

Электрофизическая модель грунта Луны

О.В. Юшкова¹, И.Н. Кибардина¹, В.В. Юшков^{1,2}

1 Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141190 Фрязино, пр. Введенского, 1

2 Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, МГУ, o.v.y@mail.ru

На основе анализа имеющихся в литературе результатов лабораторных измерений диэлектрических характеристик образцов лунного грунта, доставленных на Землю в ходе миссий «Луна» и «Apollo», разработана электрофизическая модель верхнего слоя грунта Луны. Модель может использоваться для численного моделирования процесса радиозондирования грунта Луны, при подготовке программы проведения радиолокационных экспериментов, прогноза и интерпретации данных натурных измерений.

Based on the analysis of the available in the literature results of laboratory measurements of the dielectric characteristics of lunar soil samples delivered to the Earth during the "Luna" and "Apollo" missions, the electro-physical model of the upper layer of the lunar soil was developed. This model can be used for numerical simulation of the radiosounding of the lunar soil in the preparation of the program for conducting radar experiments, forecasting and interpretation of field measurement data.

Дистанционные и контактные наблюдения показали, что верхний слой Луны имеет выраженную слоистую структуру [1]. Коренные породы, преимущественно базальтовые в морских районах и анортозитовые – в материковых, покрыты слоем реголита. Реголит представляет собой рыхлый однородный грунт, сформированный из гомогенизированных обломков коренных пород, разрушенных под воздействием температурных колебаний и метеоритных бомбардировок. Верхние обломочные породы обогащены оседающей космической пылью и насыщены нейтральными газами в результате воздействия космического излучения и солнечного ветра. Во время миссий «Луна» и «Apollo» на Землю для исследования в лабораторных условиях были доставлены образцы коренных пород и реголита. Описание образцов, обзор результатов измерений приведены в [1]. Оказалось, что реголит по электрофизическим свойствам похож на диэлектрики, например, на алюмосиликаты [1-4], диэлектрические характеристики которых зависят от температуры и частоты воздействующего электромагнитного поля. В работах [2, 3] проведен анализ имеющихся в литературе данных о действительной части диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь лунных пород и приведены теоретические соотношения, выведенные на основе теории диэлектриков, для учета зависимости комплексной диэлектрической проницаемости от температуры и частоты радиоволн. Кроме отдельных пород, на Землю были доставлены керны - образцы грунта с ненарушенной структурой, извлеченные из скважины посредством специального вида бурения. В работе [5] предложена формула для расчета плотности реголита $\rho(z)$ в зависимости от глубины z в слое реголита толщиной до 100 метров: $\rho(z) = \rho_0 + n \ln(z+1)$.

Так как на Луне отсутствует атмосфера, перепады температуры на поверхности велики. Оценить физическую температуру на поверхности Луны можно двумя способами. Во-первых, измерить непосредственно, как это было сделано в миссиях «Apollo 15, 17». Затем, с учетом натурных измерений построить теоретическую модель, описывающую

зависимость суточного хода температуры от координат и зенитного угла Солнца [1]. Во-вторых, можно дистанционно, с помощью радиометра, измерить радиояркостную температуру и разработать методику ее пересчета в физическую на поверхности [9, 10]. Считается, что температура на поверхности оценена адекватно, если результаты расчета обеих моделей совпадают.

В 2007 г на КА «Chang-1» был установлен пассивный микроволновый радиометр MRM с четырьмя частотными каналами, 3, 7.8, 19.35 и 37 ГГц [6]. Измерения, выполненные в течение восьми полных лунных суток, положены в основу создания глобальной карты распределения радиояркостной температуры Луны. Для всех рабочих частот чувствительность прибора составила 0,5 К, динамический диапазон работы - 20-500 К [5]. В 2009 г. на борту LRO (NASA) был установлен прибор DLRE (The Diviner Lunar Radiometer Experiment). Это 9 каналный радиометр, работающий в диапазоне длин волн от 7,6 до 400 мкм [7]. Малый угол диаграммы направленности радиометра и низкая орбита LRO (50 км) обеспечивают высокое пространственное разрешение измерений (~ 200 м) и позволяют построить детальную карту суточного хода радиояркостной температуры на поверхности Луны. Слой грунта, доступный для изучения MRM, составляет несколько сантиметров, а взаимодействие электромагнитных волн DLRE с грунтом сосредоточено в более тонком слое. Анализ результатов работ [6-10] позволил сделать следующие выводы:

1. Результаты измерений [7-9] показали, что значения, пересчитанные из радиояркостной температуры в физическую, совпадают с теоретическими оценками и с натурными измерениями, проведенными на поверхности Луны посадочной миссией «Apollo 15» [7]. На рис 1. сплошной линией нанесен график, соответствующий вариации суточной температуры в месте посадки Apollo 15. Кривая построена по модели учитывающей экспериментальные измерения теплового потока и свойства образцов реголита. Измерения DLRE нанесены точками. Горизонтальная ось отражает условное деление лунных суток на 24 часа.

