



Оптимизация состава СВЧ-радиометрического комплекса при исследовании лунного грунта (реголита)

Саворский В.П., Юшкова О.В.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Цель работы

Разработать метод оптимизации выбора СВЧ-радиометрических каналов, обеспечивающих решение задач по уточнению (восстановлению) температурных профилей и по определению содержания (концентрации) $\text{FeO} + \text{TiO}_2$ в поверхностном слое реголита (лунного грунта).

Особенности объекта исследований - реголита

Размер средний размер 65 мкм

Плотность на поверхности лунных морей порядка $1,3 \text{ г/см}^3$, на склонах от $0,8 \text{ г/см}^3$, увеличивается с глубиной до $1,9 \text{ г/см}^3$ глубине порядка 3 м

Толщина до 10-15 м, в среднем не менее 5-7 м

Температура поверхности от 80 К до 380 К (в зависимости от фазы лунного дня и широты участка Луны)

Минеральный состав алюмосиликаты, до 25% ильменита, до 15-20% льда по постоянно затененных склонах кратеров в приполярных широтах (выше 85°)

Основные факторы, формирующие радиотепловое поле реголита на лунной поверхности

1

Приповерхностные профили термодинамических температур

2

Термодинамические характеристики лунного грунта

3

Профили диэлектрических характеристик лунного грунта

4

Геометрические характеристики лунной поверхности (статистика лунных уклонов)

5

Интенсивность солнечной освещенности

Профиль плотности реголита

Для расчета плотности в работе [1] предложена формула:

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

Формула ① верна для расчета плотности реголита в слое толщиной до 100 м. Так при оценке плотности реголита у подножия лунных Апеннин (на склоне кратера Элбоу) в формуле ① стоит использовать значения $\rho_0 = 0,80 \text{ г/см}^3$ и $n = 0,225$, а в долине вблизи лунного каньона Hadley Rille $\rho_0 = 1,31 \text{ г/см}^3$ [2]. Обычно, при описании плотности реголита используют обобщенные значения констант, входящих в формулу ①, равные $\rho_0 = 1,27 \text{ г/см}^3$ и $n = 0,121$ [2].

В работе [3] предложена эмпирически найденная зависимость плотности реголита от глубины z задается выражением:

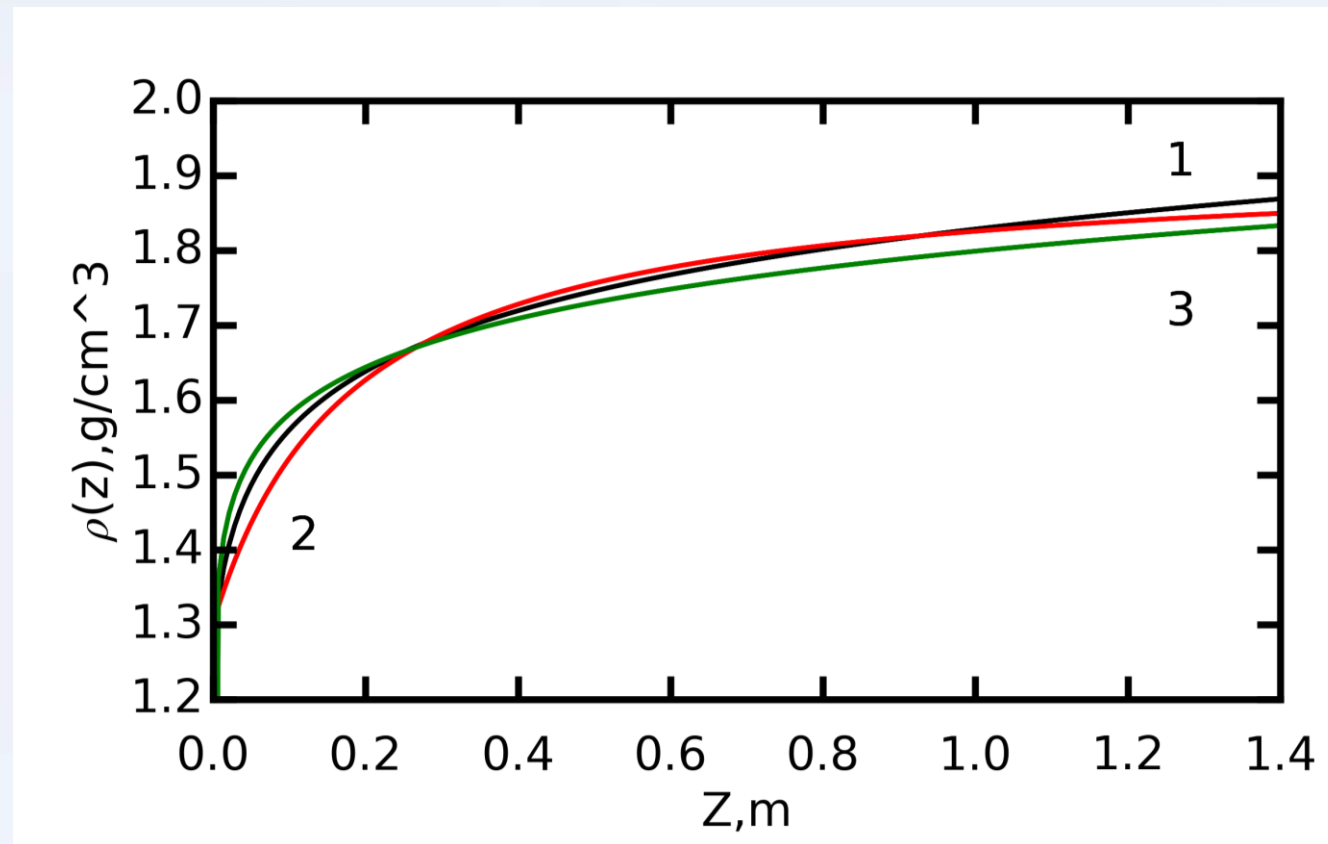
$$\rho(z) = 1,92 (z + 12,2) / (z + 18) \quad ②$$

