

## Моделирование радиояркостной температуры грунта Луны

О.В. Юшкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН  
141190, г. Фрязино, пр. Введенского, 1  
E-mail: [o.v.y@mail.ru](mailto:o.v.y@mail.ru)

*Рассмотрен механизм моделирования радиояркостной температуры грунта Луны. Для этого используется Электрофизическая модель лунного грунта, в которой учтены частота электромагнитной волны, температура на поверхности Луны, толщина и плотность слоя реголита, лежащего на материнской платформе из коренных пород, толщина теплоизоляционного слоя. Приведена формула для расчета радиояркостной температуры моделируемого грунта Луны.*

*Ключевые слова: Луна, радиометр, температура, грунт*

## Modeling brightness temperature of lunar soil

O.V. Yushkova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fryazino Branch of the Institute of Radio Engineering and Electronics. V.A. Kotelnikov RAS.

*The mechanism of modeling the radio-brightness temperature of the Moon's soil is considered. For this, the electrophysical model of the lunar soil is used, which takes into account the frequency of the electromagnetic wave, the temperature on the surface of the Moon, the thickness and density of the regolith layer lying on the parent platform of bedrock, and the thickness of the heat-insulating layer.*  
*Keywords: the Moon, radiometry, temperature, soil*

## Введение

Результаты миссий Марс-Экспресс, MRO, Розетта, Кагуя, Chang“E доказали, что с помощью радиоприборов можно изучать электрофизические параметры верхнего покрова космических тел, идентифицировать наличие внутренних границ между диэлектрически неоднородными породами грунта. Свойства грунта с помощью радаров определяют путем сравнения параметров излученного и отраженного грунтом сигналов, с помощью радиометров сравнивают интенсивность теплового излучения тела в течение суток. Считается, что толщина слоя грунта, доступного для исследования радиоволнами, составляет 10 — 15 их длин. Таким образом, чем толще слой грунта представляет интерес, тем ниже радиодиапазон волн должен быть использован и наоборот. Исходя из этого, для комплексного исследования верхнего покрова космического тела желательно комбинировать результаты измерений радаров и радиометров: радары нужны для исследования пород ниже 1-2 метров, а радиометры для изучения свойств покрова до 2 метров. Для повышения результативности натурных измерений целесообразно проведение численного моделирования процессов работы радиоприборов над поверхностью космического тела. Численное моделирование, опирающееся на известные теоретические положения радиофизики, позволяет не только спрогнозировать результаты натурных измерений, подобрать оптимальные методы обработки и визуализации получаемых данных, но и выбрать наиболее интересные районы и время суток для проведения экспериментов. Принимая во внимание то, что начаты проекты Artemis 1 (США), Nakuto-R (Япония), Chang“E

(Китай), Луна-25, Нуклон (Россия), Beresheet-2 (Израиль), Луну, как соседку Земли, в ближайшее время посетит не один космический корабль с научной аппаратурой на борту. В состав этой аппаратуры будут входить радары и радиометры для исследования строения и состава лунного грунта. И если моделированию отражения от грунта радиосигналов радаров посвящено достаточное количество работ [1], симулирование работы радиометра над лунной поверхностью практически не рассматривалось.

### Численное моделирование

Один из ключевых моментов моделирования измерений радиометров – модель лунного грунта, построенная на известной совокупности знаний об этом космическом теле. Согласно результатам лабораторных исследований образцов лунных пород, доставленных на Землю возвратными миссиями, грунт Луны является диэлектриком. Значит его диэлектрическая проницаемость, помимо минералогического состава, зависит от окружающей температуры и от частоты электромагнитных волн, взаимодействующих с грунтом [2,3].

Так как Луна не обладает атмосферой, в течение дня изменения температуры могут быть значительны. В работе [4] рассмотрена возможность оценки физической температуры грунта с учетом координат и зенитного угла Солнца. На рис.1 приведен график температуры на лунной поверхности в зависимости от местного времени для широт (сверху вниз) 0, 60, 75, 89 градусов [4].

