

УДК 523.4

## О ПРОГНОЗИРОВАНИИ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПЛАНЕТ МАРСА И МЕРКУРИЯ

Д. П. Волков, Г. Н. Дульнев, Ю. П. Заричняк, Б. Л. Муратова

Предложен метод решения обратной задачи — определения структуры материала по заданному значению эффективной теплопроводности, температуры, давлению и составу атмосферы. Метод использован для прогнозирования структуры поверхностного слоя планет Марса и Меркурия.

*Эффективная теплопроводность поверхностного слоя планет.* Одним из способов получения сведений о структуре поверхностного слоя планет со слабой атмосферой является измерение нестационарного температурного поля в поверхностном слое дистанционными радиофизическими методами [1, 2]. Интерпретация результатов измерений с помощью модели однородного полупространства позволяет однозначно связать характер изменения температурного поля в поверхностном слое с комплексом его теплофизических характеристик, где

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{\lambda c_{уд} \rho}} \quad (1)$$

Удельная теплоемкость  $c_{уд}$  и плотность вещества  $\rho$  не связаны непосредственно со структурой поверхностного слоя, в то время как теплопроводность  $\lambda$  является параметром, существенно зависящим от структуры.

Основываясь на факте, что теплоемкость весьма различных земных и лунных горных пород слабо отличается друг от друга, можно экстраполировать это наблюдение на свойства покрова других планет со слабой атмосферой, таких, например, как Марс и Меркурий. Информация о плотности  $\rho$  поверхностного слоя планет со слабой атмосферой может быть получена независимым путем по измерению затухания радиоволн или диэлектрической проницаемости поверхностного слоя [1]. Тогда величина комплекса  $\gamma$  оказывается непосредственно связанной с теплопроводностью поверхностного слоя исследуемой планеты.

*Метод прогнозирования структуры покрова обычно состоит в следующем.* Рассматриваются различные модели структуры материала и теоретически определяется их эффективная теплопроводность  $\lambda$ . Задавая известные значения величин  $c_{уд}$  и  $\rho$  и используя ряд вычисленных значений  $\lambda$  для разных структур, по формуле (1) рассчитывается ряд значений комплекса  $\gamma_{расч}$ . Последние сопоставляются с результатами измерений  $\gamma_{эксп}$ , прогнозируемая структура соответствует случаю  $\gamma_{расч} \approx \gamma_{эксп}$ . Такой способ прогнозирования структуры поверхностного слоя планет оправдал себя при изучении покрова Луны [1, 3], при определении структуры пористых спеченных материалов [4] и представляется перспективным для прогнозирования структуры покрова Марса и Меркурия.

Особенностью прогнозирования структуры покрова Марса и Меркурия является необходимость учета влияния остаточной атмосферы и значительных колебаний температуры поверхности на этих планетах на величину теплопроводности поверхностного слоя.

Напомним, что прогнозирование структуры Луны также проводилось [3] сопоставлением измеренных значений комплекса  $\gamma_{\text{экср}}$  с расчетными величинами  $\gamma_{\text{расч}}$ , полученными на крайних геометрических моделях, а именно на модели пылевого слоя (зернистая система в состоянии свободной засыпки) с минимальным значением теплопроводности и модели твердого пористого тела с замкнутыми или сообщающимися порами.

При сопоставлении исходных параметров (пористости, размера пор, температуры) значения теплопроводности  $\lambda$ , рассчитанные для упомянутых моделей, хотя и охватывали область измеренных значений  $\gamma_{\text{экср}}$ , но могли отличаться на несколько порядков. Последнее порождало необходимость разработки новой модели, позволяющей учесть возможность существования промежуточных структур — слабосвязанных (слабоспеченных) и связанных материалов, для которых расчетные значения комплекса  $\gamma_{\text{расч}}$  совпадали бы с измеренными значениями  $\gamma_{\text{экср}}$ . Учитывая опыт этой работы, целесообразно при прогнозировании строения поверхностного слоя Марса и Меркурия сразу выбрать наиболее общую модель «связанного» материала, подробно изученную в работе [4]. Схематическое изображение структуры связанного материала приведено на рис. 1а. Структура состоит из «каркаса», образованного хаотической, но относительно плотной кладкой контактирующих зерен («структура первого порядка»), и пространственной сети более крупных пустот, пронизывающих каркас и образующих с ним «структуру второго порядка». Степень спекания (степень связанности) грунта можно характеризовать относительным средним размером фактического пятна контакта  $y_2$ , равного отношению радиуса  $r_2$  фактического пятна контакта к радиусу  $r$  зерна, т. е.  $y_2 = r_2/r$ .

