

# Теплофизические параметры лунной коры

Кронрод Е.В., Кронрод В.А., Кусков О.Л.

*(ГЕОХИ РАН)*

[e.kronrod@gmail.com](mailto:e.kronrod@gmail.com)

Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса  
11-15 ноября 2024

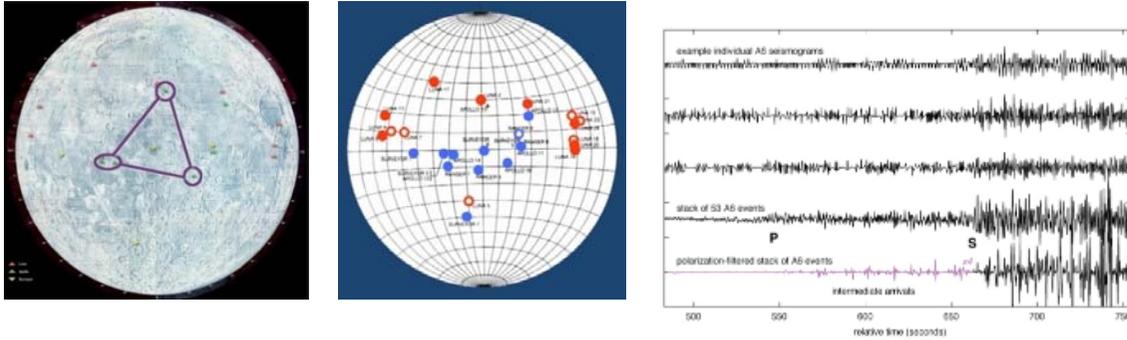
# Лунные миссии

- **Луна-10** (СССР, 1966) — первая орбитальная миссия, передача радиосигналов, гравитационное поле, магнитное поле, гамма-спектрометрия.
- **Луна-11, Луна-12** (СССР, 1966) — фотосъемка, гамма-излучение для химического состава, изучение магнитного поля.
- **Луна-19** (СССР, 1971) — уточнение данных по гравитационному полю, магнитосфере.
- **Луна-22** (СССР, 1974) — гравитационное поле, фотосъемка, магнитное поле.
- **Apollo 15** (США, 1971) — лазерная локация, топографическая карта, сейсмометрия, тепловой поток.
- **Apollo 17** (США, 1972) — сейсмография, гравиметрия, электромагнитное зондирование, тепловой поток.
- **Clementine** (США, 1994) — топографическая карта, минералогия, лазерная альтиметрия.
- **Lunar Prospector** (США, 1998) — распределение элементов, гравитация, альтиметрия.
- **Smart-1** (ЕКА, 2003) — химический состав, рентгеновская и ультрафиолетовая спектроскопия.
- **Kaguya (SELENE)** (Япония, 2007) — лазерная альтиметрия, химический состав, гравитация.
- **Чанъэ-1** (Китай, 2007) — топография, химический состав, радиолокация.
- **Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)** (США, 2009) — топографическая карта, температура, водяной лед.
- **LCROSS** (США, 2009) — обнаружение воды на Луне путём анализа выбросов от удара зонда по поверхности.
- **Чанъэ-2** (Китай, 2010) — химия, топография, фотосъемка.
- **GRAIL** (США, 2011) — гравитационная карта, плотность коры, мантия.
- **Чанъэ-3** (Китай, 2013) — посадка, луноход, подповерхностное зондирование.
- **Чанъэ-4** (Китай, 2019) — исследование обратной стороны Луны, подповерхностное зондирование.
- **Чанъэ-5** (Китай, 2020) — сбор образцов грунта, радиометрия.
- **Chandrayaan-2** (Индия, 2019) — топография, состав поверхности, поиски водяного льда.
- **Chandrayaan-3** (Индия, 2023) — орбитальные исследования минералогии, топографии, модули для изучения воды.
  
- **Будущие миссии** (NASA, ESA, Китай, Россия) — пилотируемые программы, исследование лунных ресурсов и создание станций на Луне.



## Данные о параметрах коры Луны

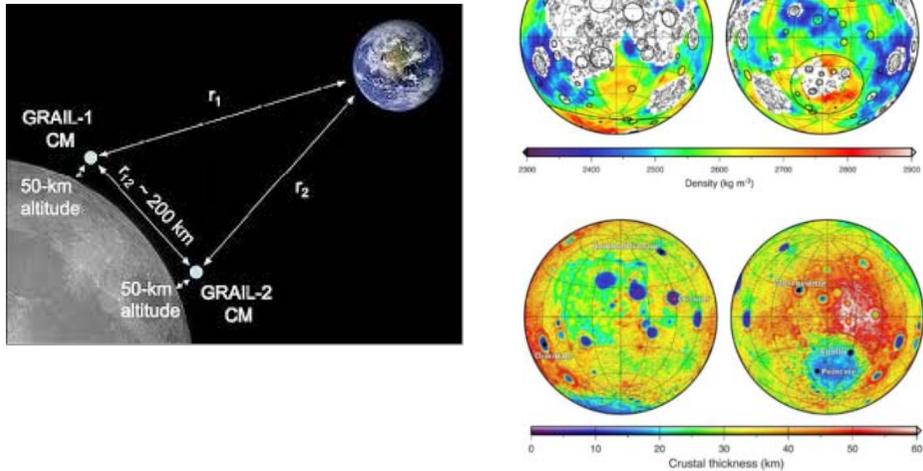
**Сейсмология** – данные с аппаратов Apollo (1969-1972), использованы для оценки толщины коры.



