



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 6 за 2007 г.



ISSN 2071-2898 (Print)  
ISSN 2071-2901 (Online)

М.Я. Маров, А. В. Колесниченко,  
В.Н. Лебедев, К. К. Мануйлов

К проблеме определения  
теплофизических свойств  
грунта Фобоса

Статья доступна по лицензии  
[Creative Commons Attribution 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** К проблеме определения теплофизических свойств грунта Фобоса / М.Я. Маров [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2007. № 6. 25 с.

<https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2007-6>



**О р д е н а Л е н и н а**  
**ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ**  
**имени М.В. Келдыша**  
**Российской академии наук**

М.Я. Маров, А.В. Колесниченко,  
В.Н. Лебедев, К.К. Мануйлов

**К ПРОБЛЕМЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ**  
**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**  
**ГРУНТА ФОБОСА**

(Эксперимент "Термофоб")

**Препринт №    за 2007 г.**

**Москва**

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ОРДЕНА ЛЕНИНА ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ  
ИМЕНИ М.В. КЕЛДЫША

М.Я. Маров, А.В. Колесниченко,  
В.Н. Лебедев, К.К. Мануйлов

К ПРОБЛЕМЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ГРУНТА ФОБОСА

(Эксперимент "Термофоб")

Москва, 2007 г.

УДК 521.053

М.Я. Маров, А.В. Колесниченко, В.Н. Лебедев, К.К. Мануйлов. К проблеме определения теплофизических свойств грунта Фобоса. Препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 2007.

Рассматриваются методика и основные характеристики эксперимента "Термофоб" по исследованию теплофизических и электрофизических свойств поверхности спутника Марса Фобоса с помощью прибора, устанавливаемого на посадочном аппарате ФОБОС-ГРУНТ. Обсуждается возможность проведения прямых измерений на поверхности Фобоса на основе математических моделей процессов сбора и интерпретации информации, включая методические и технические ограничения. Дано описание конструкции прибора с учётом предварительных лабораторных испытаний.

M.Ya. Marov, A.V. Kolesnichenko, V.N. Lebedev, K.K. Manuilov. On the problem of thermophysical properties determination for Phobos soil. Preprint of the Keldysh Institute of Applied mathematics of RAS. Moscow, 2007.

Methodology and main features of THERMOPHOB scientific instrument to be installed on PHOBOS-GRUNT lander are described. The goal of this experiment is direct *in situ* measurements of thermophysical and electrophysical properties of Phobos surface soil layer. Both potential and scientific-technological constraints inherent to the proposed method based on mathematical modeling of collection and interpretation of the measured information are discussed.

© ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, 2007 г.

E-mail: manuilov@keldysh.ru

## Введение

В последние годы к малым телам (к которым, помимо астероидов, относят также кометы и метеороиды) проявляется повышенный интерес, поскольку, по современным представлениям, они содержат первичное вещество, из которого формировалась Солнечная система, включая большие планеты. Природа малых тел отличается целым рядом принципиальных особенностей. Вследствие слабой гравитации малые тела часто имеют несферическую форму. Отсутствие собственной атмосферы у астероидов (за исключением тех из них, которые рассматриваются как утратившие свою активность кометы) препятствует эрозии поверхности, сохраняющей следы многочисленных столкновений и интенсивной метеоритной бомбардировки, воздействия космических лучей, солнечного излучения и солнечного ветра.

Исследование метеоритов дало неоспоримые доказательства того, что некоторые малые тела претерпели дифференциацию. Есть также веские доказательства процессов с участием воды и, возможно, выходов лавы. В то время как ядра комет состоят из наиболее примитивного вещества, многие астероиды можно рассматривать как значительно более сложные объекты. В ещё большей степени это суждение относится к малым телам, захваченным в процессе орбитальной эволюции большими планетами.

Тела Солнечной системы (Рис. 1–3) непрерывно изменяются в процессах соударения и есть множество доказательств того, что в первые полмиллиарда лет после её образования эти процессы шли чрезвычайно активно. Природа соударяющихся тел, богатых или бедных летучими элементами, имела важное значение в эволюции как самих планет, так и их атмосфер, а возможно, и климата. Так, например, есть предположение, что значительная



Рис. 1. Борозды на поверхности Фобоса

Рис. 2. Деймос, тело размером всего 14 км.

Рис. 3. Мимас, ледяной спутник Сатурна.

доля некоторых газов в атмосферах планет земной группы привнесена кометами.

Поверхность малых тел является объектом особого научного интереса. В отсутствие процессов деструкции пород поверхностный слой в течение миллиардов лет складывался из обломков сталкивавшихся объектов, представляя собой своего рода летопись Солнечной системы. Анализ периодов собственного вращения астероидов накладывает вполне определённые ограничения на их размеры, что свидетельствует о рыхлой структуре этих тел, возможно сложенных из обломков, возникших вследствие соударений. При слабой гравитации и отсутствии атмосферы мельчайшие частицы метеоритов, захваченные малыми телами в космосе, остаются неизменными. Поскольку спектр размеров микрочастиц напрямую связан с плотностью энергии деструктивных процессов, приведших к их образованию, дисперсный анализ грунта (в сочетании с химическим и структурным анализом) позволяет оценить скорости сталкивавшихся тел. Можно также предположить, что функция распределения микрометеоритов по размерам в районе малого тела адекватна дисперсному составу грунта на его поверхности.

В силу широкого диапазона характеристик ( $g$  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, металлы и лед) или скоростью вращения. Для полной реализации этих возможностей необходима широкая программа исследования околосолнечного пространства.

## Почему Фобос?

Большой интерес к спутнику Марса Фобосу связан, прежде всего, с его происхождением, вопрос о котором до конца не решён. Можно предполагать, что, подобно другому спутнику Деймосу, он является захваченным Марсом астероидом. Исходя из этой концепции, Фобос следует относить к малым телам Солнечной системы, претерпевшим определённые изменения в процессе эволюции вблизи Марса.

Фобос (ср. диаметр 22.0 км) и Деймос (ср. диаметр 14.0 км) являются спутниками Марса, открытыми в 1877 году. Их интенсивное изучение началось после получения снимков высокого разрешения со станции Маринер-9, а позже с орбитальных аппаратов Викинг. Оба спутника находятся на устойчивых синхронных орбитах. Фобос является одним из трех спутников, обнаруженных в Солнечной системе, чей период обращения (7h 39m) меньше периода обращения планеты (для Марса 24h 37m) и который теряет орбитальную энергию на формирование приливных волн в коре Марса. Поскольку орбита Фобоса постепенно приближается к Марсу и он уже находится в сфере

Роша – поверхности, ограничивающей область гравитационной устойчивости, Фобос может быть разорван приливными силами и стать кольцом (типа юпитерианского) в ближайшие 50 миллионов лет.

Фобос и Деймос относятся к наиболее темным объектам Солнечной системы (альбеда  $\sim 0.06$ ), похоже, что их равномерно серая поверхность является слоем реголита толщиной в несколько сотен метров для Фобоса и по крайней мере 5–10 метров для Деймоса. Формирование кратеров на поверхности Фобоса шло во время и после образования реголита. У Деймоса реголит продолжал образовываться после замедления кратерообразования и кратеры размером менее 100 метров оказались частично или полностью заполненными. В отличие от сглаженного рельефа Деймоса, поверхность Фобоса изобилует рельефными, свежими кратерами различного размера и сетью линейных борозд, напоминающих цепочки кратеров. Похоже, что эти цепочки связаны с образованием Стикни, крупнейшего кратера Фобоса.

