

УДК 523.34-83

## ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГРУНТА ЛУНЫ

© 2020 г. О. В. Юшкова<sup>a</sup>, \*, И. Н. Кибардина<sup>a</sup>, Т. Н. Дымова<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Фрязинский филиал Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия

\*e-mail: o.v.y@mail.ru

Поступила в редакцию 28.02.2020 г.

После доработки 11.07.2020 г.

Принята к публикации 13.07.2020 г.

На основе анализа имеющихся в литературе данных о лабораторных измерениях диэлектрических характеристик образцов лунного грунта, доставленных на Землю в ходе миссий “Луна” и “Apollo”, разработана электрофизическая модель верхнего слоя грунта Луны. Модель учитывает температурные условия в районе проведения измерений, изменение температуры и распределение плотности грунта в верхнем слое реголита. Модель предназначена для численного моделирования экспериментов, направленных на исследование свойств лунного грунта с помощью электромагнитных волн.

**Ключевые слова:** Луна, реголит, коренные породы, диэлектрическая проницаемость, электромагнитные волны, электрофизическая модель

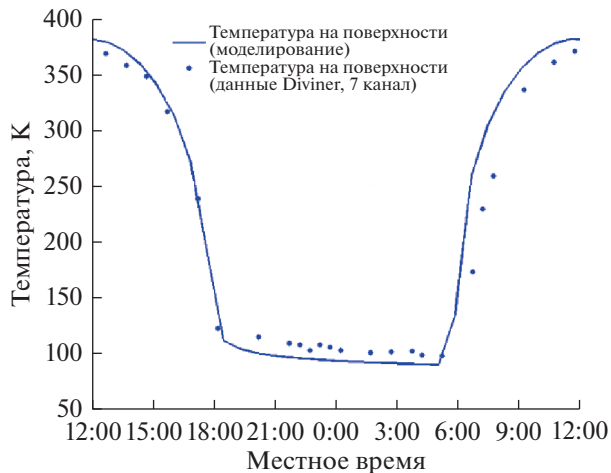
**DOI:** 10.31857/S0320930X20060067

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования Луны с помощью космических аппаратов начались 2 января 1959 с запуска автоматической межпланетной станции Луна-1. С тех пор спутник Земли исследовали космические аппараты России, США, Японии, Индии, Европы, Китая. Российская лунная программа предусматривает запуск к Луне четырех автоматических станций. Среди экспериментов, направленных на изучение строения и состава верхнего слоя грунта запланировано выполнить георадарные измерения с лунохода, моно и бистатическую радиолокацию поверхности, каротажное зондирование с посадочного модуля. При создании научной аппаратуры для проведения таких измерений, для прогноза их результатов и отработки технологии решения обратных задач необходимо уметь численно моделировать натурные эксперименты. Ключевым элементом при моделировании радиофизических измерений является электрофизическая модель лунного грунта. Как было показано в ряде работ (Heiken и др., 1991), диэлектрическая и магнитная проницаемости грунта Луны зависят от состава грунта, температуры и частоты электромагнитного поля. Основной магнитный минерал лунных пород – чистое железо, общее содержание примесей которого примерно одинаково и составляет 0.5–0.6% веса для всех мест посадок. Кроме ферромагнетиков в состав лунного грунта входят вещества, относящиеся к парамагнетикам и антиферромагнетам (Флоренский

и др., 1975). Антиферромагнетики становятся парамагнетиками при очень низких температурах. Парамагнетики приобретают магнитные свойства под действием внешнего магнитного поля и относятся к слабомагнитным веществам, их магнитная проницаемость незначительно отличается от единицы, поэтому ниже при построении электрофизической модели мы ограничимся рассмотрением только диэлектрической проницаемости лунного грунта. Модель основана на теории диэлектриков, учитывает результаты лабораторных измерений электрофизических характеристик образцов коренной породы и реголита, доставленных на Землю с помощью миссий Луна и Apollo, и может быть использована при моделировании в диапазоне частот 100 МГц–10 ГГц при температуре поверхности от 80 до 380 К.

Грунт Луны представляет собой сложную систему, образованную из скальных и осадочных пород с геологически сложившейся структурой. Дистанционные и контактные наблюдения показали, что грунт Луны имеет выраженную слоистую структуру (Черкасов и др., 1975): коренные породы, в основном базальтовые в морских районах и анортозиты в континентальных районах, покрыты слоем реголита. Реголит представляет собой рыхлый однородный грунт, сформированный из гомогенизированных обломков коренных пород, разрушенных под воздействием температурных колебаний и метеоритных бомбардировок. В справочнике (Heiken и др., 1991) приведено описание образцов коренных пород и реголита,



**Рис. 1.** Суточный ход температуры на поверхности в месте посадки Apollo-15. Сплошная линия — модель, точки — измерения DLRE (Vasavada и др., 1999).

доставленных на Землю. Лабораторные исследования образцов (Heiken и др., 1991) подтвердили гипотезу, высказанную В.Д. Кротиковым и В.С. Троицким (Кротиков, Троицкий, 1963) о том, что реголит по электрофизическим свойствам похож на диэлектрики. Электрические характеристики диэлектрика зависят от минералогического состава, температуры и частоты электромагнитного поля. Поэтому далее мы рассмотрим существующую информацию о динамике суточной температуры на поверхности и внутри верхнего слоя грунта, распределении плотности грунта по глубине и результаты лабораторных исследований диэлектрических характеристик образцов. Все эти факторы будут включены в модель.