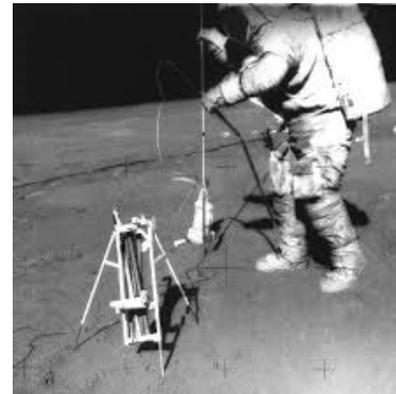
**Топографические данные** (LRO, LOLA-Lunar Orbiter Laser Altimeter)



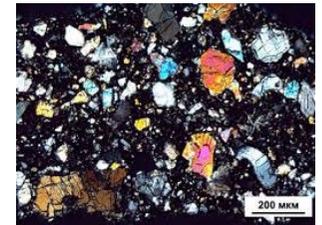
**Гравиметрия** – спутниковые миссии (Lunar Prospector, Kaguya, GRAIL)



**Измерение тепловых потоков** (Apollo 15 и 17)

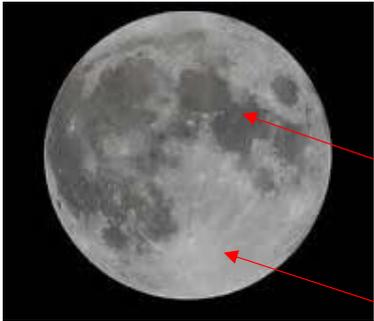


**Исследование Образцов**



**Моделирование**

## Данные о параметрах коры Луны

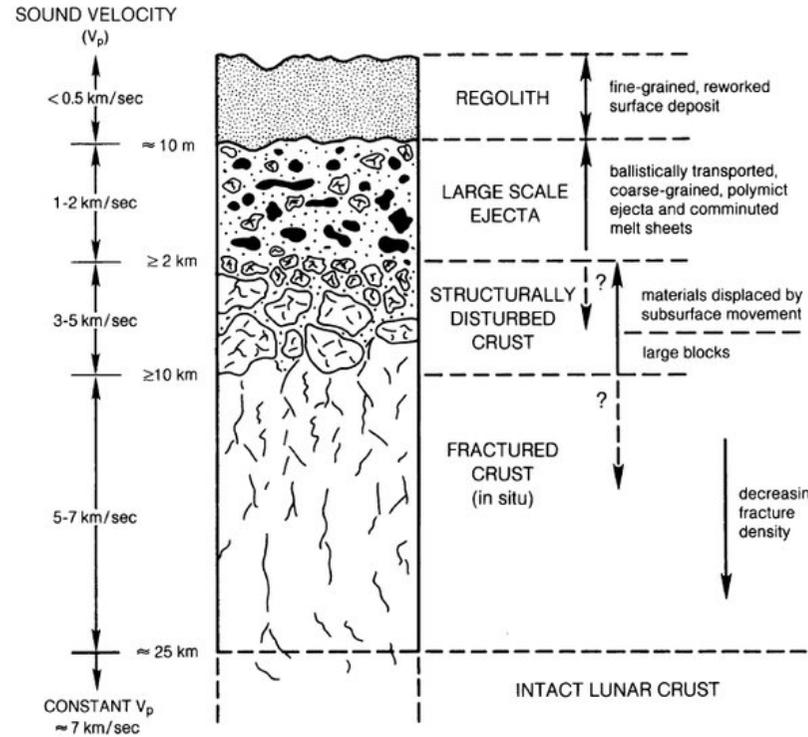


Базальты

Анортозиты

### Параметры:

- Толщина коры (GRAIL, Kaguya)
  - на ближней стороне 30–40 км, на дальней — до 60–100 км
  - Средняя толщина 34-43 км
- Плотность 2300-2900 кг/м<sup>3</sup>, средняя 2550 кг/м<sup>3</sup>
- Пористость 6-12%
- Состав, плотность зерна:
  - анортозиты 2,7 г/см<sup>3</sup>
  - базальты 3,0 г/см<sup>3</sup>
- Коэффициент теплопроводности



[Heiken, G.H., Vaniman, D.T., & French, B.M. eds, 1991]