Оценки гравитационного поля Фобоса и Деймоса дают оценку массы и плотности этих тел (соответственно  $1 \cdot 10^{16}$  кг и  $1.9 \text{ г/см}^3$  для Фобоса,  $2 \cdot 10^{15}$  кг и  $1.4 \text{ г/см}^3$  для Деймоса). Низкая плотность, цвет и альбеда делают Фобос и Деймос композиционно похожими на карбонатные хондриты, найденные в поясе астероидов. Эти данные являются сильным аргументом в пользу версии захвата Марсом двух астероидов. Однако с небесно-механической точки зрения захват астероида маловероятен. Это дает сильные аргументы в пользу того, что формирование спутников Марса происходило вместе с Марсом из протопланетного облака. Но в этом случае состав Фобоса должен отличаться от состава карбонатных хондритов и быть близок составу обычных хондритов, характерных для области аккреции вблизи Марса. Возникает вопрос о том, каковы могли бы быть физические процессы, которые бы объяснили их происхождение, какую роль в их происхождении сыграло гравитационное поле Марса? Этот круг вопросов – один из важнейших в современной фундаментальной физике Солнечной системы, их решение поможет решить проблемы происхождения и эволюции Земли и планет земной группы.

Безусловно, в процессе эволюции спутники Марса подвергались воздействию различных внешних факторов. Начнем с самого Марса. Существование на Земле так называемых SNC-метеоритов, имеющих марсианское происхождение, свидетельствует о том, что выброс материала с поверхности Марса действительно происходил, особенно на ранних этапах эволюции. Часть этого выброшенного материала могла осесть на поверхность Фобоса, привнося тем самым компоненту марсианского вещества в состав реголита Фобоса. При метеоритной бомбардировке осколки легко покидают спутники Марса, однако большая часть этого вещества остается в окрестностях Марса на орбитах, близких к их источникам, образуя пылевой тор. Косвенным доказательством его наличия являются зафиксированные космическими аппаратами МАРС-5 и ФОБОС-2 возмущения, испытываемые солнечным ветром вблизи орбит марсианских спутников (Кривов и др., 1991). Выполненный недавно численный анализ (Sasaki, 1999) показал, что при формировании пылевого тора важную роль играют орбитальные резонансы пылевых частиц, вы-

званные влиянием Марса и вариациями давления солнечной радиации (эффект Пойтинга-Робертсона). Исследование этой проблемы важно не только с точки зрения эволюции реголита на поверхности марсианских спутников, но и для изучения условий вблизи Марса при планировании перспективных экспедиций к Марсу.

Реголит безатмосферных тел подвержен бомбардировке частиц космических лучей и солнечного ветра. Несмотря на это, можно ожидать, что процессы, происходящие во внешнем слое реголита, хорошо отражают химический состав коренных пород. Поэтому изучение реголита позволит получить сведения не только о реликтовом веществе, из которого сформировались планеты и тела Солнечной системы, но и об условиях их формирования и последующей эволюции.

Наиболее мощным методом исследований реголита является определение соотношений состава основных его элементов – порообразующих, летучих элементов, изотопов. В настоящее время известно соотношение основного элементного состава хондритов и метеоритов марсианского происхождения (SNC-метеоритов). Например, соотношение углерода и кремния для обыкновенных хондритов в три раза выше, чем для SNC-метеоритов, а соотношение этих же элементов для углистых хондритов почти в сто раз выше, чем для обычных хондритов. Подобный диагностический метод используется по результатам измерений соотношений других порообразующих элемен-

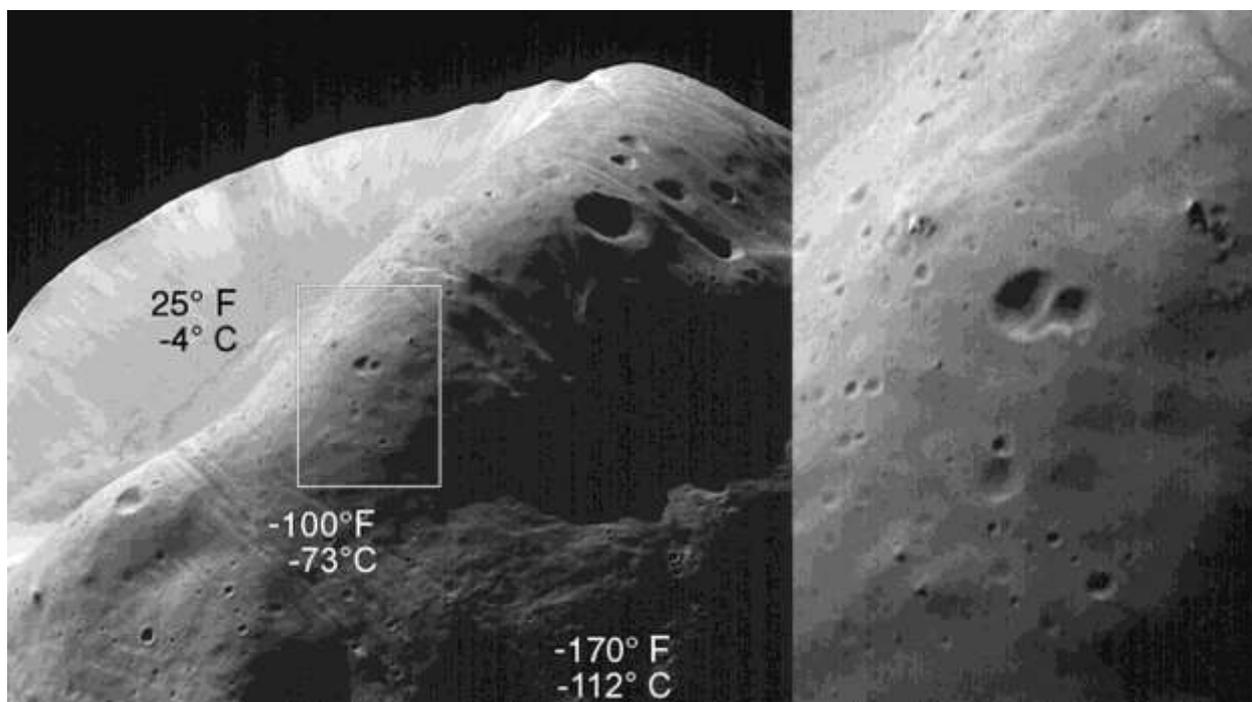


Рис. 4. Данные термоэмиссионного спектрометра Mars Global Surveyor, совмещенные с изображением МОС (Mars Orbiter Camera) показывают исключительно большой температурный контраст между дневной и ночной областями, связанный, по всей вероятности, с мелкодисперсной структурой поверхности. На изображении видны осыпи на внутренней стороне и большие валуны, частично покрытые грунтом на внешней части Стикни – крупнейшего кратера Фобоса диаметром 10 км. Размер области съемки – 1.9 км x 2 км, разрешение – 4 м.

тов, изотопов кислорода, благородных газов. Зная эти соотношения и выполнив детальный анализ исследуемого образца реголита, можно определить его "родословную" и, таким образом, сделать заключение о происхождении тела. По соотношениям радиоактивных элементов определяют абсолютный возраст тела.

Определение теплофизических параметров реголита позволяет определить тепловой режим поверхностного слоя спутника и его среднюю температуру. Эти данные могут быть в последствии использованы при расчете скоростей химических реакций. Значение коэффициента теплоемкости в основном задается элементным составом реголита, в то время как коэффициент теплопроводности в значительной мере определяется структурой грунта и его дисперсностью.