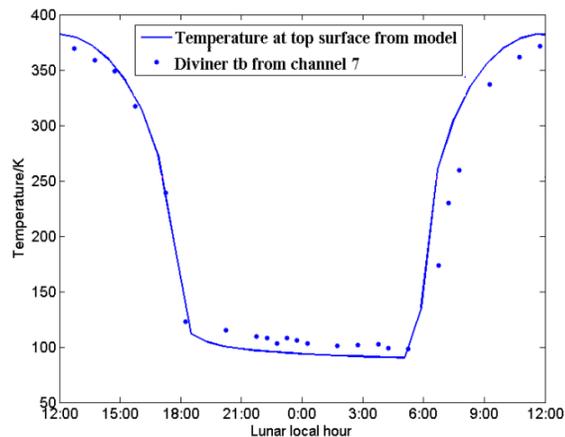


Рис.1. Суточный ход температуры на поверхности в месте посадки Apollo 15 (сплошная линия - модель, учитывающая свойства реголита, экспериментальные измерения теплового потока и физической температуры и измерения Diviner (точки) [9]).

2. В дневное время температура значительно меняется по широте, в ночное время широтное изменение - незначительно. Временной рост температуры на рассвете несимметричен убыванию на закате[10].

Температуры на полюсах Луны различны из-за наклона оси вращения. В дневное время самая высокая температура на Северном полюсе: на 2,4 К выше, чем на Южном полюсе, ночные температуры почти одинаковы. Самая большая разница между дневной и ночной температурами - на экваторе, она составляет 300 К. Самая низкая температура, равная 25К-35К, зафиксированная DLRE в районах ударных кратеров Южного полюса в ночное время.

3. Изменения температуры по широте отражены на рис. 2[9]. Это результаты численного решения уравнения теплопроводности, записанные для условия равновесия потоков тепла через верхний слой реголита.

Малая плотность реголита обуславливает его высокие теплоизоляционные свойства [4], поэтому суточные вариации температуры затрагивают слой всего около 1 м [11]. На рис. 3 даны результаты расчета глубинного профиля температуры в слое грунта, выполненные по схеме аналогичной описанной в работе [11]. По горизонтальной оси отмечена глубина 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.

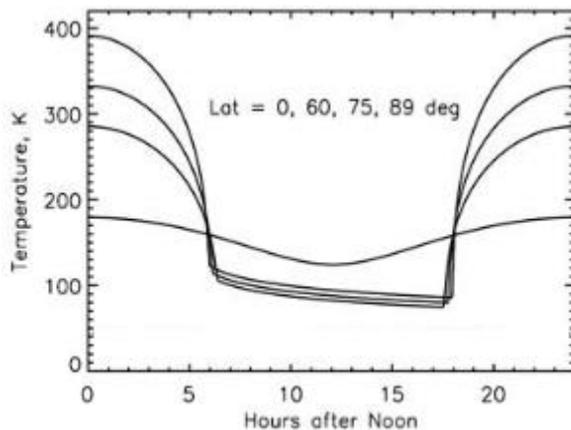


Рис. 2. Результаты моделирования суточного хода температуры на поверхности Луны для широт (сверху вниз) 0°, 60°, 75°, 89°- [9].

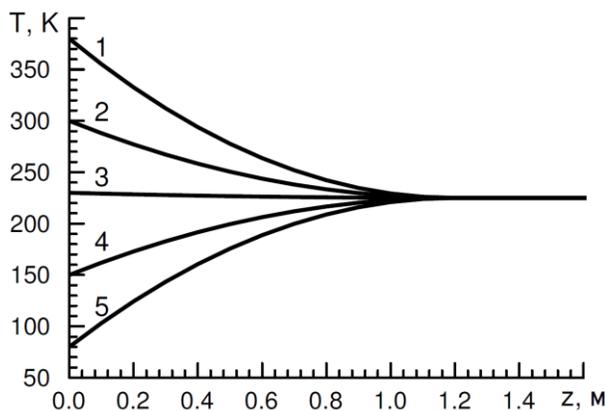


Рис. 3. Изменение температуры в верхнем слое грунта Луны. Линия 1 соответствует температуре на поверхности – 380 К, 2 – 300 К, 3 – 230 К, 4 – 150 К, 5 – 80 К.