## ТЕМПЕРАТУРА НА ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ

На Луне нет атмосферы, поэтому перепады температуры на ее поверхности велики. Температура поверхности измерялась непосредственно во время миссий Apollo-15, -17. С 2007 г. начался этап дистанционного картографирования температурных условий на поверхности Луны. На спутнике Chang'e-1 был установлен пассивный микроволновый радиометр (MRM) с четырьмя частотными каналами 3, 7.8, 19.35 и 37 ГГц (Zheng и др., 2012). Измерения, выполненные в течение восьми полных лунных дней, были использованы в качестве основы для создания глобальной карты яркостной температуры Луны. В 2009 г. на борту Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) был размещен девяти каналный радиометр Diviner Lunar Radiometer Experiment (DLRE) (Paige и др., 2010). Семь тепловых каналов работали в диапазоне длин волн от 7.6 до 400 мкм для изучения яркостной температуры поверхности Луны. Узкий угол

диаграммы направленности радиометра и низкая орбита аппарата (50 км) обеспечили высокое пространственное разрешение измерений (приблизительно 200 м) и позволили построить детальную карту суточного изменения радиояркостной температуры лунной поверхности (Williams и др., 2017). Приповерхностный слой грунта, доступный для изучения MRM, составляет несколько сантиметров, а DLRE принимает излучение практически с поверхности. С учетом натуральных измерений была построена теоретическая модель для описания суточного изменения температуры слоя грунта в зависимости от координат и зенитного угла Солнца (Vasavada и др., 1999) и (Huang, 2008). На рис. 1 приведен суточный ход температуры поверхности (Vasavada и др., 1999). Анализ результатов работ, посвященных температуре грунта Луны, позволил сделать следующие выводы:

1. Значения физической температуры, пересчитанные из радиояркостной температуры, совпадают с теоретическими оценками и результатами контактных измерений, проведенными во время посадки Apollo-15. Точками на рис. 1 обозначены суточные измерения температуры на посадочной площадке Apollo-15, сплошной линией приведены результаты ее моделирования с учетом свойств реголита, теплового потока и контактных измерений физической температуры.

2. Наибольшая разница между дневными и ночными температурами наблюдается на экваторе и достигает 300 К. Самая низкая температура, зарегистрированная прибором DLRE, составляет 25–35 К ночью в зоне ударных кратеров Южного полюса.

3. Широтные изменения ночной температуры — незначительны.

Согласно работе (Кротиков, Троицкий, 1963), реголит обладает высокой теплоизоляцией. В приближении моделирование теплового режима в грунте сводится к решению нелинейного одномерного уравнения теплопроводности в конечной области с учетом граничных условий. На основе теории теплового баланса был разработан алгоритм расчета глубинного профиля температуры в лунном грунте (Маров и др., 2010). В этой работе конечная область оценена как 10–15 см, а при наших расчетах мы полагаем, что суточные колебания температуры затрагивают слой около 1 м (согласно статьям (Шевченко, 1990; Минчин, Улубеков, 1972)). Этот параметр модели, так же как теплопроводность и теплоемкость реголита и основных пород, может быть изменен в зависимости от накопленной информации о свойствах грунта и положения конкретного места проведения измерений. На рис. 2 приведены результаты расчета профиля температуры в поверхностном слое реголита Луны для различных поверхностных температур. Горизонтальная ось графика

указывает глубину в метрах, а вертикальная ось — температуру в градусах Кельвина. Линия 1 соответствует температуре поверхности 380 К, линия 2 — 300 К, 3 — 230 К, 4 — 150 К, 5 — 80 К. Температура грунта ниже глубины 1 м постоянна и равна 230 К.

### ГРУНТ ЛУНЫ

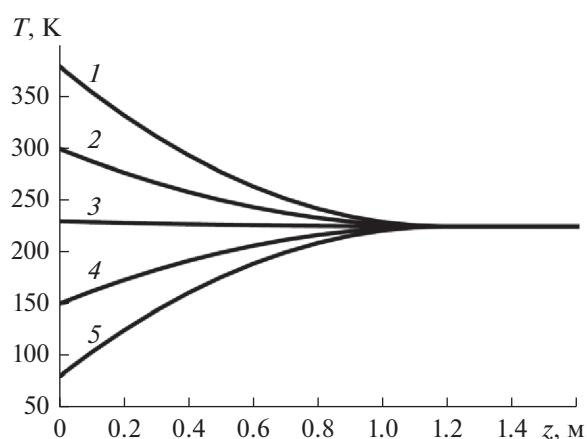
**Плотность грунта.** Информация о плотности коренных пород и реголита стала доступна после проведения лабораторных анализов доставленных на Землю образцов лунного грунта. Подробный обзор физико-механических характеристик грунта Луны приведен в (Слюта, 2014). Из мест посадок космических аппаратов были доставлены буровые керны грунта с нетронутой структурой. Исследование кернов позволило вывести формулу для расчета плотности реголита как функцию глубины  $z$  (Olhoeft, Strangway, 1975):

$$\rho(z) = \rho_0 + n \ln(z + 1). \quad (1)$$

В этой формуле  $\rho(z)$  измеряется в г/см<sup>3</sup>,  $z$  — в сантиметрах, значение  $n$  определено эмпирически и равно 0.121. Значение  $\rho_0$  соответствует плотности реголита на поверхности. Формула (1) верна для расчета плотности реголита в слое толщиной до 100 м.

**Толщина реголита.** Толщина слоя реголита зависит от его возраста и расположения, она может быть до нескольких десятков метров, при этом слой мощнее в гористой местности (Heiken и др., 1991). Средняя толщина слоя реголита составляет около 4–5 м для морей и 10–15 м для горной местности. Согласно измерениям георадара LPR (Lunar Penetrating Radar), который был установлен на луноходе Yutu, толщина реголита в месте посадки КА Chang'E-3 составляла 3–5 м (Xiao и др., 2015). Для определенности при расчетах мы полагали, что толщина реголита равна 4 м, хотя не ограничивая общности, толщину реголита в модели можно менять в зависимости от расположения района исследования и по мере накопления о нем более точной информации.