Формула ② обеспечивает равенство плотности на поверхности $1,3 \text{ г/см}^3$. С увеличением глубины z значение $\rho(z)$ приближается к $1,92 \text{ г/см}^3$, которое является наиболее оптимальным средним значением на глубине около 3 м [3]. В этой же работе предложена степенная зависимость плотности от глубины [3]:

$$\rho(z) = 1.39z^{0.056} \quad ③$$

- [1] Olhoeft G.R., Strangway D. W. Dielectric properties of the first 100 meters of the Moon // Earth and Planetary Science Letters. 1975. vol. 24. pp. 394 – 404 [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(75\)90146-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(75)90146-6)
- [2] Mitchell J.K., Scott R.F., Houston W.N., Costes N.C., Carrier W.D., Bromwell L.G. Mechanical properties of lunar soil - Density, porosity, cohesion, and angle of internal friction // Geochem. Cosmochem. Acta, Suppl. 3 (1972), 3235-3253.
- [3] Carrier W.D. III, Olhoeft G.R., Mendell W. Physical properties of the lunar surface // Lunar Sourcebook / Eds. Heiken G., Vaniman D., French B.M. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1991. P. 475–594.

Профиль плотности реголита



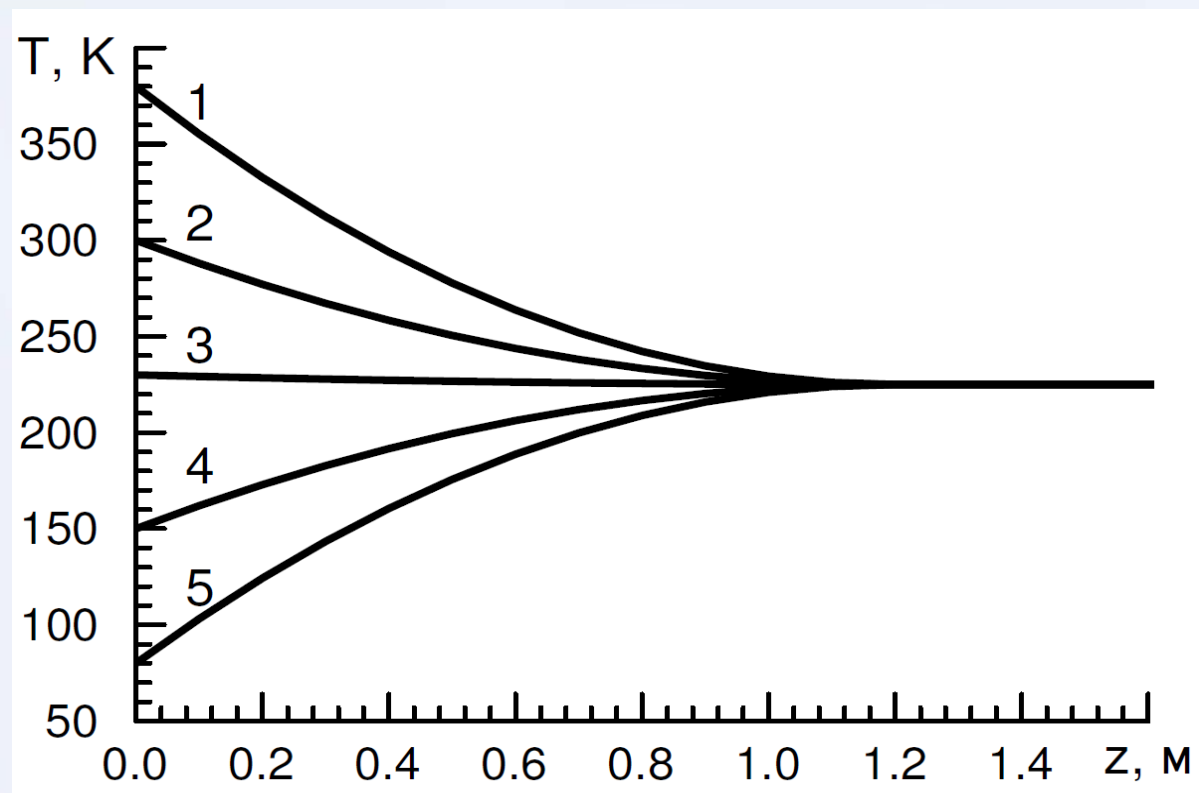
Температурный профиль в слое реголита

Распределение температуры грунта Луны по глубине рассчитывается на основе уравнения теплопроводности с учетом того, что реголит обладает высокой теплоизоляцией и суточные колебания температуры затрагивают слой около 1 м [4].