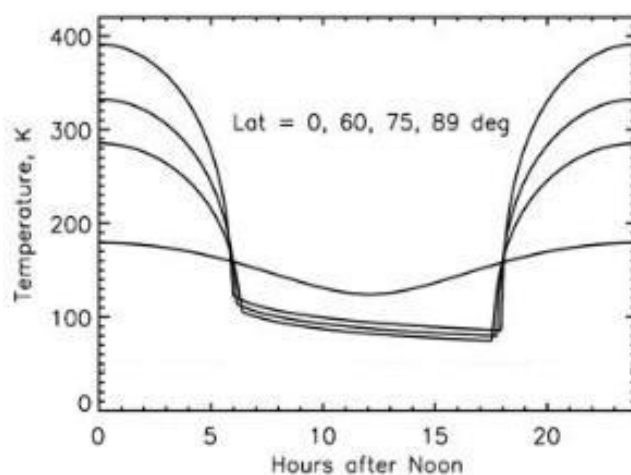


Рис. 1. Температура на поверхности в зависимости от местного времени

Верхний слой грунта Луны (реголит) имеет малую плотность, что обуславливает его высокие теплоизоляционные свойства. Суточные вариации температуры затрагивают слой всего около 1 м [5]. На основе решения уравнения теплопроводности можно оценить глубинный профиль температуры внутри слоя грунта, затронутого суточными вариациями этой величины [6]. На рис.2 приведен график изменения температуры в грунте. На рис.2 по горизонтальной оси отмечена глубина грунта в метрах, по вертикальной – температура в градусах Кельвина. Линия 1 соответствует температуре на поверхности равной 380 К, линия 2 – 300 К, 3 – 230 К, 4 – 150 К, 5 – 80 К. Температура грунта ниже слоя толщиной 1 м – постоянна и считается равной 230 К.

С учетом этих данных и результатов измерения комплексной диэлектрической проницаемости образцов лунного грунта, опубликованных в открытой печати [2], построена Электрофизическая модель лунного грунта [7]. Она позволяет рассчитать глубинный профиль диэлектрической проницаемости и тангенса потерь верхнего покрова с учетом следующих характеристик:

- частота электромагнитного поля;
- температура на поверхности Луны;
- толщина и плотность слоя реголита, лежащего на материнской платформе из коренных пород;
- толщина теплоизоляционного слоя.

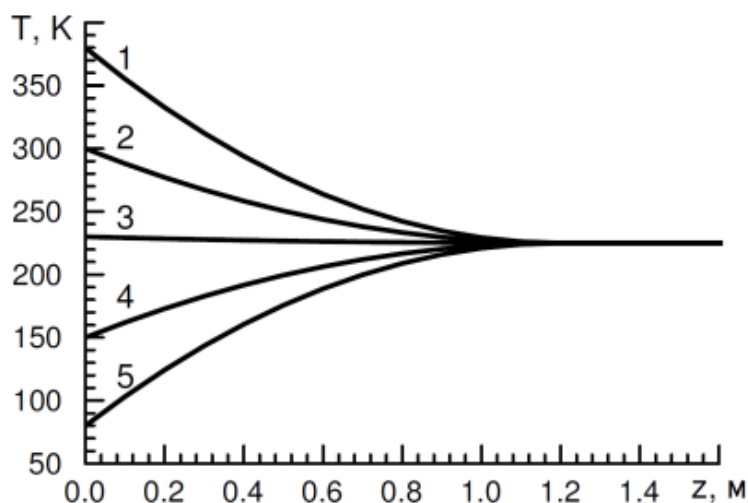


Рис. 2. Температура на поверхности в зависимости от местного времени

На рис.3 приведены глубинные профили действительной части диэлектрической проницаемости верхнего слоя реголита толщиной 1 м для разного времени суток и частот взаимодействующего с грунтом электромагнитного поля. По горизонтальной оси графика отмечена глубина в м, по вертикальной – безразмерная величина  $\epsilon'$ . Линия 1 соответствует температуре на поверхности равной 380 К, линия 2 – 300 К, 3 – 230 К, 4 – 150 К, 5 – 80 К. График А построен для частоты  $10^6$  Гц, Б –  $10^9$  Гц.

На рис.4 приведены глубинные профили  $\epsilon''$  мнимой части диэлектрической проницаемости верхнего слоя реголита для разного времени суток, и следовательно разной температуре на поверхности, и частот взаимодействующего с грунтом электромагнитного поля. По горизонтальной оси графика отмечена глубина в м, по вертикальной – безразмерная величина  $\epsilon''$ . Линия 1 соответствует температуре на поверхности равной 380К, линия 2 – 300К, 3 – 230К, 4 – 150К, 5 – 80К. График А построен для частоты  $10^6$  Гц, Б – для  $10^9$  Гц.