**Диэлектрические характеристики образцов лунного грунта.** В этом разделе предложено математическое описание диэлектрических характеристик образцов лунного реголита в зависимости от температуры реголита и частоты радиоволн. В работе (Кибардина, Юшкова, 2017) проведен анализ имеющихся в литературе данных о диэлектрической проницаемости лунных пород, в частности о  $\epsilon'$  (действительная часть диэлектрической проницаемости) и тангенсе угла потерь  $\text{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon'$ . Не смотря на то, что на Землю было доставлено более двух тысяч образцов лунного грунта, в работе (Heiken и др., 1991) приведены только семь, у которых  $\epsilon'$  и  $\text{tg}\delta$  были измерены в нескольких ча-



**Рис. 2.** Глубинный профиль температуры реголита Луны. Температура на поверхности 1 — 380 К, 2 — 300 К, 3 — 230 К, 4 — 150 К, 5 — 80 К.

стотных диапазонах: 0.1–10, 450 МГц, 9.375 ГГц, при температуре, примерно равной 290 К, и похожих условиях хранения. Реголит представлен четырьмя образцами: 10084 (fines, Apollo-11), 12070 (fines, Apollo-12), 14163 (fines, Apollo-14), 66041 (fines, Apollo-16), коренные породы — образцами 14310 (crystal rock, Apollo-14), 60025 (anorthosites, Apollo-16) и 72441 (basalt, Apollo-17). Плотность и процентное содержание двуокиси титана и оксида железа этих образцов даны в табл. 1.

Измерения диэлектрических характеристик проводились несколькими научными группами, поэтому один образец грунта делился на фрагменты, которые имели похожую, но не одинаковую плотность. Нам надо было построить график тангенса диэлектрических потерь образцов для частот диапазона от 10 Гц до 10 ГГц. Так как в работе (Кротиков, Троицкий, 1963) высказано предположение, согласно которому для сухих грунтов величина  $\text{tg}\delta/\rho$  является инвариантной относительно плотности, а в работе (Ржевский, 1976) эта гипотеза была экспериментально подтверждена для мелкозернистых лунных пород для описания потерь в грунте, нами была выбрана именно эта, не совсем стандартная для радиофизики, зависимость. На рис. 3 приведены результаты измерений  $\text{tg}\delta/\rho$  образцов реголита: треугольные маркеры соответствуют образцу 10084, круглыми маркерами даны результаты измерений для образца 12070, звездочки соответствуют образцу 14163; квадратные маркеры — образцу 66041. На рис. 4 представлены графики частотной зависимости  $\text{tg}\delta/\rho$  для коренных грунтов. Квадратными маркерами отмечены экспериментальные измерения, соответствующие кристаллическому образцу 14310; треугольные — анортозитовому образцу 60025, круглые — образцу 72441. На этом рисунке по горизонтальной оси отложены значе-

**Таблица 1.** Физико-химические параметры образцов лунного грунта

	N	%TiO <sub>2</sub> [5]	%FeO [5]	ρ, г/см <sup>3</sup>
Реголит	10084	7.56	15.94	1.94
	12070	2.81	16.40	1.74
	14163	1.77	10.45	1.2
	66041	0.63	5.80	1.5
Коренные породы	14310	1.30	7.70	7
	60025	0.02	0.67	2.1
	72441	1.53	8.68	1.65

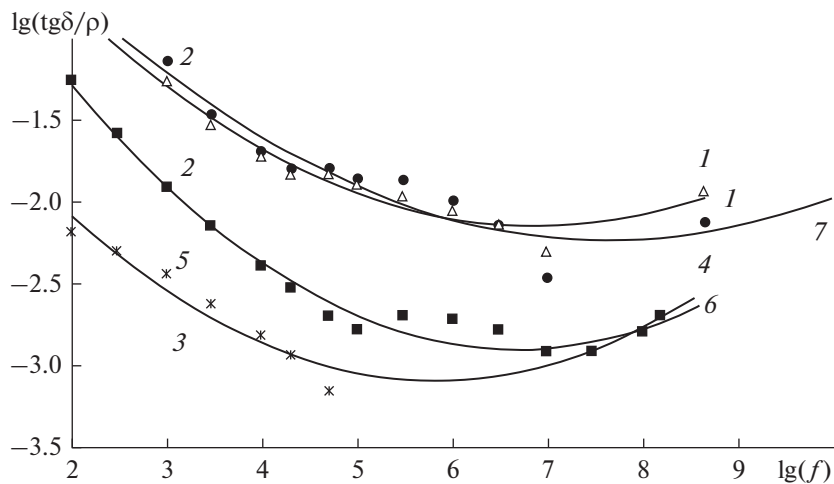
**Таблица 2.** Соответствие ссылок и обозначений на рис. 3 и 4

Обозначения на рис. 3 и 4	Ссылка	Обозначения на рис. 3 и 4	Ссылка
1	(Heiken и др., 1991)	6	(Gold и др., 1973)
2	(Katsube, Collett, 1971)	7	(Bassett, Shackelford, 1972)
3	(Strangway и др., 1972)	8	(Chung и др., 1972)
4	(Gold и др., 1972)	9	(Gold и др., 1976)

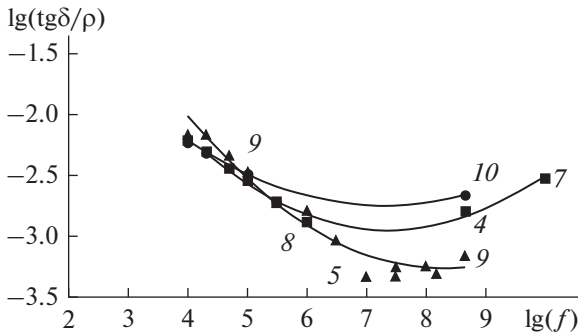
ния  $\lg f$ , где частота  $f$  дана в Гц, по вертикальной оси —  $\lg(\text{tg}\delta/\rho)$ . Для рассмотренных образцов диапазон изменения значений  $\text{tg}\delta/\rho$  осадочных пород значительно шире диапазона изменения  $\text{tg}\delta/\rho$  коренных пород. Качественное поведение графиков для всех образцов одинаково. В диапазоне частот  $10^2-10^6$  Гц функция  $\text{tg}\delta/\rho$  убывает, что, связано с электропроводимостью грунта. На частотах 6–8 МГц значения функции минимальны; последующий ее рост на частотах выше 8 МГц, по-видимому, связан с релаксационными эффектами (Тареев, 1982). В табл. 2 дано соответ-

ствие экспериментальных значений на графике и ссылок на публикацию.