Качественные фотографии с близкого расстояния (рис. 4), полученные аппаратом Mars Global Surveyor выявили темные и светлые полосы на внутреннем конусе кратеров. Эти полосы рассматриваются как следы осыпей на крутых склонах и их существование при гравитации в 1000 раз меньше земной показывает, что поверхность Фобоса покрыта пылью из метеоритных осколков. На фотографиях хорошо заметны валуны размером до 50 м, частично прикрытые грунтом. Данные измерений термоэмиссионного спектрометра этого же аппарата позволили определить локальную температуру поверхности. Большой контраст температуры для дневной ( $-4^{\circ}\text{C}$ ) и ночной ( $-112^{\circ}\text{C}$ ) стороны Фобоса при его семичасовых сутках может быть объяснен мелкой пылью, покрывающей поверхность слоем толщиной, оцениваемой как минимум в один метр. Для сравнения заметим, что на поверхности Луны в экваториальной области в лунный полдень температура достигает  $+125^{\circ}\text{C}$  и падает до  $-175^{\circ}\text{C}$  в лунную полночь.

## Проект ФОБОС-ГРУНТ

Целью Российского проекта ФОБОС-ГРУНТ, осуществляемого наряду с программами исследования малых тел в США и в Евросоюзе, является:

- отработка специфических средств и методов изучения малых тел, включающих научное оборудование, средства доставки, баллистическое, навигационное и топографическое обеспечение, системы жизнеобеспечения и связи;
- бурение, забор стратифицированных проб грунта и доставка образцов на Землю,
- контактное и дистанционное определение физико-химических характеристик поверхностного слоя Фобоса.

Важнейшей научной задачей проекта, помимо забора и доставки грунта на Землю, является определение элементного состава пород, который является индивидуальным отличительным признаком небесного тела и может дать ответы на многочисленные научные проблемы, связанные с эволюцией планет Солнечной системы и их спутников.

### **Основные этапы и характеристики проекта:**

- Вывод осуществляется ракетой-носителем "Союз". Маршевый двигатель: электроракетная двигательная установка (ЭРДУ), получающая питание (до 8 кВт) от солнечных батарей (впервые в России);
- Длительность перелета Земля – орбита Марса: 500 суток;
- Радиолокация и телевизионная (ТВ) съемка Фобоса с подлетной орбиты;
- Подготовка на орбите спутника Марса (40 суток); уточнение эфемерид и гравитационной постоянной Фобоса;
- Синхронизация орбит аппарата и Фобоса с расстоянием между ними 30 – 200 км;
- переход на орбиту спутника Фобоса;
- ТВ-наблюдение и окончательный выбор района посадки;
- Посадка с использованием лазерного высотомера, доплеровского измерителя скорости и дальности и ТВ-системы;
- Масса посадочного модуля ~500 кг;
- Множественный грунтозабор с использованием бурильного устройства (отбирается колонка реголита высотой 0.6 м объемом 100 см<sup>3</sup>);
- Интервал между посадкой и стартом возвратной ракеты: 2 суток;
- Длительность работы невозвращаемого оборудования 1 год;
- Длительность перелета Марс – Земля: 300 суток;

Доставка пробы грунта с Фобоса на Землю представляет собой сложную задачу и соответственно имеет определенную вероятность выполнения. В то же время ряд данных для изучения свойств поверхностных пород может быть получен косвенными методами непосредственно на Фобосе. Среди таких методов могут быть предложены исследования характеристик приповерхностных слоев грунта с помощью теплофизических и электрических измерений.

До настоящего времени эксперименты подобного рода на космических телах не проводились. Аналогичный эксперимент на пенетраторе проекта МАРС-96, планировавшийся в 1996 г., провести не удалось в связи с нештатными запусками носителей.

## Эксперимент "Термофоб"

**Цель эксперимента.** Прибор "Термофоб" предназначен для теплофизических измерений в поверхностном слое реголита Фобоса в месте посадки автоматического аппарата ФОБОС-ГРУНТ с целью характеристики пород по физическим свойствам.

Данные термометрических измерений, полученные в процессе активного теплового воздействия на грунт, позволяют определить основные теплофизические характеристики: теплопроводность и объемную теплоемкость грунта. Определение температурной зависимости теплопроводности позволяет дать оценку дисперсности материала.

Результаты измерений могут быть использованы для расчета тепловой модели грунта Фобоса. Кроме того, контактные измерения температуры являются калибровочными для соответствующих дистанционных методов.

### Научное предложение

**Модель грунта.** Для правильного выбора метода измерения и определения параметров прибора необходимо задаться моделью поверхностного слоя грунта Фобоса. Естественным ориентиром при этом являются данные анализа лунного грунта. Луна – практически единственное изученное небесное тело без атмосферы и вулканической деятельности, имеющее, следовательно, схожий механизм грунтообразования.

По современным представлениям лунный грунт состоит из трех слоев. Верхний слой (2 – 3 см) с плотностью вещества около  $0.5 \text{ г/см}^3$  имеет твердопористую дендритовую (фрактальную) структуру и образован частицами размером порядка десятков микрон, спеченными в ходе бомбардировки поверхности космическим и солнечным излучением. Второй слой включает 3 – 5 метров пористого вещества с плотностью около  $1 \text{ г/см}^3$ . Наконец, идет довольно плотный слой, вероятно, скальный грунт.

Ниже приводятся данные лабораторного анализа проб лунного грунта из района Моря Изобилия, доставленных на Землю АМС "Луна-16" (*Авдеевский и др.*, 1974), материкового грунта, полученного АМС "Луна-20", а также данные по грунту, собранному возвратными модулями "Аполлон 11" (Море Спокойствия), "Аполлон 12, 14" (Океан Бурь), "Аполлон 15" (Море Дождей), "Аполлон 16" (материковая область) (*Головкин и др.*, 1979). По этим данным поверхностный реголит Луны представляет собой рыхлый дисперсный материал из частиц двух типов: первичных магматических пород типа базальтов и спекшихся, часто оплавленных с поверхности, почти сферических частиц. Среднечисленный размер частиц близок к 25 мкм, а среднемассовый – к 160 мкм.

Таблица 1. Характеристики образцов лунного грунта.

Источник данных	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\lambda \cdot 10^{-3}$ , Вт/(м·К)		С, Дж/(см <sup>3</sup> ·К)		а, 10 <sup>-8</sup> м <sup>2</sup> /с	
		293 °К	216 °К	293 °К	216 °К	293 °К	216 °К
Луна-16	1.38	2.76	—	1.07	—	0.27	—
	2.25	2.0	—	1.66	—	0.12	—
Луна-20	1.0	2.55	—	0.8	—	0.32	—
Аполлон 11	1.3	1.85	1.59	0.95	0.776	0.196	0.205
Аполлон 12	1.3	1.72	1.24	—	—	—	—
Аполлон 14	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
Аполлон 15	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
	1.5	0.97	0.71	1.13	0.97	0.085	0.073
Аполлон 16	1.5	0.76	0.60	1.15	0.90	0.066	0.065
Расчет по химическому составу				0.188			

При нагрузке 1 кг/см<sup>2</sup> плотность образцов увеличивается почти в два раза по отношению к измеренной при свободной засыпке. Напротив, явной зависимости коэффициента теплопроводности от давления не обнаружено, что наводит на мысль, что перенос тепла в грунте осуществляется в основном излучением. Коэффициент лучистой теплопроводности в пористых материалах описывается формулой Лоба (*Loeb*, 1951)

$$k_r = 4\sigma d \varepsilon \Gamma T^3,$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $d$  – размер пор,  $\varepsilon$  – поглощательная способность,  $\Gamma$  – коэффициент формы (для сферических пор  $\Gamma=2/3$ ). Данные более поздних исследований лунного грунта в диапазоне температур 90–350 °К (аппараты Луна-20, Аполлон 12, 14, 15) подтвердили наличие двух каналов передачи тепла: лучистого переноса, описываемого формулой Лоба и теплопереноса через границы гранул с равенством вклада каналов в области температур 270–300 °К (рис. 5).