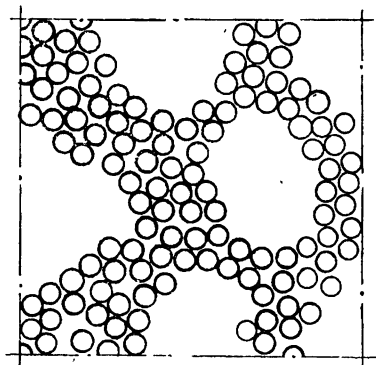


Рис. 1а. Схематическое изображение структуры связанного материала.

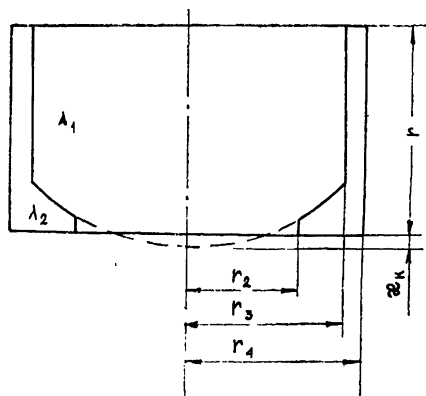


Рис. 1б. Элемент каркаса с усредненными и геометрическими параметрами, эффективная теплопроводность которого равна теплопроводности каркаса  $\lambda_k$ .

Исходной информацией для расчета являются следующие параметры: предполагаемая плотность грунта  $\rho$ , плотность монолита (изверженных пород, слагающих грунт)  $\rho_0$ , удельная теплоемкость монолита  $c_{\text{уд}}$ , теплопроводность монолита  $\lambda_1$ , и компонента в порах  $\lambda_2$ , средняя температура грунта  $T$ , давление атмосферы у поверхности  $H$ , предполагаемый размер частиц грунта  $d$ . Совокупность литературных данных, взятых в качестве исходных для прогнозирования структуры поверхностного слоя Марса и Меркурия, представлена в табл. 1. Метод расчета геомет-

рических и физических параметров слабосвязанного материала изложен в монографии [4]. В Приложении приведен алгоритм расчета теплопроводности связанных материалов.

**Сопоставление расчетных и экспериментальных значений комплекса  $\gamma$ .** На рис. 2 результаты расчета  $\gamma_{\text{расч}}$  сопоставлены с экспериментальными значениями  $\gamma_{\text{эксп}}$ . Экспериментальные данные образуют зону разброса  $\pm 25\%$  от средних значений. На этом же рисунке представлены расчетные кривые, описывающие зависимость комплекса  $\gamma$  от пористости  $m_2$  для грунтов с различной степенью связанности, характеризуемой относительными размерами фактического пятна контакта  $y_2$ , т. е.  $\gamma = f(m_2, y_2)$ .

Таблица 1

	Марс	Меркурий
Состав пород, слагающих поверхностный слой	Изверженные (интрузивные) породы	
Объемная плотность грунта, $кг/м$	1300—1800	1200—1600
Диаметр частиц, $м$	$10 \cdot 10^{-6}$ — $10 \cdot 10^{-4}$	
Теплопроводность монолита, $Вт/м \cdot К$	3,5—2,0 <sup>[5]</sup>	
Интервал температур, К	200—400	100—800
Состав атмосферы	CO <sub>2</sub>	He, Ar, Ne, Kr
Давление газа, $мм. рт. ст.$	5	$1 \cdot 10^{-4}$
Теплоемкость грунта, $Дж/кг \cdot К$	580—920	280—1100 <sup>[6]</sup>

Расчет теплофизических свойств выполнен для средних температур  $\bar{T}$ , соответствующих среднеобъемным значениям температуры поверхностного слоя во время проведения радиофизических измерений. Для оценки влияния теплопроводности минералов, входящих в состав грунта, расчеты проведены при двух значениях теплопроводности  $\lambda_1 = 2; 3,5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ , охватывающих диапазон изменения теплопроводности наиболее часто встречающихся минералов земных грунтов.