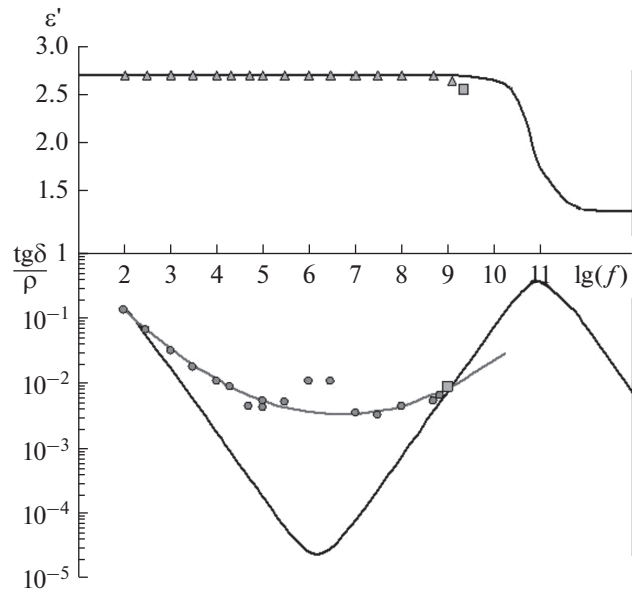
Образцы 14163 и 14310 доставлены из одного района Луны, как и образцы 66041 и 60025. Во второй паре образец 60025 является анортозитом, характерной породой для места приземления космического аппарата Apollo-16, а образец 14310 — кристаллической породой, по плотности и иным свойствам он отличался от других пород, доставленных Apollo-14 из того же места посадки. Поэтому именно пара 66041 и 60025 была выбрана нами для моделирования Луны в виде: геологически-однородного слоя реголита, лежащего на однородной коренной породе. На рис. 5 приведены



**Рис. 3.** Зависимость нормированного тангенса потерь реголита от частоты. Маркерами отмечены экспериментальные измерения: треугольные соответствуют образцу 10084, круглые — 12070, звездочки — 14163, квадратные — 66041.



**Рис. 4.** Зависимость нормированного тангенса потерь грунта коренных пород от частоты. Маркерами отмечены экспериментальные измерения: квадратные соответствуют образцу – 14310, треугольные – 60025, круглые – 72441.



**Рис. 5.** Частотные зависимости  $\epsilon'$  и  $\text{tg}\delta/\rho$  образца лунного грунта 66041 (Apollo-16). Треугольные маркеры – экспериментальные измерения  $\epsilon'$  из (Katsube, Collett, 1973), круглые –  $\text{tg}\delta/\rho$  из (Katsube, Collett, 1973), квадратные –  $\epsilon'$  и  $\text{tg}\delta/\rho$  из (Gold и др., 1973). Черные линии – результаты расчета по формуле (2), серая – по формуле (5).

результаты лабораторных измерений в частотном диапазоне 100 Гц–9.375 ГГц при температуре 290 К  $\epsilon'$  и  $\text{tg}\delta/\rho$  только для образца 66041. На приведенном графике треугольные маркеры соответствуют экспериментальным измерениям  $\epsilon'$  из (Katsube, Collett, 1973), круглые –  $\text{tg}\delta/\rho$  из (Katsube, Collett, 1973), квадратные –  $\epsilon'$  и  $\text{tg}\delta/\rho$  из (Gold и др., 1973). Далее приводится анализ графика с точки зрения теории диэлектриков.

В теории диэлектриков для описания комплексной диэлектрической проницаемости диэлектриков с ионной структурой, аналогов реолита на Земле, обладающих и проводимостью и поляризацией (Сканави, 1949), используется соотношение

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{(\epsilon_0 - \epsilon_\infty)}{1 + \omega^2\tau^2} - i \left[ \frac{\omega\tau(\epsilon_0 - \epsilon_\infty)}{1 + \omega^2\tau^2} + \frac{\gamma}{\omega} \right]. \quad (2)$$

Здесь  $\epsilon_0$  – значение диэлектрической проницаемости вещества при предельно низких частотах,  $\epsilon_\infty$  – предельное значение диэлектрической проницаемости вещества при высоких частотах,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – частота приложенного электромагнитного поля в Герцах,  $\tau$  – макроскопическое время релаксации в с,  $i^2 = -1$ ,  $\gamma$  – проводимость в 1/с. При ионной проводимости число ионов находится в экспоненциальной зависимости от температуры и задается формулой (Фрелих, 1960):

$$\gamma = \gamma_0 \exp(-B/T). \quad (3)$$

В этой формуле параметры  $\gamma_0$  и  $B$  определяются минералогическим составом диэлектрика,  $T$  – температура в градусах Кельвина. Время релаксации, входящее в соотношение (2), тоже экспоненциально связано с температурой выражением (William, Thomas, 1998):

$$\tau = \tau_0 \exp(F/T), \quad (4)$$

где значения  $\tau_0$  и  $F$  также определяются минералогическим составом диэлектрика.

