

В. С. АВДУЕВСКИЙ, Н. А. АНФИМОВ, М. Я. МАРОВ,
С. П. ШАЛАЕВ, А. П. ЭКОНОМОВ

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛУННОГО ВЕЩЕСТВА, ДОСТАВЛЕННОГО АМС «ЛУНА-16»

(Представлено академиком А. П. Виноградовым 23 XII 1970)

Исследованная порция лунного вещества представляет собой верхнюю часть колонки грунта длиной около 350 мм, извлеченного грунтозаборным устройством станции «Луна-16» из поверхностного слоя Луны в районе Моря Изобилия. По своей структуре эта часть колонки (зона А, ⁽¹⁾) представляет собой реголит — рыхлый дисперсный материал, состоящий из частиц двух типов: частиц первичных магматических пород (типа базальтов) и частиц, подвергшихся заметным преобразованиям в процессах дезинтеграции лунных пород под воздействием эффективных для Луны космических факторов (спекшиеся, часто оплавленные с поверхности частицы и оплавленные образования почти сферической формы).

Среднечисленный размер частиц в исследованной порции грунта составляет около 25 μ , а среднемассовый размер — 160 μ .

Плотность. Результаты измерений показали, что при свободной засыпке лунного грунта в атмосфере гелия его плотность составляет около 1,2 г·см⁻³. Посредством виброуплотнения плотность грунта может быть увеличена до 1,85 г·см⁻³. Максимальная плотность лунного грунта была достигнута в приборе для измерения коэффициента теплопроводности ($\rho = 2,25$ г·см⁻³). Здесь грунт располагался в виде тонкого слоя толщиной $l = 1$ мм, а к его верхней поверхности была приложена нагрузка, причем удельное давление на грунт изменялось от 0,015 до 0,8 кг·см⁻².

Удельная теплоемкость. Для измерения удельной теплоемкости лунного грунта использовался ледяной изотермический калориметр, принцип действия которого основан на изменении объема системы лед — вода при подводе к ней внешнего тепла. Порция грунта массой около 1,5 г помещалась в атмосферу гелия в специально изготовленную тонкостенную металлическую ампулу, внутренний объем которой 1,1 см³, а собственная масса 0,85 г. Ампула герметизировалась.

После выдержки в термостате при постоянной температуре в течение часа ампула с грунтом сбрасывалась в калориметр, что позволяло определить ее общее теплосодержание.

Суммарная методическая ошибка определения оценивается величиной $\pm 5\%$. Удельная теплоемкость лунного грунта в диапазоне температур от 0 до 100° С как среднее значение в серии из пяти экспериментов составляет

$$c = 0,177 \pm 0,010 \text{ кал} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}.$$

Теплопроводность. Для измерения коэффициента теплопроводности лунного грунта был создан специальный прибор — кондуктиметр, в котором реализовался одномерный поток тепла через тонкий слой исследуемого вещества. Кондуктиметр помещался под вакуумный колпак в

среду гелия. Откачкой давление доводилось до $4 \cdot 10^{-1} - 10^{-3}$ мм рт. ст. Слой вещества имел форму диска диаметром 30 мм и толщиной 1 мм. Толщина слоя грунта измерялась катетометром. Источником тепла служил наложенный на слой вещества электронагреватель. Расположенный под слоем вещества приемник тепла был выполнен в виде медного цилиндра. Для уменьшения утечек тепла применялись охранные кольцо из исследуемого материала и охранные нагреватели, окружающие источник и приемник тепла. Мощность основного электронагревателя подбиралась так, чтобы разность температур между источником и приемником тепла составляла приблизительно 20° и поддерживалась постоянной в течение достаточно длительного времени для установления квазистационарного режима. При таком режиме производная температуры по времени T'_t одинакова по всему слою вещества и не изменяется со временем, причем из-за малости этой производной профиль температуры внутри вещества близок к линейному.

В этом случае коэффициент теплопроводности может быть определен по формуле

$$\lambda = ql / \Delta T.$$

Здесь q — удельный тепловой поток через грунт, который может быть определен по электрической мощности, выделяемой в нагревателе, или по темпу нагрева приемника тепла. Погрешность измерения не превышает 25%.

Результаты экспериментов по определению величины коэффициента теплопроводности лунного грунта в диапазоне температур $20-40^\circ \text{C}$ при различном давлении газа (гелия) P_{He} и различном удельном давлении на грунт P_r представлена на рис. 1.

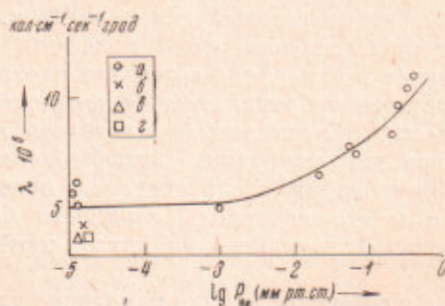


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплопроводности лунного грунта от давления гелия при значениях удельного давления на грунт ($\text{кг} \cdot \text{см}^{-2}$): а — 0,015; б — 0,2; в — 0,4; г — 0,8

Видно, что коэффициент теплопроводности лунного грунта в вакууме в пределах точности экспериментов не зависит от удельного давления на грунт (в пределах от 0,015 до $0,8 \text{ кг} \cdot \text{см}^{-2}$). Осреднение всех полученных результатов дает для величины этого коэффициента при $\rho = 2,25 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ и $t = 20-40^\circ \text{C}$ значение $\lambda = (4,8 \pm 1,2) \cdot 10^{-5} \text{ кал} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}$ ($P_{\text{He}} \leq 10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$).