Реголит ~10м

Мегареголит 1-3 км,  
 $\rho = 2400-2600 \text{ кг/м}^3$

Кора ~40 км  
 $\rho = 2300-2900 \text{ кг/м}^3$

*Пористость влияет на коэффициент теплопроводности –  
 существенный параметр при построении тепловых моделей*

Пористость породы - отношение общего объема пустот в породе к ее объему

Плотность породы  $\rho = \rho_s \cdot (1-f)$ ,  $f$  – объемная доля пор,  $\rho_s$  - плотность зерна

$$f(H) = f_0 \exp(-C \cdot P(H)/P_C)$$

$$P(H) = \int_0^H \rho(H) g dH, \quad \rho(H) = \rho_s (1 - f(H)) \quad [\text{Han et al., 2014}]$$

$f_0$  – пористость поверхностного слоя непосредственно под слоем реголита,

$\rho_s$  – плотность зерна (нулевая пористость),

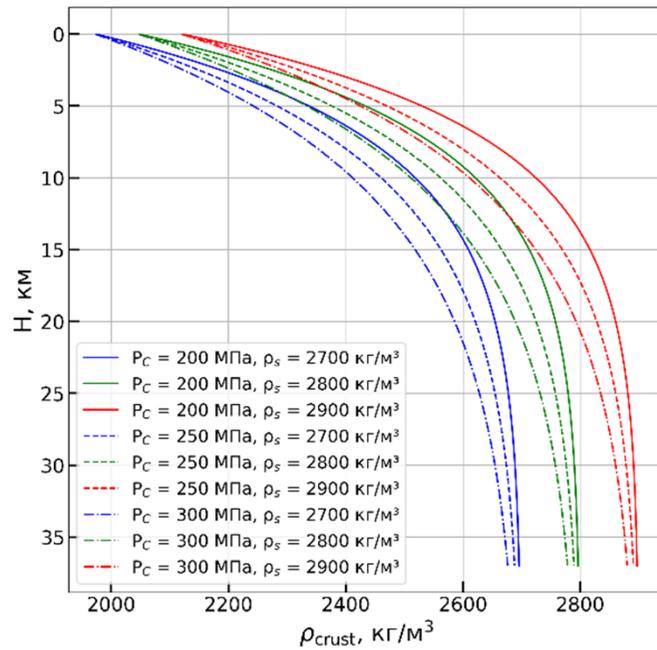
$P(H)$  - литостатическое давление на глубине  $H$ ,

$g$  - ускорение силы тяжести (для Луны  $g=1.67 \text{ м сек}^{-2}$ ),

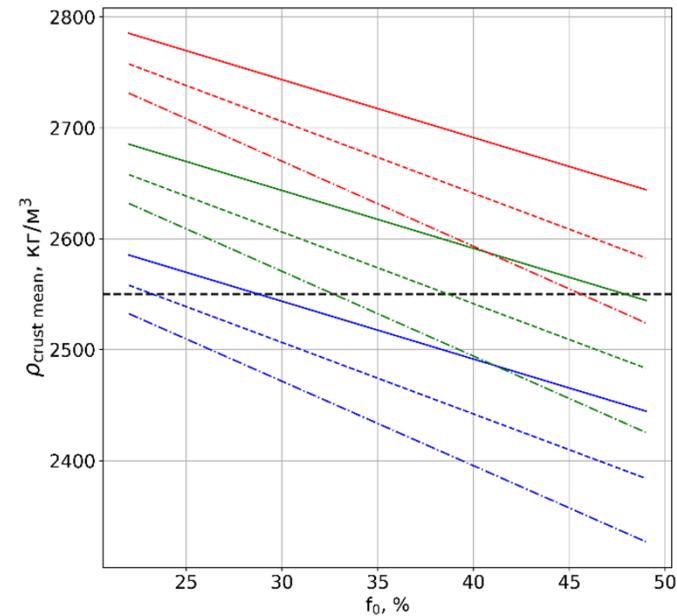
$P_C$  – давление закрытия пор,

$C \sim 6.15$  (Han et al., 2014)

