

Теплофизические параметры лунной коры

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

(ГЕОХИ РАН)

e.kronrod@gmail.com

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

Лунные миссии

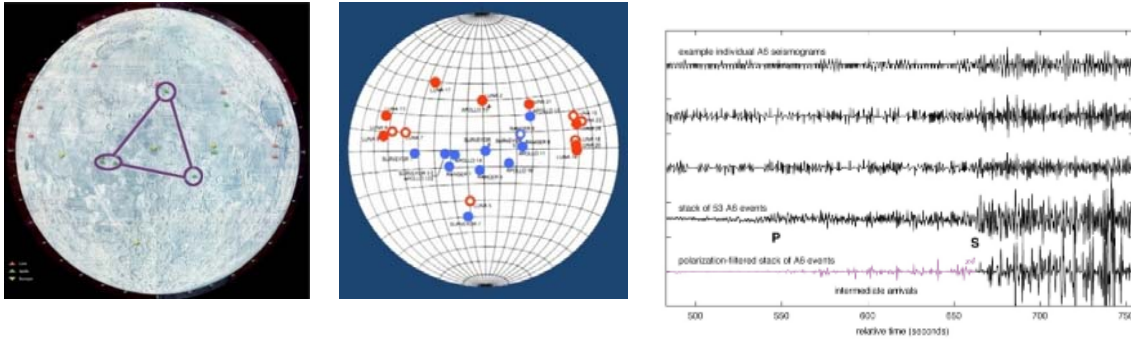
- **Луна-10** (СССР, 1966) — первая орбитальная миссия, передача радиосигналов, гравитационное поле, магнитное поле, гамма-спектрометрия.
- **Луна-11, Луна-12** (СССР, 1966) — фотосъемка, гамма-излучение для химического состава, изучение магнитного поля.
- **Луна-19** (СССР, 1971) — уточнение данных 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.

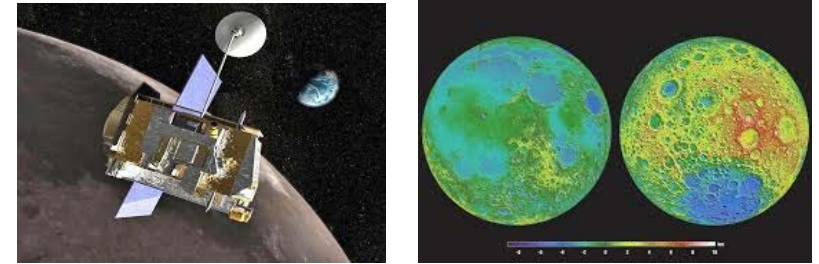


Данные о параметрах коры Луны

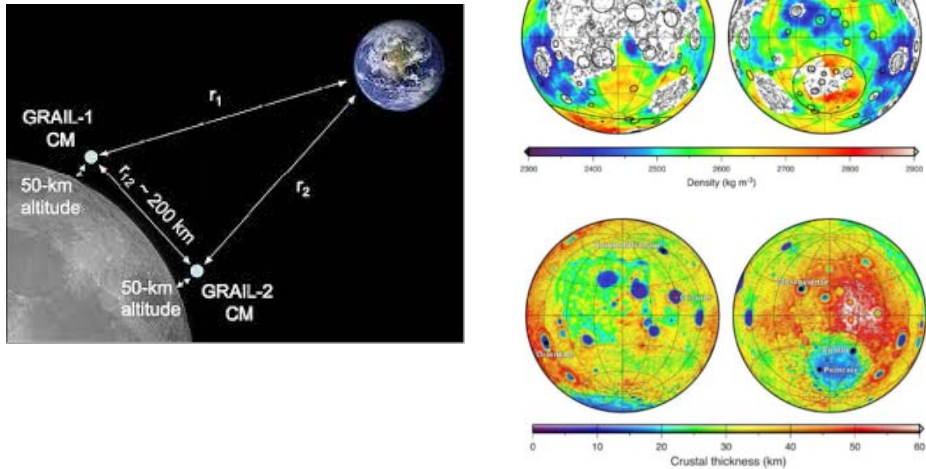
Сейсмология – данные с аппаратов Apollo (1969-1972), использованы для оценки толщины коры.