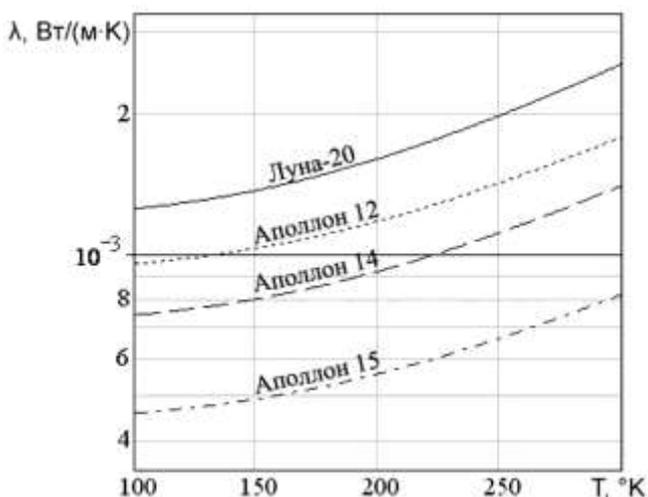


Рис. 5. Зависимость теплопроводности лунного грунта из различных областей от температуры по данным (*Головкин и др.*, 1979), (*Cremers, Birkebak*, 1970), (*Cremers*, 1975), (*Hemingway et al*, 1973).

**Тепловые модели грунта Луны и Фобоса.** Рассматриваемые небесные тела не имеют значимых тепловых источников, поэтому температура грунта определяется балансом между градиентными потоками тепла (теплопроводность) и теплом, поглощаемым или выделяемым элементом среды при изменении его температуры за счет теплоемкости. На поверхности должен обеспечиваться баланс градиентного потока тепла и разности потоков поглощенной и излученной оптической энергии<sup>1</sup>. Дневной разогрев и ночное охлаждение затрагивают ограниченную область грунта вблизи поверхности, внутренняя зона небесного тела находится при постоянной температуре и может не учитываться в расчетах. Таким образом моделирование теплового режима грунта в первом приближении сводится к решению нелинейного одномерного уравнения теплопроводности в конечной области  $0 \leq x \leq X$  :

$$C(T)\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

с граничными условиями второго рода

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{1}{\lambda(T)} (P_i(t) - P_e(T)), \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=X} = 0. \quad (2)$$

Здесь  $T(x, t)$  – температура среды,  $\lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности,  $\rho$ ,  $C(T)$ , – соответственно удельная плотность и теплоемкость,  $P_i(t)$  – поток тепла, получаемый при инсоляции,  $P_e(t)$  – поток, уносимый тепловым излучением. Формулы для  $P_i(t)$  и  $P_e(t)$  имеют вид

$$P_i(t) = \begin{cases} (1-A)E \cos(\phi(t)) & \cos(\phi(t)) > 0 \\ 0 & \cos(\phi(t)) \leq 0 \end{cases}, \quad (3)$$

$$P_e(w) = \int_0^{\infty} (1-A(\nu)) \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{\exp(h\nu/kw) - 1} d\nu, \quad (4)$$

где  $A$ ,  $A(\nu)$  – интегральное и спектральное альбедо,  $E$  – солнечная постоянная (1368 Вт/м<sup>2</sup> для Луны и 589 Вт/м<sup>2</sup> для Марса),  $\phi(t)$  – зенитный угол Солнца (для экваториальной области  $\phi(t) = 2\pi t/\tau$ , где  $t$  – местное время, а  $\tau$  – продолжительность локальных суток).

Начальные условия задаются произвольно, поскольку мы ищем установившийся суточный цикл температуры. Например, можно задать  $T(x, 0) = 0$ .

<sup>1</sup> Предполагается, что толщина слоя, в котором происходит поглощение и излучение, является пренебрежимо малым. При малых альбедо эта толщина сравнима с характерной длиной волны  $\lambda$  излучения (0.5-1 мкм для поглощения и 10-20 мкм для излучения). Для радиоизлучения ( $\lambda > 1$  мм) это предположение неверно. Не выполняется оно и для планет с газовой (аэрозольной) компонентой.

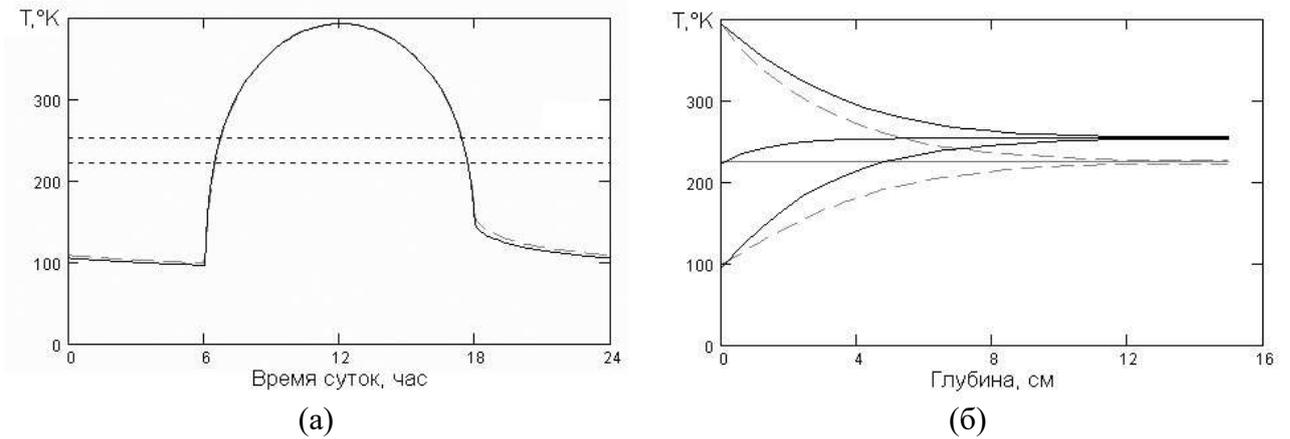


Рис. 6. Результаты тепловых расчетов лунного грунта для астрономических параметров Луны: (а) зависимость температуры поверхности от местного времени суток; (б) зависимость максимальной, средней за сутки и минимальной температуры от глубины для вариантов расчета: (1)  $\lambda = 2.5 \cdot 10^{-3}$  Вт / (м·К) и (2)  $\lambda(T) = 1.2 \cdot 10^{-3}$  Вт / (м·К) +  $T^3 \cdot 0.5 \cdot 10^{-10}$  Вт / (м·К<sup>4</sup>).

Модель грунта Луны. На рис. 6 показано стационарное численное решение уравнения (1) с граничными условиями (2) для астрономических параметров Луны, полученное расчетом с использованием неявной разностной схемы Эйлера и алгоритма прогонки для расчетной сетки с количеством узлов  $N_x = 30 \dots 100$ ,  $N_t = 200 \dots 1000$ . Использованы теплофизические характеристики образцов лунного грунта зонда Луна-20 (табл. 2). Значения оптических параметров реголита взяты из (Антипова-Каратаева, 1979). Полученные расчетом значения температуры лунной поверхности ( $T_{\max} = 393$  °К,  $T_{\min} = 99$  °К,  $T_{\text{ср}} = 225$  °К) удивительно хорошо согласуются с контактными измерениями температуры, полученными во время экспедиций посещения.

Как показали дальнейшие исследования, температурная зависимость коэффициента теплопроводности практически не влияет на суточный ход температуры поверхности, но вызывает вполне ощутимый (около 25 °К) рост температуры с глубиной, связанный с улучшенным подогревом грунта днем и сниженным выхолаживанием ночью. Эффект подогрева грунта на 35 °К на глубинах более полуметра зафиксирован по данным измерения радиоизлучения Луны в широком диапазоне волн – от одного миллиметра до 70 сантиметров, проведенным в Советском Союзе по методу "искусственной Луны". До сих пор это явление связывалось с уносом тепла, выделяемого при радиоактивном распаде в недрах Луны.