На следующем слайде на рисунке 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.

[4] Минчин С.Н., Улубеков А.Т. Земля-космос-Луна//М: Машиностроение, 1972. с. 244.

Температурный профиль в слое реголита



Влияние минерального состава реголита

Глубина проникновения микроволнового излучения S-диапазона варьируется от 0,5 м до > 5 м в зависимости от концентрации ильменита в реголите.

Тангенс диэлектрических потерь (δ) может быть описан зависимостью

$$\operatorname{tg} \delta = 10^{0,038S+0,312\rho-3,26} \text{ ④}$$

где δ – тангенс диэлектрических потерь при плотности грунта ρ в г/см³ и общей концентрацией FeO + TiO₂, равной S % (примерно соответствующей концентрации ильменита).

[5] Fa W., Wieczorek M.A., Heggy E. Modeling polarimetric radar scattering from the lunar surface: Study on the effect of physical properties of the regolith layer // JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 116, E03005, doi:10.1029/2010JE003649, 2011

Диэлектрическая проницаемость реголита (C = 0)

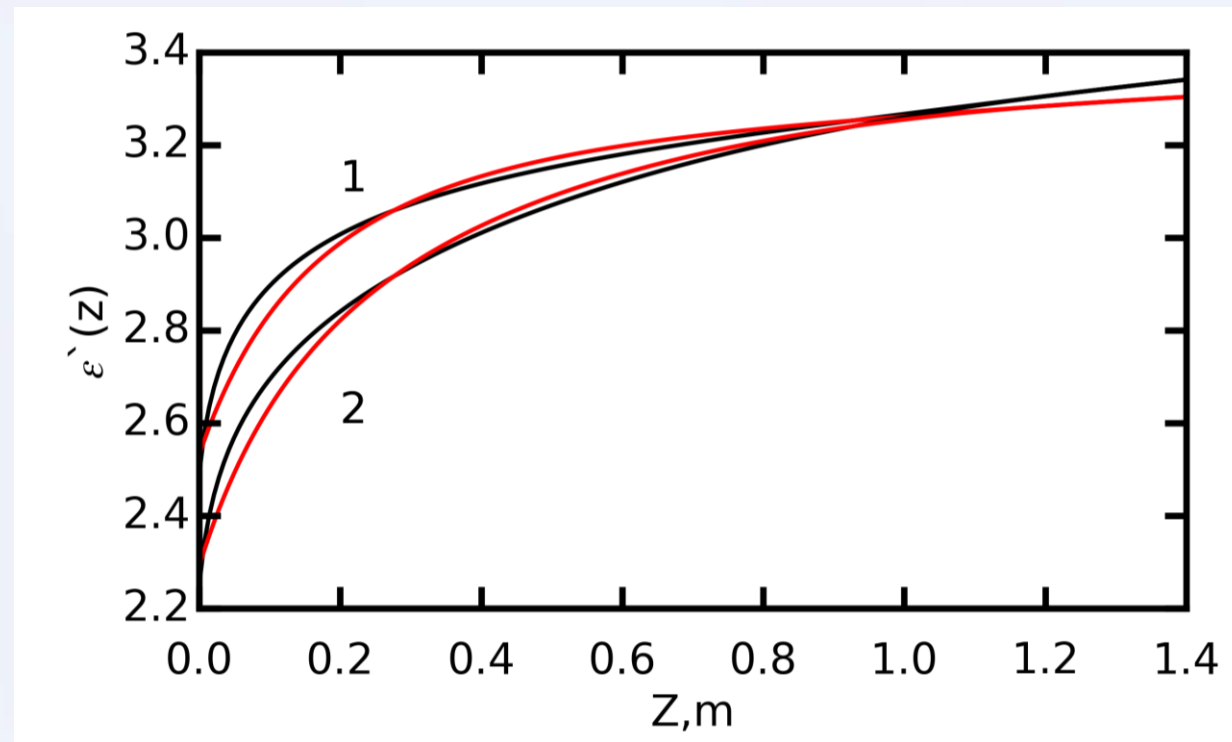
$$\varepsilon'(\rho, T) = (1.85 \pm 0.02)^\rho + (8 \pm 1)10^{-4}T$$