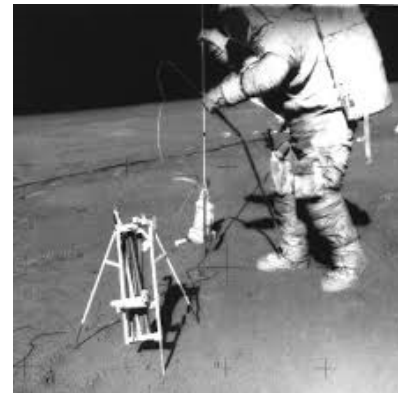
Топографические данные (LRO, LOLA-Lunar Orbiter Laser Altimeter)



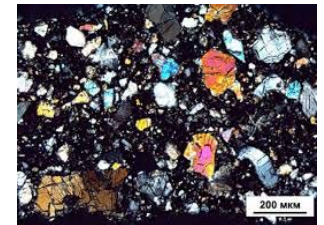
Гравиметрия – спутниковые миссии (Lunar Prospector, Kaguya, GRAIL)



Измерение тепловых потоков (Apollo 15 и 17)



Исследование Образцов



Моделирование

Данные о параметрах коры Луны

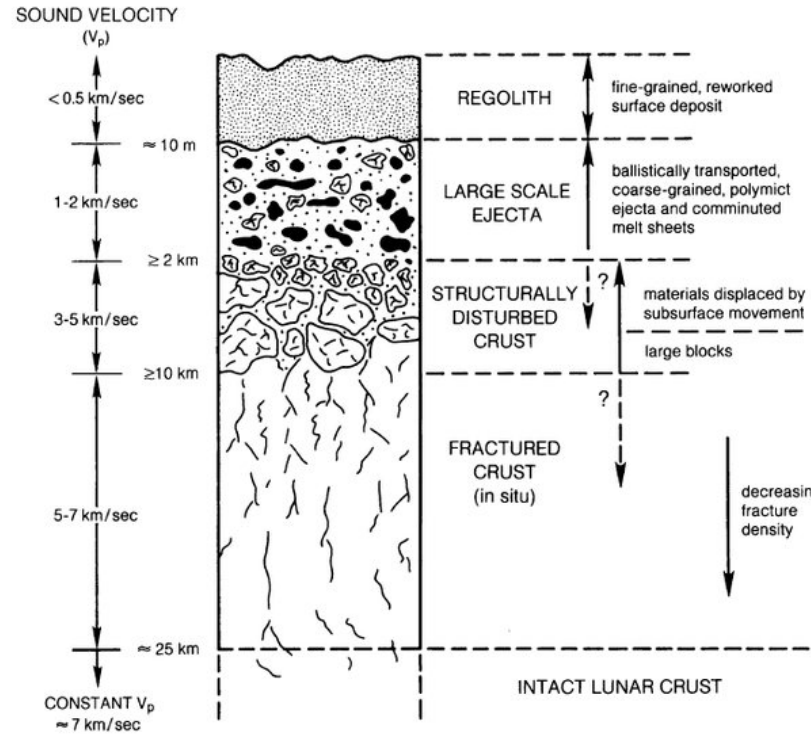


Базальты

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/м³, средняя 2550 кг/м³
- Пористость 6-12%
- Состав, плотность зерна:
 - анортозиты 2,7 г/см³
 - базальты 3,0 г/см³
- 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, ρ_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,

ρ_s – плотность зерна (нулевая пористость),

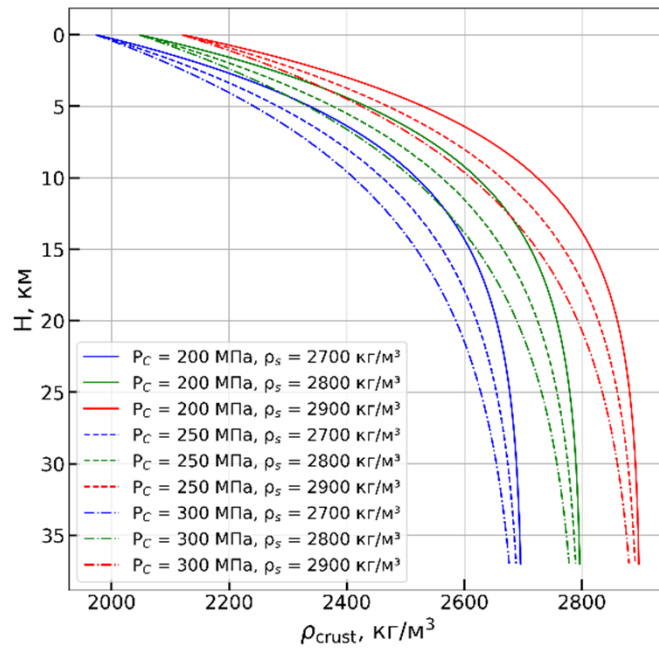
$P(H)$ - литостатическое давление на глубине H ,