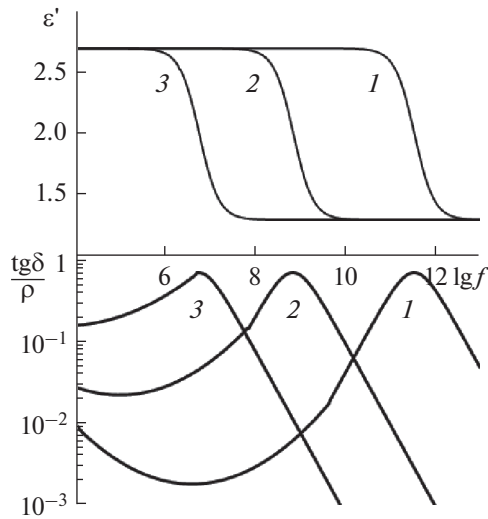
В работе (Юшкова, Кибардина, 2017) подробно описан метод определения параметров, входящих в формулы (2)–(4). Для образца 66041 они равны:  $\epsilon_0 = 2.7$ ,  $\epsilon_\infty = 1.4$ ,  $\gamma_0 = 1971$  1/с,  $B = 550$ ,  $\tau_0 = 1.04 \times 10^{-16}$  с,  $F = 2900$ , для образца 60025 –  $\epsilon_0 = 5$ ,  $\epsilon_\infty = 4.6$ , и  $\gamma_0 = 4088$  1/с,  $B = 550$ ,  $\tau_0 = 6.8 \times 10^{-15}$  с,  $F = 2900$ .

На рис. 5 черными линиями приведены результаты расчета по формуле (2), с учетом параметров (3), (4) для образца 66041.

В работе (Кибардина, Юшкова, 2017) показано, что для всех семи образцов лунного грунта зависимость  $\text{tg}\delta/\rho$  от частоты может быть аппроксимирована функцией:

$$\text{tg}\delta/\rho = D10^{a(\lg f - \lg f_0)^2}, \quad (5)$$

где  $f$  – частота в Гц,  $f_0$  в Гц – частота, при которой для данного образца  $\epsilon''$  принимает наименьшее значение, равно  $D = 10^9$ ,  $\rho$  – плотность образца. Константы  $\phi$  и  $a$  связаны с минералогическими особенностями образца, в частности, с содержанием в грунте оксидов металлов. Для образца 66041:  $a = 0.074$ ,  $\phi = -2.9$ ,  $\lg f_0 = 6.69$ ; для образца 60025:  $a = 0.0684$ ,  $\phi = -3.271$ ,  $\lg f_0 = 6.7$ .



**Рис. 6.** Диэлектрические характеристики  $\epsilon'$  и  $\text{tg}\delta/\rho$  реголита образца 66041 в зависимости от частоты: линии 1 соответствует температура 350 К, линии 2 – 200 К, 3 – 150 К.

Результаты расчета по формуле (5) для  $\text{tg}\delta/\rho$  представлены на рис. 3 и 4 сплошной черной линией, а рис. 5 – серой линией.

Как видно из рис. 5, формула (2) дает грубое приближение в окрестности минимума функции  $\text{tg}\delta/\rho$ : значение занижено на три порядка, но учитывает связь диэлектрических параметров грунта с его температурой, в отличие от формулы (5). Ниже в модели были скомбинированы функции (2) и (5): для низких и высоких частот использовалось приближение (2), для средних – (5). Для этого при расчете диэлектрической проницаемости реголита для других температур, в формулу (5) введена температурная зависимость коэффициентов  $f_0(T)$ ,  $a(T)$ ,  $D(T)$  так, чтобы частота  $f_0$ , на которой наблюдается локальный минимум функции (5), менялась с температурой так же как для функции, заданной формулой (2). Для функции (2) такое значение находится из условия

$$\frac{d\epsilon''(\omega)}{d\omega} = 0 \text{ и равно } f_0 = \omega_{\min}/2\pi, \text{ где}$$

$$\omega_{\min} = \sqrt{\frac{A - 2 - \sqrt{A^2 - 8A}}{2\tau^2(A + 1)}}, \quad A = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{\gamma\tau} \text{ (Юшкова,}$$

Кибардина, 2017). Значения  $\tau$  и  $\gamma$  зависят от температур согласно выражениям (3) и (4). По аналогии с приближением (2), значение функции  $D(T)$  в (5) принято пропорциональным величине  $\sqrt{\gamma\tau}$ , т.е.

$$D(T) = D \exp((F - B)/2T).$$

Параметр  $a(T)$  задан из условия равенства функций (2) и (5) значению  $\epsilon''(\omega_{\max})$  в точке  $\omega_{\max}$ :

$$a(T) = \lg \left( \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{2\epsilon' \rho D(T)} \right) / \lg^2 \left( \frac{\omega_{\min}}{\omega_{\max}} \right),$$