## Расчетная плотность в коре

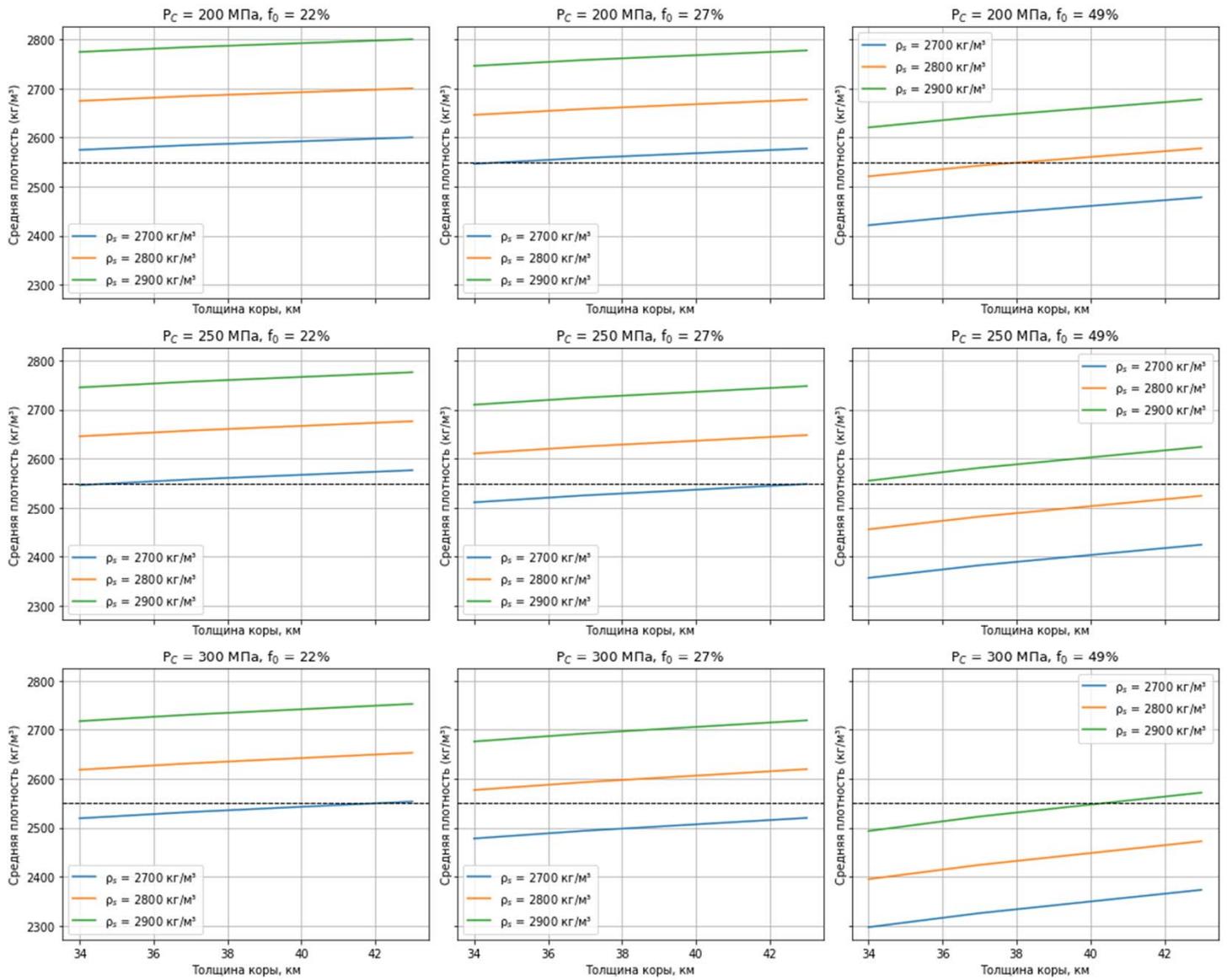


Изменение плотности с глубиной  
 $f_0 = 27\%$

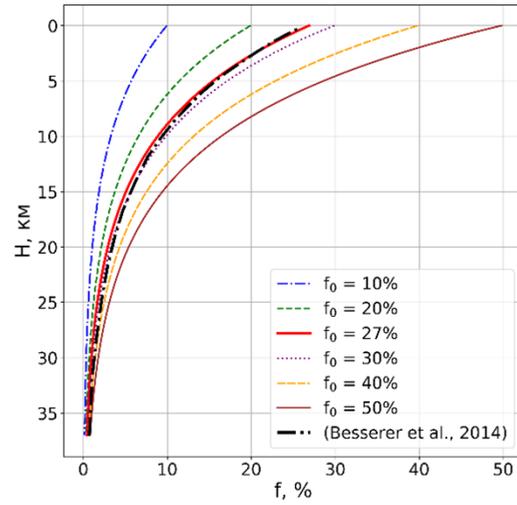


[Wieczorek  
 et al, 2013]

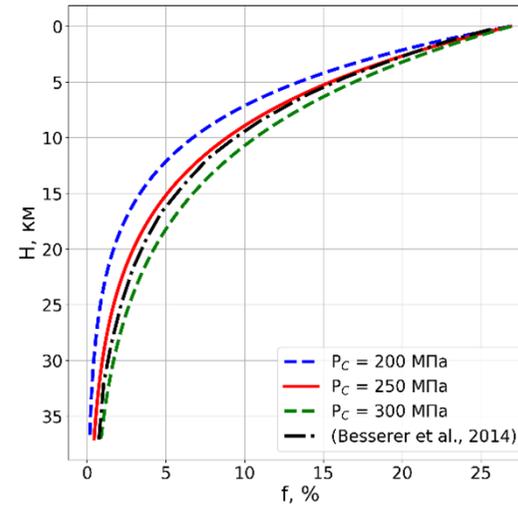
Средняя плотность в зависимости от  
 пористости на поверхности