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

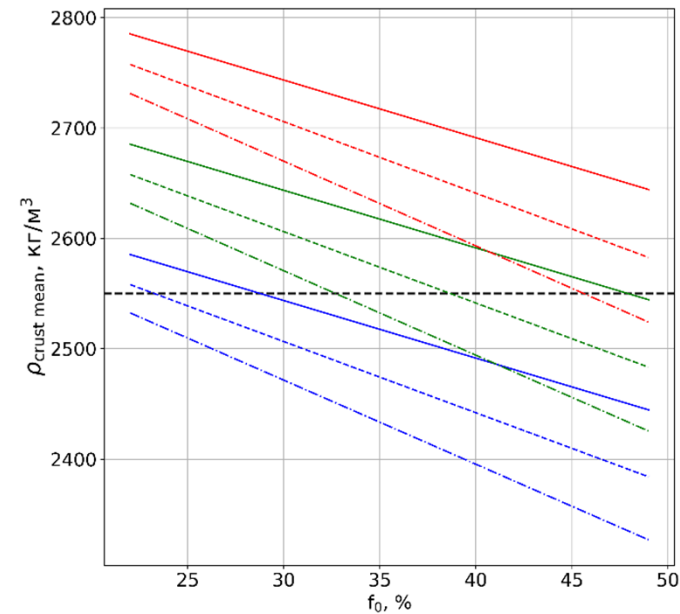
P_C – давление закрытия пор,

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

Расчетная плотность в коре

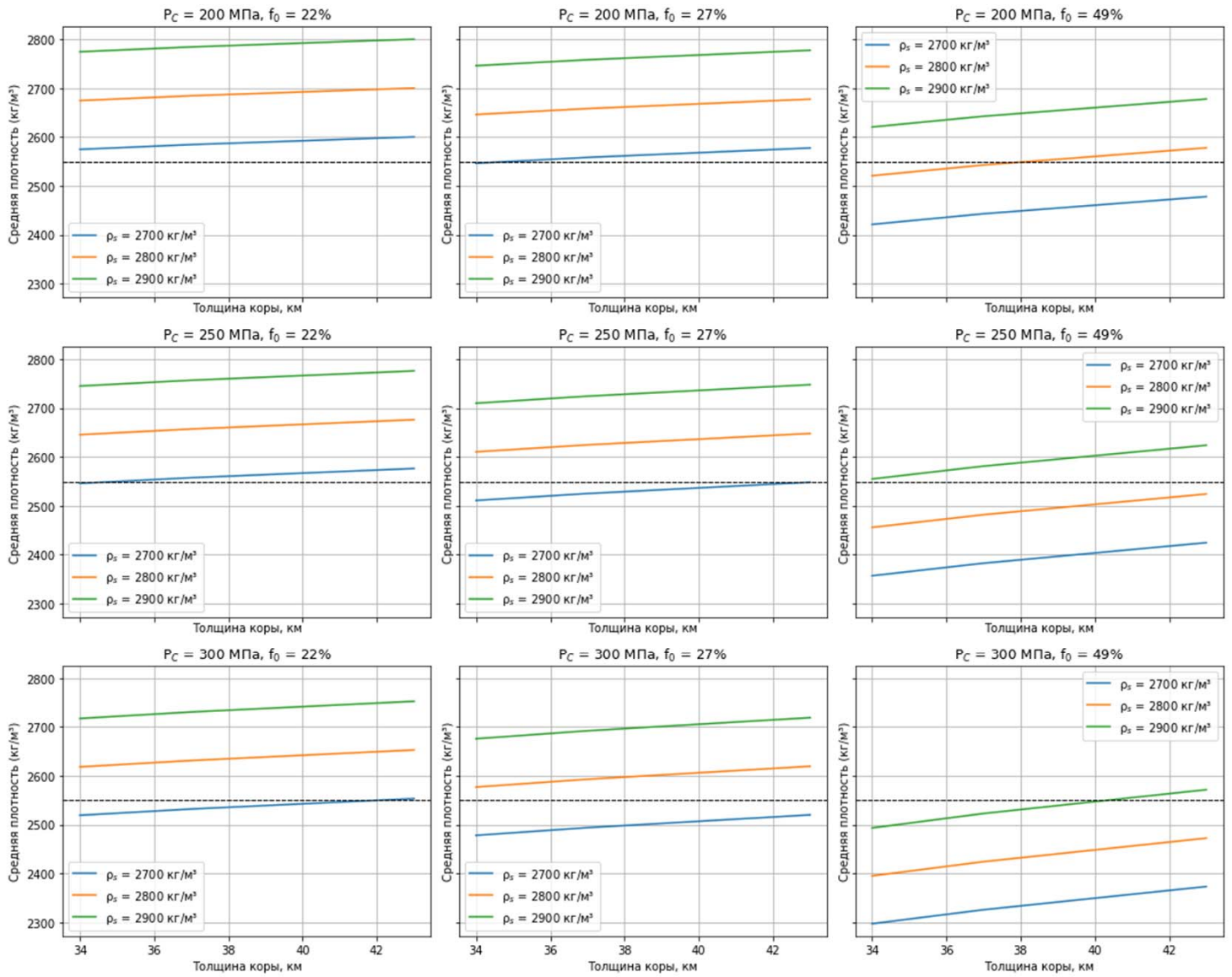