$$tg\delta(T) = (5.1 \pm 0.2)10^{-3}exp((1.7 \pm 0.2)10^{-3}T)$$

$$\varepsilon''(\rho, T) = tg\delta(T, z) * \varepsilon'(\rho, T)$$

Профиль диэлектрической проницаемости реголита

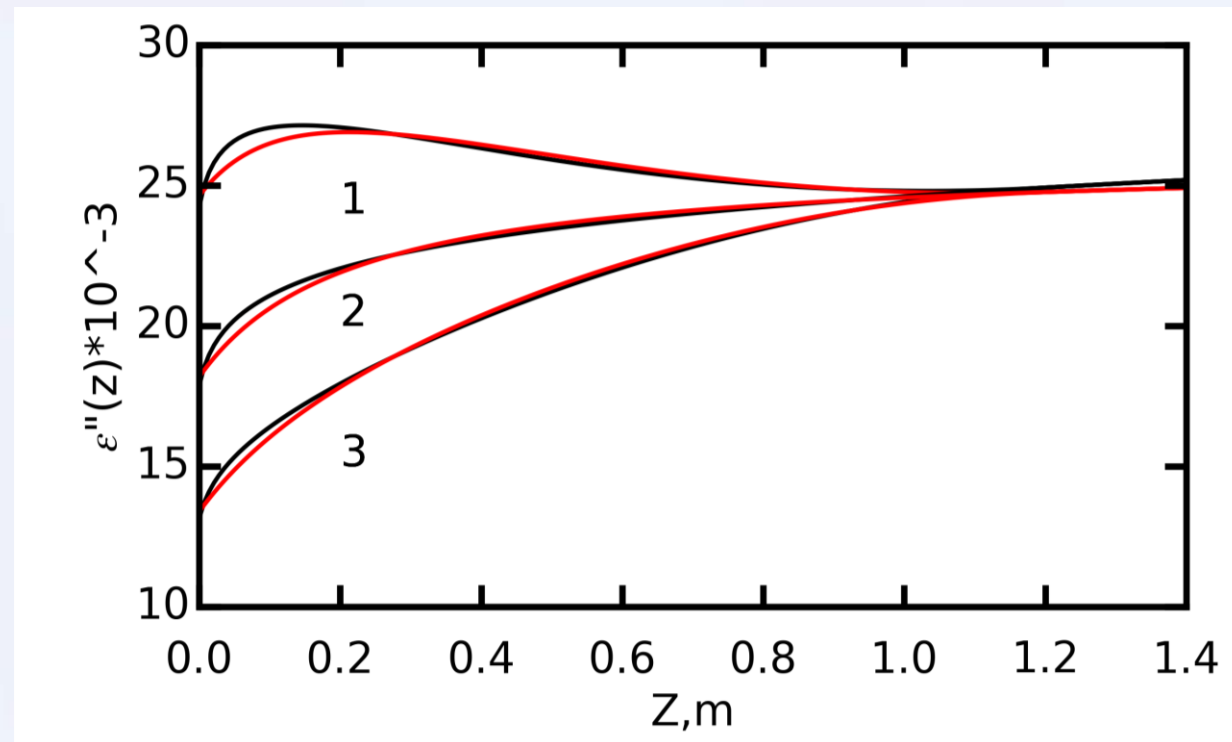
Действительная часть



Температура на поверхности: 1 – 380 К, 2 – 80 К

Профиль диэлектрической проницаемости реголита

Мнимая часть



Температура на поверхности: 1– 380 К, 2 – 230 К, 3 – 80 К

Профиль поглощения

$$F(l) = \int_0^l \frac{2\pi f}{c} \operatorname{Im} \sqrt{\varepsilon(z)} dl$$

$$\operatorname{Im} \sqrt{\varepsilon(z)} = \sqrt{\left(\sqrt{\varepsilon'^2(z) + \varepsilon''^2(z)} - \varepsilon' \right) / 2}$$

$$\text{При } \operatorname{tg} \delta(T) \rightarrow 0 \quad \operatorname{Im} \sqrt{\varepsilon(z)} = \varepsilon'' / \sqrt{\varepsilon'} / 2$$

l_s - толщина скин-слоя при условии, что $F(l_s) = 1$

Весовая функция

$$W(z) = \frac{2\pi f}{c} \operatorname{Im} \sqrt{\varepsilon(z)} \exp \left(- \int_0^l \frac{2\pi f}{c} \operatorname{Im} \sqrt{\varepsilon(z)} dl \right) dz,$$

$$\operatorname{Im} \sqrt{\varepsilon(z)} = \sqrt{\left(\sqrt{\varepsilon'^2(z) + \varepsilon''^2(z)} - \varepsilon' \right) / 2},$$

f - рабочая частота радиометра,
 c - скорость света в свободном пространстве.

Радиояркие температуры слоя реголита

$$T(f) = (1 - R) \int_0^D T(z)W(z, f) dz + Q$$

R – малая величина, которую можно опустить;