Модель грунта Фобоса. В качестве астрономических параметров Фобоса нами были использованы теплофизические параметры лунного грунта. Поскольку данные по спектральному альбедо для Фобоса в ИК-диапазоне отсутствуют, далее были использованы соответствующие данные для Луны. На рис. 7 показаны результаты соответствующих расчетов. Полученные характерные значения температуры поверхности приведены в табл. 2.

Сравнение результатов численного моделирования с данными термоэмиссионного спектрометра (TES) Mars Global Surveyor показывает удовлетворительное соответствие для ночного минимума температуры. Дневной

Таблица 2. Характерные температуры поверхности Фобоса.

Источник данных		Tmax, °K	Tmin, °K	Tcp, °K
Расчет	$\lambda(T) = 1.2 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$	310	150	216
	$\lambda(T) = 1.2 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)} + 0.5 \cdot 10^{-10} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К}^4) \cdot T^3$	311	144	213
Термоэмиссионный спектрометр Mars Global Surveyor		269	161	—

максимум температуры по данным TES примерно на 40 градусов ниже расчетного значения, что довольно странно. Как видно из рис. 8, величина потока тепла  $P_i(t) - P_e(t)$ , которым грунт обменивается с окружающим пространством, составляет менее 15% солнечного потока. По этой причине дневной максимум должен быть близок к равновесному значению температуры для неподвижного небесного тела с Солнцем в зените (394 °K для Луны и 319 °K для Фобоса). Возможно, причиной рассогласования данных является регулярное прохождение Фобоса через тень Марса. Фобос, как и Луна, постоянно ориентирован к Марсу одной стороной, при этом результаты расчетов относятся к внешнему (незатеняемому) полушарию, в то время как данные TES могут относиться к внутреннему.

Период обращения Фобоса (0.31891 суток) почти в 100 раз меньше лунного, поэтому величина обменного теплового потока для Фобоса на поря-

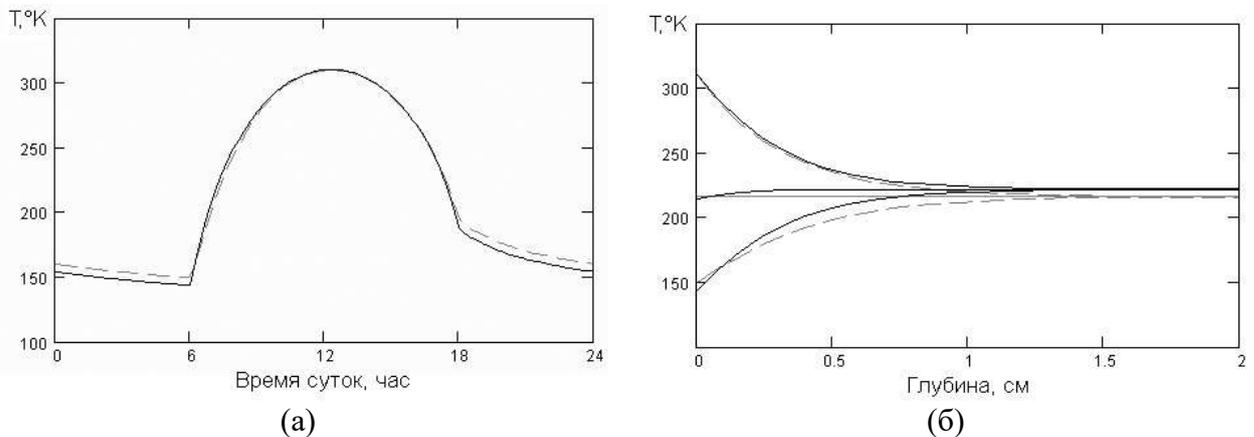
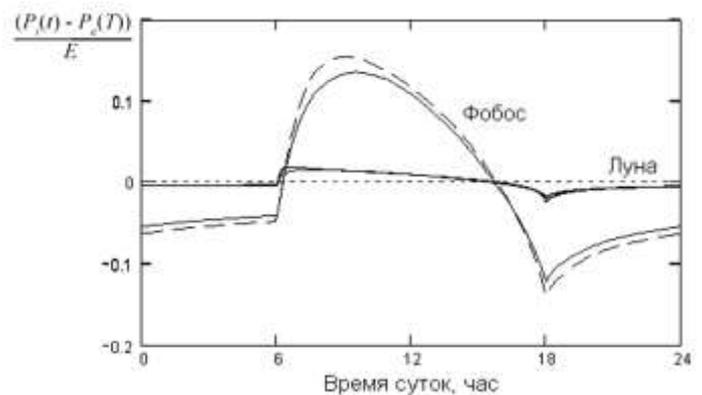


Рис. 7. Данные тепловых расчетов для лунного грунта и астрономических параметров Фобоса. Параметры кривых соответствуют рис. 6.

Рис. 8. Отношение теплового потока через поверхность грунта Луны и Фобоса к местному значению солнечной постоянной. Излом кривой связан с заложенным в граничном условии (3) представлением Солнца в виде точечного источника.



док больше, а глубина проникновения тепловой волны  $x = \sqrt{\lambda \tau / C\rho} = 0.58$  см на порядок меньше, чем на Луне (5.3 см). С практической точностью можно считать, что на глубинах более 1 см температура грунта на Фобосе постоянна. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности приводит к подогреву глубинных слоев грунта на 8.5 градусов.

**Активная термометрия Фобоса.** Изменения лучисто-теплового обмена в месте посадки десантного аппарата миссии ФОБОС-ГРУНТ не позволяют провести эксперимент по тепловому зондированию в пассивном режиме, поэтому в эксперименте "Термофоб" планируется определение теплофизических свойств грунта по данным термометрических измерений в процессе его нагрева автономными источниками тепла. При этом необходимо учесть процесс релаксации теплового поля, обусловленный изменившимися граничными условиями (3), (4) и имеющий длительность порядка нескольких местных суток.

Величина активного теплового потока должна быть соизмерима с величиной солнечного потока, заданного солнечной постоянной ( $0.06$  Вт/см<sup>2</sup>). При существенно более слабом нагреве возрастет роль возмущающих тепловых утечек, при более сильном возможны химические процессы в грунте, изменяющие его свойства. Эти факторы в сочетании с ограничениями эксперимента по энергетике задают площадь теплового воздействия до  $10$  см<sup>2</sup>. Продолжительность воздействия ( $\Delta t \sim 1000$  сек) определяется длительностью сеанса измерений. Глубина проникновения тепловой волны за время сеанса составит  $\Delta x = \sqrt{\lambda \Delta t / C\rho} \sim 1.1$  мм. Таким образом, мы сможем исследовать теплофизические свойства образца грунта объемом порядка  $1$  см<sup>3</sup>.

**Постановка задачи.** При малой по сравнению с размером датчика глубине распространения тепловой волны задачу нестационарного теплообмена для эксперимента "Термофоб" можно в первом приближении считать одномерной, описываемой уравнением Био-Фурье

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (5)$$

Для полубесконечной области:  $0 < x < \infty$  с начальным условием:  $T(x,0) = T_0$  и граничным условием II рода (задан поток тепла)  $\partial_x T = -Q$  имеем известное решение:

$$T(x,t) = 2Qa \sqrt{\frac{t}{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a^2t}\right) - Qx \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2a\sqrt{t}}\right) + T_0, \quad (6)$$

где  $T(x, t)$  – температура среды,  $a^2 = \lambda / C\rho$  – коэффициент температуропроводности,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности грунта,  $C, \rho$  – соответственно

его удельная теплоемкость и плотность,  $Q = P / \lambda$  – градиент температуры при  $x = 0$ ,  $P$  – плотность теплового потока,

$$\operatorname{erfc} z \equiv 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-\zeta^2) d\zeta.$$

**Методы определения теплофизических характеристик.** В лабораторных условиях обычно производится раздельное определения плотности  $\rho$ , удельной теплоемкости  $C$  и теплопроводности  $\lambda$  грунта. По полученным данным рассчитывается коэффициент температуропроводности среды. Именно так определялись представленные в табл. 5 характеристики образцов лунного грунта, доставленные на Землю. Естественно, этот подход неприемлем в условиях космического проекта.

