



Моделирование зодиакального излучения на основе расчетной фазовой функции

межпланетной пыли

авторы: Сальников К. С., Кустова Н. В., Тимофеев Дмитрий Николаевич | 1015k@mail.ru

Институт оптики атмосферы СО РАН

Лаборатория рассеяния электромагнитных волн



Российский
научный фонд

№ 25-22-00183

Что известно о межпланетной пыли?

- Межпланетная пыль пополняется за счёт комет и астероидов [1].
- Предполагается, что частицы имеют нанометровые и субмикронные размеры 0.05(ближе к Земле) - 50 мкм(ближе к Солнцу).
- Имеют неправильную геометрическую форму.
- Двигаются за счет действия сил: Пойнтига-Робертсона, радиационного давления и гравитационных резонансов [2].
- Спектры отраженного солнечного излучения отвечают различным поглощающим силикатам, такими как оливин, пироксин и энстатит [3].

[1] Vernazza et al. Interplanetary dust particles as samples of Ice Asteroids. *The Astrophysical Journal*, 806(2):204, 06 2015.

[2] Kelsall et al. The COBE diffuse infrared background experiment search for the cosmic infrared background. II. Model of the Interplanetary dust cloud. *The Astrophysical Journal*, 508(1):44, 11 1998.

[3] Takahashi et al. Mid-infrared spectroscopy of zodiacal emission with AKARI/IRC. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 71(6):110, 11 2019.

Зачем исследуют межпланетную пыль?

- Она рассеивает и поглощает солнечный свет;
- Излучает в инфракрасном диапазоне;
- Вносит паразитный вклад в общую яркость неба при фотометрии космоса в инфракрасном диапазоне [4];
- Поступая в атмосферу Земли, она становится центром конденсации облачных частиц;
- Влияет на радиационный баланс, глобальное потепление и климат [5].

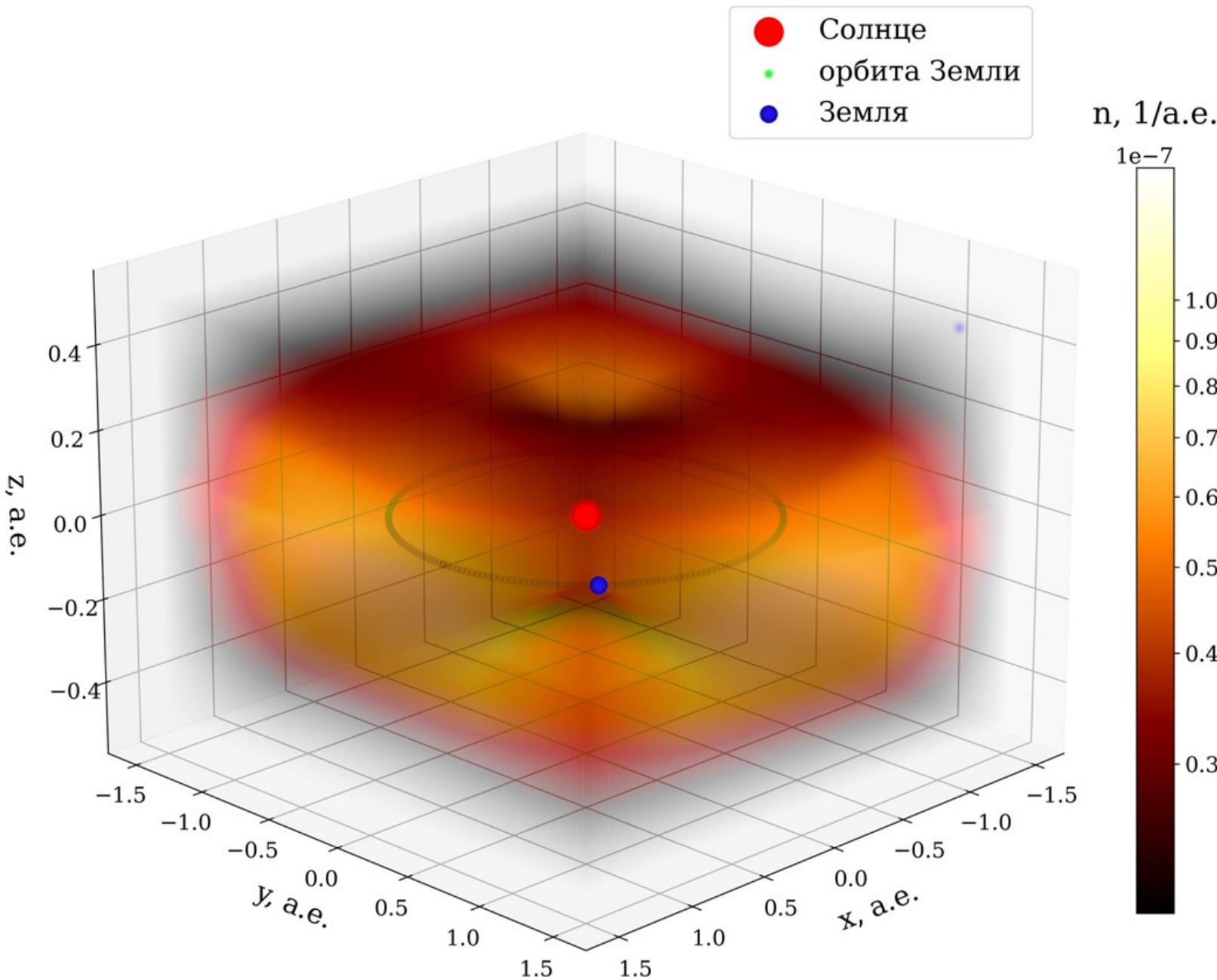
[4] San et. al. Cosmoglobe: Simualting zodical emission with ZodiPy. A & A, 666:A107, 2022.

