

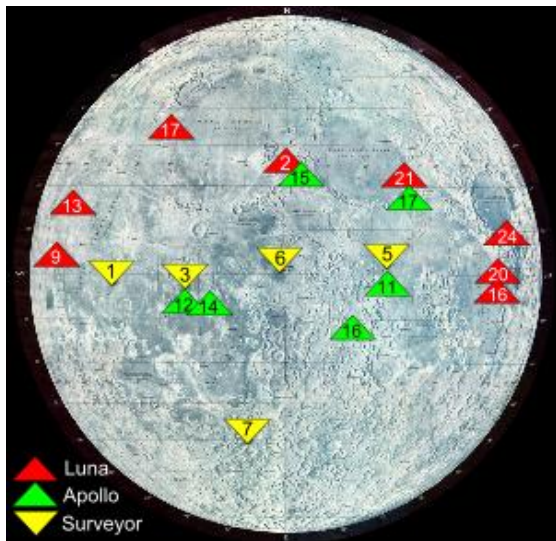
# Пористость лунной коры: моделирование и сопоставление с данными миссии GRAIL

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

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН



# Фактические данные



Места прилунения аппаратов по программам «Луна» 1970-1976 (СССР), «Сервейер» (США) и «Аполлон» 1961-1975 г (США)

## ✓ Геофизические данные:

- Электромагнитное зондирование
- Измерение теплового потока
- Геодезические исследования (Миссия GRAIL, Лазерные эксперименты LLR)
- Сейсмические эксперименты «Аполлон»;

## ✓ Геохимические и петрологические данные:

- Химический анализ грунта;
- Образцы лунного грунта;
- Метеориты

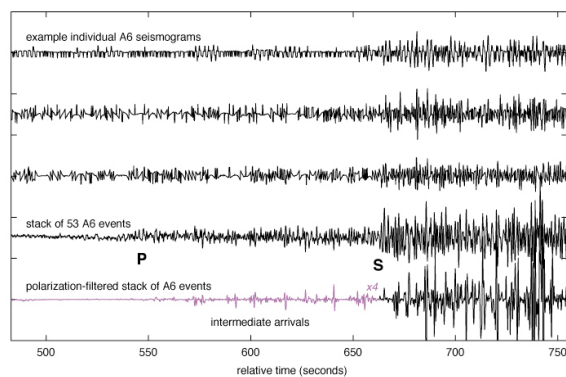
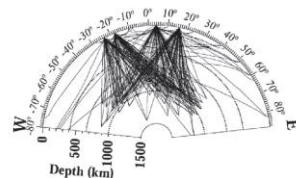
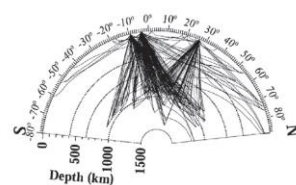
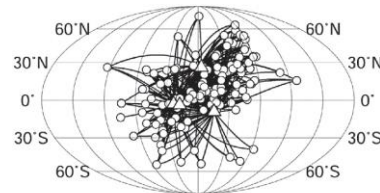
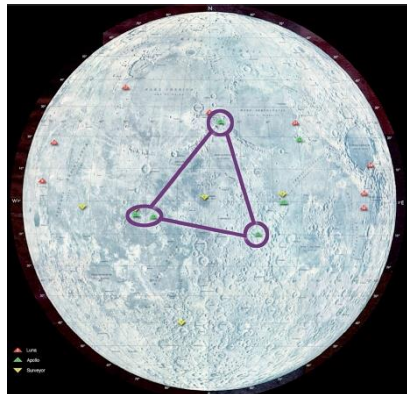
## ✓ Лабораторные эксперименты/Физика минералов/Термодинамика

Миссия / Программа	Страна / Агентство	Годы	Ключевой вклад
«Луна» (серия автоматических аппаратов)	СССР	1959–1976	Первая межпланетная станция («Луна-1»), первые мягкие посадки, доставка образцов грунта.
«Луноход»	СССР	1970–1973	Первые луноходы: изучение свойств реголита, состав анализ.
Apollo	NASA, США	1969–1972	Пилотируемые полеты с высадками, сбор образцов, тепловой поток, сейсмология.
Lunar Prospector	NASA, США	1998–1999	Карта концентраций Th, K, U; оценка тепловыделения.
Kaguya (SELENE)	JAXA, Япония	2007–2009	Топография, состав, гравитация Луны.
Чандраян (1, 2, 3)	ISRO, Индия	2008–2023	Орбитальные исследования, посадка (Чандраян-3 успешна), луноход.
LCROSS	NASA, США	2009	Подтверждение водяного льда на южном полюсе.
LADEE	NASA, США	2013–2014	Исследование экзосферы и пылевой среды Луны.
LRO	NASA, США	2009–н.в.	Температурные, топографические данные; уточнение теплового потока.
GRAIL	NASA, США	2011–2012	Высокоточное гравитационное поле; оценка толщины, плотности и пористости коры.
Чанъэ (3,4,5)	CNSA, Китай	2013–н.в.	Исследование реголита, доставка образцов.
Луна-25	Роскосмос	2023	Миссия России, выход на орбиту, потеря связи после запуска.
Будущие миссии (Луна-26,27,28, Artemis и др.)	Роскосмос, NASA, JAXA и др.	2025–2035	Орбитальные, посадочные миссии, пилотируемые полеты, дальнейшее изучение и освоение Луны.

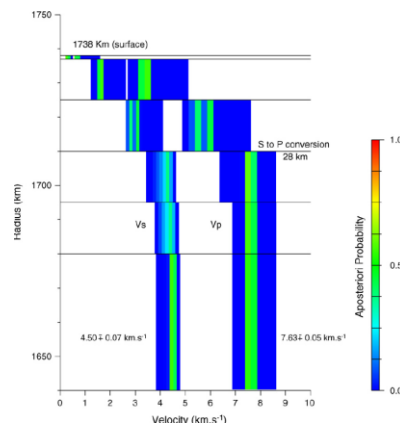
# Ключевые миссии для понимания структуры Луны

# Apollo

## Сейсмические данные



~12500 сейсмических событий



Лунный модуль «Аполлона»  
на поверхности Луны

## Тепловой поток



Зонд Apollo 17

Аполлон - 15       $21 \pm 3$  мВт/м<sup>2</sup>  
Аполлон - 17       $15 \pm 2$  мВт/м<sup>2</sup>  
[Langseth et al., 1972, 1976]

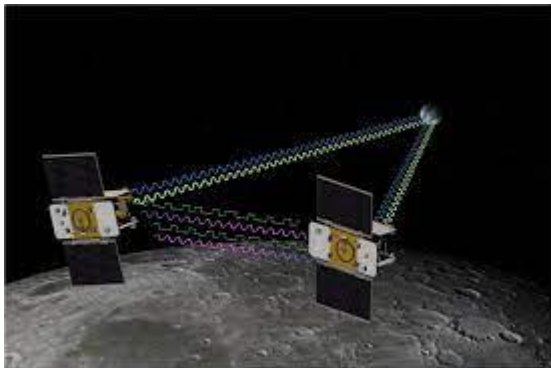
# Исследования гравитационного поля Луны

## Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) 2009 г.