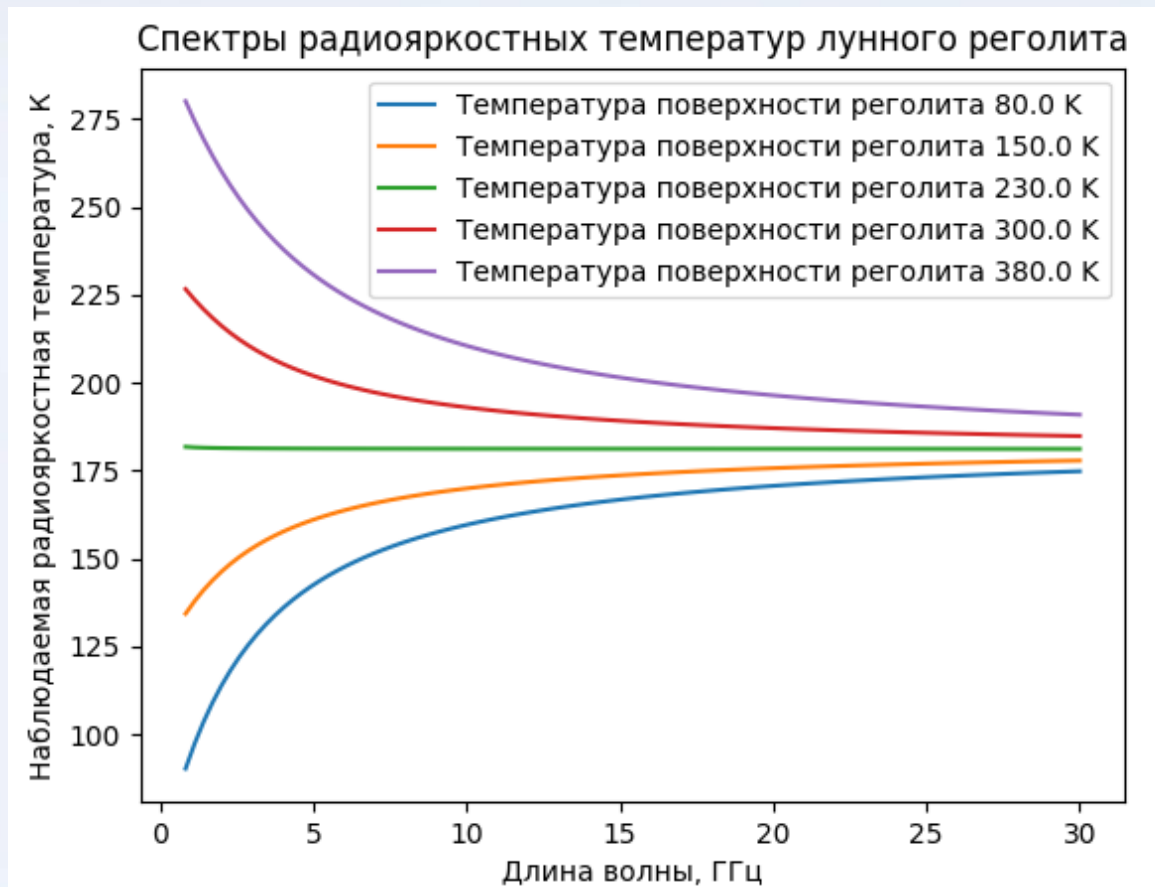
Q - малая величина, которую можно опустить;

D - предельно достижимая глубина, существенная при изучении СВЧ радиометрами.

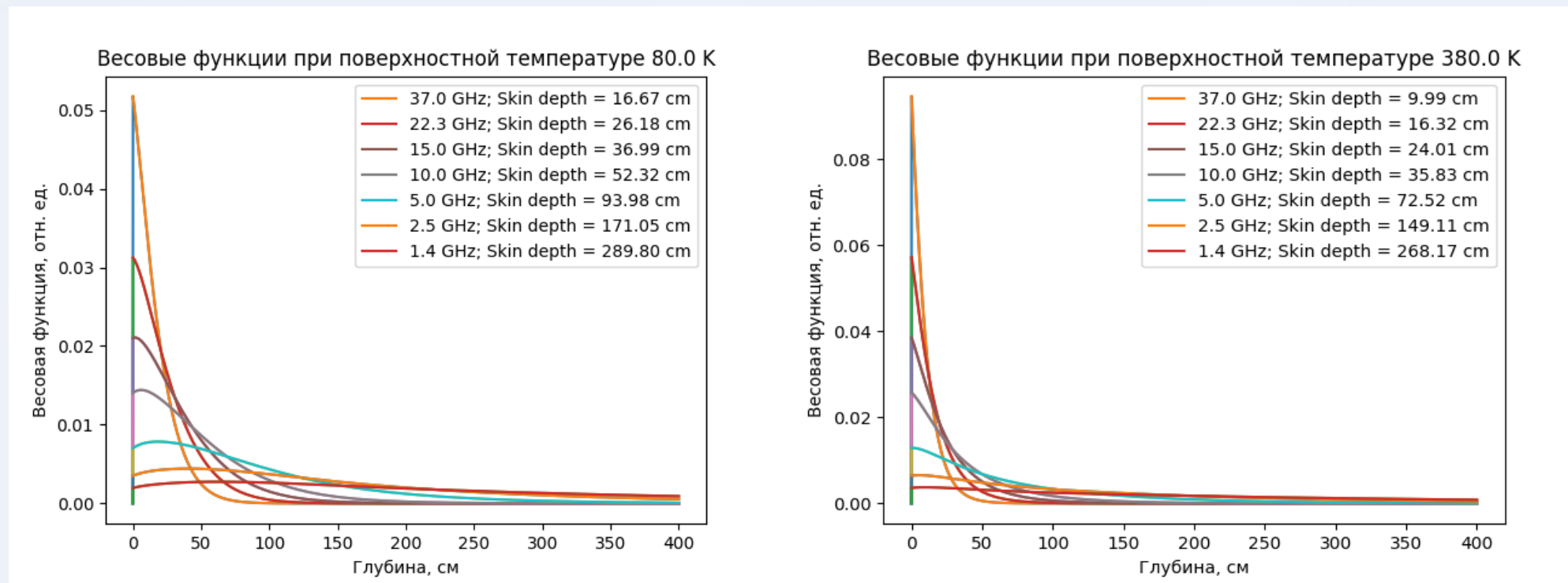
$$R = \left| \frac{1 - \operatorname{Re}\sqrt{\varepsilon(0)}}{1 + \operatorname{Re}\sqrt{\varepsilon(0)}} \right|$$