где  $\omega_{\max} = \sqrt{\frac{A - 2 + \sqrt{A^2 - 8A}}{2\tau^2(A + 1)}}.$

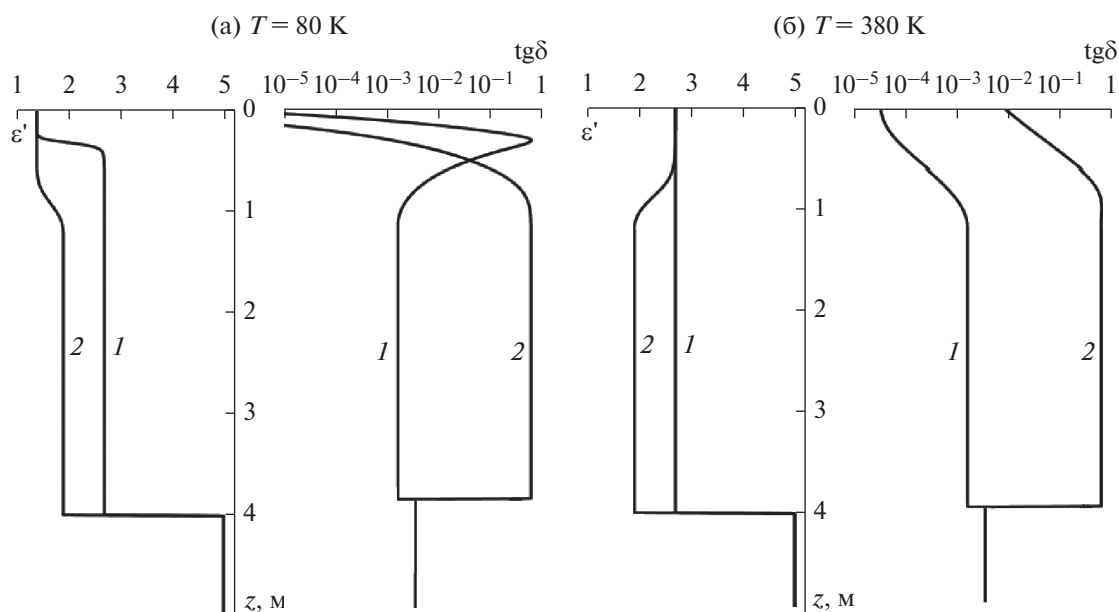
На рис. 6 приведены результаты такого комбинированного расчета  $\epsilon'$  и  $\text{tg}\delta/\rho$  в зависимости от частоты для образца 66041 при температурах на поверхности 150, 200, 350 К. При уменьшении температуры, область дисперсии смещается к низким частотам, при которых поглощение увеличивается, при этом поглощение коротких волн уменьшается.

### ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГРУНТА

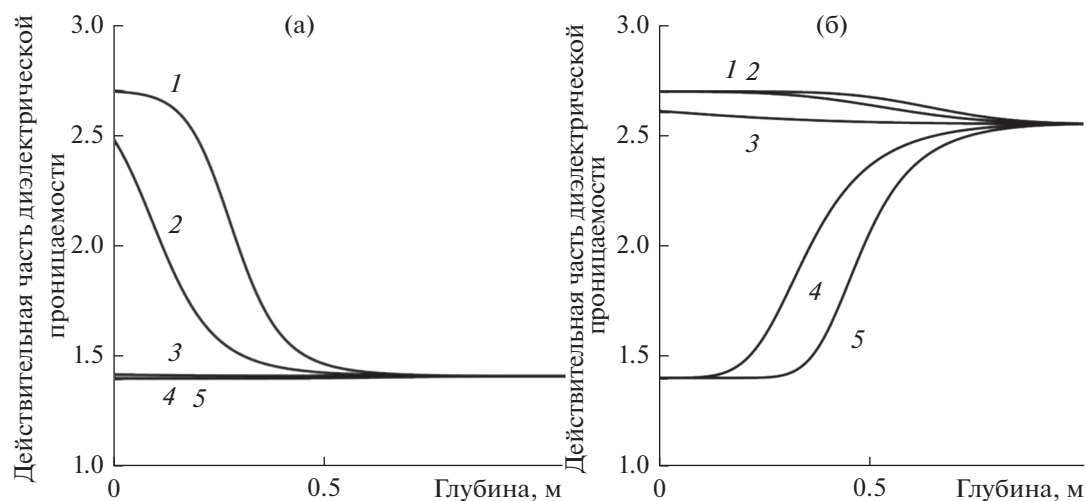
В результате выполненного анализа, полученные характеристики верхнего слоя грунта Луны были заложены в основу электрофизической модели:

1. Слой однородного реголита толщиной 4 м, лежит на однородной коренной породе.
2. Плотность реголита меняется по глубине по формуле (1), плотность на поверхности принята равной  $\rho_0 = 1.5 \text{ г/см}^3$ , плотность коренного грунта равна  $2.1 \text{ г/см}^3$ .
3. Температура на поверхности меняется от времени суток согласно рис. 1 (Vasavada и др., 1999).
4. Температура верхнего слоя зависит от температуры на поверхности и меняется по глубине в соответствии рис. 2. Толщина слоя, подверженного суточным изменениям, считается равной 1 м.

На рис. 7–9 показаны результаты расчетов  $\epsilon'$  и  $\text{tg}\delta$  верхнего слоя грунта Луны с учетом условий 1–4. Заметим, что плотность грунта меняется с глубиной, поэтому графики на этих рисунках построены для  $\text{tg}\delta$ , а не для  $\text{tg}\delta/\rho$  как на графиках выше. На рис. 7 показано распределение по глубине действительной части диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  и тангенса угла потерь  $\text{tg}\delta$  верхнего слоя грунта Луны для частот 1 МГц (линия 1) и 1 ГГц (линия 2) при температуре на поверхности (а) 80 К и (б) 380 К. 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 меняется от 1.4 до 2.7, а  $\text{tg}\delta$  – от  $10^{-6}$  до почти 1. При ночной температуре внешний слой реголита вымораживается, значения  $\epsilon'$  и  $\text{tg}\delta$  в этом



**Рис. 7.** Распределение по глубине  $\epsilon'$  и  $\text{tg}\delta$  для образца 66041 при температуре на поверхности (а) 80 К, (б) 380 К. Линии 1 – 1 МГц, 2 – 1 ГГц.



**Рис. 8.** Глубинные профили  $\epsilon'(z)$  верхнего слоя реголита: (а) частота 1 МГц, (б) частота 1 ГГц. Температура на поверхности: 1 – 380 К, 2 – 300 К, 3 – 230 К, 4 – 150 К, 5 – 80 К.