Как видно из рис. 2 а, зона экспериментальных значений  $\gamma_{\text{эксп}}$  для Марса соответствует материалам с различной пористостью  $m_2$  и с различными размерами пятна контакта частиц  $y_2$ . Если принять, что объемная плотность поверхностных слоев Марса лежит в пределах  $1800\text{—}1300 \text{ кг/м}^3$  [7], что соответствует пористости  $0,3\text{—}0,6$  при величине удельной плотности монолита  $\rho_0 = 2600 \text{ кг/м}^3$ , то видно, что  $\gamma_{\text{эксп}}$  и  $\gamma_{\text{расч}}$  хорошо согласуются при весьма малых пятнах контакта  $5 \cdot 10^{-3} < y_2 < 5 \cdot 10^{-2}$ , характерных для слабосвязанных материалов (для сравнения — у обычного песка  $y_2 \approx 2 \cdot 10^{-3}$ ).

Аналогичные результаты получены и для Меркурия (рис. 2б). Ввиду того, что давление атмосферы на Меркурии не превышает  $1 \cdot 10^{-4} \text{ мм рт. ст.}$ , теплопроводность его пород при прочих равных условиях значительно меньше, чем на Марсе. Если ориентировочно считать, что объемный вес грунта Меркурия равен  $\rho \approx 1200 \div 1600 \text{ кг/м}^3$  [8], что соответствует пористости  $m_2 \approx 0,45$ , то поверхностные слои Меркурия соответствуют очень слабосвязанным материалам, имеющим радиус относительного пятна контакта  $y_2 \approx 5 \cdot 10^{-3}$ .

Судя по результатам сопоставления рассчитанных и измеренных значений комплекса  $\gamma$  большая часть поверхности Марса и Меркурия покрыта пористым ( $m_2 = 0,5$ ) слабосвязанным материалом вроде слабоспеченного или смерзшегося песка с относительным радиусом пятна контакта  $y_2 = 2 \cdot 10^{-2}$  для Марса и  $y_2 = 5 \cdot 10^{-3}$  для Меркурия.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

## Алгоритм расчета теплопроводности связанных материалов

I. Определим геометрические параметры каркаса («структуры первого порядка»):

$$m_2 = 1 - \rho/\rho_0,$$

$$x_k = \{1 - [(1 - m_2^0)/(1 - m_2)]^{1/3}\} \left[ (1 - \sqrt[3]{1 - m_{2k}^0}) / (1 - \sqrt[3]{1 - m_2^0}) \right],$$

$$N = 0,5\{3 + m_{2k}^0 + [(m_{2k}^0)^2 - 10m_{2k}^0 + 9]^{1/2}\} / m_{2k}^0,$$

$$y_2 = 1,7 \cdot 10^{-4} \sqrt{\rho} + 2[x_k(N - 1) / (1 - \sqrt[3]{1 - m_{2k}^0})]^{1/2} / N,$$

$$y_3 = 2\sqrt{N - 1} / N, \quad y_4 = y_3(1 - x_k) / \sqrt[3]{1 - m_{2k}^0}, \quad \delta_2 = d(1 - x_k)N.$$

II. Приведем совокупность формул, характеризующих теплофизические свойства модели:

$$\lambda_{л2} = 2,3 \cdot 10^{-7} T^3 \varepsilon \delta_2 / (2 - \varepsilon), \quad \nu = (\lambda_{л2} + \lambda_2) / \lambda_1,$$

$$B = 3 \cdot 10^3 (2 - a) \Delta (c_p / c_w) / [a \text{Pr}(1 - c_p / c_w)],$$

$$\Phi = \nu^2 (7,5 - 11\nu + 4,5\nu^2) (1 - y_2 / y_3) + y_2 / y_3,$$

$$\lambda_{л3} = 0,3d(1 - x_k)(T/100)^3,$$

$$\lambda_{м3} = \lambda_2 / \{1 + B/[Hd(1 - x_k)]\},$$

$$\nu_2 = (\lambda_{л3} + \lambda_{м3}) / \lambda_1.$$

III. Теплопроводность каркаса  $\lambda_k$  определяется из выражения

$$\lambda_k = \frac{\lambda_1}{y_4^2} \left\{ \frac{y_2^2}{\Phi} + (1 - x_k) \left[ \frac{D}{y_3^2 - y_2^2} + \frac{1 - \nu}{2\nu \left( D - F + E \ln \frac{E - D}{E - F} \right)} \right]^{-1} + \nu_2 (y_4^2 - y_3^2) \right\},$$

