- Троицкий В.С., Тихонова Т.В. Тепловое излучение Луны и физические свойства ее верхнего покрова // Известия вузов. Радиофизика. 1970. Т. 13. № 9. С. 1273–1311.
- Авдуевский В.С., Анфимов Н.А., Маров М.Я., Трескин Ю.А., Шалаев С.П., Экономов А.П. Теплофизические свойства лунного вещества, доставленного на Землю автоматической станцией «Луна-16». В сб.: Лунный грунт из Моря Изобилия. М.: «Наука», 1974. 624 с.
- Hemingway B.S., Robie R.A., Wilson W.H. Specific heats of lunar soils, basalt, and breccias from the Apollo 14, 15 and 16 landing sites between 90 and 350°K // Proceed. of the 4 Lunar Science Conf. Pergamon Press. 1973. V. III. P. 2481–2488.
- Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Николаева О.В. Лунный грунт: свойства и аналоги. Модель 1974 года. М.: Академия Наук СССР Институт Геохимии и Аналитической Химии им. В.И. Вернадского, 1975. 50 с.
- Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
- Дудкин К.К., Алифанов О.М. Измерения теплофизических характеристик лунного грунта в естественных условиях // Тепловые процессы в технике. 2018. Т. 10. №5–6. С. 245–255.

Density measurements of lunar internal heat flow by penetrating thermal probe

K.K. Dudkin^{1,2}, O.M.Alifanov¹

¹ Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russia

² NPO Lavochkin, Khimki, Moscow region, 141400, Russia

e-mail: lord-konst@mail.ru; o.alifanov@yandex.ru

The article considers the scheme of the buried thermal probe for determining the lunar heat flow density. The probe represents a rod, on which thermometers are fixed at certain intervals. The thermal probe is placed in a pre-drilled well. A certain time is needed for the probe-soil system reaches thermal equilibrium. After it measurements are starting. If the soil thermal conductivity is known, then it remains only to measure a series of temperature values at various depths, to obtain its differences and, according to Fourier's law, obtain the heat flow density. However, the question arises on what material the rod should be made of. If it is made of a material with high thermal conductivity, then, given the ultra-low thermal conductivity of the soil ($\lambda = 0.001 – 0.03 \text{ W/m}\cdot\text{K}$),

then the heat flow-over through the rod from the lower warmer part to the upper one would occur. And the upper part, in its turn, would transfer the heat to the adjacent sections of the soil. The soil in the upper layers around the rod will be locally heated, and this means that the thermometers will not show the real temperature drops corresponding to natural conditions, but the distorted ones. Thus, the rod material should be of the lowest possible thermal conductivity to minimize these distortions. Direct measurements on the lunar surface have already been carried out by NASA in the Apollo 15 and Apollo 17 missions according to this scheme. Following NASA, fiberglass is assumed in calculations as a rod material, due to its adequate strength for the set problems, and herewith a low thermal conductivity. Two calculations were performed to assess a temperature difference deviations while such thermal probe scheme application.

- For a homogeneous soil model, in which the soil thermal characteristics are constant;
- For a multi-layer soil model, in which the soil thermal characteristics are changing with depth.

According to the results of numerical simulation for various soil models, a penetrating thermal probe gives errors in determining the heat flux from 13.8% to 18.5%. Summarizing, we can say that the penetrating thermal probe has good prospects for application in various scientific lunar exploration missions.

Keywords: lunar soil, thermal flow density, thermal probe, Moon exploration.

REFERENCES

1. **Langseth, M.G., Keihm, S.J.** *In situ measurements of lunar heat flow*. In: J.H. Pomeroy and N.J. Hubbard (eds.). *The Soviet-American Conference on Cosmochemistry of the Moon and Planets*, June 4–8, 1974, Moscow. NASA Special Publication 370, Part I, pp. 283–293.
2. **Tikhonova T.V., Troitskii V.S.** Effect of heat from within the Moon on its radio emission for the case of lunar properties which vary with depth. *Sov. Astron.*, 1969, vol. 13, no. 1, pp. 120–128.
3. **Shumakov N.V.** *Metod posledovatel'nykh intervalov v teplometrii nestatsionarnykh protsessov* [The method of consecutive intervals in calorimetry of non-stationary processes]. Moscow: Atomizdat, 1979. 216 p. In Russ.
4. **Krotikov V.D., Troitskii V.S.** Radio emission and nature of the Moon. *Sov. Phys. Usp.*, 1964, vol. 6, pp. 841–871. DOI: 10.1070/PU1964v00n06ABEH003615
5. **Ivanov N.S.** *Metody izmereniya teplovyykh potokov v gornyykh porodakh*. V kn.: *Teplo i massoobmen v merzlykh pochvakh i gornyykh porodakh* [Methods for measuring heat fluxes in rocks. In the book: Heat and mass transfer in frozen soils and rocks]. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1961, pp. 91–104. In Russ.
6. **Troitskii V.S.** Results of an investigation of the Moon from its radiation characteristics. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 1967, vol. 10, no. 9–10, pp. 709–718. <https://doi.org/10.1007/BF01031600>
7. **Troitskii V.S., Tikhonova T.V.** Thermal radiation from the moon and the physical properties of the upper lunar lay- er. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 1970, vol. 13, no. 9, pp. 981–1010. <https://doi.org/10.1007/BF01032762>
8. **Avduevsky B.C., Anfimov N.A., Marov M.Ya., Treskin Yu.A., Shalaev S.P., Ekonomov A.P.** *Teplofizicheskie svoystva lunnogo veshhestva, dostavленного na Zemlyu avtomaticheskoy stanciei «Luna-16»*. V sb.: *Lunnyj grunt iz Morya Izobiliya* [Thermophysical properties of lunar matter delivered to Earth by the automatic station «Luna-16»]. In Proc.: *Lunar soil from the Sea of Plenty*. Moscow: Nauka, 1967. 624 p. In Russ.
9. **Hemingway B.S., Robie R.A., Wilson W.H.** Specific heats of lunar soils, basalt, and breccias from the Apollo 14, 15 and 16 landing sites between 90 and 350°K. *Proceed. of the 4 Lunar Science Conf. Pergamon Press*. 1973. V. III. P. 2481–2488.
10. **Florensky K.P., Bazilevsky A.T., Nikolaeva O.V.** *Lunnyj grunt: svoystva i analogi. Model` 1974 goda* [Lunar soil: properties and analogues. Model 1974]. Moscow: Vernadsky institute of geochemistry and analytical chemistry of Academy of Sciences of the USSR, 1975. 50 p. In Russ.
11. **Lykov A.V.** *Teoriya teplopovodnosti* [Theory of heat conductivity]. Moscow: Vysshaya shkola, 1967. 600 p. In Russ.
12. **Dudkin K.K., Alifanov O.M.** Izmereniya teplofizicheskikh kharakteristik lunnogo grunta v estestvennykh usloviyakh [Lunar regolith thermo-physical characteristics measuring in natural conditions]. *Teplovye protsessy v tekhnike – Thermal Processes in Engineering*, 2018, vol. 10, no. 5–6, pp. 245–255. In Russ.

Учредитель и издатель журнала:

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-72651 от 16.04.2018

Редактор Бублик Н.П., e-mail: tpt@mai.ru
Оригинал-макет и электронная версия изготовлены в МАИ.

Сдано в набор 14.05.2019. Подписано в печать 06.06.2019.

Формат 60×90 1/8. Печать цифровая. Усл. печ. л. 5.82. Уч.-изд. л. 6.35. Тираж 55 экз. «Свободная цена».

Отпечатано в ООО «Печатный салон ШАНС»