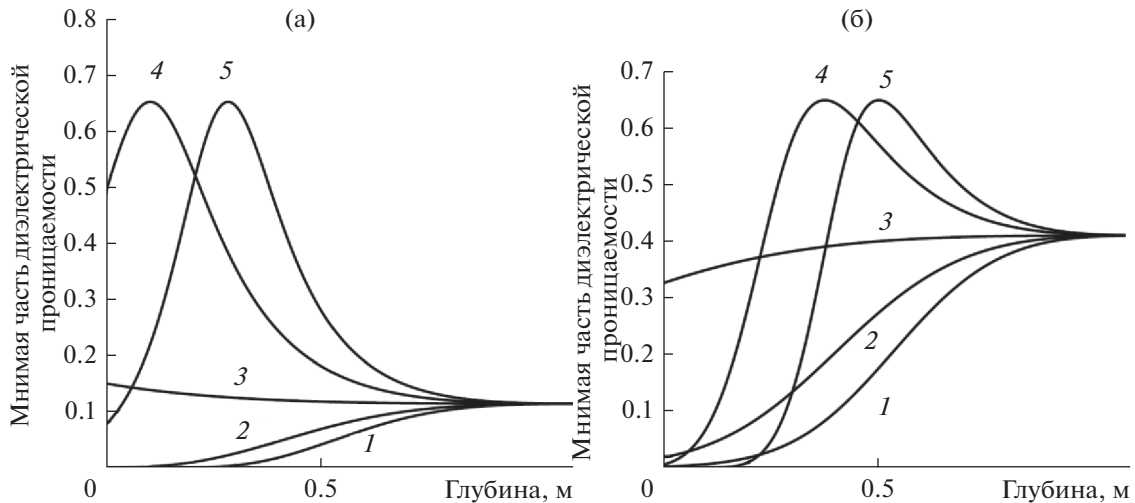
слое снижаются. Для волн разной частоты поведение диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  и  $\text{tg}\delta$  с глубиной – различны.

На рис. 8а приведены более детальные глубинные профили действительной части диэлектрической проницаемости верхнего слоя реголита толщиной 1 м для разного времени суток на частоте 1 МГц, на рис. 8б – 1 ГГц. На рисунке 9а приведены глубинные профили мнимой части диэлектрической проницаемости верхнего слоя реголита толщиной 1 м для разного времени суток на частоте 1 МГц, на рис. 9б – 1 ГГц. По го-

ризонтальной оси графиков отмечена глубина в метрах, по вертикальной – безразмерные величины  $\epsilon'$  (а) и  $\epsilon''$  (б). Линия 1 соответствует температуре на поверхности 380 К, линия 2 – 300 К, 3 – 230 К, 4 – 150 К, 5 – 80 К.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изложена методика построения электрофизической модели верхнего слоя грунта Луны на основе имеющихся данных о его минералогическом составе и представлений о свойствах



**Рис. 9.** Глубинные профили  $\epsilon''(z)$  верхнего слоя грунта: (а) частота 1 МГц; (б) частота 1 ГГц. Температура на поверхности 1 – 380 К, 2 – 300 К, 3 – 230 К, 4 – 150 К, 5 – 80 К.

диэлектрической проницаемости диэлектриков в диапазоне частот  $10^2-10^{10}$  Гц. Параметры, используемые в формулах при расчете диэлектрических характеристик, выведены на основании анализа лабораторных измерений диэлектрической проницаемости, проведенных с образцами грунта, доставленными на Землю различными авторами (Heiken и др., 1991). Методика иллюстрируется графиками, построенными для образцов реголита 66041 (Apollo-16) и анортозита 60025 (Apollo-6). Модель учитывает зависимость диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь от плотности и температуры грунта на поверхности, а также от частоты зондирующего электромагнитного поля.

Из анализа расчетов следует, что диэлектрическая проницаемость верхнего слоя грунта Луны зависит от температуры на поверхности и от частоты электромагнитного поля, изменением плотности грунта по глубине при расчете диэлектрических свойств верхнего покрова можно пренебречь. Основной вывод, полученный в результате анализа расчетов и положений теории диэлектриков, состоит в том, что геологически однородный слой реголита, а иногда и находящиеся под ним коренные породы, в течение лунного дня меняют свои диэлектрические свойства за счет изменения температуры. Действительная часть диэлектрической проницаемости меняется от 1.4 (значение  $\epsilon_0$ ) до 2.7 ( $\epsilon_\infty$ ), а  $\text{tg}\delta$  – от  $10^{-6}$  до почти 1 ( $(\epsilon_0 - \epsilon_\infty)/2$ ). Изменения происходят на восходе и закате Солнца, скорость изменения диэлектрической проницаемости и толщина слоя, в котором эти изменения проявляются, зависят от частоты взаимодействующего электромагнитного поля. При этом на частотах волн, длина кото-

рых превышает толщину теплоизолирующего слоя в 2–3 раза, суточные изменения диэлектрических характеристик верхнего покрова не заметны, а для более коротких волн изменения действительной части диэлектрической проницаемости и  $\text{tg}\delta$  с изменением температуры сравнительно равномерны, что позволяет изучать теплоизоляционные свойства грунта при проведении измерений в одном месте в течение суток. Для зондирования Луны радиоволнами мегагерцового диапазона следует учитывать частотную изменчивость диэлектрических параметров не только верхнего слоя толщиной 1–2 м, но и грунта, лежащего ниже слоя реголита, а при использовании радиоволн гигагерцового диапазона помнить, что при низких температурах  $\epsilon'$  и  $\text{tg}\delta$  уменьшаются настолько, что реголит можно считать для них “прозрачным”.

Так как многие тела Солнечной системы имеют схожий с Лунной процесс образования верхнего слоя, полученные результаты могут быть полезны при планировании радиолокационных экспериментов будущих миссий.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Кибардина И.Н., Юшкова О.В. Определение плотности и процентного содержания оксидов металлов грунта Луны по радиолокационным данным // Космич. исслед. 2017. Т. 55. № 3. С. 201–206.  
 Кротиков В.Д., Троицкий В.С. Радиоизлучение и природа Луны // Успехи физ. наук. 1963. Т. LXXXI. № 4. С. 589–639.