[5] Ермаков В. И., Охлопков В. П., Стоjkов Ю. И. Влияние космической пыли на климат Земли. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 3, 2006.

Распределение пыли в 3D

Используем:

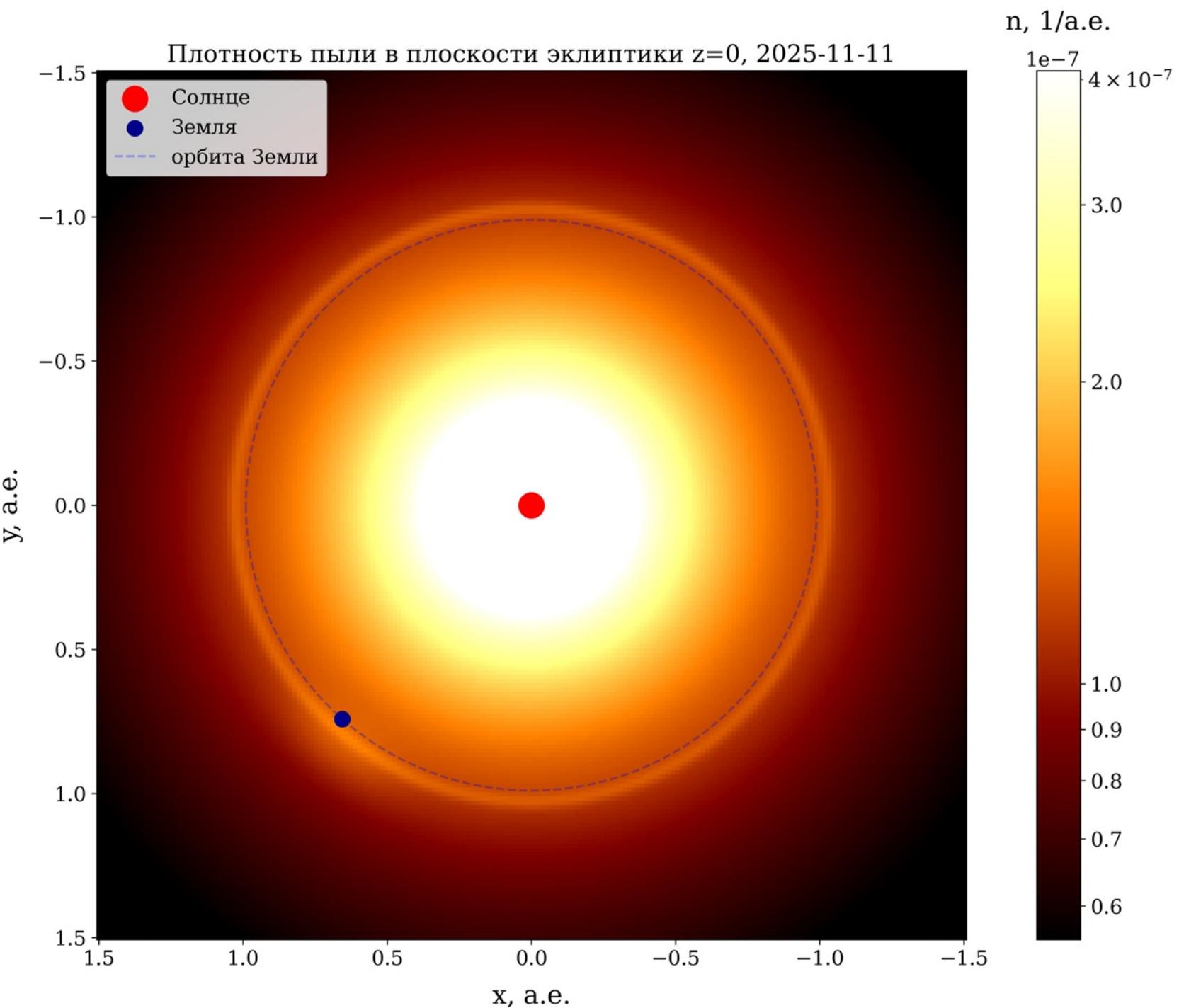
- Модель распределения пыли [2];
- Программу визуализации ZodiPy[4].