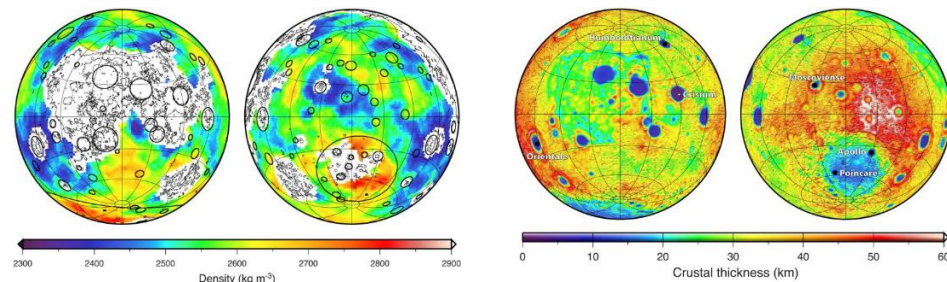


- ✓ масса
- ✓ момент инерции
- ✓ радиус
- ✓ числа Лява
- ✓ плотность/пористость коры
- ✓ размеры ядра
- ✓ добротность

## The Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL) 2011 г.



### Толщина и плотность коры



[Wieczorek et al., 2013]



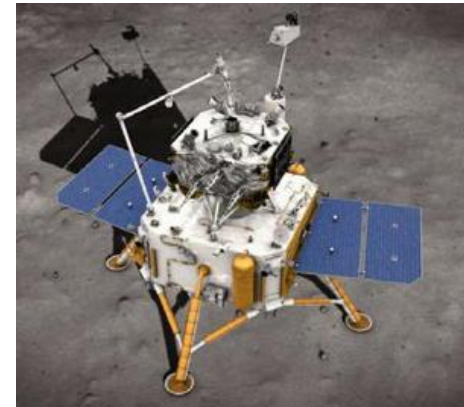
# Образцы лунного грунта

"Луна-16", "Луна-20" и "Луна-24" (1970-1976) - 326 граммов

«Аполлон» (1961-1975 гг) - 382 кг лунного грунта.

Чанъэ-5 (2020) Около 2 кг грунта

Чанъэ-6 (2024) Образцы грунта обратной стороны Луны – около 2 кг



# Лунные метеориты

За последние 50 лет собрано 430 образцов лунных метеоритов  
Более 700 кг

По составу лунные метеориты:

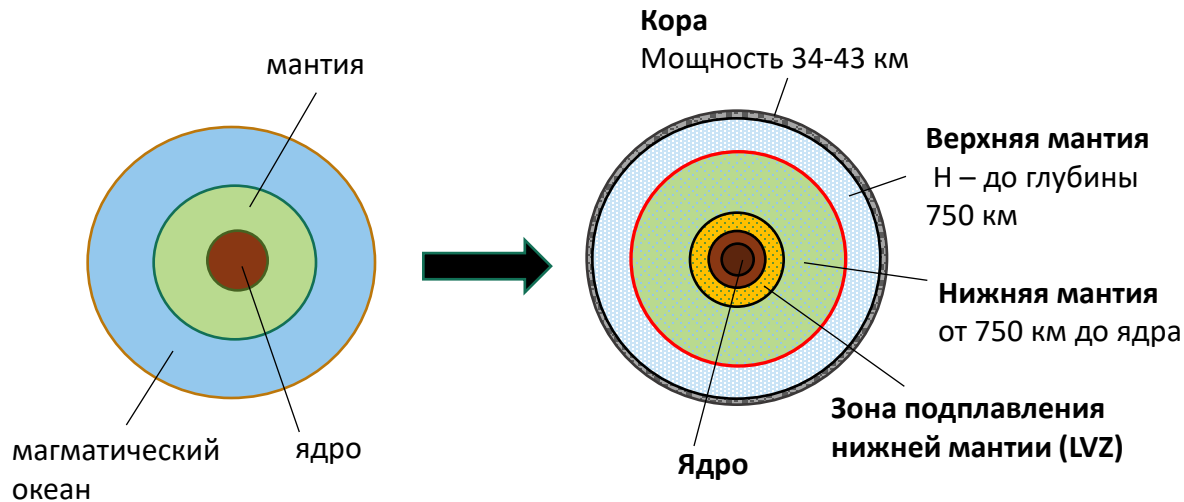
(1) материковые; (2) морские; (3) смешанные