Оценка эффективного размера пор грунта. Влияние давления гелия на величину коэффициента теплопроводности грунта начинает заметно проявляться при $P_{\text{He}} = 4 \cdot 10^{-1} \text{ мм рт. ст.}$ (при этом давлении наблюдается двухкратное увеличение λ , т. е. вклад теплопроводности через гелий λ_{He} приблизительно равен теплопроводности грунта в вакууме). Это обстоятельство можно использовать для оценки эффективного размера пор Δx в грунте. Средняя длина свободного пробега ато-

Таблица 1

Метод определения	$c, \text{ кал} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}$	$\lambda, \text{ кал} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}$	$\rho, \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$	Источники
Лабораторный анализ «Луна-16»	$0,177 \pm 0,01$	$(4,8 \pm 1,2) \cdot 10^{-6}$	2,25	Наши данные
«Аполлон-11»	0,185	$5,5 \cdot 10^{-6}$	1,265	(3)
Оптические и радиоиз- мерения	$0,20 \pm 0,02$	$1,25 \cdot 10^{-6}$	0,5	(4)
		$3,50 \cdot 10^{-6}$	0,5	(5)
		$1,2 \cdot 10^{-6} \pm$ $\pm 1,7 \cdot 10^{-5}$	$4,9 \pm 0,35$	(6)
Расчеты по известному составу	0,188			(7)

мов гелия в этих условиях равна 0,4 мм, т. е. заметно превышает характерный размер пор. В этом случае тепловой поток через газ $q_{\text{не}}$ равен ⁽²⁾

$$q_{\text{не}} \simeq \sqrt[3]{\frac{3}{8} P_{\text{не}}} \sqrt{3R/4T} T_x' \Delta x,$$

где R — газовая постоянная, а T_x' — производная температуры по x . Отсюда следует оценка для $\Delta x \sim 0,02$ мм. Это удовлетворительно согласуется с данными статистических измерений размера частиц лунного грунта.

Обсуждение результатов. В оптических и радиоастрономических исследованиях Луны используются комплексные теплофизические характеристики, представляющие собой комбинацию определенных выше величин: коэффициент температуропроводности $a = \lambda / \rho c$, глубина прогрева лунной поверхности $l_T = (2a / \Omega)^{0.5}$, где $\Omega = 2,46 \cdot 10^{-6}$ рад·сек⁻¹ — угловая скорость вращения Луны, а также параметр $\gamma = (\lambda \rho c)^{-0.5}$.

Для определенных средних значений c , λ и ρ эти величины составляют

$$a = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2 \cdot \text{сек}^{-1}; \quad l_T = 3,1 \text{ см}; \quad \gamma = 725 \text{ см}^2 \cdot \text{град} \cdot \text{сек}^{0.5} \text{ кал}^{-1}.$$

Полученные значения удельной теплоемкости, коэффициента теплопроводности и плотности лунного вещества из колонки, взятой «Луной-16», могут быть сопоставлены с оценками значений c , λ и ρ , получаемыми с использованием параметров a , l_T и γ из наземных наблюдений, а также со значениями, определенными для реголита при анализе образцов «Аполлона-11». Результаты такого сопоставления приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что определенные в прямом лабораторном эксперименте на образцах «Луны-16» и «Аполлона-11» значения c и λ находятся в хорошем согласии. Величина удельной теплоемкости удовлетворительно согласуется также с расчетами этой характеристики для известного химического состава образцов грунта ^(1, 8) определяемой как $c = \sum c_i X_i$, где X_i — массовая концентрация i -го компонента в образце. В оценках коэффициента теплопроводности по оптическим и радиоастрономическим измерениям имеет место заметное расхождение. Следует однако иметь в виду, что величина λ сильно зависит от структуры грунта, а для зернистых дисперсных материалов и от его плотности, и может в связи с этим существенно изменяться по поверхности Луны.

Основным результатом настоящей работы является экспериментальное подтверждение реальности весьма низких значений коэффициента теплопроводности поверхностного слоя Луны при его сравнительно высокой плотности.

В заключение авторы выражают благодарность В. П. Казначееву, Ю. Д. Поскачееву, В. А. Раздолину, Ю. А. Трескину и С. И. Федотову за помощь при проведении экспериментов.

Поступило
15 XII 1970

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. П. Виноградов, Изв., № 256, 28 октября, 1970. ² Г. Гребер, С. Эрк, Основы учения о теплообмене, М., 1958. ³ R. A. Robie, B. S. Hemingway, W. H. Wilson, Science, 167, № 3918, 749 (1970). ⁴ J. A. Bastin, P. E. Clegg, G. Fielder, Science, 167, № 3918, 728 (1970). ⁵ В. С. Троицкий, Сборн. Новое о Луне, Изд. АН СССР, 1963, стр. 354. ⁶ А. Е. Саломонович, Там же, стр. 366. ⁷ Т. В. Сеньор, К. М. Зигель, А. Жиро, там же, стр. 398. ⁸ L. C. Peck, V. C. Smith, Science, 167, № 3918, 532 (1970).