При дистанционном анализе свойств грунта по данным термометрических измерений можно определить только произведение удельной теплоемкости на плотность среды (ее объемную теплоемкость), входящее в решение (5). Таким образом, для определения двух независимых параметров среды необходимы, как минимум, два датчика.

**Метод проникающего зонда.** Определение глубины проникновения тепловой волны в исследуемом материале по схеме рис. 9 является часто используемым практическим методом. Измеряются три значения температуры: в зоне нагрева ( $T_1$ ), на расстоянии  $x$  от нагревателя ( $T_2$ ) и в невозмущенной зоне ( $T_0$ ) (на достаточной глубине или до нагрева). По данным измерений определяется параметр  $\alpha = (T_2 - T_0)/(T_1 - T_0)$  и из соотношения

$$\alpha(z) \equiv T(x,t)/T(0,t) = \exp(-z^2) - z\sqrt{\pi} \operatorname{erfc}(z) \quad (7)$$

для нормированного распределения температуры по глубине (рис. 10) определяется сначала параметр  $z = x/2a\sqrt{t}$ , а затем и коэффициент температуропроводности  $a$ .

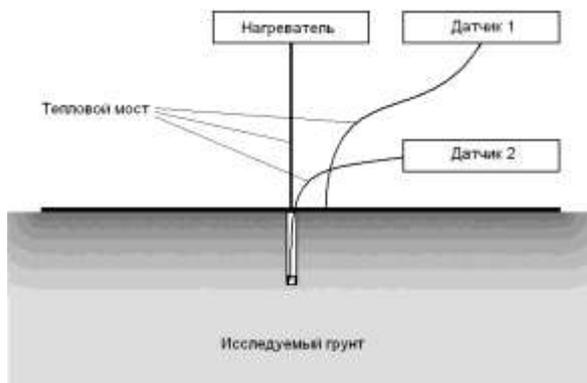


Рис. 9. Определение температуропроводности методом проникающего зонда.

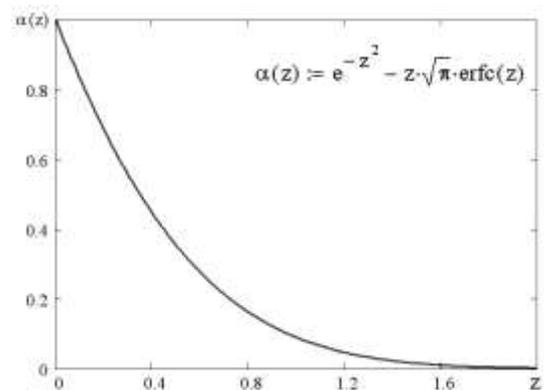


Рис. 10. Нормированная кривая прогрева.

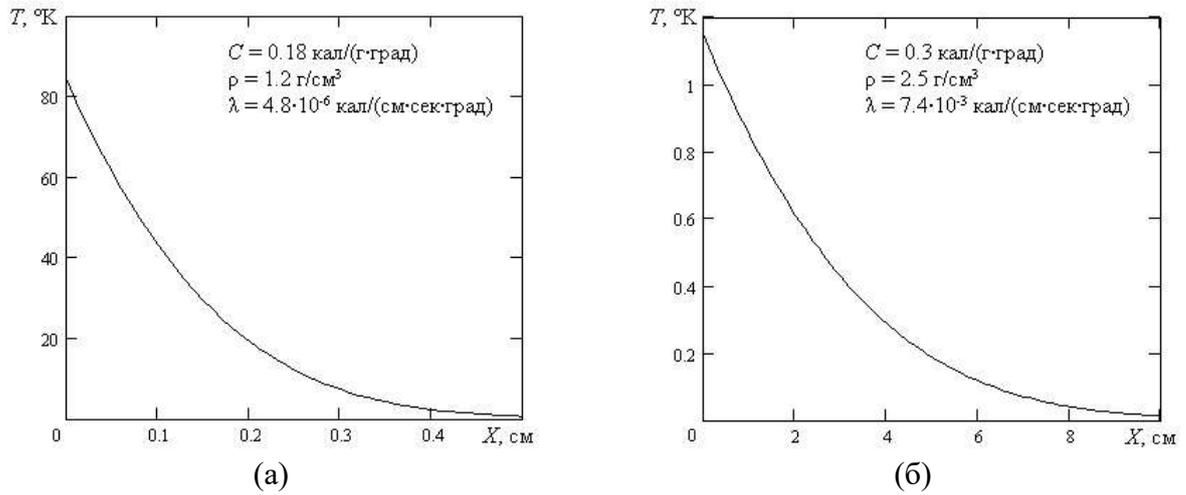


Рис. 11. Распределение температуры по глубине после прогрева в лунного грунта (а) и базальта (б) потоком  $P = 0.01$  Вт/см<sup>2</sup> в течение 1000 сек.

Метод прост и надежен, однако требует внедрения зонда в грунт на уровень порядка глубины проникновения тепловой волны  $z_0 = a\sqrt{t}$  и обеспечения теплового контакта с исследуемой средой. На рис. 11 приведены температурные профили при нагреве реголита плоским тепловым потоком: данные рис. 11,а относятся к монолитному образцу, а рис. 11,б – к дисперсному. Глубина проникновения тепловой волны  $z_0$  к исходу 1000 сек нагрева составит около 2 см для монолитного образца и всего 1 мм для дисперсного. В связи с этим потребуется несколько датчиков температуры, расположенных на разной, в том числе и очень малой глубине.

Задача бурения монолитного реголита на Фобосе достаточно сложна: при ускорении силы тяжести менее  $0.001$  g невозможно вдавить бур в грунт. Для дисперсного грунта внедрение зонда за счет посадочного импульса не представляет трудностей, однако при исключительно малой теплопроводности среды зонд быстро станет тепловым мостом, искажающим картину теплового поля. По этим причинам метод проникающего зонда плохо подходит для решения поставленной задачи.

**Метод поверхностного зонда.** Метод температурного зонда можно радикально упростить, ограничившись одним датчиком температуры, распо-

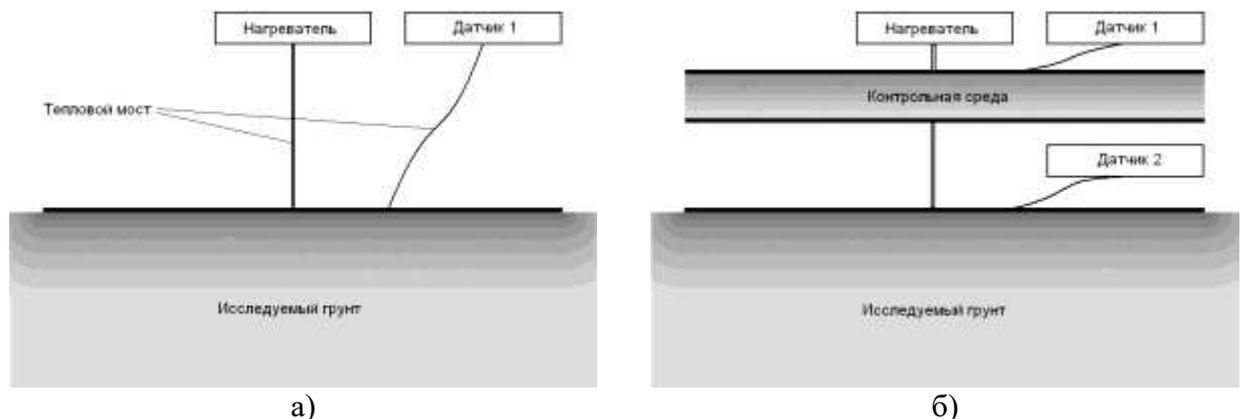


Рис. 12. Метод поверхностного зонда с одним (а) и двумя (б) датчиками.