NWA5000

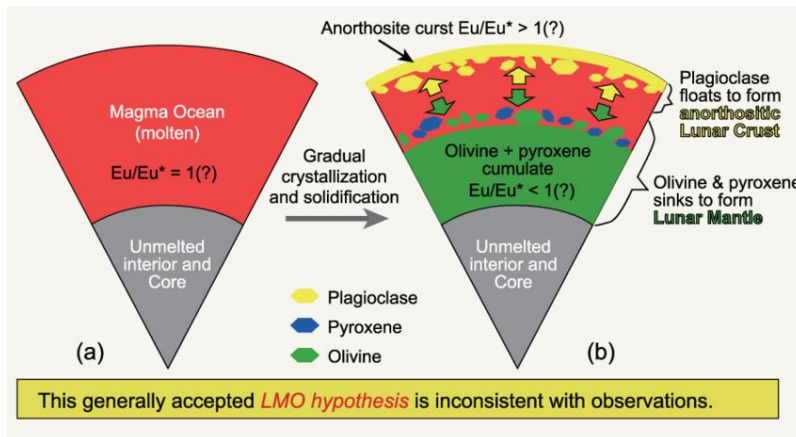
# Внутреннее строение Луны

## Модель магматического океана

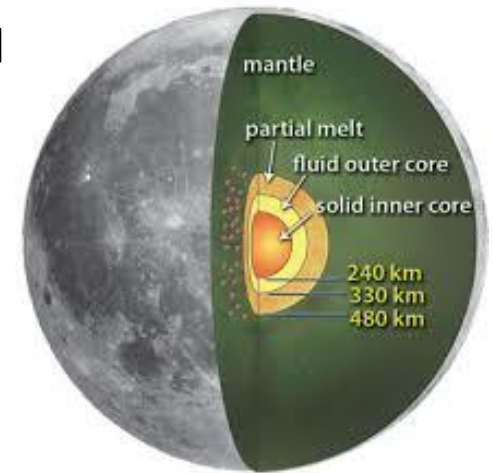


*До дифференциации*

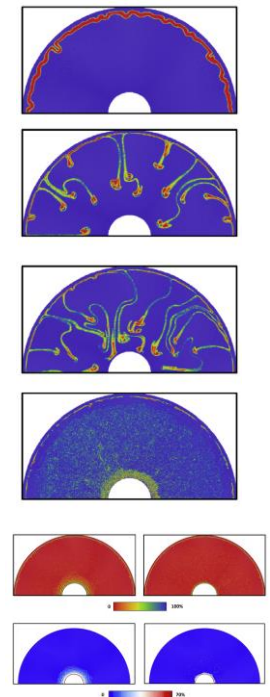
*После дифференциации*



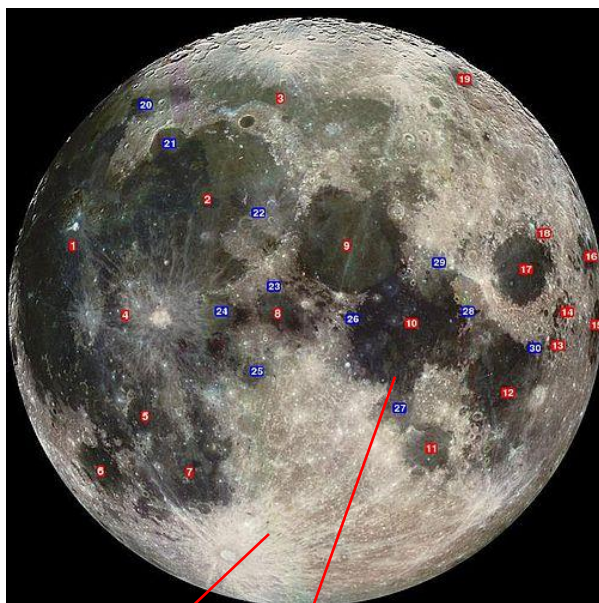
[Niu & O'Hara-NSR, 2015]



[Weber et al., 2011]



[Zhao et al., 2019]



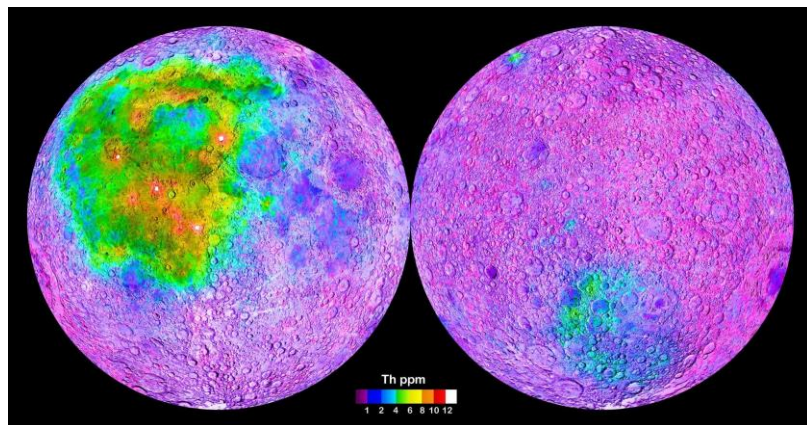
*Базальтовые моря*

*Анортозитовая материковая кора*

**Материковые породы** в основном представляют собой брекчии габбро-норит-троктолит-анортозитового состава (продукты ударного дробления коры)

**Морские породы** — магматические

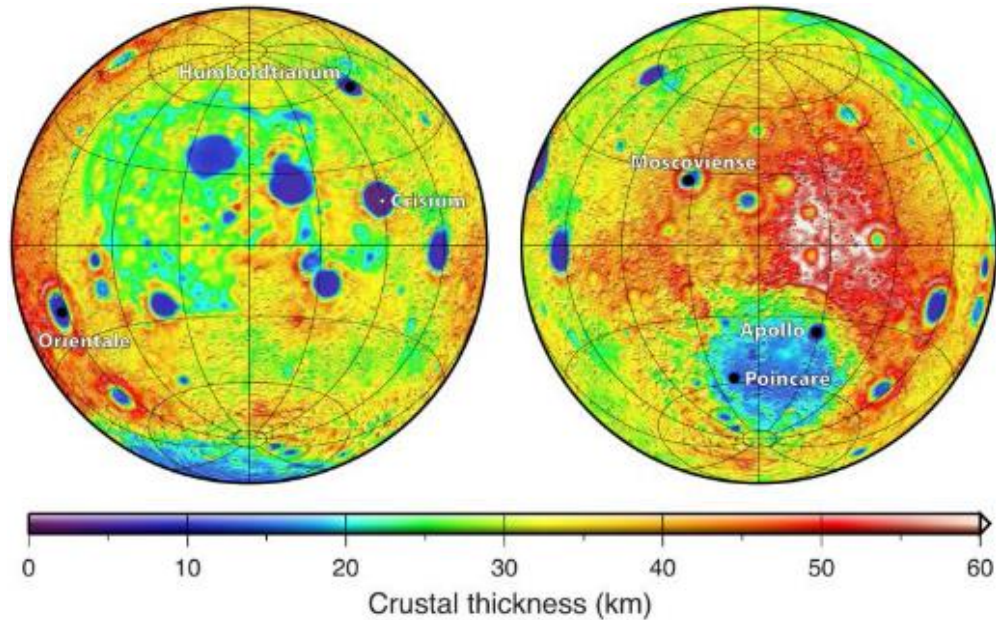
Главные породообразующие минералы морских пород — высококальциевый пироксен и плагиоклаз



**KREEP** — области, богатые несовместимыми элементами — результат вулканизма (частичное плавление мантии на глубине до 400 км. В основном 3.8–3.2 млрд лет назад в Океане Бурь - 1.1 млрд лет назад («Чанъэ-5»))



# Толщина коры



- Толщина коры Луны в среднем составляет около 40 км (34-43 км по Wieczorek ).
- Толщина коры неоднородна: с видимой стороны она тоньше примерно на 8-12 км, чем на обратной.
- В лунных морях кора может быть очень тонкой — 5-7 км.
- На обратной стороне в горных районах кора может достигать толщины до 100 км.