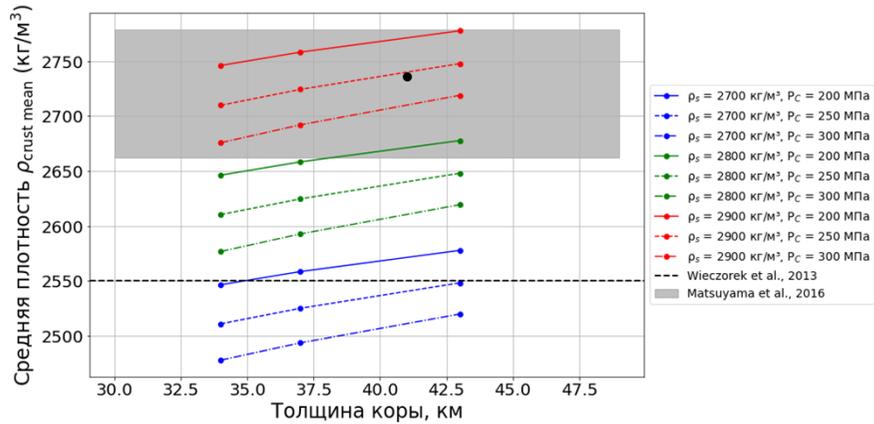
# Пористость в коре



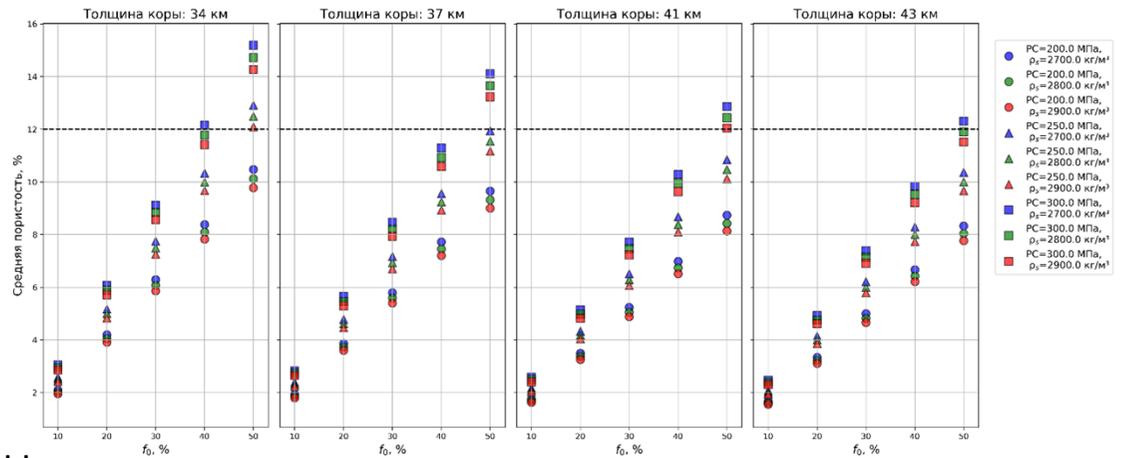
$P_C = 250$  МПа,  $\rho_s = 2700$  кг/м<sup>3</sup>



