

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.2.9>

УДК: 621.3.091.1

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛУННОГО РЕГОЛИТА НА СВЧ

Д.П. Скулачев, А.С. Косов

Институт космических исследований Российской Академии Наук,  
117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2022 г.

**Аннотация.** В рамках планируемого космического эксперимента «РАТ» предполагается дистанционное измерение с борта посадочного модуля температуры лунного реголита. Для экспериментальной отработки деталей будущего эксперимента создан стенд, имитирующий измерение температуры лунного реголита на глубинах до 1 м. Рассмотрены конструктивные особенности и тепловые характеристики устройства. Стенд имитатора работает при нормальном атмосферном давлении и обеспечивает перепад температур от 20 до 100 °С в метровом слое реголита. На следующем этапе разработки планируется создание стенда, обеспечивающего работу в вакууме и перепад температур от минус 150 °С до минус 30 °С.

**Ключевые слова:** антенна, дистанционные измерения, радиометр, реголит, СВЧ, симулятор, температура.

**Финансирование:** Госконтракт № 1921730301771217000241361/217/2258-3-2019.

**Автор для переписки:** Скулачев Дмитрий Петрович, [dskulach@mx.iki.rssi.ru](mailto:dskulach@mx.iki.rssi.ru)

## Введение

Одной из областей применения СВЧ радиометров является дистанционное зондирование приповерхностного слоя грунта внеземных объектов. В частности, подобные измерения планируются выполнить с борта российской лунной посадочной платформы в рамках космического эксперимента «РАТ». Посадка космического аппарата намечается на высоких лунных широтах. Основной целью эксперимента является измерение температуры лунного реголита на разных глубинах. Отличие измеренных температур от предсказанных теми или иными моделями может указывать на присутствие льда в реголите.

Для отработки деталей будущего эксперимента создан стенд, имитирующий измерение температуры лунного реголита на глубинах до 1 м. Стенд имитатора работает при нормальном атмосферном давлении и обеспечивает перепад температур от 20 до 100 °С в слое реголита до 1 м глубиной. На следующем этапе разработки планируется создание стенда, обеспечивающего работу в вакууме и перепад температур от минус 150 °С до минус 30 °С.

### 1. Параметры лунного реголита

Температура реголита изменяется в широких пределах в течение лунных суток, на различных глубинах и на различных лунных широтах.

Контактные измерения температуры реголита на поверхности и на глубинах до 2 м были проведены во время экспедиций Apollo-15 и Apollo-17 (NASA, США) в семидесятые годы прошлого века. Дневная температура на поверхности Луны оказалась более 100 °С. На глубине 1 м температура реголита составляла около минус 20 °С. Измерения проводились в точках посадки космических аппаратов на умеренных лунных широтах (менее 300 с.ш.).

Оценки температуры реголита в глобальных масштабах были выполнены с использованием данных искусственных спутников Луны Chang'E1, Chang'E2 (в СВЧ диапазоне, CNSA, Китай) и LRO (в инфракрасном диапазоне, NASA, США). Измерения показали, что на высоких лунных широтах температура

реголита может изменяться от минус 30 °С в приповерхностном слое до минус 150 °С на глубине 1 м [1].

Плотность реголита изменяется по закону, близкому к экспоненциальному, от менее 1000 кг/м<sup>3</sup> вблизи поверхности («лунная пыль») до более 1800 кг/м<sup>3</sup> на глубине полуметра. Так же ведет себя и удельная теплопроводность, увеличиваясь от 1 мВт/(м·К) у поверхности до 10 мВт/(м·К) на полуметровой глубине [2]. Видно, что теплопроводность лунного реголита в вакууме значительно меньше теплопроводности земного воздуха на уровне моря (около 20 мВт/(м·К)).