Изменение плотности с глубиной
 $f_0 = 27\%$

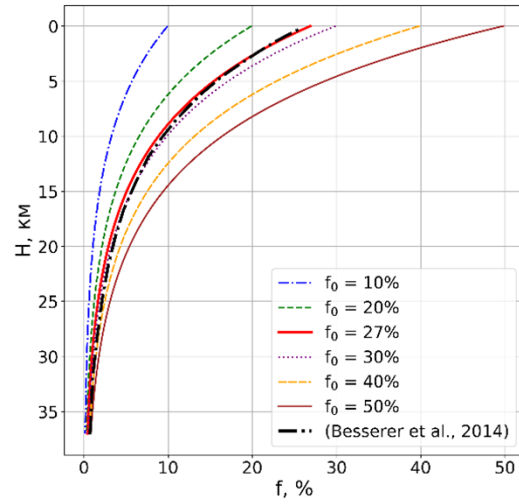


[Wieczorek et al, 2013]

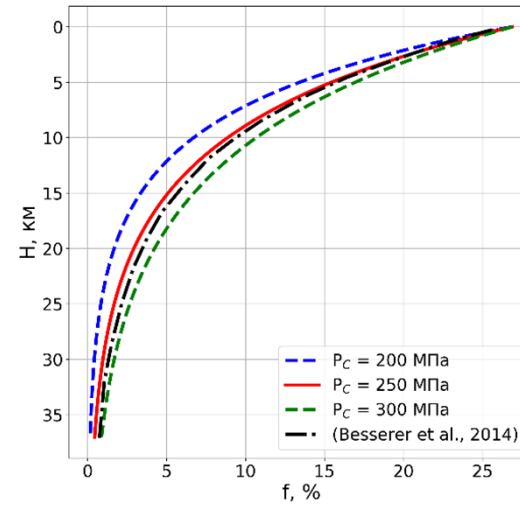
Средняя плотность в зависимости от пористости на поверхности