- Маров М.Я., Колесниченко А.В., Мануйлов К.К., Осипов В.П. Эксперимент “ТЕРМОФОб”: Прямые исследования теплофизических свойств грунта Фобоса // Астрон. вестн. 2010. Т. 44. № 5. С. 393–402.
- Минчин С.Н., Улубеков А.Т. Земля-космос-Луна. М.: Машиностроение, 1972. с. 244.
- Ржевский В.В., Шварев В.В., Силин А.А. Исследование физических свойств грунта “Луны-20” и его земных аналогов // Космич. исслед. 1976. Т. XIV. В. 2. С. 187–292.
- Сканава Г.И. Физика диэлектриков. Область слабых полей. М.-Л.: ГИТТЛ, 1949. С. 1–500.
- Слюта Е.Н. Физико-механические свойства лунного грунта // Астрон. вестн. 2014. Т. 48. № 5. С. 358–382.
- Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. М.: Энергия, 1982. с. 302.
- Черкасов И.И., Шварев В.В. Грунт Луны. М.: Наука, 1975. С. 1–144.
- Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Николаева О.В. Лунный грунт: свойства и аналоги // Академия наук СССР: Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского, 1975. С. 1–50.
- Фрелих Г. Теория диэлектриков. М.: Издательство иностранной литературы, 1960. С. 1–251.
- Шевченко В.В. Луна // Физическая энциклопедия / Советская энциклопедия, 1990. Т. 2. С. 613–615.
- Юшкова О.В., Кибардина И.Н. Диэлектрические свойства верхнего покрова Луны // Астрон. вестн. 2017. № 2. С. 136–141.
- Bassett H.L., Shackelford R.G. Dielectric properties of Apollo 14 lunar samples at micrometer and millimeter wavelengths // Proc. Lunar Sci. Conf. 3rd. 1972. P. 3157–3160.
- Chung D.H., Westphal W.B., Olhoeft G.R. Dielectric properties of Apollo 14 lunar samples // Proc. Lunar Sci. Conf. 3rd. 1972. P. 3161–3172.
- Frisillo A.L., Olhoeft G.R., Strangway D.W. Effects of pressure, temperature and density on the electrical properties of lunar samples 72441,12, 15301,38 and a terrestrial basalt // Earth Planet. and Sci. Lett. 1975. P. 345–356.
- Gold T., Bilson E., Yerbury M. Grain size analysis, optical reflectivity measurements, and determination of high-frequency electrical properties for Apollo 14 lunar samples // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1972. 3. Suppl. P. 3187–3193.
- Gold T., Bilson E., Yerbury M. Grain size analysis and determination of high frequency electrical properties of Apollo 15 and 16 samples // Proc. Lunar Sci. Conf. 4th. 1973. P. 3093–3099.
- Gold T., Bilson E., Baron R. L. Electrical properties of Apollo 17 rock and soil samples and a summary of the electrical properties of lunar material at 450 MHz frequency // Proc. Lunar Sci. Conf. 7th 1976. P. 2593–2603.
- Heiken G., Vaniman D., French B.M. Lunar Sourcebook: A User’s Guide to the Moon. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1991. P. 1–736.
- Huang S. Surface temperatures at the nearside of the Moon as a record of the radiation budget of Earth’s climate system // Adv. Space Res. 2008. V. 41. P. 1853–1860.
- Katsube T.J., Collett L.S. Electrical properties of Apollo 11 and Apollo 12 lunar samples // Proc. Lunar Sci. Conf. 2nd. 1971. P. 2367–2379.
- Katsube T.J., Collett L.S. Electrical characteristics of rocks and their application to planetary and terrestrial EM-sounding // Proc. Lunar Sci. Conf. 4th. 1973. P. 3111–3131.
- Olhoeft G.R., Strangway D. W. Dielectric properties of the first 100 meters of the Moon // Earth and Planet. Sci. Lett. 1975. V. 24. P. 394–404.
- Paige D.A., Foote M.C., Greenhagen B.T., Schofield J.T., Calcutt S., Vasavada A.R., Preston D.J., Taylor F.W., Allen C.C., Snook K.J., Jakosky B.M., Murray B.C., Soderblom L.A., Jau B., Loring S., Bulharowski J., Bowles N.E., Thomas I.R., Sullivan M.T., Avis C., De Jong E.M., Hartford W., McCleese D.J. The Lunar Reconnaissance Orbiter Diviner Lunar Radiometer Experiment // Space Sci. Rev. 2010. V. 150. P. 125–160.
- Vasavada A.R., Paige D.A., Wood S.E. Near-surface temperatures on Mercury and the Moon and the stability of polar ice deposits // Icarus. 1999. V. 141. P. 179–193.
- William G., Thomas D.K. Phenomenological and molecular theories of dielectric and electrical relaxation of materials // Novocontrol Application Note Dielectric 3, Novocontrol GmbH, 1998. www.novocontrol.de/pdf\_s/APND3.PDF
- Williams J.-P., Paige D., Greenhagen B. T., Sef-ton-Nash E. The global surface temperatures of the Moon as measured by the diviner lunar radiometer experiment // Icarus. 2017. V. 283. P. 300–325.
- Xiao L., Zhu P., Fang G. et al. A young multilayered terrane of the northern Mare Imbrium revealed by Chang’E-3 mission // Science. 2015. V. 347. № 6227. P. 1226–1229.
- Zheng Y.C., Tsang K.L., Chan K.T., Zou Y.L., Zhang F., Ouyang Z.Y. First microwave map of the Moon with Change-1 data: The role of local time in global imaging // Icarus. 2012. P. 194–210.  
<https://doi.org/10.1016/j.Icarus.2012.02.017>