В основу электрофизической модели грунта Луны были заложены следующие условия:

1. Слой однородного реголита толщиной 4 м (оценка толщины слоя реголита георадаром миссии Chang'E-3 [12]), лежит на однородной коренной породе;

2. Плотность реголита меняется по глубине по формуле $\rho(z) = \rho_0 + n \ln(z+1)$, плотность коренного грунта равна 2,1 г/см³;

3. Температура на поверхности и меняется согласно рис.2.

4. Температура верхнего слоя зависит от температуры на поверхности и меняется по глубине в соответствии рис.3. Толщина слоя, подверженного суточным изменениям, оценивается в 1,2 м;

5. Комплексная диэлектрическая проницаемость коренной породы и реголита связаны с частотой радиоволны, температурой и плотностью грунта соотношениями, подробно описанными в [2, 3]. Результаты расчетов ε' и ε'' по формулам [2,3] приведены на рис. 4 для образца лунного грунта №66041 [2].

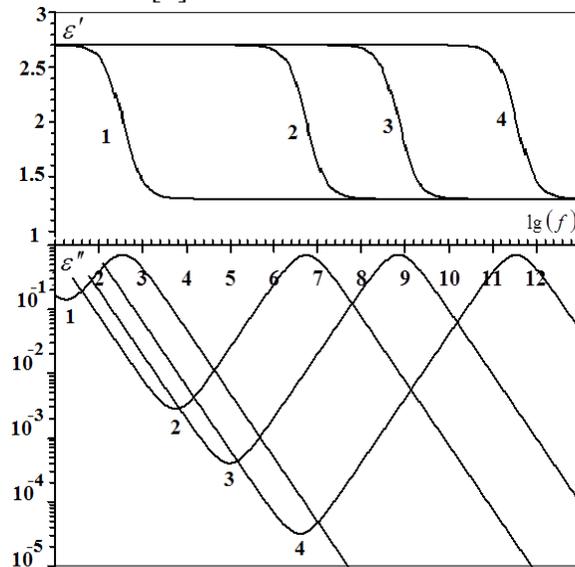


Рис. 4. Частотная зависимость действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости образца лунного грунта №66041 [1] при температурах 100К (линия 1), 150К (2), 200К (3) и 300К (4) [2].

На рис.5 показаны результаты расчета глубинного распределения диэлектрической проницаемости ε' и тангенса угла потерь $tg\delta$ верхнего слоя грунта Луны, выполненные с учетом условий 1-5 для частот 1 МГц (линия 1) и 1 ГГц (линия 2) при температуре на поверхности а) 80К и б) 380К. Из расчетов следует, что изменение плотности реголита по глубине не существенно влияет на глубинное распределение диэлектрических характеристик, в отличие от изменения температурного режима. В геологически однородном верхнем слое в течение лунного дня действительная часть диэлектрической проницаемости ε' меняется от 1,4 до 2,7, $tg\delta$ - от 10^{-6} до почти 1. При ночной температуре внешний слой реголита вымораживается, значения ε' и $tg\delta$ в этом слое снижаются. Для волн разной частоты поведение ε' и $tg\delta$ с глубиной различны. Анализ этих различий должен быть учтен при планировании измерений.