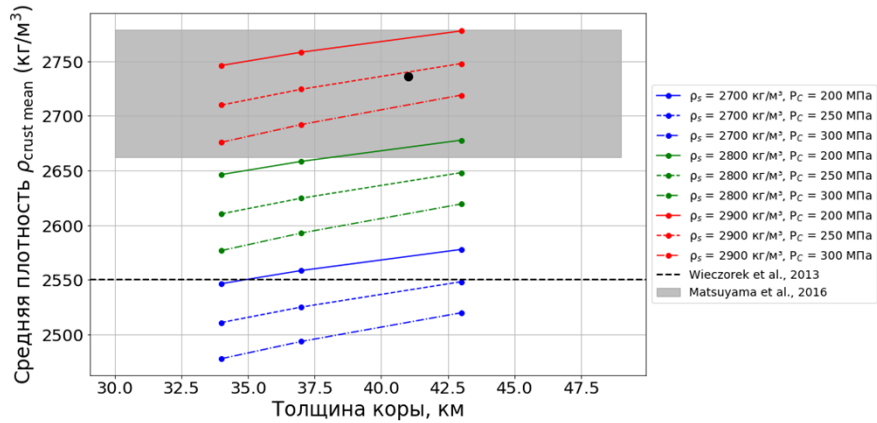
Пористость в коре



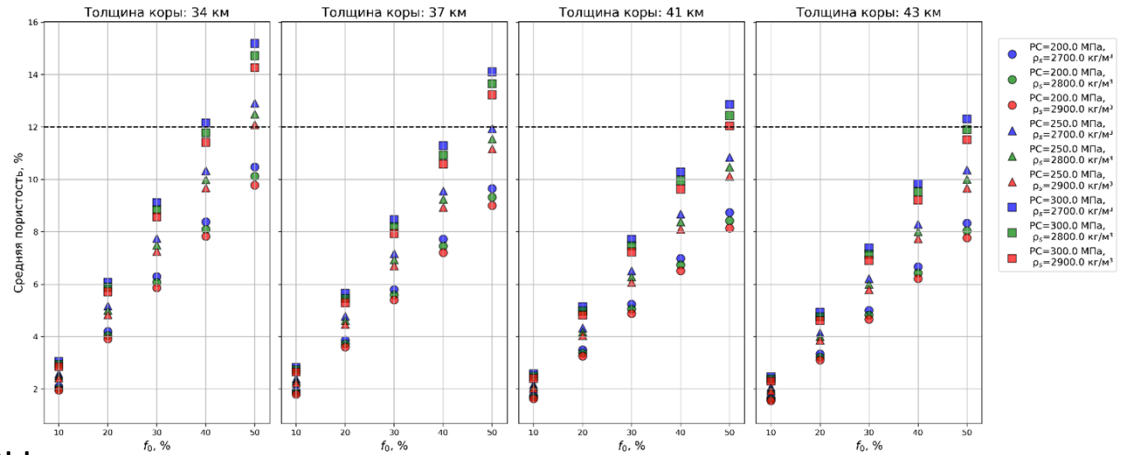
$P_C = 250$ МПа, $\rho_s = 2700$ кг/м³