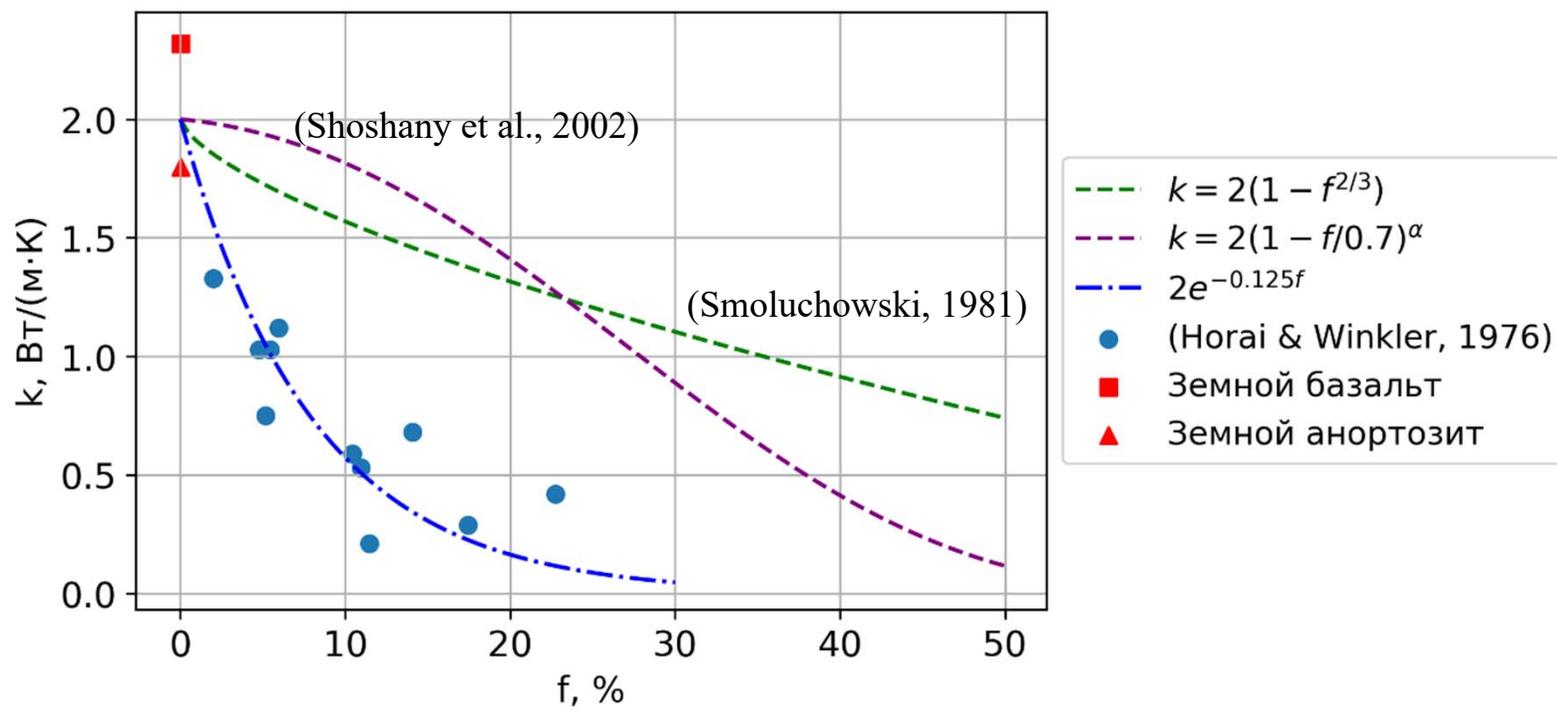
$\rho_s = 2700$  кг/м<sup>3</sup>,  $f_0 = 27\%$