## **2. Параметры измерительной аппаратуры**

Эксперимент «РАТ» на поверхности Луны предполагается проводить с помощью модуляционного СВЧ радиометра, работающего на нескольких частотах в диапазоне от 9 до 18 ГГц. Флуктуационный порог радиометра не более 0,25 К при постоянной времени интегрирования 1 с.

Радиометр имеет две рупорные антенны – измерительную и опорную. Диаграмма направленности измерительной антенны по уровню минус 3 дБ составляет 300. Антенна после посадки будет находиться на расстоянии не более полуметра от поверхности Луны и будет направлена вертикально вниз.

Опорная антенна направлена вертикально вверх и обеспечивает калибровку прибора и измерения относительно температуры «холодного» неба. Диаграмма направленности опорной антенны составляет 450. Широкая диаграмма направленности обеспечивает малое влияние на результаты измерений радиоизлучений космических объектов, попадающих в поле зрения антенны.

## **3. Имитация космического эксперимента**

При наземных испытаниях обеспечение всех условий космического эксперимента очень сложно. Поэтому, создание имитатора предполагается проводить в два этапа. На первом этапе изготавливается образец, работающий

при нормальном атмосферном давлении и в области положительных (по Цельсию) температур реголита. На втором этапе планируется изготовление имитатора, работающего в вакууме при отрицательных температурах реголита.

#### 4. Конструкция имитатора

Имитатор представляет собой конструкцию в форме полого усеченного конуса, как показано на рис. 1.