# Структура коры Луны

Кора ~40 км

$$\rho_{mean} = 2550 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho = 2300-2900 \text{ кг/м}^3$$

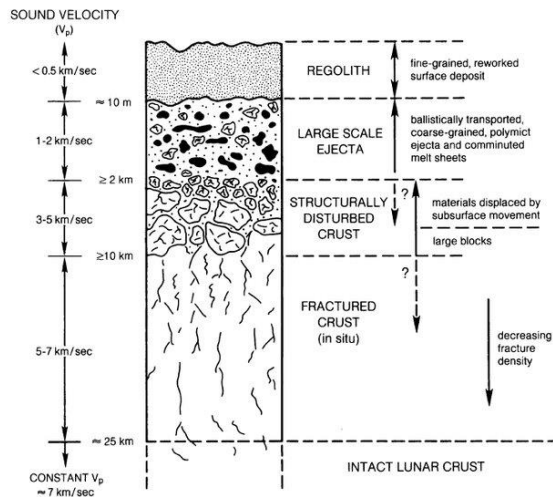
Состав, плотность зерна:

анортозиты 2,7 г/см<sup>3</sup>

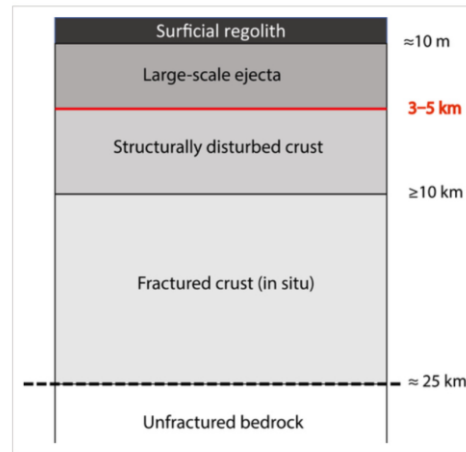
базальты 3,0 г/см<sup>3</sup>

Пористость 6-12%

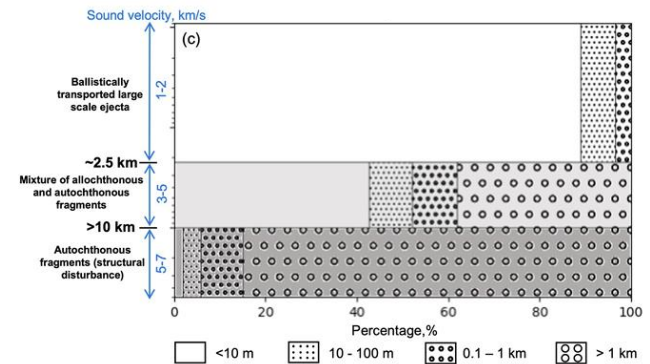
1. Поверхностный реголит (0–7м)  $\rho=1,36-1,85 \text{ г/см}^3$
2. Верхний мегареголит (7 м – 5 км)
3. Структурно нарушенная кора (5–10 км)
4. Трещиноватая кора (10–20 км)
5. Монолитная кора (>20 км)



[Heiken, G.H. et al., 1991]



[Izquierdo et al., 2021]



[Liu et al., 2022]

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

$$f(H) = f_0 \exp\left(-C \cdot P(H)/P_c\right)$$

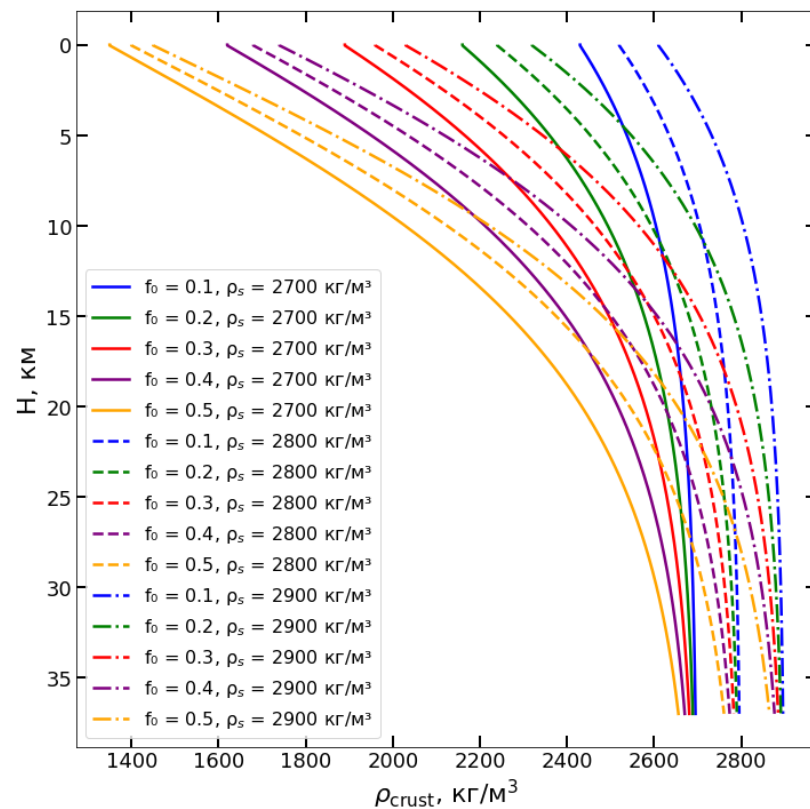
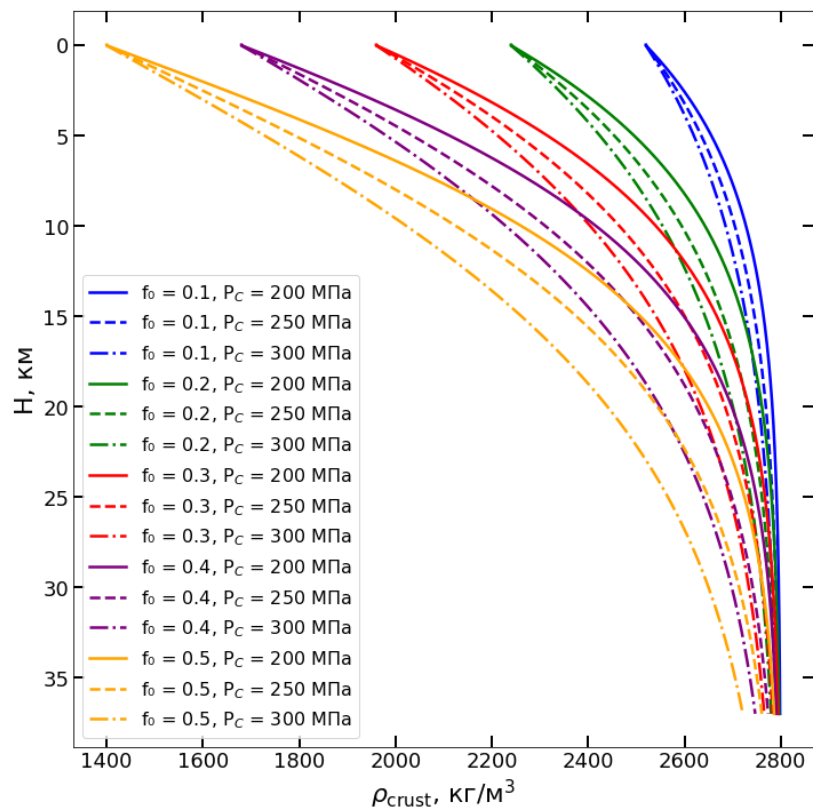
$$\rho(H) = \rho_s (1 - f(H))$$