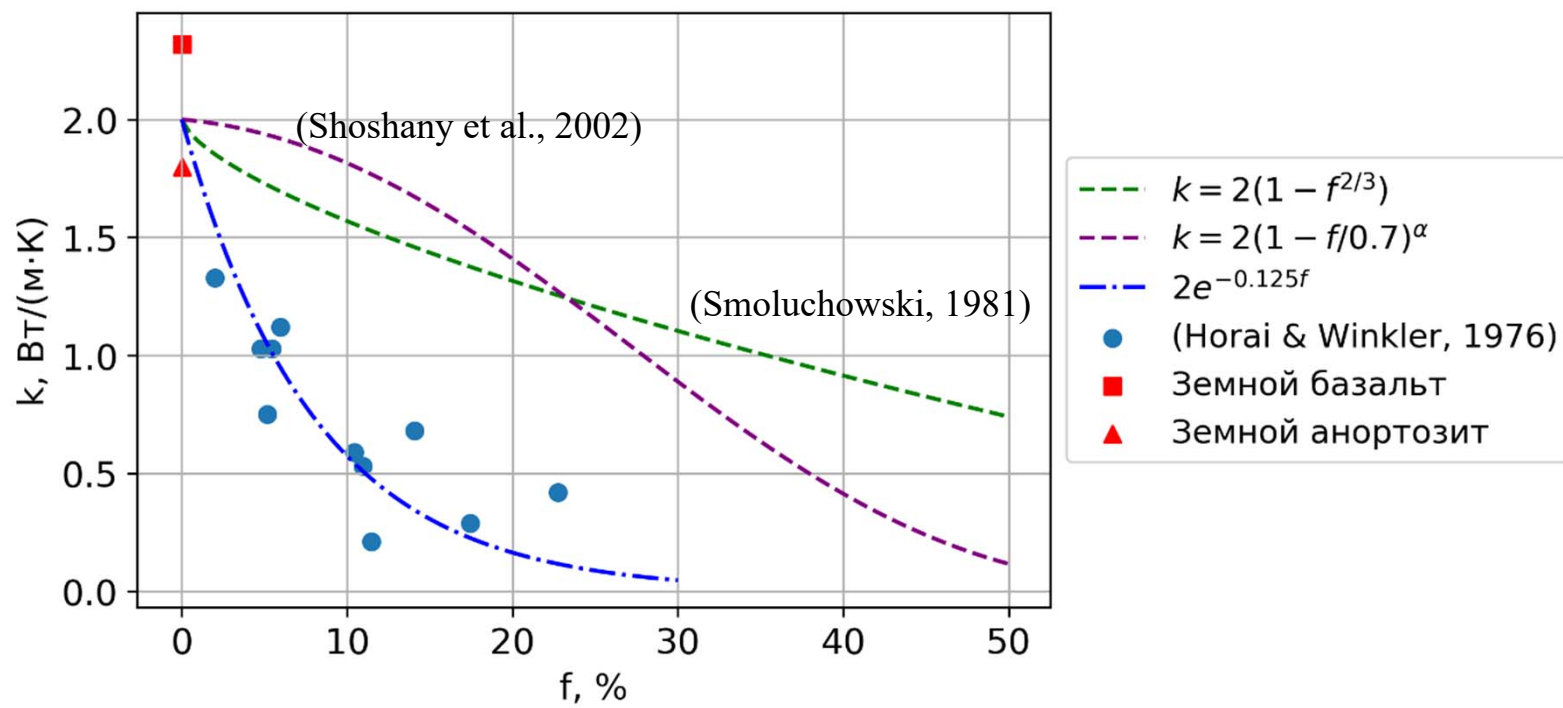
$\rho_s = 2700$ кг/м³, $f_0 = 27\%$



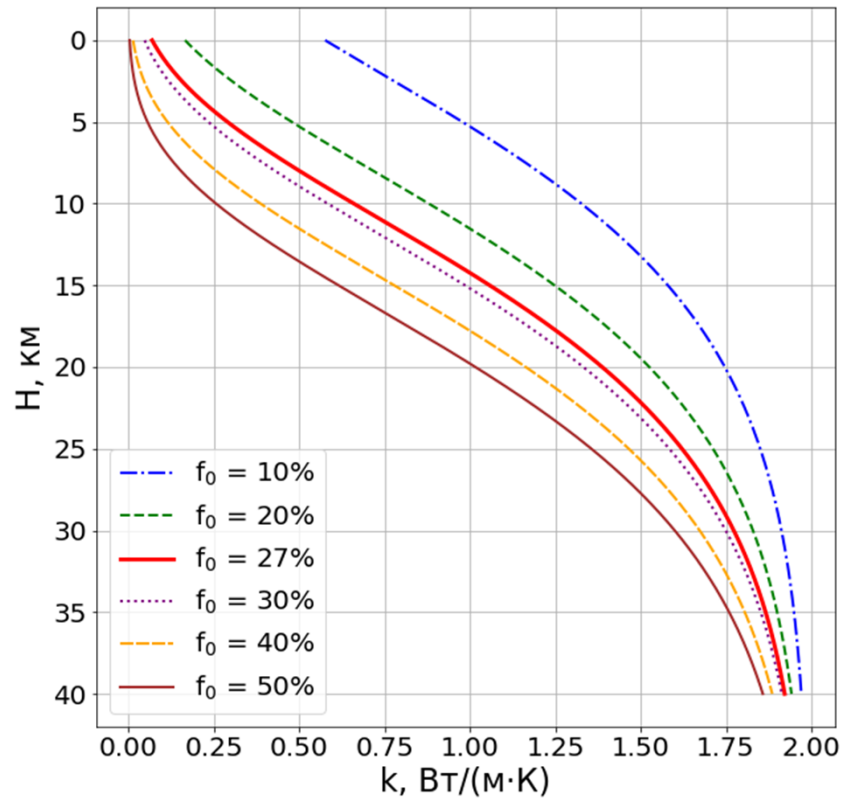
Влияние толщины коры



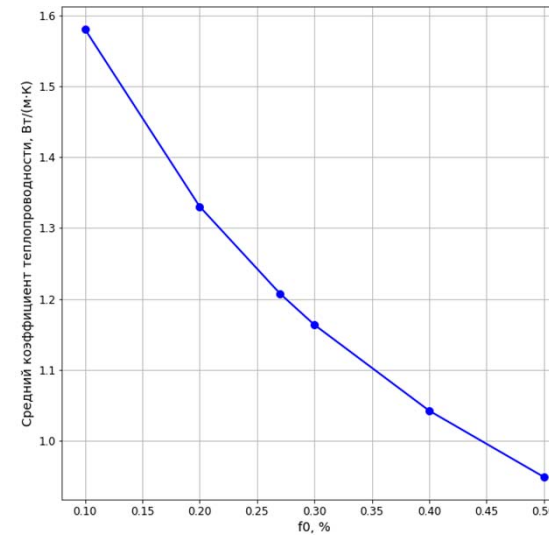