ложенным на нагреваемой поверхности грунта (рис. 12(a)). Как следует из (2), температура поверхности зависит как от времени, так и от коэффициента теплопроводности грунта, его плотности и теплоемкости

$$T(0,t) = \frac{2P}{aC\rho} \sqrt{\frac{t}{\pi}} + T_0, \quad (8)$$

По результатам измерений можно определить только произведение  $aC\rho$ . Тем не менее, как дополнительный, метод поверхностного зонда вполне подходит для эксперимента "Термофоб", учитывая многочисленные ограничения проекта. Данная схема (с выключенным нагревателем) особенно хорошо подходит для определения температурного тренда в первые сутки после посадки на Фобос.

Более точное определение коэффициента теплопроводности возможно при использовании двухдатчиковой схемы (рис. 12,б). Этот метод эквивалентен методу температурного зондирования с той разницей, что роль слоя грунта между датчиками 1 и 2 здесь выполняет контрольная среда с известными теплофизическими параметрами. В связи с тем, что характеристики контрольной среды и грунта различаются, формулу (3) нельзя использовать. Определение характеристик грунта производится путем сравнения данных измерений с результатами модельных численных расчетов.

**Дистанционный (радиометрический) метод.** Описанные выше методы при многих достоинствах страдают существенным недостатком: неконтролируемым тепловым контактом датчиков с грунтом. Избежать необходимости механического контакта позволяет схема с нагревом грунта при помощи ИК-излучения (рис. 13). При заданной мощности нагревателя  $P$  величина перепада температуры  $\Delta T$  между излучающей поверхностью  $S$  и грунтом (рис. 14) определяется формулой

$$\Delta T = T \left( \sqrt[4]{1 + P/(\sigma S T^4)} - 1 \right),$$



Рис. 13. Определение теплопроводности радиометрическим методом.

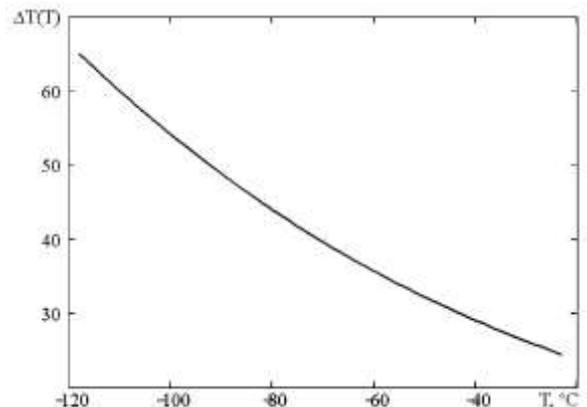


Рис. 14. Значение перепада температуры  $\Delta T(T)$  для параметров  $S = 10 \text{ см}^2$ ,  $P = 0.1 \text{ Вт}$ .

где  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-12}$  Вт/(см<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана-Больцмана. Перепад температуры не зависит от свойств грунта и может быть учтен при наземной обработке данных. Так же как и метод поверхностного зонда, радиометрический метод может быть доработан введением контрольной среды и дополнительного датчика температуры между нагревателем и ИК-излучателем. Этот метод не может быть использован для пассивного измерения температуры среды.

## Техническое предложение

Состояние вопроса по эксперименту. Аналогичный прибор "Термозонд" для исследования разреза грунта Марса с борта пенетратора (проект МАРС-96) был разработан ранее в МАИ. Прибор с массой 0.2 кг и энергопотреблением 2 Вт предназначался для определения теплофизических свойств марсианского грунта по данным измерения температуры на глубине проникновения пенетратора (Алифанов и др., 1995).

Эксперимент "Термофоб" разработан в ИПМ им М.В. Келдыша РАН на основе анализа полученных исходных данных по проекту ФОБОС-ГРУНТ. Работа осуществляется в соответствии с установленным графиком подготовки экспедиции. Прибор имеет ряд конструктивных особенностей связанных с иным типом несущего аппарата и схемой доставки (мягкая посадка на грунт). Принципиальные отличия имеют конструкция и схема размещения чувствительных датчиков. В конструкции использован опыт разработки метеокомплекса для пенетратора проекта МАРС-96. Работа выполняется в кооперации с НПОЛ, ИКИ РАН, ГЕОХИ РАН.

Принцип работы прибора. Теплофизические измерения предполагается производить при активном воздействии на грунт теплового потока автономными электрическими нагревателями малой мощности. Значения температуры грунта в зоне нагрева преобразуются датчиками в электрические сигналы, обрабатываются и вводятся в запоминающее устройство посадочного модуля, после чего передаются по радиолинии на Землю. Для восстановления значений физических параметров по результатам измерений используются данные наземной калибровки.

Для измерения температуры грунта планируется использовать малоинерционные контактные датчики (фольговые терморезисторы), размещенные на опорах посадочного модуля аппарата ФОБОС-ГРУНТ. Тепловой контакт датчиков с грунтом, обеспечиваемый конструкцией датчиков и опор, осуществляется за счет посадочного импульса. Для повышения репрезентативности и надежности измерений датчики устанавливаются группами на каждую из трех опор посадочного модуля. Датчики электро- и термоизолированы от конструкции аппарата. Уточнение характеристик момента внедрения и

мест установки датчиков прибора на посадочном модуле проекта ФОБОС-ГРУНТ определяются на дальнейших этапах разработки совместно с НПОЛ.

Прибор "Термофоб" включает совокупность вторичных преобразователей, согласующих характеристики датчиков и телеметрической системы. С целью повышения надежности все вторичные преобразователи являются независимыми, объединяясь только цепями питания. Достоверность определения теплофизических параметров обеспечивается использованием разнотипных систем преобразователей, дополняющих друг друга.

Методика измерений. В начальном, пассивном режиме измерений определяется тренд температуры в местах размещения датчиков, связанный с остаточным воздействием прогрева грунта солнечным излучением и тепловым воздействием посадочного модуля.

Теплофизические характеристики грунта определяются в активном режиме измерений по динамике изменения температуры в пограничной области грунта после включения нагревателя. С целью определения температурной зависимости теплофизических параметров планируется использование нескольких (2 – 4) режимов нагрева, отличающихся мощностью теплового потока.

Циклограмма работы. Продолжительность режима активной работы научной аппаратуры уточняется в соответствии с энергетическими ресурсами и программой работы посадочного модуля. Прибор "Термофоб" работает по жесткой программе, его включение осуществляется внешним программным устройством путем подачи питающего напряжения.