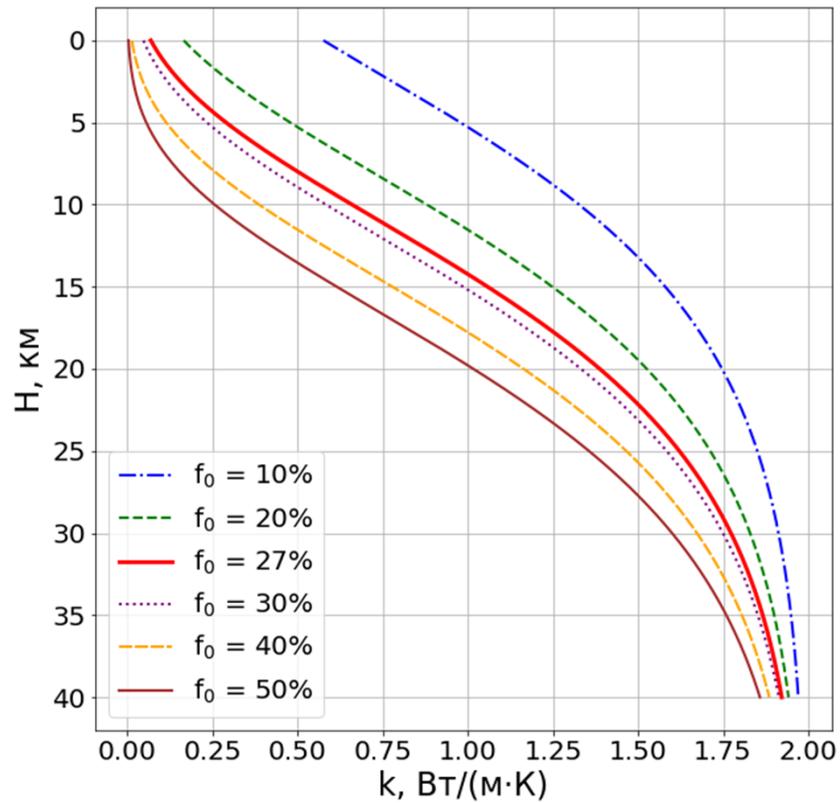
Влияние толщины коры



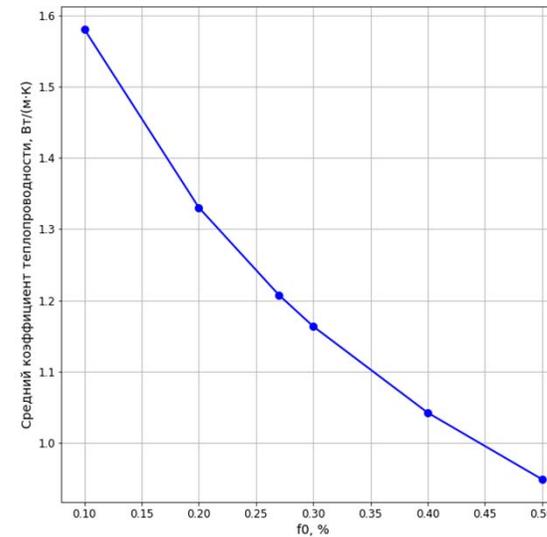
## Коэффициент теплопроводности



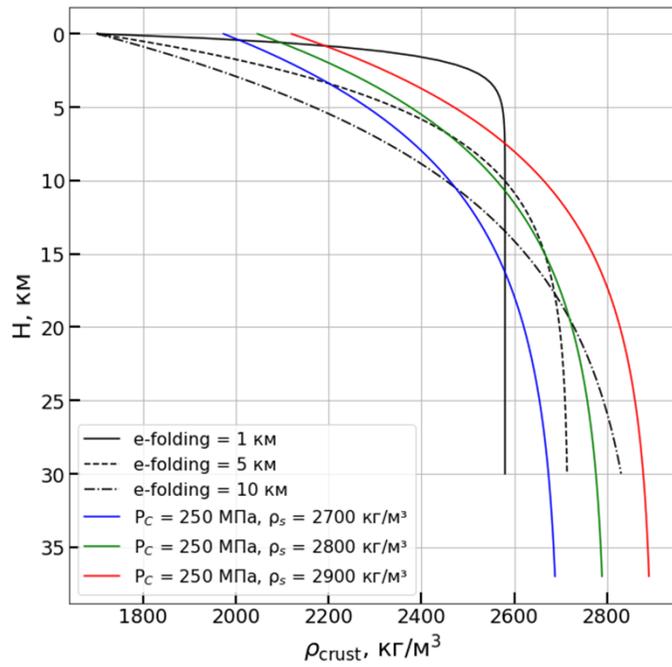
## Расчетное распределение коэффициента теплопроводности по глубине