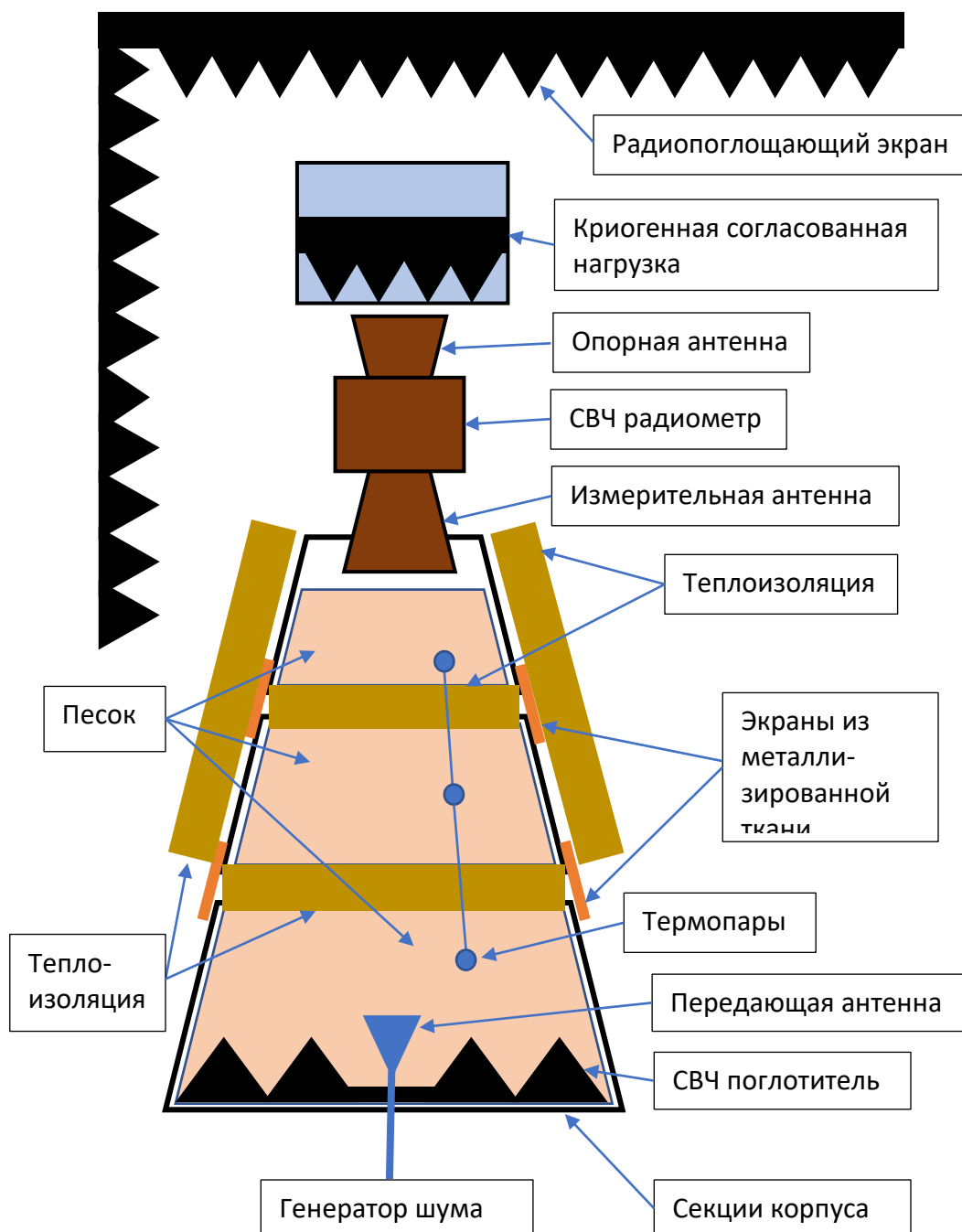


Рис. 1. Конструкция имитатора реголита. Нагреватели, датчики и терморегуляторы двух верхних секций корпуса условно не показаны

Высота конуса равна 102 см, диаметр нижнего (глухого) основания 100 см, диаметр верхнего (открытого) основания 14 см. Чтобы не ограничивать поле зрения радиометра, угол раствора конуса выбран примерно вдвое большим, чем ширина диаграммы направленности антенны.

Конус выполнен из трех металлических секций одинаковой высоты. Секции теплоизолированы друг от друга и окружающей среды. Для этого в собранном виде секции разделены сантиметровыми зазорами, а закрепление секций выполнено теплоизолирующими перемычками. Зазоры между секциями плотно закрыты снаружи тонкой радиоэкранирующей тканью.

Кроме того, внутри конуса, на уровне зазоров размещены теплоизолирующие маты из радиопрозрачного базальтового волокна. Толщина матов составляет 2 см. Такие же маты использованы для наружной теплоизоляции двух верхних секций.

Тепловой режим верхних секций обеспечивается двумя независимыми внешними терморегуляторами. Нагреватели и датчики терморегуляторов расположены на внешней поверхности секций, под теплоизоляцией (на рис. 1 условно не показаны). Мощность каждого из нагревателей составляет 1 кВт. Терморегуляторы обеспечивают поддержание температуры с погрешностью 2 °С в диапазоне от 20 °С до 150 °С.

Внутренние полости секций заполнены кварцевым песком, имитирующим лунный реголит. Общая масса песка составляет примерно 500 кг. В песке, внутри каждой секции установлены малогабаритные термодатчики, которые подключаются к внешнему многоканальному измерителю температуры.

Для подавления возможных резонансов на дне нижней секции размещен СВЧ поглотитель. Там же установлена антенна для контроля уровня поглощения в песке. Контроль уровня поглощения проводится с помощью СВЧ радиометра и внешнего генератора шума, подключенного к антенне.

СВЧ радиометр размещен над открытой верхней секцией так, чтобы измерительная антенна смотрела вниз, на песок. Опорная антенна при этом

направлена вверх. Для имитации радиоизлучения небосвода над опорной антенной размещена согласованная СВЧ нагрузка, охлаждаемая жидким азотом.

Для защиты от внешних помех место установки радиометра окружено радиопоглощающим экраном.

## 5. Тепловой режим имитатора

Суточный ход температуры лунного реголита на различных глубинах определяется в основном изменениями теплового потока от Солнца. При этом меняется температура поверхности реголита, вызывая затухающую тепловую волну, углубляющуюся в реголит.