**Таблица 3.** Технические и информационные характеристики прибора.

Параметр	Значение
Масса и габариты прибора	0.30 кг, 100 x 80 x 60 мм
Габариты блоков датчиков	Ø 30 x 40 мм (3 шт.)
Средняя потребляемая мощность	=27 В, 2 Вт
Ресурс	1000 часов
Диапазон измеряемых температур	160 ... 380 °К
Частота опроса	5 Гц
Длительность сеанса	150 мин (уточняется)
Периодичность сеансов	уточняется
Количество и тип информационных каналов	10 (аналог)
Информативность	0.5 Кбит/сек

Конструкция. В основу прибора положены принципы максимальной простоты конструкции, отсутствия механизмов и приводов, а также пиротехнических средств для внедрения датчиков в грунт. Прибор представляет собой моноблок 100 x 80 x 60 мм. Три выносные группы датчиков (Ø30 x 40 мм) устанавливаются на плавающей подвеске в отверстиях посадочных опор. Для уменьшения влияния термоэлектрических потенциалов и омического со-

противления контактов на точность измерений датчики имеют безразъемное соединение с моноблоком электроники. Рассматривается вопрос о необходимости дополнительной теплоизоляции датчиков путем применения охранных нагревателей в районах тепловых утечек.

Программа испытаний. В настоящее время проводится разработка датчиков, реализующих метод поверхностного зонда и радиометрический метод. Определение состава термодатчиков, выбор схемы измерений и окончательная компоновка прибора будут произведены по результатам комплексных испытаний, включающих вакуумные измерения теплофизических характеристик для паспортизованных мелкодисперсных сред. Для работы с образцами (типами) грунтов требуется создание лабораторной компьютеризированной термовакуумной установки на диапазон давлений от атмосферного до порядка  $10^{-4}$  мм рт. ст. и температур 100–300 °К, включающей как контрольные теплофизические приборы, так и эталонные монолитные и дисперсные среды.

#### Наземная обработка данных.

Задача определения теплофизических свойств грунта Фобоса в эксперименте "Термофоб" является в конечном счете обратной (нелинейной) задачей нестационарной теплопроводности, состоящей в восстановлении коэффициентов теплопроводности и теплоемкости на поверхности твердого тела по результатам внутренних измерений температуры. Следует отметить, что универсального алгоритма решения такого рода обратных задач не существует. Их решение в каждом конкретном случае осуществляется индивидуальным образом с привлечением всего опыта использования различных методов идентификации, а также с учетом специфики данного класса задач.

Неоднозначность решения обратных задач вынуждает зачастую исследователей со скепсисом относиться к физическому смыслу значений параметров, полученных подобным способом. Известно, что обратные задачи теплопроводности являются неустойчивыми задачами и требуют разработки специальных методов и приемов решения. Обратная задача теплопроводности – одна из многих задач, которые в математическом смысле являются некорректно поставленными. Их решение крайне чувствительно к погрешностям измерений. Существует ряд общих методов решения некорректных задач. Один из них, названный методом регуляризации, разработан в ИПМ им. М.В. Келдыша ее директором – А.Н. Тихоновым (*Тихонов, Арсенин, 1975*). Этот метод позволяет снизить чувствительность решения к погрешностям измерений.

При обработке результатов эксперимента "Термофоб" мы предполагаем использовать модификацию этого метода, позволяющего более эффективно решать линейные и нелинейные обратные задачи нестационарной теплопроводности. Разработка программного обеспечения в этой области начата. Её результаты, как и данные испытаний прибора "Термофоб", составят тему отдельной публикации.

## Заключение

Фобос представляет первостепенный научный интерес независимо от того, является ли он астероидом, захваченным на орбиту Марса и претерпевшим существенные изменения в процессе эволюции, или реликтом формирования самой планеты. В любом случае в его составе находится вещество, близкое к тому первичному материалу, из которого сформировалась Солнечная система. Его изучение даст подход к решению фундаментальных проблем планетной космогонии.

С этой точки зрения проект ФОБОС-ГРУНТ, утверждённый Федеральной программой космических исследований с запуском в 2009 г., представляет большую актуальность и занимает достойную нишу среди амбициозных планов зарубежных космических агентств на ближайшую перспективу исследования Марса. Важнейшей научной задачей проекта является забор и доставка на Землю образцов пород с поверхности Фобоса с целью его всестороннего изучения в земных лабораториях. В то же время ряд данных о свойствах поверхностных пород предполагается получить дистанционными и прямыми методами измерений непосредственно на Фобосе. К прямым методам относятся исследования характеристик приповерхностных слоев грунта с помощью теплофизических и электрофизических измерений в рамках эксперимента "Термофоб", осуществляемого главным разработчиком – ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Результаты этих измерений могут быть использованы для расчета тепловой модели грунта Фобоса, а контактные измерения температуры послужат калибровочными при использовании соответствующих дистанционных методов. По своей идеологии эксперимент связан с необходимостью решения обратных задач при анализе измерительных данных.

С целью правильного выбора метода измерения и определения параметров прибора в работе проведено математическое моделирование поверхностного слоя грунта Фобоса. При этом использованы доступные данные анализа лунного грунта, поскольку Луна – практически единственное изученное небесное тело без атмосферы и современной вулканической деятельности, имеющее, очевидно, схожий механизм грунтообразования. Расчёты для обоих тел выполнены по аналогичной методике при соответствующих значениях параметров моделей, проведено сопоставление результатов с данными независимых измерений. Рассмотрена постановка исходной задачи и возможные методы определения теплофизических характеристик (контактные методы проникающего и поверхностного зонда и дистанционный радиометрический метод), проанализированы их преимущества и недостатки применительно к условиям измерений на посадочном аппарате.

Рассмотрены предложенный принцип работы, технические характеристики и конструкция прибора "Термофоб", особенности его функционирова-

ния на космическом аппарате, а также современное состояние подготовки эксперимента.

## Литература

- 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 кн.: Лунный грунт из моря Изобилия. М. Наука, 1974.
- Алифанов О.М., Охапкин А.С., Чумаков В.А. Аппаратура "Термозонд": теплофизический детектор для измерения температуры и определения теплофизических свойств грунта Марса. Техническое описание, МАИ, 1995.
- Антипова-Каратаева И.И., Ахманова М.В., Деменьтьев Б.В., Марков М.Н., Стахеев Ю.И., Тарасов Л.С. 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., Круглов Н.Т., Петроченков Р.Г., Силин А.А., Шварев В.В. Исследование тепловых свойств грунта "Луны-20". В сб.: Грунт из материкового района Луны. М. Наука, 1979, с. 635-639.
- Кривов А.В., Соколов Л.Л., Холшевников К.В., Шор В.А. О существовании роя частиц в окрестности орбиты Фобоса. Астрон. вестн. 1991. Т. 25, 3, с. 317.
- Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М. Наука. 1975.
- Cremers C.J., Birkebak R.C., Dawson J.P. Thermal conductivity of fines from Apollo 11. Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., Geochim. Cosmochim. Acta Suppl. 1, 1970, 3, p. 2045-2050.
- Cremers C.J., Birkebak R.C. Thermal conductivity of fines from Apollo 12. Proc. II Lunar Sci. Conf., Geochim. Cosmochim. Acta Suppl. 2, 1971, 3, p. 2311-2315.
- Cremers C.J. Thermophysical properties of Apollo 14 fines. J. Geophys. Res., 1975, 80, №32, p. 4466-4470.
- Hemingway B.S., Robie R.A., Wilson W.H. Specific heats of lunar soils, basalt and breccias from Apollo 14, 15 and 16 landing sites between 90 and 350<sup>0</sup> Kelvin. Proc. IV Lunar Sci. Conf., 1973, 3, p. 2481-2487.
- Loeb A.L. J. Appl. Phys., 1951, 22, №3, p. 282-285.
- Robie R.A., Hemingway B.S., Wilson W.H. Science, 1970, 167, №3918, p. 749-750.
- Sasaki S. Concentration of Phobos-derived Particles on the Equatorial Region of Martian Surface. Proc. of the Fifth International Conference on Mars July 18-23, 1999 - Pasadena, California, p. 6121-6122. Internet reference: <http://mars.jpl.nasa.gov/mgs/sci/fifthconf99/surfclose.html>.