Коэффициент теплопроводности



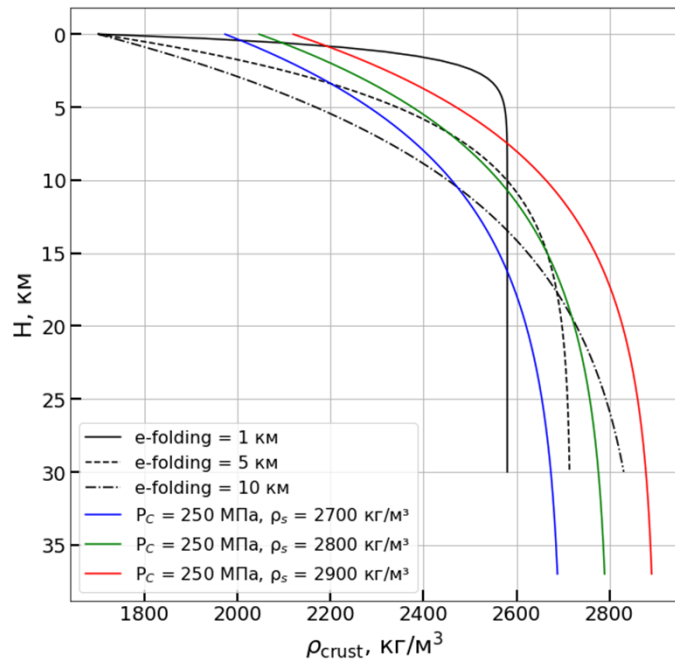
Расчетное распределение коэффициента теплопроводности по глубине