Распределение пыли в плоскости эклиптики

Области с пылью:

- Диффузное облако;
- Хвост пыли
следующий за Землей;
- Околосолнечное
кольцо;
- Три пылевые полосы.



Интегрирование вдоль луча зрения

Яркость рассеянного солнечного света на межпланетной по всем компонентам пыли (с) можно записать в виде

$$Z_\lambda = \sum_c \int n_c(x, y, z) A_{c,\lambda} F_\lambda \Phi_\lambda(\theta) ds,$$

где $A_{c,\lambda}$ – альбедо, F_λ – солнечный поток излучения, $\Phi_\lambda(\theta)$ – фазовая функция рассеяния на пыли, n_c – линейная плотность пыли вдоль луча зрения.

Здесь делается предположение о общей для всех компонент пыли фазовой функции, поэтому нахождение её в наиболее общем виде представляет интерес.

Цель: Найти фазовую функцию на основе расчетов рассеяния на пылевых частицах пироксена, оливина и энстатита приближениями дискретных диполей для размеров от 1 нм до 3 мкм и физической оптики от 3 мкм до 50 мкм на длине волны 1.064 мкм.

Теоретическая основа методов

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H}(\vec{r}) = -i\omega\epsilon_0\epsilon(\vec{r})\vec{E}(\vec{r}) + \vec{j}_{ct}, \\ \operatorname{rot} \vec{E}(\vec{r}) = i\omega\mu_0\mu\vec{H}(\vec{r}). \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{E}(\vec{r}) - \omega^2\epsilon(\vec{r})\epsilon_0\mu\mu_0\vec{E}(\vec{r}) &= i\omega\mu\mu_0\vec{j}(\vec{r}), \\ \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{G}_m(\vec{r}_0, \vec{r}) - k^2\vec{G}_m(\vec{r}_0, \vec{r}) &= \vec{e}_m\delta(\vec{r}_0, \vec{r}). \end{aligned} \quad (2)$$

$$\hat{G} = \begin{bmatrix} \vec{G}_1 \\ \vec{G}_2 \\ \vec{G}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G + k^{-2}G_{xx} & k^{-2}G_{xy} & k^{-2}G_{xz} \\ k^{-2}G_{xy} & G + k^{-2}G_{yy} & k^{-2}G_{yz} \\ k^{-2}G_{xz} & k^{-2}G_{yz} & G + k^{-2}G_{zz} \end{bmatrix}, \quad G(\vec{r}_0, \vec{r}) = \frac{e^{ik|\vec{r}-\vec{r}_0|}}{4\pi|\vec{r}-\vec{r}_0|}. \quad (3)$$