В первом варианте конструкции имитатора предполагалось нагревать тонкий верхний слой песка, чтобы за счет теплопередачи с течением времени устанавливался необходимый глубинный профиль температуры. Расчеты показали, что в этом случае время установления температуры получается недопустимо большим.

Представленная на рис. 1 конструкция выходит на режим в приемлемое время (5-10 суток) и позволяет гибко изменять как режим нагрева, так и профиль температуры. Пример расчетного распределения температуры по объему имитатора показан на рис. 2. Температура стенок секций принимались следующие:

- 27 °С для нижней секции;
- 67 °С для средней секции;
- 127 °С для верхней секции.

Тепловые расчеты велись с помощью свободно распространяемой программы Agros2D [3].

В экспериментальном образце имитатора был использован окатанный сухой кварцевый песок высокого качества с размерами частиц от 0.1 до 0.5 мм.

Теплопроводность песка сильно зависит от его влажности. Верхние секции предлагаемой конструкции, во время измерений, длительное время находятся в

подогретом состоянии, что обеспечивает постоянную низкую влажность находящегося песка.

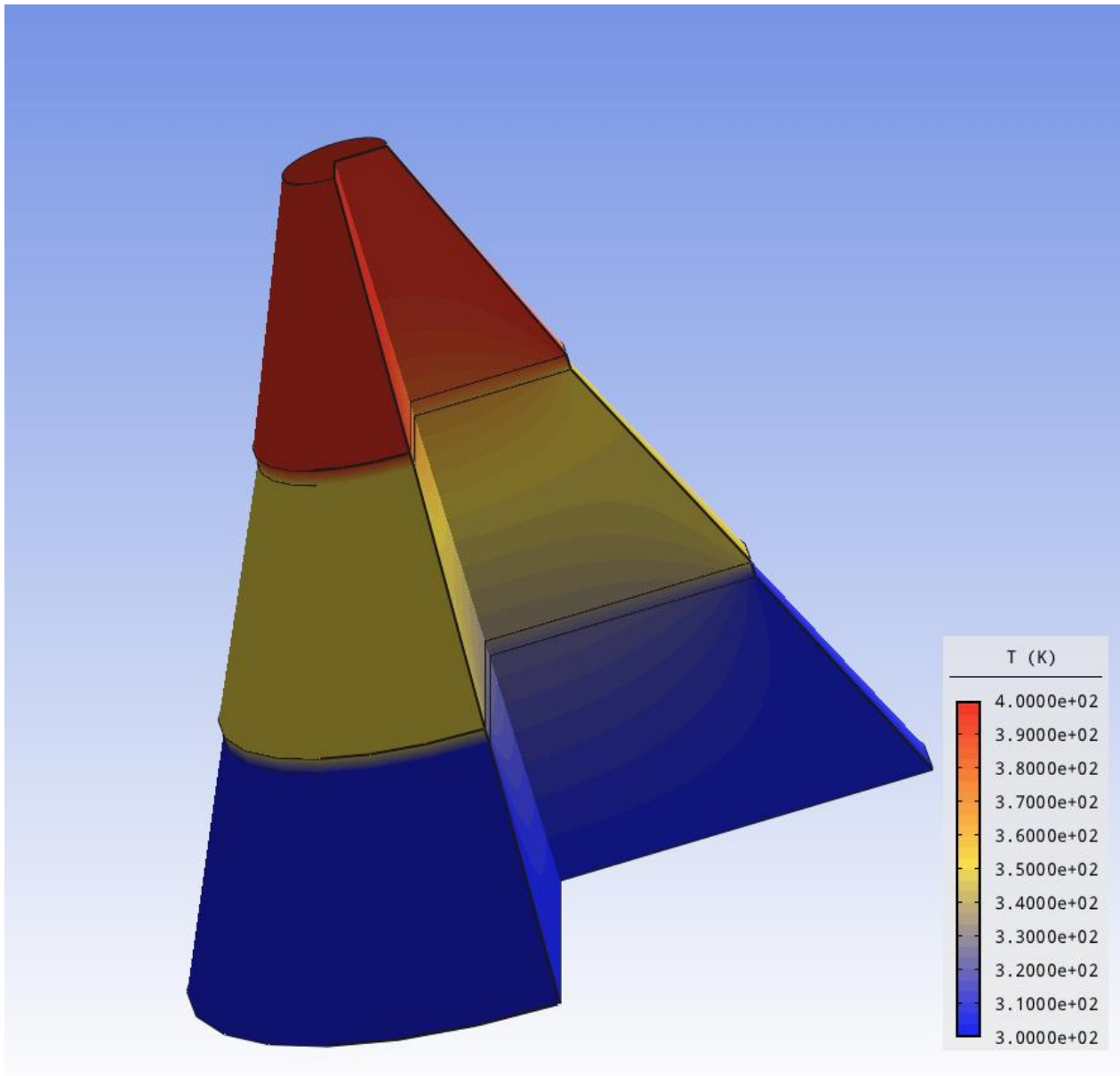


Рис. 2. Результаты расчета температуры внутри конструкции имитатора. Для наглядности четверть конуса удалена, позволяя видеть температуру внутри.

Внизу справа на рисунке приведена цветовая шкала температур в К

## 6. Диэлектрические потери в песке имитатора

Чистый кварцевый песок обладает тангенсом угла диэлектрических потерь несколько меньшим, чем у лунного реголита. Если требуется увеличить уровень потерь, то в кварцевый песок можно добавить необходимое количество гранулированного материала с большими диэлектрическими потерями. Это может быть двуокись титана, графит, карбонильное железо и т. п. вещества.

Следует отметить, что использование чистого кварцевого песка приводит к увеличению длины имитатора при равных потерях, что иногда бывает полезным для достижения необходимого закона изменения температуры с глубиной. Поправки к результатам измерений, в этом случае, могут быть получены расчетным путем.