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

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

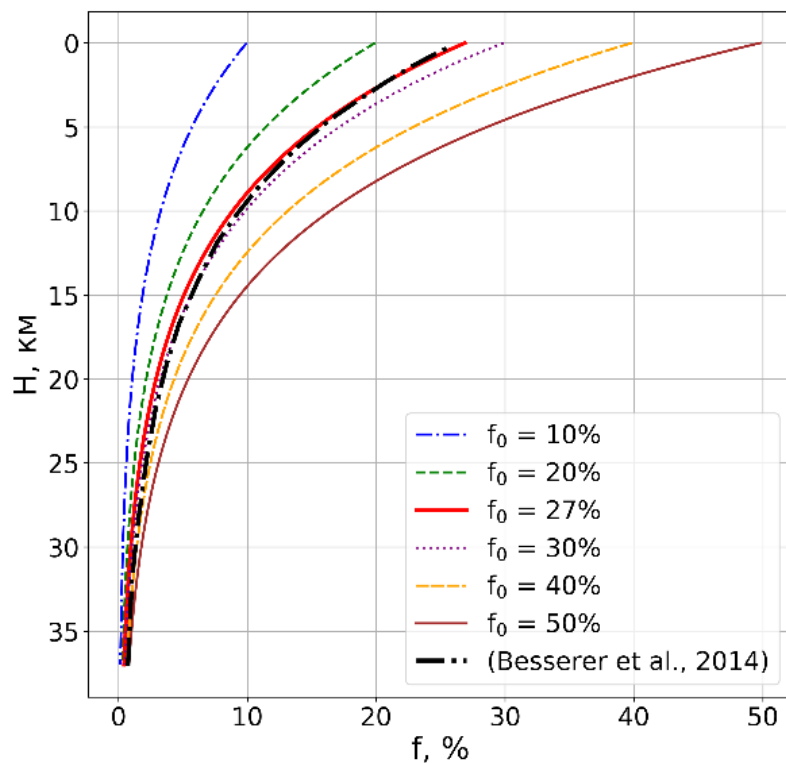
$P_c$  – давление закрытия пор,  $C \sim 6.15$  (Han et al., 2014)

# Расчетная плотность в коре при различных $\rho_s, f_0, P_C$

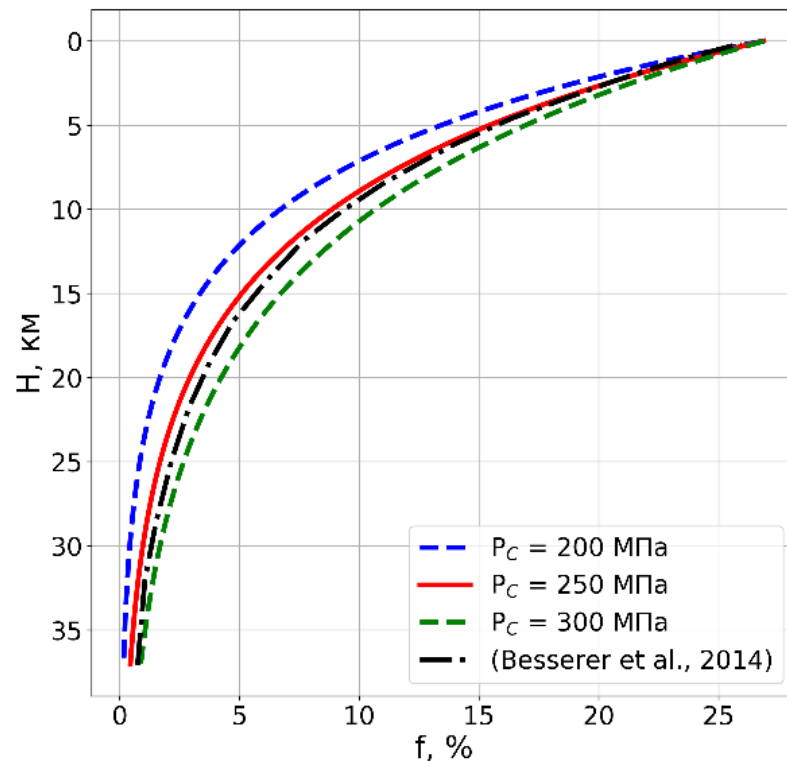




# Расчетная пористость в коре



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

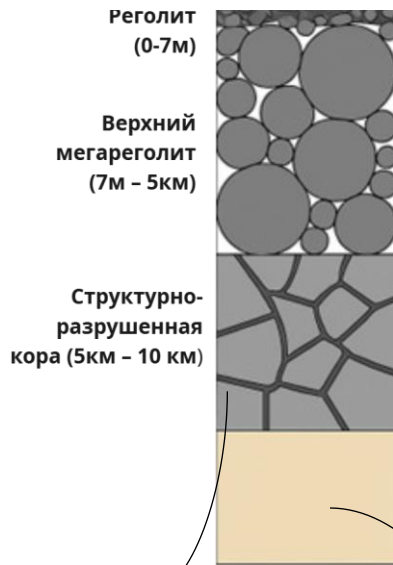


$\rho_s = 2700 \text{ кг/м}^3$ ,  $f_0 = 27\%$

Пористость на поверхности - основной параметр, определяющий распределение плотности и пористости в коре

$$\rho_s, f_0, P_C$$

# Модель пористой коры



## Область 1 (7 м – 5 км)

Фаза 1:  $r_1 = 0.5$  м,  $k(f) = 2e^{-0.125f}$  при  $f_{s1} = 0.1$   
(соответствует пористости на поверхности  $f_s = 0.2$ )

Фаза 2 (“заполнитель”):  $r_2 \sim 6.5$  см (получен из условия размещения частиц  $\Phi 2$  в порах между фрагментами  $\Phi 1$ )

Теплоперенос в области 1 описывается моделью Максвелла с учётом радиационного вклада в  $\Phi 2$