$$D = \sqrt{1 - y_3^2}, \quad F = \sqrt{1 - y_2^2},$$

$$E = [1 - x_k - \nu D + B/(Hd)] / (1 - \nu).$$

IV. Далее вычисляются геометрические параметры структуры «второго порядка»:

$$x = 1 - \sqrt[3]{(1 - m_2^0)/(1 - m_2)},$$

$$m_{22} = 1 - [(1 - m_2^0)/(1 - m_{2k}^0)] [(1 - x_k)/(1 - x)]^3,$$

$$0 < m_{22} < 0,5, \quad F_1 = -1, \quad \varphi = \arccos(1 - 2m_{22}),$$

$$0,5 < m_{22} < 1,0, \quad F_1 = 1, \quad \varphi = \arccos(2m_{22} - 1),$$

$$c = 0,5 + F_1 \cos[(2\pi - \varphi)/3],$$

$$\alpha = (2 - \varepsilon)c^2(2 - c) / [1,5d(1 - x)],$$

$$\delta_3 = 3d(1 - x)(1/c - 1).$$

V. Лучистая и молекулярная составляющие коэффициента теплопроводности рассчитываются по формулам [4]

$$\lambda_{л} = 0,3(T/100)^3/\alpha,$$

$$\lambda_{м} = \lambda_2/[1 + B/(H\delta_3)],$$

$$\nu_n = (\lambda_{л} + \lambda_{м})/\lambda_k.$$

VI. Эффективная теплопроводность структуры  $\lambda$  вычисляется по формуле

$$\lambda = \lambda_k[c^2 + \nu_n(1 - c)^2 + 2\nu_n c(1 - c)/(\nu_n c + 1 - c)].$$

VII. Подставляя значения  $c_{уд}$ ,  $\rho$  и  $\lambda$  в формулу (1), можно вычислить величину комплекса  $\gamma$ .

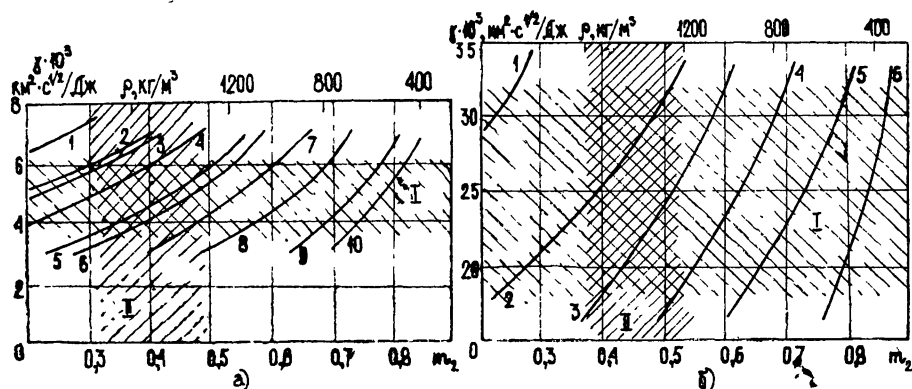


Рис. 2. Сопоставление расчетных и измеренных значений комплекса  $\gamma$  для грунтов с различной степенью связности (сплошная линия—расчетные значения  $\gamma$ , I—зона разброса измеренных значений комплекса  $\gamma$ , II—зона предполагаемых значений пористости грунтов);

а) расчеты применительно к Марсу при следующих значениях параметров:  $\bar{T}=200$  К,  $H=5$  мм рт. ст., 1— $d=5 \cdot 10^{-2}$  мм,  $y_2=2 \cdot 10^{-3}$ ,  $\lambda_1=3,5$  Вт/м·К; 2— $d=1 \cdot 10^{-1}$  мм,  $y_2=2 \cdot 10^{-3}$ ,  $\lambda_1=3,5$  Вт/м·К; 3— $d=1 \cdot 10^{-1}$  мм,  $y_2=2 \cdot 10^{-3}$ ,  $\lambda_1=2$  Вт/м·К; 4, 5, 7, 8, 9, 10— $d=0,1$  мм,  $\lambda_1=2$  Вт/м·К; 4— $y_2=5 \cdot 10^{-3}$ ; 5— $y_2=2 \cdot 10^{-3}$ ; 7— $y_2=5 \cdot 10^{-2}$ ; 8— $y_2=1 \cdot 10^{-1}$ ; 9— $y_2=2 \cdot 10^{-1}$ ; 10— $y_2=4,5 \cdot 10^{-1}$ ;