Расчетная формула: $T(f) = (1 - R) \sum_{i=0}^N T_i W_i \Delta z$

Эффективные радиояркостные температуры реголита



Выбор СВЧ-радиометрических каналов для исследования изменчивости профилей температуры



Весовые функции СВЧ излучения в слое реголита, см/дм
диапазоны

Выбор СВЧ каналов для восстановления температурных профилей реголита

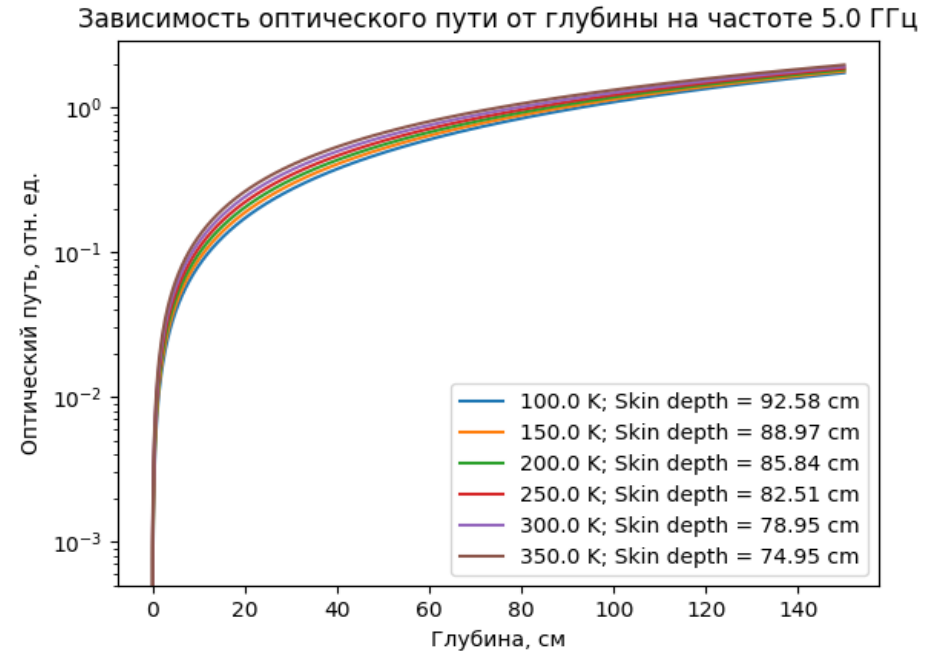
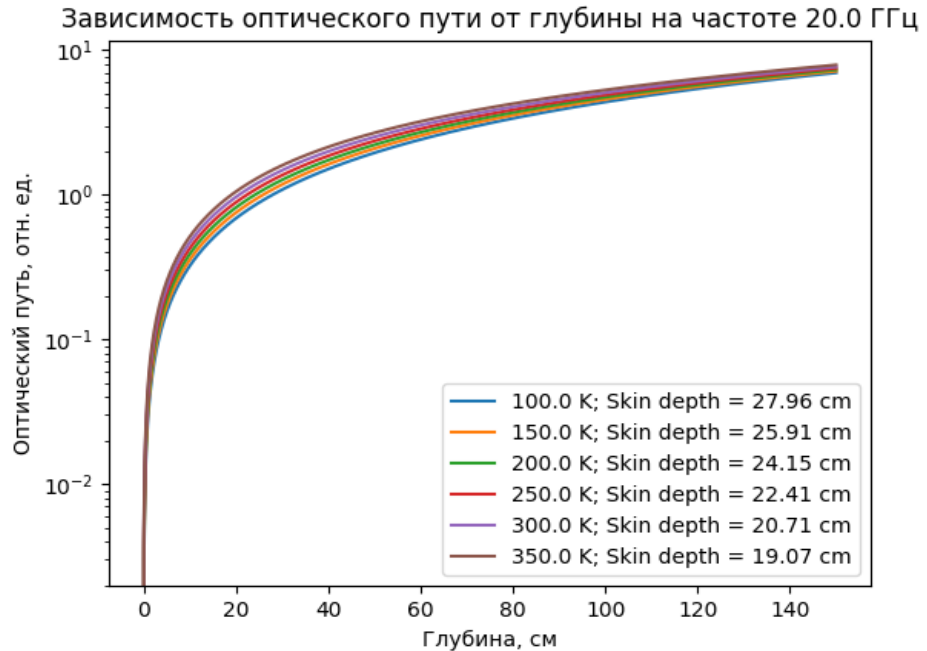
При низких температурах
поверхности (80-150 К)

Центральная частота, ГГц	Глубина зондирования, см
1,4	180-600
5	70-180
15	30-70
37	0-30