*теплопроводность композита:*

$$k_{\text{compos}} = k_1 \frac{k_2 + 2k_1 - \varphi(k_2 - k_1)}{k_2 + 2k_1 - \varphi(k_2 - k_1)}, \quad k_1 - \text{теплопроводность } \Phi 1, \\ k_2 - \text{теплопроводность } \Phi 2, \varphi - \text{объемная доля } \Phi 2$$

## Область 2 (5 – 10 км)

Фаза 3: “заполнитель”  $\Phi 1 + \Phi 2$  (=Область 1)

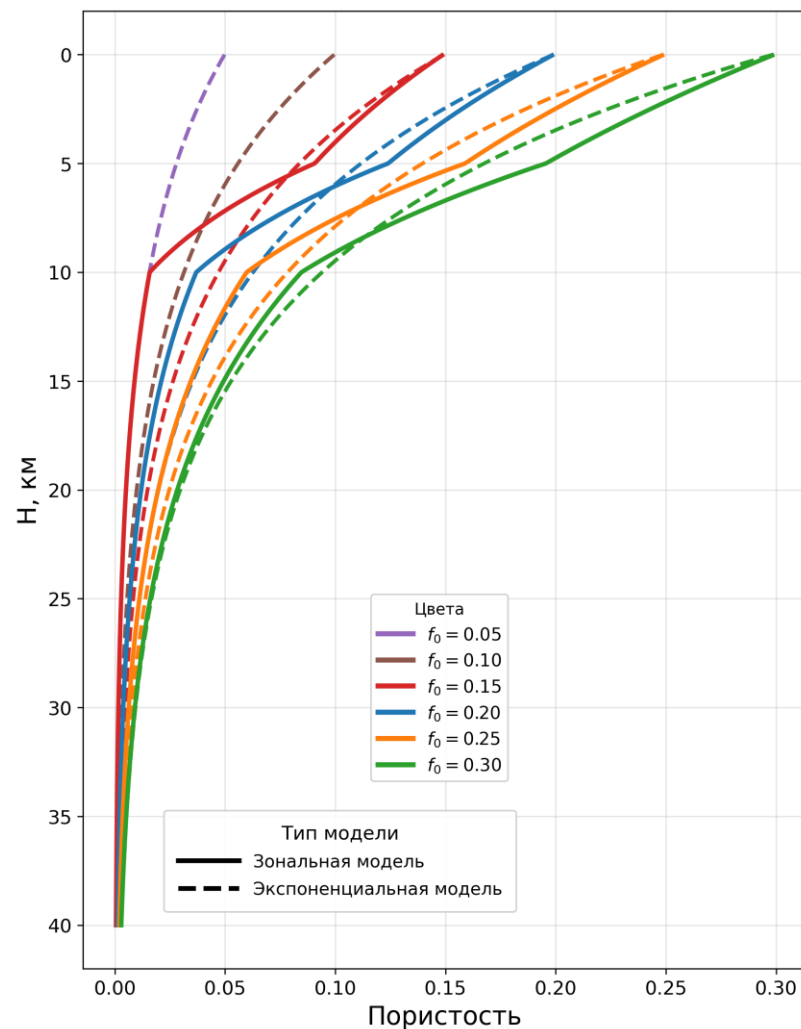
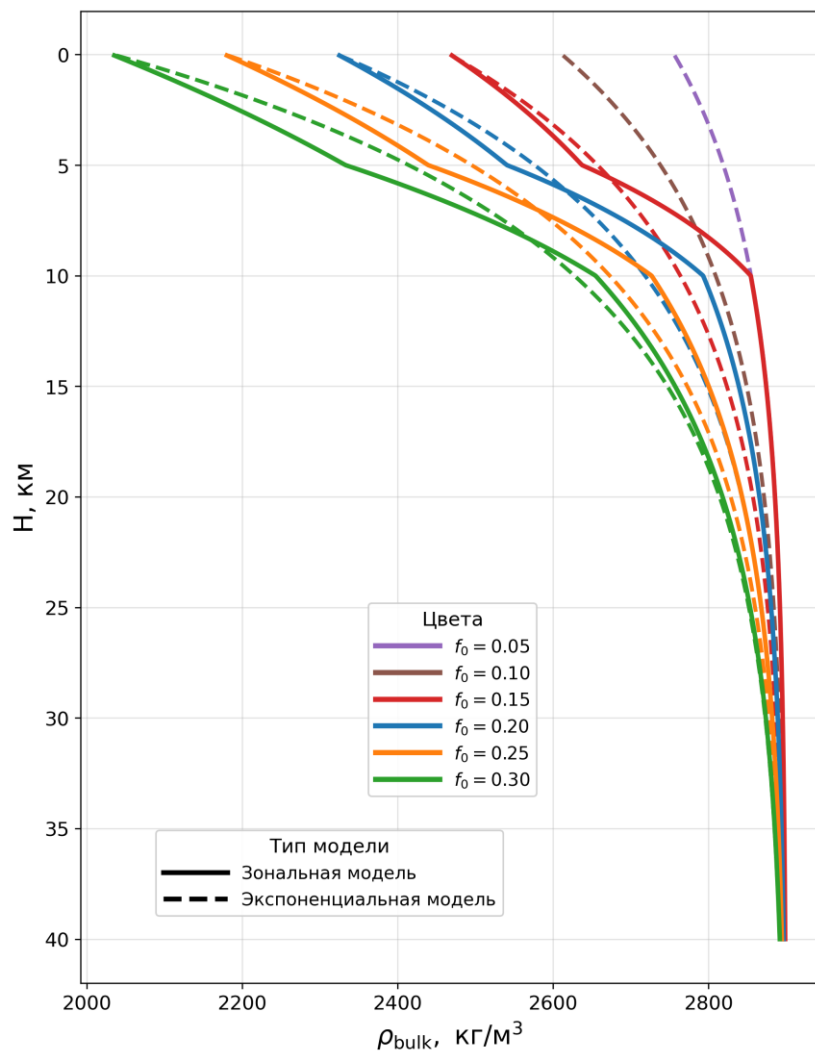
## Область 3 (10 – 20 км)