## 7. Последующие работы

Описанный выше имитатор лунного реголита может работать только при нормальном атмосферном давлении и обеспечивает температуры только выше нормальной. На следующем этапе работы мы планируем разработать имитатор, применение которого возможно в вакуумной камере и который обеспечивает криогенные температуры. Предполагается значительно уменьшить габариты и вес имитатора, а также время выхода устройства на тепловой режим.

## Заключение

Конструкция имитатора лунного реголита в виде трехсекционного конуса позволяет обеспечить заданный температурный профиль с перепадом температур порядка 80 °С на глубине 1 м. Показано, что чистый кварцевый песок имеет определенные преимущества, если его использовать в качестве имитации реголита. В процессе дальнейшей работы планируется значительно уменьшить габариты и вес имитатора, а также время выхода устройства на тепловой режим.

**Финансирование:** Госконтракт № 1921730301771217000241361/217/2258-3-2019

## Литература

1. Wei G., Li X., Gan H., Blewett D.T., Neish C.D., Greenhagen B.T. A New Method for Simulation of Lunar Microwave Brightness Temperatures and Evaluation of Chang'E2 MRM Data Using Thermal Constrains from Diviner. *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2012. V.124. №5. P.1433-1450. <https://doi.org/10.1029/2018JE005858>



2. Horai K.I., Fujii N. Thermophysical properties of lunar material returned by Apollo missions. *The Moon*. 1972. V.4. P.447-475. <https://doi.org/10.1007/BF00562011>
3. Karban P., Mach F., Kůs P., Pánek D., Doležel I. Numerical solution of coupled problems using code Agros2D. *Computing*. 2013. V.95. №1. Supplement. P.381-408. <https://doi.org/10.1007/s00607-013-0294-4>

**Для цитирования:**

Скулачев Д.П., Косов А.С. Моделирование лунного реголита на СВЧ. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2023. №2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.2.9>