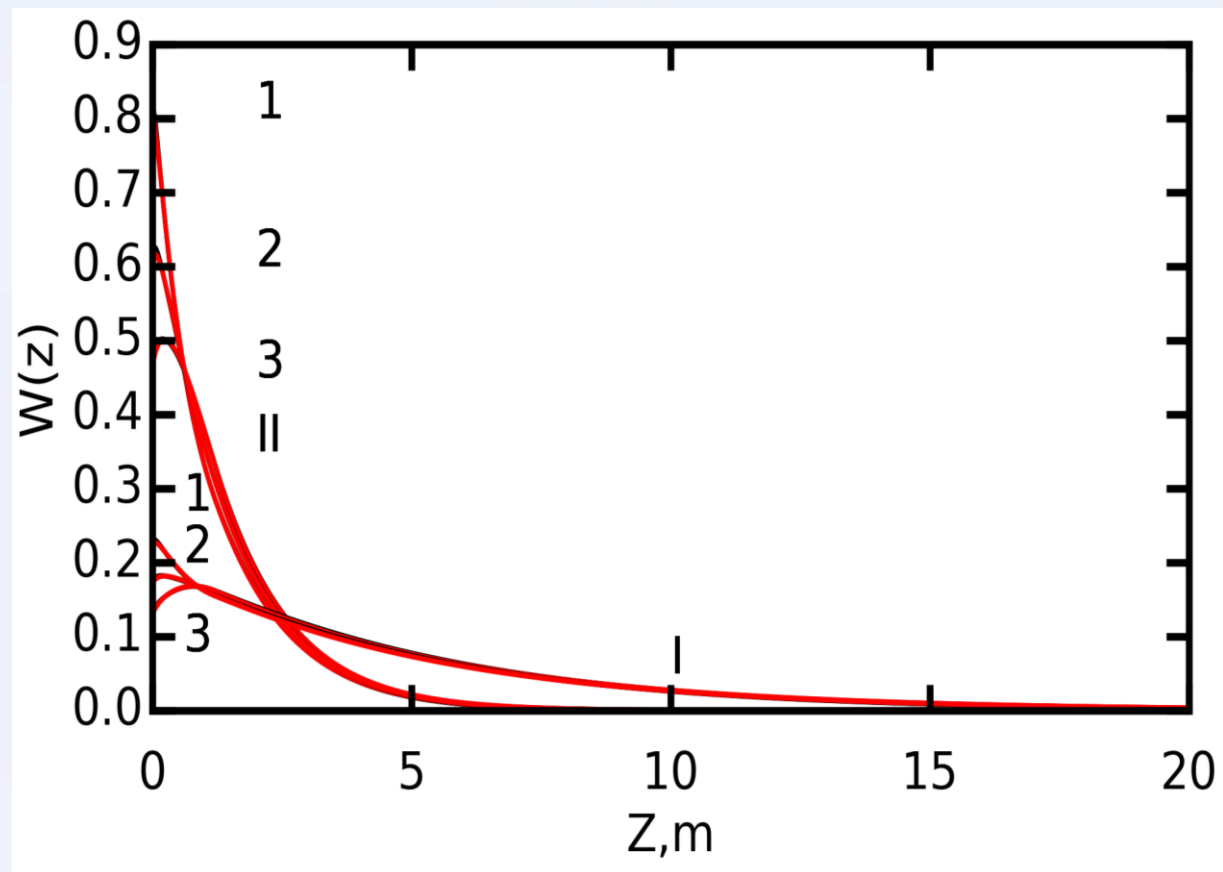
При высоких температурах
поверхности (300-380 К)

Центральная частота, ГГц	Глубина зондирования, см
1,4	140-540
5	50-140
15	20-50
37	0-20

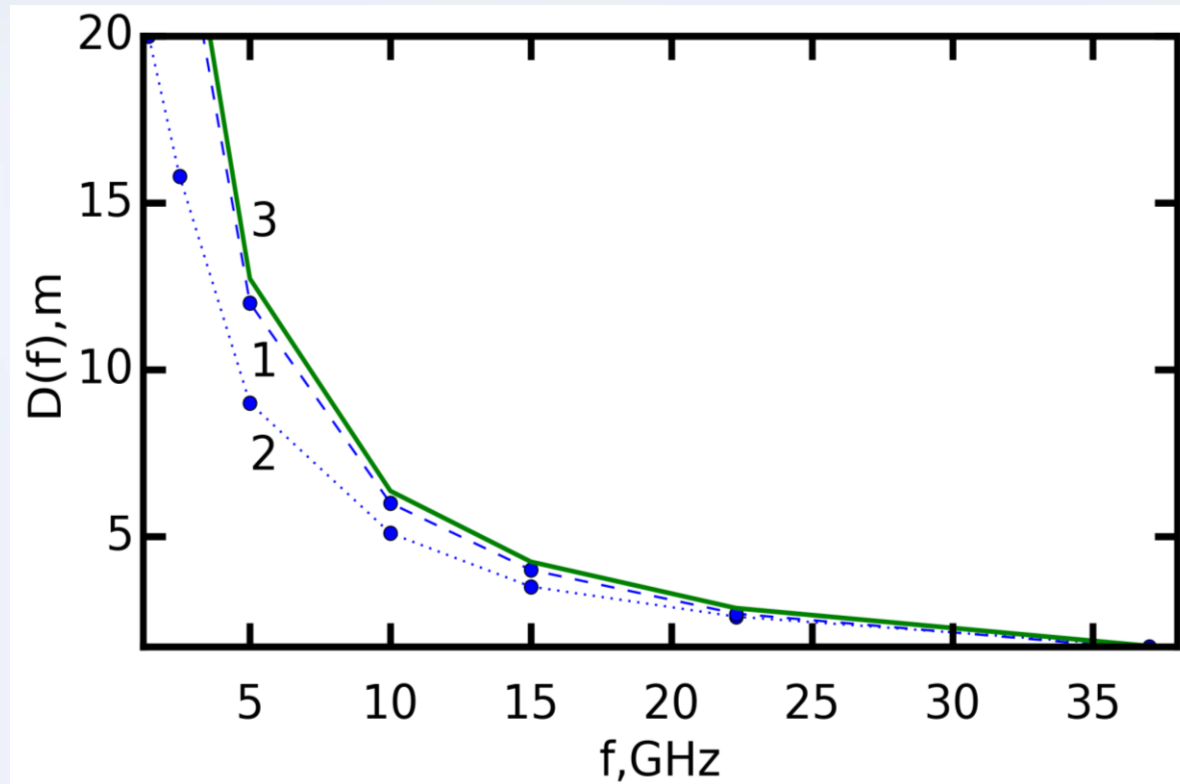
Профиль суммарного коэффициента поглощения слоя реголита