$$k(f) = 2e^{-0.125f} \text{ при } f_{s1} = 0.1$$

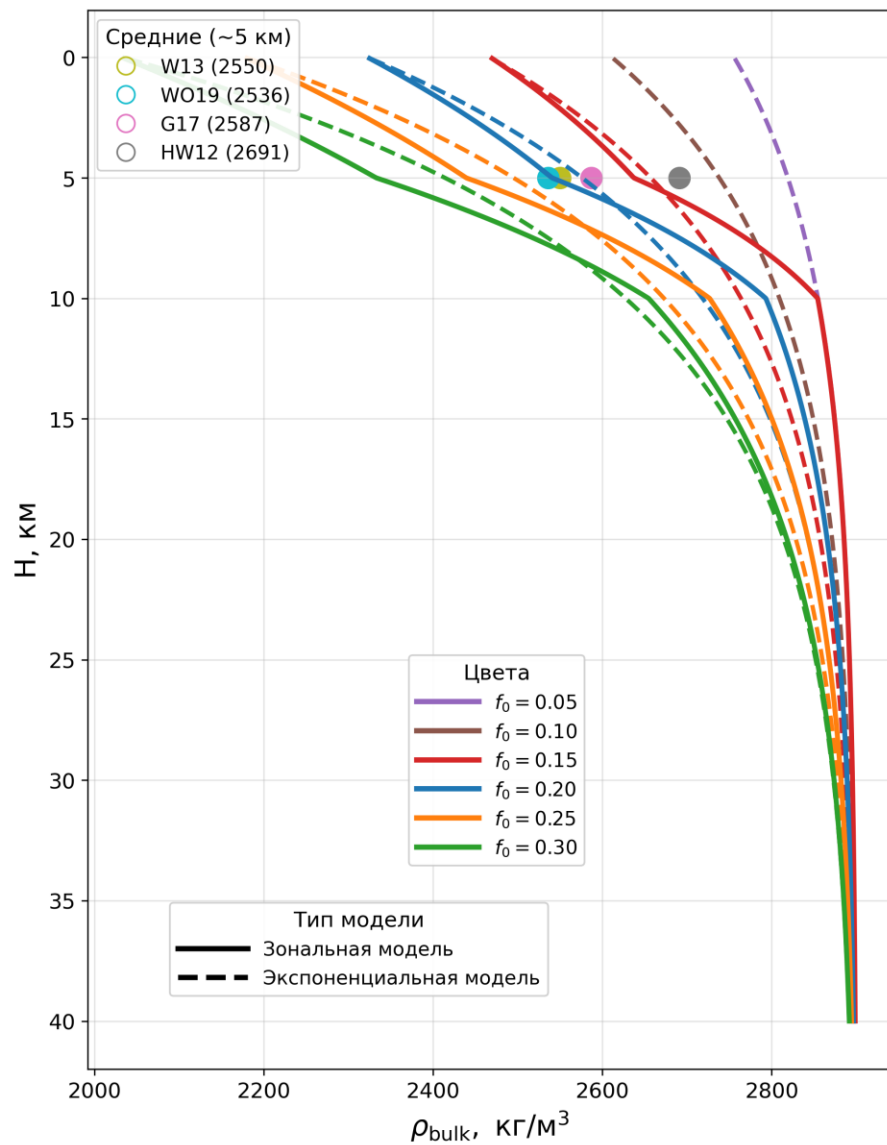
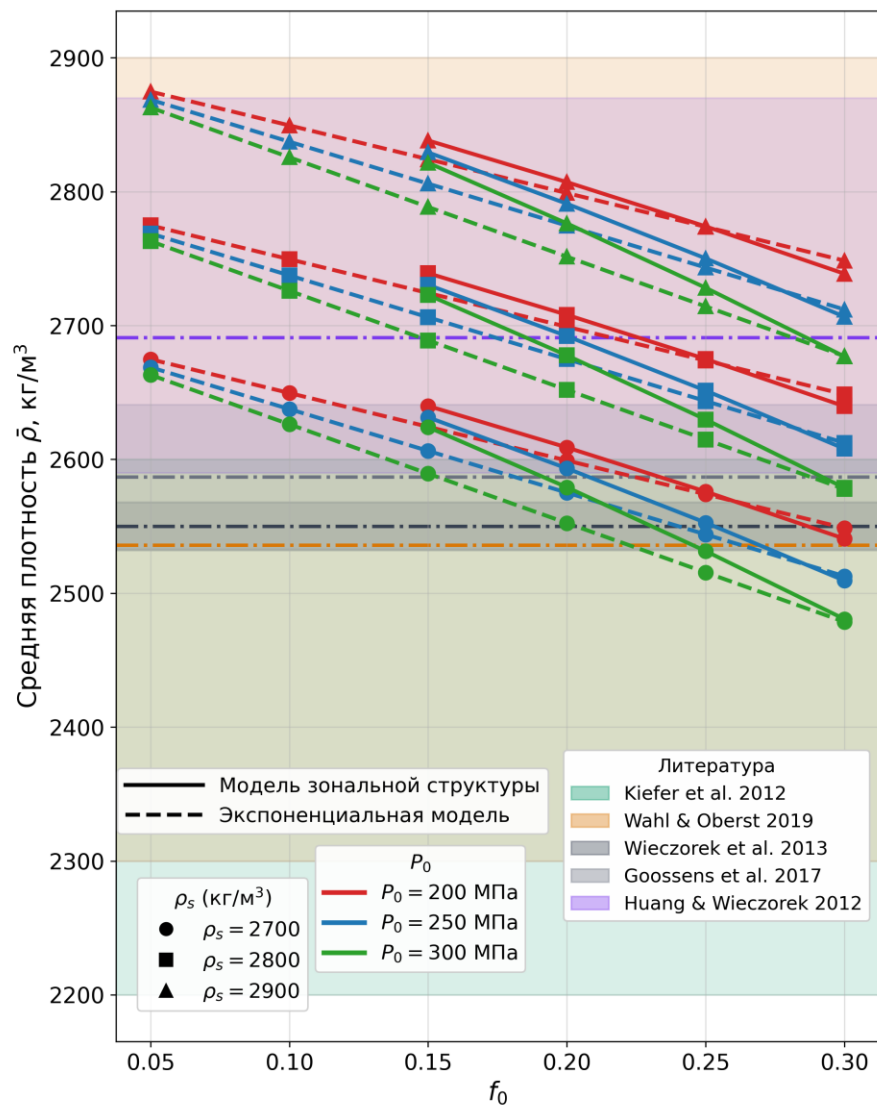
Фаза 4 крупные блоки,  $r_4$  меняется линейно с глубиной от 10м до 1 км

$$k_{\text{eff}} = k_3^\phi \cdot k_4^{(1-\phi)} \text{ (Ratcliffe Empirical Model)}$$