$$P_c = 250 \text{ МПа}, \rho_s = 2700 \text{ кг}/\text{м}^3$$

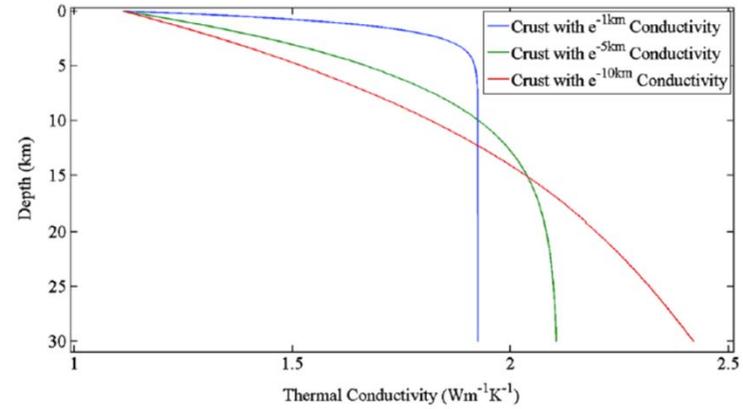


Эквивалентный коэффициент теплопроводности в коре

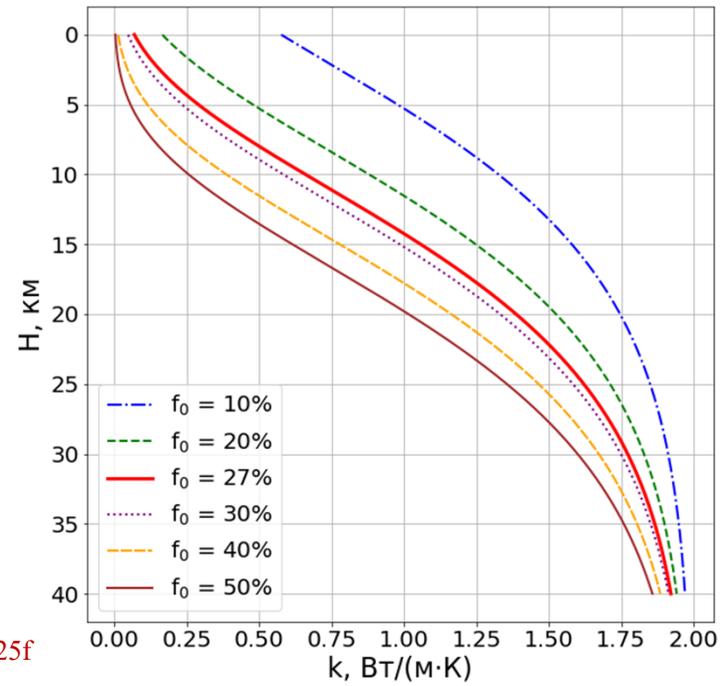


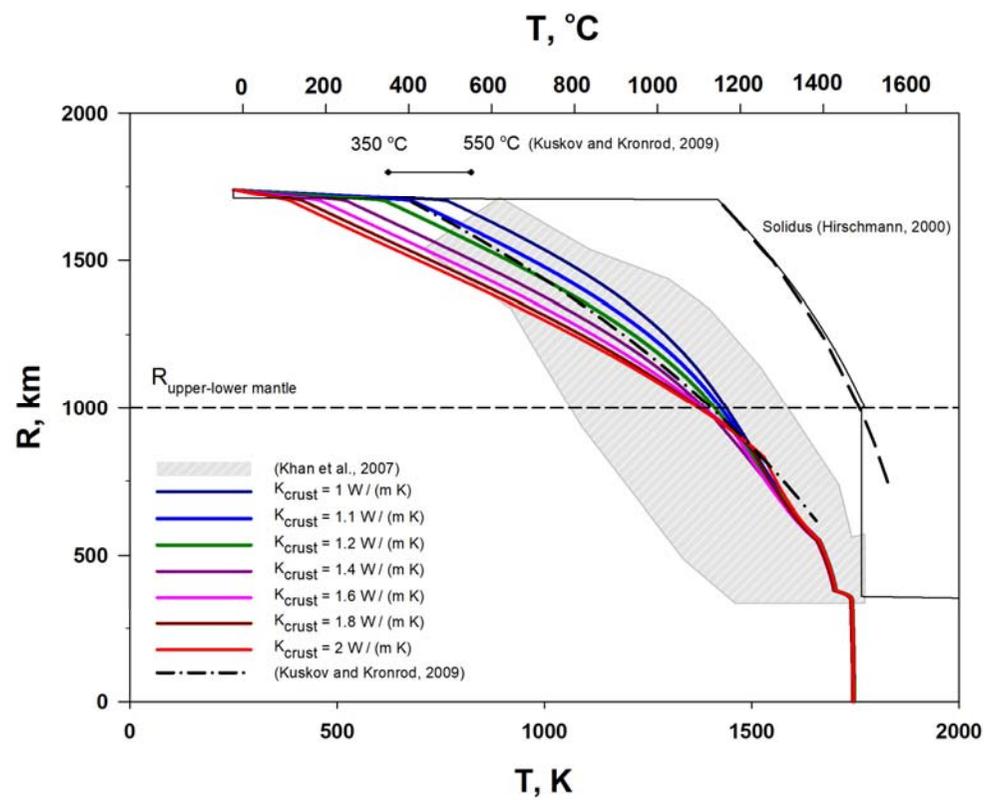
Сравнение с (Siegler et al., 2014)

$$k(f) = 2e^{-0.125f}$$



Siegler: (Smoluchowski, 1981):  $k = k_0(1 - f^{2/3})$





Коэффициент теплопроводности в коре оказывает существенное влияние на тепловые модели Луны

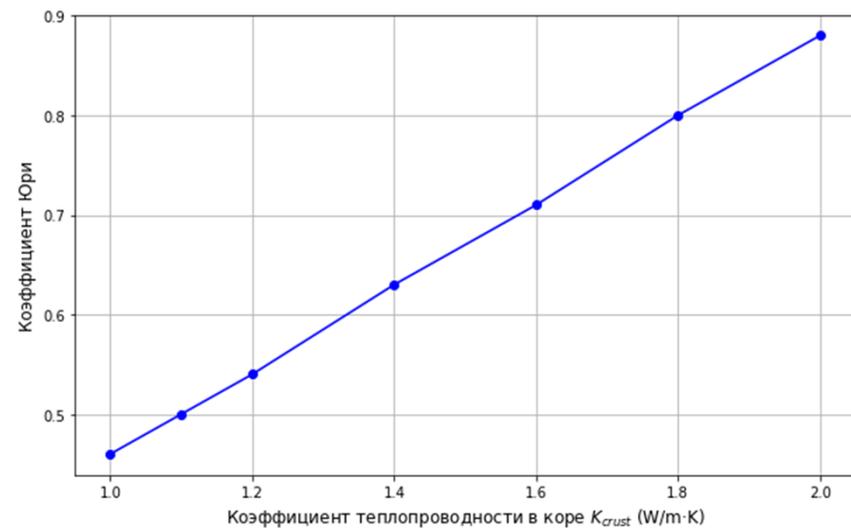
**Коэффициент Юри (Urey ratio)** - отношение тепла, производимого за счет радиоактивного нагрева, к тепловому потоку, теряемому через поверхность планеты

0.65 - 0.73 [Siegler et al., 2022]

Для Земли 0.21 - 0.49, наиболее вероятно 0.33 (Jaupart & Mareschal, 2010)

**Расчетные значения коэффициента Юри при различных коэффициентах теплопроводности в коре**

$K_{\text{crust}}$ (W/m·K)	Коэффициент Юри
1.0	0.46
1.1	0.50
1.2	0.54
1.4	0.63
1.6	0.71
1.8	0.80
2.0	0.88



Спасибо за внимание