Радиояркость температура рассчитывается на основе закона Планка, который в данном случае можно аппроксимировать формулой Рэля–Джинса. Из нее следует, что в радиодиапазоне интенсивность излучения прямо пропорционально температуре тела. В работе [8] для расчета используют формулу  $T_g(0, t, \varphi, \psi) = \int_0^{\infty} T(z, t, \varphi, \psi)w(z)dz$ . В этой формуле  $T_g(0, t, \varphi, \psi)$  – измеряемая температура верхнего покрова на поверхности  $z = 0$  в местное время равное  $t$ , а  $\varphi, \psi$  – координаты центра района поверхности Луны, в котором проводятся измерения,  $T(z, t, \varphi, \psi)$  – величина физической температуры на глубине  $z$ . Множитель  $w(z)$  называется весовой, считается, что он равен мощности коэффициента прохождения (в других работах – коэффициента прохождения), который в свою очередь равен  $(1 - R)$ , где  $R$  - коэффициент отражения радиоволн, в

диапазоне которых работает радиометр. Учитывая аддитивность интеграла, его можно представить в виде ряда, с физической точки зрения означает: представить неоднородный слой грунта в виде  $N$  подслоев, в пределах которых комплексная диэлектрическая проницаемость и температура практически не меняются. Для каждого из подслоев коэффициент отражения можно найти из волнового уравнения. Тогда для каждой границе разбиения  $z_l$  весовой коэффициент будет иметь вид:  $w(z) = V^2_{oL}$ , где  $V_{oL} = \left[ \frac{1+r_{01}}{1+r_{01}W_0} \right] \cdot \left[ \frac{1+r_{12}}{1+r_{12}W_1} \right] \cdot \dots \cdot \frac{r_{L(L+1)+1}}{1+r_{L(L+1)}W_L} \cdot e^{ik \sum_{j=1}^L z_l (\sqrt{\varepsilon_l} - \sqrt{\varepsilon_{l+1}})}$ . В этой формуле  $\varepsilon_l$  – диэлектрическая проницаемость грунта в подслое  $\eta_{kl} = \frac{\sqrt{\varepsilon_k} - \sqrt{\varepsilon_l}}{\sqrt{\varepsilon_k} + \sqrt{\varepsilon_l}}$ , последовательность  $W_l$ , номера членов которой зависят от номера среды, определяется как:

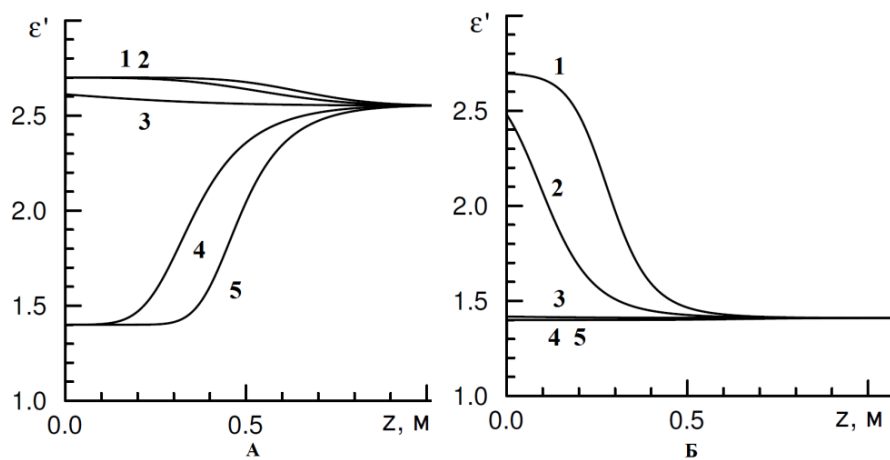


Рис. 3. Температура на поверхности в зависимости от местного времени

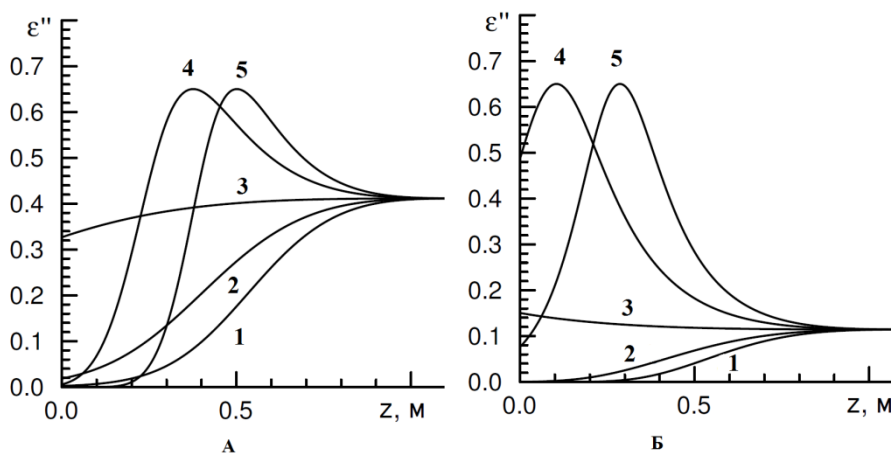


Рис. 4. Глубинные профили мнимой части диэлектрической проницаемости верхнего слоя грунта: 1 – для температуры на поверхности 380К, 2 для 300К, 3 – 230К, 4 – 150К, 5 – 80К; график А – частота  $10^6$  Гц, Б –  $10^9$  Гц  $W_0 = 0$

$$W_1 = \frac{r_{10} + W_0}{1 + r_{10}W_0} \cdot e^{2ik\sqrt{\varepsilon_1}(z_1 - z_0)}$$

$$W_2 = \frac{r_{21} + W_1}{1 + r_{21}W_1} \cdot e^{2ik\sqrt{\varepsilon_2}(z_2 - z_1)}$$

.....

$$W_L = \frac{r_{LL-1} + W_{L-1}}{1 + r_{LL-1}W_{L-1}} \cdot e^{2ik\sqrt{\varepsilon_L}(z_L - z_{L-1})}$$

Похожий подход применен в работе [9], в ней рассмотрен слой толщиной 500 см, разделенный на 500 подслоев толщиной по 1 см каждый. В каждом слое предполагалось наличие восходящего и нисходящего излучения, коэффициенты, связывающие частные решения волнового уравнения, были записаны в виде матрицы и найдены численно при решении матричного уравнения. В работе [10] тоже приведено моделирование яркостной температуры от приповерхностного слоя грунта, состоящего из трех сред: однородных слоев пыли и реголита, лежащих на коренных породах.

### Выводы

Таким образом, в данной работе представлен механизм расчета радиояркостной температуры неоднородного грунта Луны. Приведена рекуррентная формула, удобная для численного моделирования экспериментов, связанных с исследованием собственного излучения Луны, теплового режима на ее поверхности и внутри верхнего слоя грунта с помощью радиометра.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН № 075-01133-22-00.*

### Литература

1. Яковлев О.И. Космическая радиофизика. // М.: РФФИ, 1998. 432 с.
2. Heiken G., Vaniman D., French B.M. Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon // Cambridge University Press. 1991. 736 p.
3. Olhoeft G.R., Strangwag D.W. Dielectric properties of the first 100 meters of the Moon //Earth and planetary science Letters.1975.V.24. P. 394.
4. Vasavada, A. R., D. A. Paige and S. E. Wood Near-surface temperatures on Mercury and the Moon and the stability of polar ice deposits. *Icarus*. 1999. 141. P.179–193 [http://www.gps.caltech.edu/classes/ge151/references/vasavada\\_et\\_al\\_1999.pdf](http://www.gps.caltech.edu/classes/ge151/references/vasavada_et_al_1999.pdf)
5. Шевченко В.В. Луна. Москва, Советская энциклопедия. 1990. Т.2. С. 613-615.
- 6.Маров М.Я., Колесниченко А.В., Мануйлов К.К., Осипов В.П. Эксперимент "ТЕРМОФОБ": Прямые исследования теплофизических свойств грунта Фобоса// *Астрономический вестник*. 2010. Т. 44. № 5. С.393-402.
7. Юшкова О.В., Кибардина И.Н., Дымова Т.Н. Электрофизическая модель лунного грунта. *Астрономический вестник*. 2020. №54 С.488-496.
8. Keihm S.J., Langseth M.G. Lunar microwave brightness temperature observations reevaluated in the light of Apollo program findings. 1975. *Icarus*. №24. P.211-230.
9. Montopoli M., Carlofelice Di et al. Remote sensing of the Moon's subsurface with multifrequency microwave radiometers: A numerical study.// *Radio Science*. 2011. №46. P.3350-3359. <https://doi.org/10.1029/2009RS004311>
10. Fa W., Jin Y. Simulation of brightness temperature from lunar surface and inversion of regolith-layer thickness. // *Journal Geophysical research*. 2007. V.112. E05003.