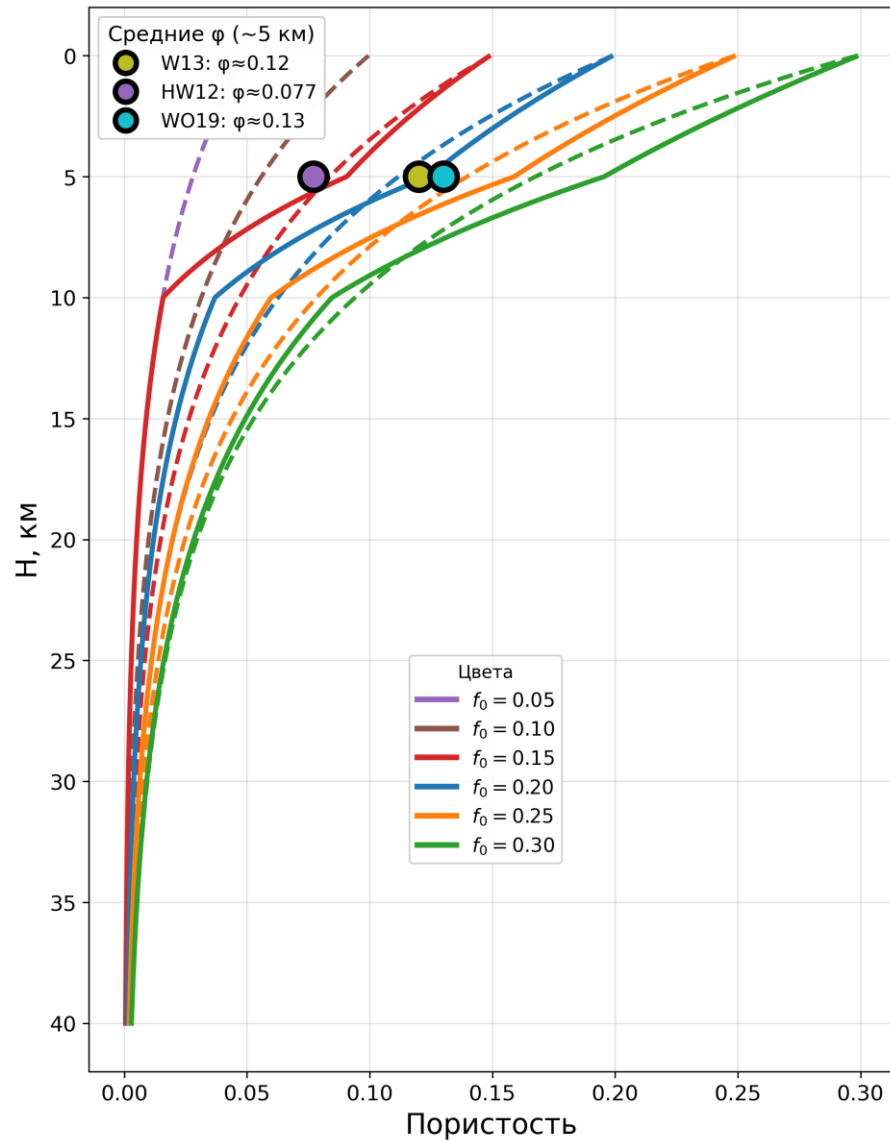
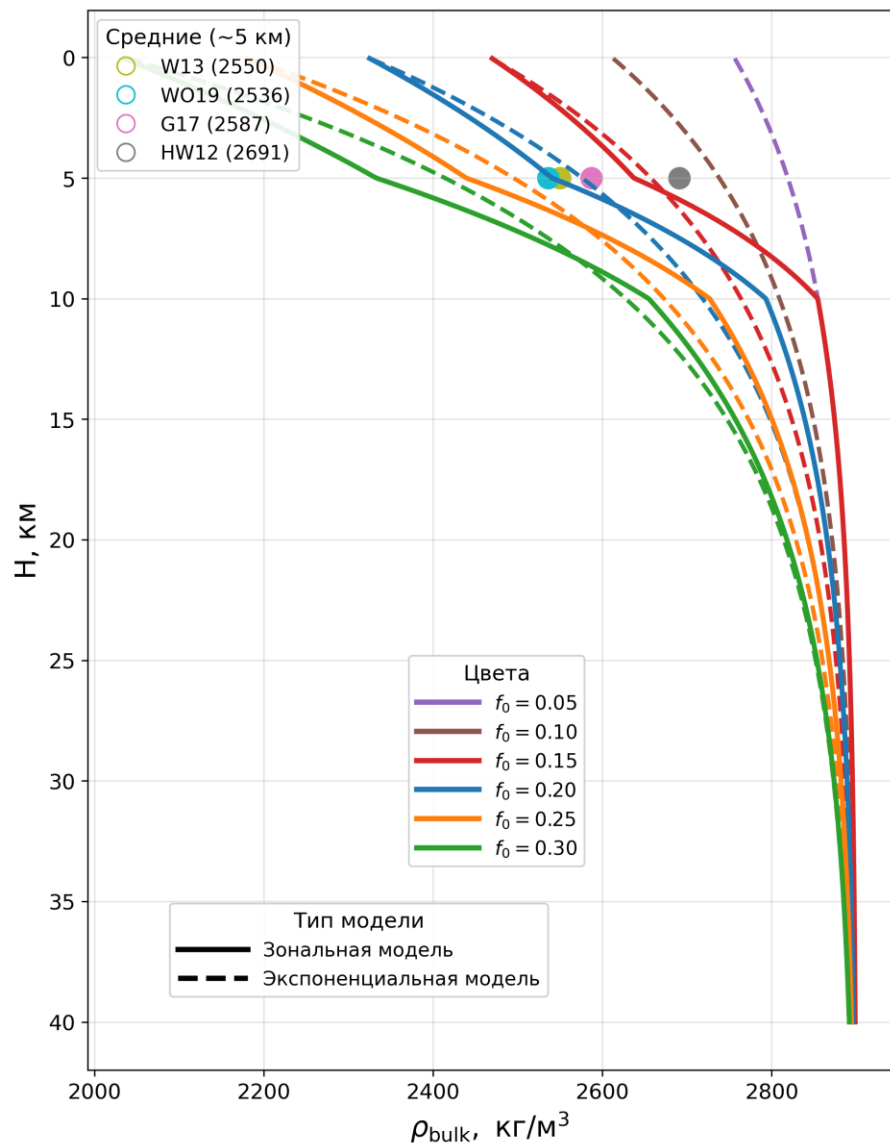
# Расчетные профили плотности и пористости в лунной коре



# Средняя плотность коры в сравнении с литературными данными по GRAIL







# Выводы

- 1. Предложена модель, описывающая распределение плотности и пористости в коре, согласованная с представлением о строении коры и данными GRAIL.
- 2. Пористость на поверхности является основным параметром, определяющим распределение плотности и пористости в коре.
- 3. Наиболее вероятные значения пористости на поверхности - 15-25%.



**Спасибо за внимание**