Выражения в приближении физической оптики:

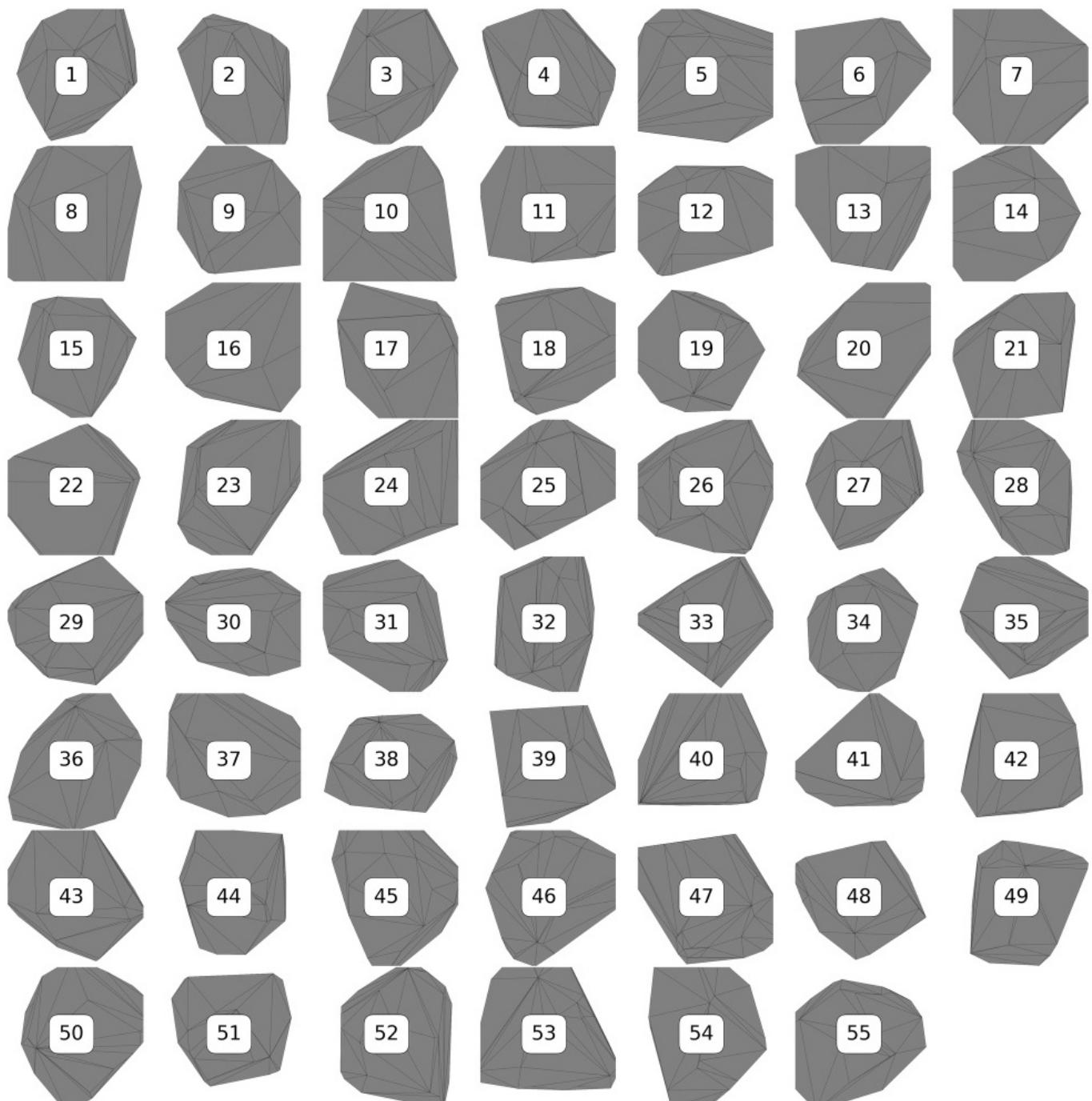
$$\vec{E}_m^{\text{scat}}(\vec{r}) = \frac{\exp(ikr)}{r}\vec{F}_m(\vec{n}), \quad \vec{F}_m(\vec{n}) = \vec{E}_m^0 \frac{k}{2\pi i} \int \int \exp(-ik(\vec{n} - \vec{n}_m)\vec{\rho}) d\vec{\rho}. \quad (4)$$