б) расчеты параметров применительно к Меркурию при следующих значениях параметров:  $\bar{T}=100$  К;  $H=1 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст.;  $d=0,1$  мм;  $\lambda_1=2$  Вт/м·К; 1— $y_2=2 \cdot 10^{-3}$ , 2— $y_2=3 \cdot 10^{-3}$ ; 3— $y_2=5 \cdot 10^{-3}$ ; 4— $y_2=1 \cdot 10^{-2}$ ; 5— $y_2=2 \cdot 10^{-2}$ ; 6— $y_2=12 \cdot 10^{-2}$ .

### Обозначения

$\lambda$ ,  $\lambda_k$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  — эффективная теплопроводность слоя, каркаса, зерен и газа в неограниченном пространстве при атмосферном давлении и температуре  $T$ ,  $\lambda_{л2}$  — лучистая составляющая теплопроводности газа в зазоре между двумя зернами,  $\lambda_{л3}$ ,  $\lambda_{м3}$  — теплопроводность в сквозных порах за счет излучения и молекулярного переноса,  $\lambda_{л}$ ,  $\lambda_{м}$  — лучистая и молекулярные составляющие теплопроводности газовой компоненты в порах структуры второго порядка,  $m_2^0$ ,  $m_2$  — общая пористость системы до и после деформации (спекания),  $m_{2к}^0$  — пористость каркаса в состоянии свободной засыпки (до спекания),  $m_{22}$  — пористость структуры второго

порядка,  $\chi$ ,  $\chi_k$  — полная деформация и деформация каркаса при спекании,  $N$  — координационное число, равное среднему числу зерен, с которыми контактирует любая частица,  $c_{уд}$  — удельная теплоемкость грунта,  $\rho$ ,  $\rho_0$  — объемная плотность грунта и монолита,  $Y_2$ ,  $Y_3$ ,  $Y_4$  — относительные размеры (радиусы) фактического пятна контакта, деформированной частицы, осредненного элемента,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$  — средний размер пор между зернами каркаса и больших пор в структуре второго порядка;  $a$  — коэффициент аккомодации, характеризующий степень полноты обмена энергии при столкновении молекул газа с поверхностью частиц грунта,  $\Lambda$  — средняя длина пробега молекулы газа при атмосферном давлении и температуре  $T$ ,  $Pg$  — критерий Прандтля,  $c_p/c_v$  — отношение изobarной теплоемкости к изохорной,  $\Phi$  — функция, учитывающая изменение теплового сопротивления зерна, за счет растекания теплового потока, входящего в зерно через пятно контакта,  $\alpha$  — коэффициент ослабления излучения за счет поглощения и рассеяния на поверхности зерен со степенью черноты  $\epsilon$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Троицкий, Т. В. Тихонова, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 13, № 9, 1273 (1970).
2. В. Д. Кротиков, О. Б. Щуко, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 16, № 12, 1811 (1973).
3. Г. Н. Дульнев, Ю. П. Заричняк, Б. Л. Муратова, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 9, № 3 (1965).
4. Г. Н. Дульнев, Ю. П. Заричняк, Теплопроводность смесей и композиционных материалов, изд. Энергия, Л., 1974.
5. Ф. Берч, Д. Шерер, Г. Спайсер, Справочник для геологов по физическим константам, ИЛ, М., 1949.
6. Radio Sci., 5 № 2(1970).
7. Р. Сагдеев, Природа, № 5 (1974).
8. П. Ходж, Революция в астрономии, изд. Мир, М., 1972.

Ленинградский институт точной  
механики и оптики

Поступила в редакцию  
15 июля 1975 г.

#### ON PREDICTION OF THE SURFACE LAYER STRUCTURE OF THE PLANETS MARS AND MERCURY

*D. P. Volkoff, G. N. Dul'nev, Yu. P. Zarichnjak, B. L. Muratova*

The method of solution of inverse problem—the exposure of the porous material structure by known magnitudes of effective thermal conductivity, temperature, pressure and composition of gas atmosphere in pores is proposed.

The method used for prediction of the surface layer structure of the planets Mars and Mercury.