Весовые функции см/м диапазоны



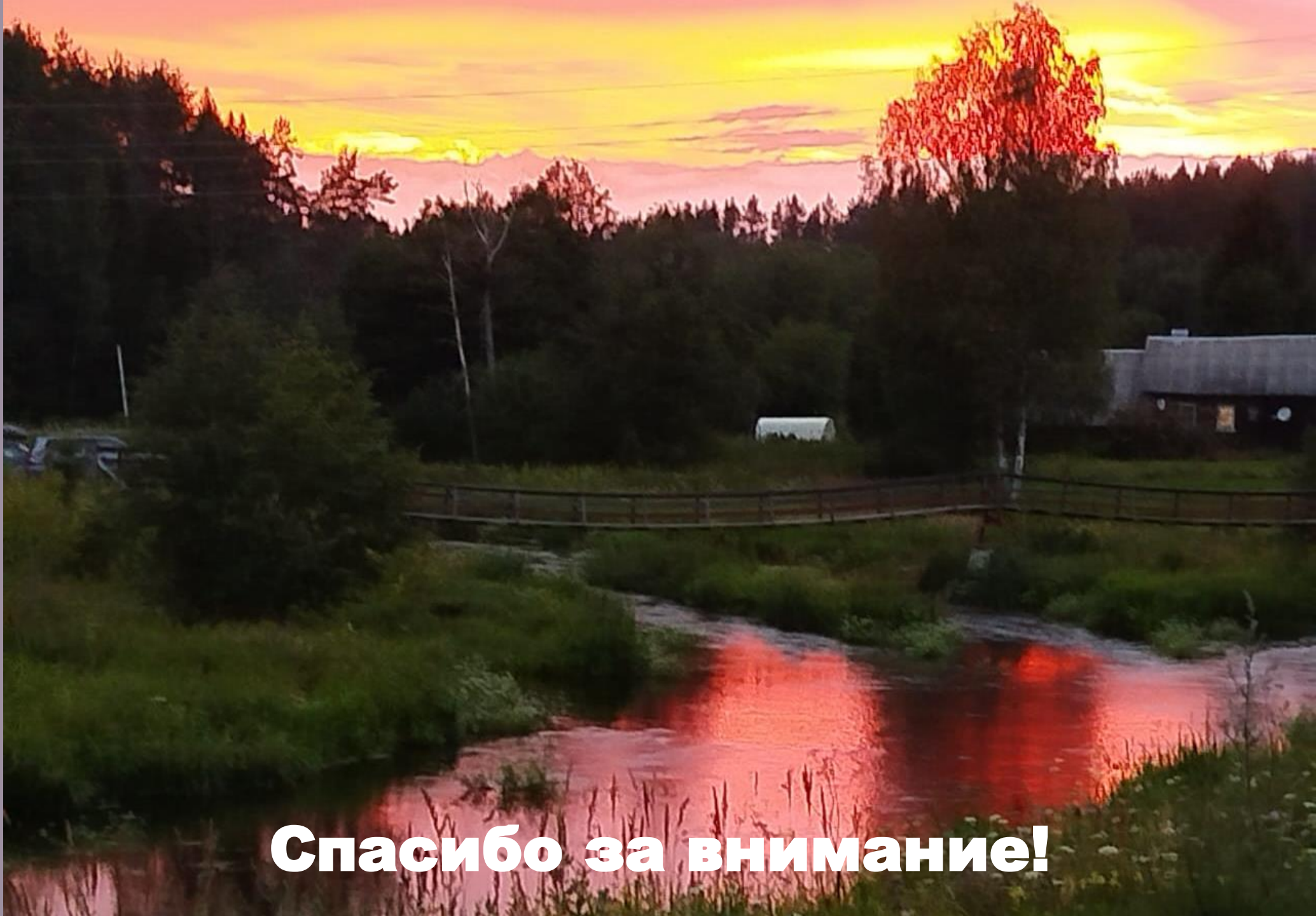
Оценки глубины проникновения



Функция $D(f)$ — линия 1, $\lambda * 100$ — линия 2, $L(f)$ — линия 3.

Выводы

1. Создана модель оценки радиоярких температур лунного реголита
2. Оценены весовые функции СВЧ излучения в слое реголита
3. Обоснованы основные СВЧ диапазоны для восстановления температурных профилей в лунном реголите



Контактная информация:
Саворский Виктор Петрович
e-mail: savor@inbox.ru
тел. +7 916 332 13 29

Спасибо за внимание!