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

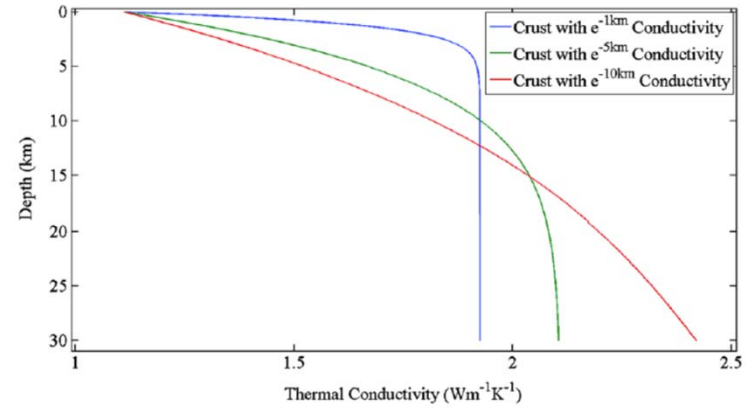


Эквивалентный коэффициент теплопроводности в коре

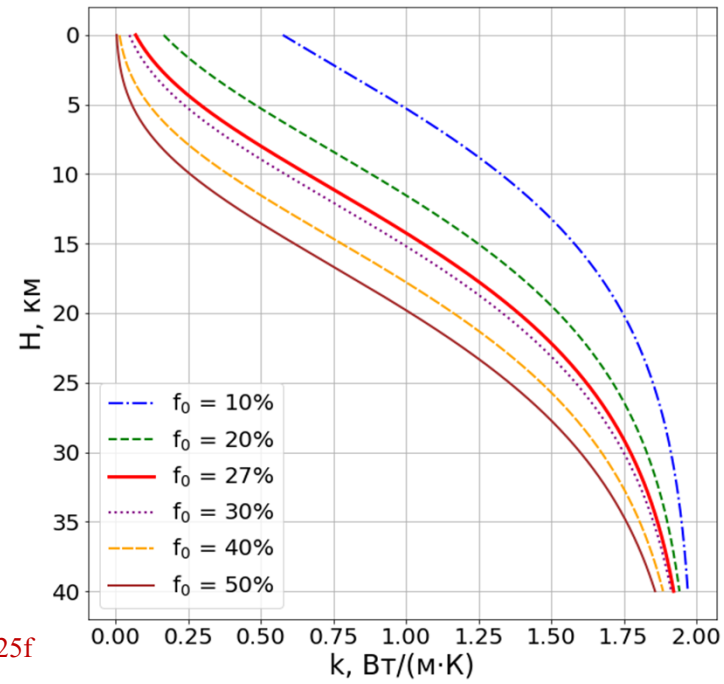


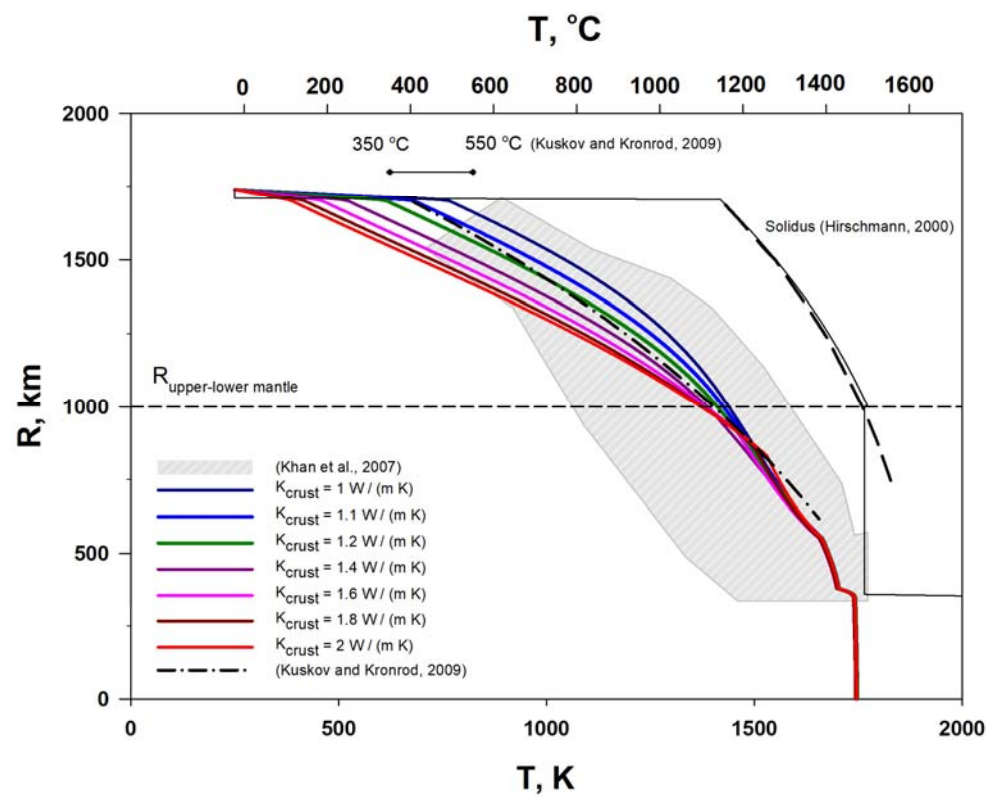
Сравнение с (Siegler et al., 2014)

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



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





Коэффициент теплопроводности в коре оказывает существенное влияние на тепловые модели Луны

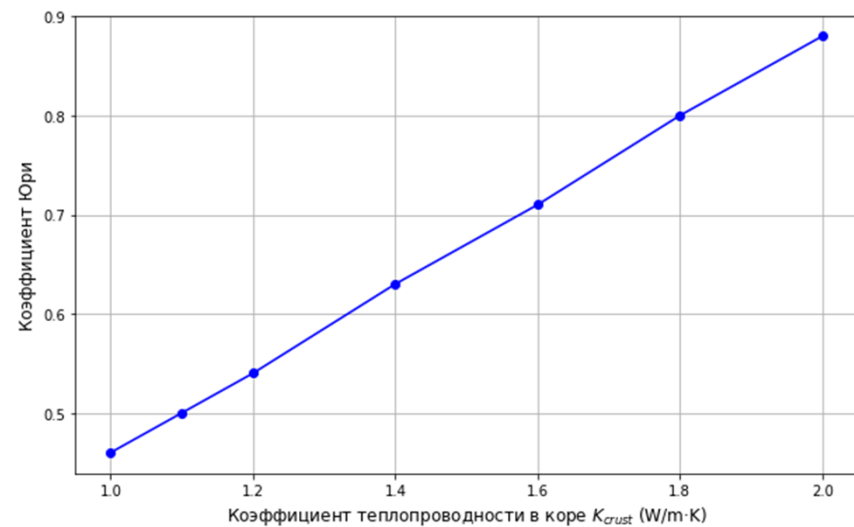
Коэффициент Юри (Urey ratio) - отношение тепла, производимого за счет радиоактивного нагрева, к тепловому потоку, теряемому через поверхность планеты

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_{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