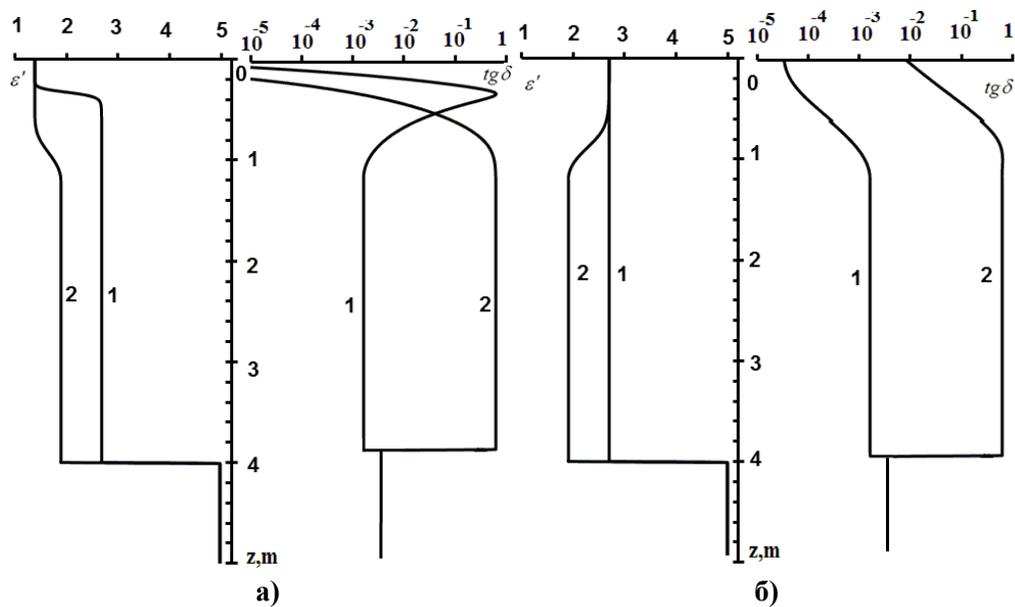


Рис.5. Распределение по глубине ϵ' и $\text{tg}\delta$ при температуре на поверхности а) 80К, б) 380К.

Приведены результаты расчетов диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь для предложенной электрофизической модели верхнего слоя грунта Луны. Модель построена по результатам анализа работ [1-12] и учитывает зависимость диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь от плотности и температуры грунта, а также от частоты радиоволны. Так как многие тела Солнечной системы имеют схожий с Луной процесс формирования верхнего слоя, полученные результаты могут быть полезны при планировании радиолокационных экспериментов будущих миссий.

Работа была выполнена при частичной поддержке Программы №28 фундаментальных исследований Президиума Российской академии наук «Космос: исследование фундаментальных процессов и их взаимосвязей».

Литература

1. Heiken G., Vaniman D., French B.M. Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon / Cambridge University Press, 1991. 736 p.
2. Юшкова О.В., Кибардина И.Н., Диэлектрические свойства верхнего покрова Луны, *Астрономический вестник*, 2017, № 2, стр. 136-141.
3. Кибардина И.Н., Юшкова О.В. Определение плотности и процентного содержания оксидов металлов грунта Луны по радиолокационным данным // *Космические исследования*, 2017 Т. 55, No. 3, стр. 201–206.
4. Кротиков В.Д., Троицкий В.С. Радиоизлучение и природа Луны/ *Успехи физических наук*. 1963. Т. LXXXI. №. 4. С. 589-639.
5. Olhoeft G.R., Strangway D. W. Dielectric properties of the first 100 meters of the Moon// *Earth and Planetary Science Letters* 1975. V. 24. P. 394 - 404.
6. Zheng, Y.C., Ouyang, Z.Y., Li, C.L., Liu, J.Z., Zou, Y.L., 2008. China's Lunar Exploration Program: Present and future. *Planet. Space Sci.* 56 (7), 881–886. doi:10.1016/j.pss.2008.01.002.).

7. (<http://www.jpl.nasa.gov/missions/diviner-lunar-radiometer-experiment-dlre/>)
8. S. Huang Surface temperatures at the nearside of the Moon as a record of the radiation budget of Earth's climate system. *Advances in Space Research*, Advances in Space Research 41 (2008) 1853–1860
9. Vasavada, A. R., D. A. Paige and S. E. Wood (1999). Near-surface temperatures on Mercury and the Moon and the stability of polar ice deposits. *Icarus* 141:179–193 (http://www.gps.caltech.edu/classes/ge151/references/vasavada_et_al_1999.pdf)
10. Li Y, Wang Z Z, Jiang J S. Simulations on the influence of lunar surface temperature profiles on CE-1 lunar microwave sounder brightness temperature. *Sci China Earth Sci*, 2010, 53: 1379 – 1391, doi: 10.1007/s11430-010-4021-0.
11. 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.
12. Long Xiao, Peimin Zhu, Guangyou Fang et al. A young multilayered terrane of the northern Mare Imbrium revealed by Chang'E-3 mission. // *Science* 13 Mar 2015:Vol. 347, Issue 6227, P. 1226-1229.