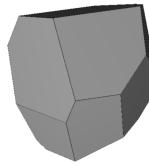
Интегральное уравнение для приближения дискретных диполей:

$$\vec{E}_{\text{scat}}(\vec{r}) = k_0^2(\epsilon - 1) \int_{V'} \hat{G}(\vec{r}', \vec{r}) \vec{E}(\vec{r}') d\vec{r}' \quad \hat{a}_i^{-1} \vec{P}_i - \sum_{j \neq i} \hat{G}_{ij} \vec{P}_j = \vec{E}_i^{\text{inc}}, \quad \vec{F}(\vec{n}) = -ik(\hat{I} - \vec{n} \otimes \vec{n}) \sum_i \vec{P}_i \exp(-ik\vec{r}_i \cdot \vec{n}) \quad (5)$$

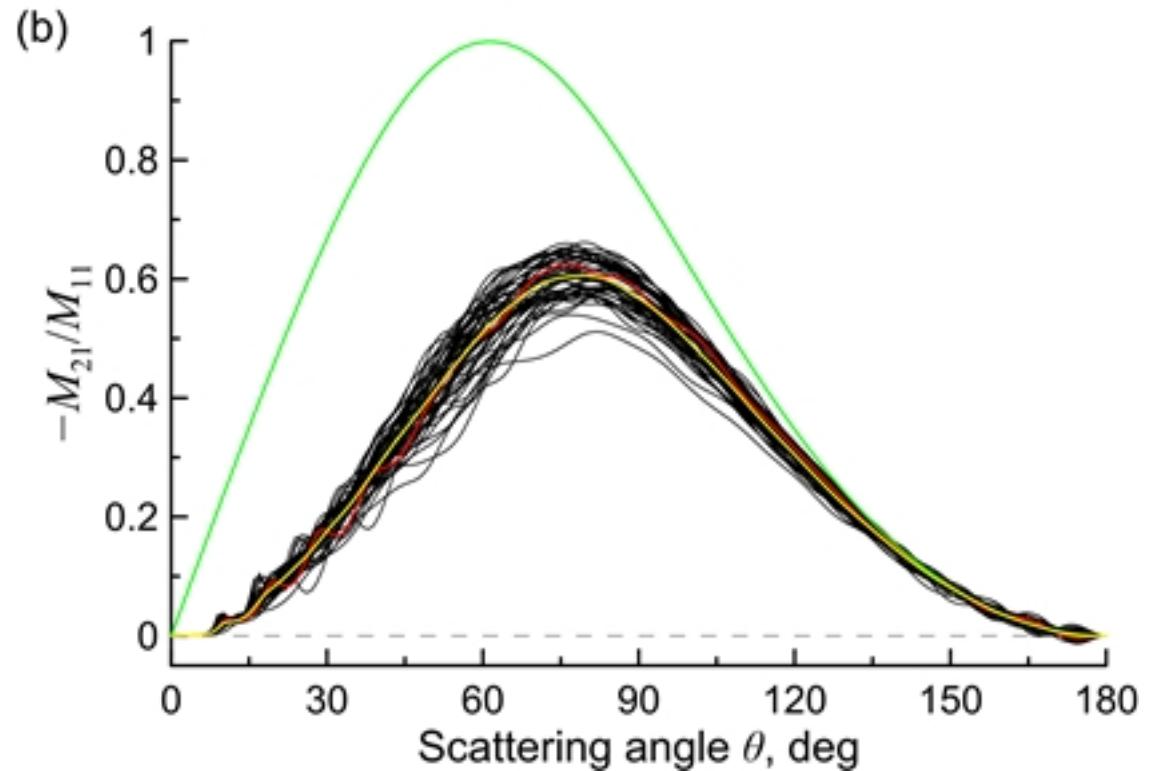
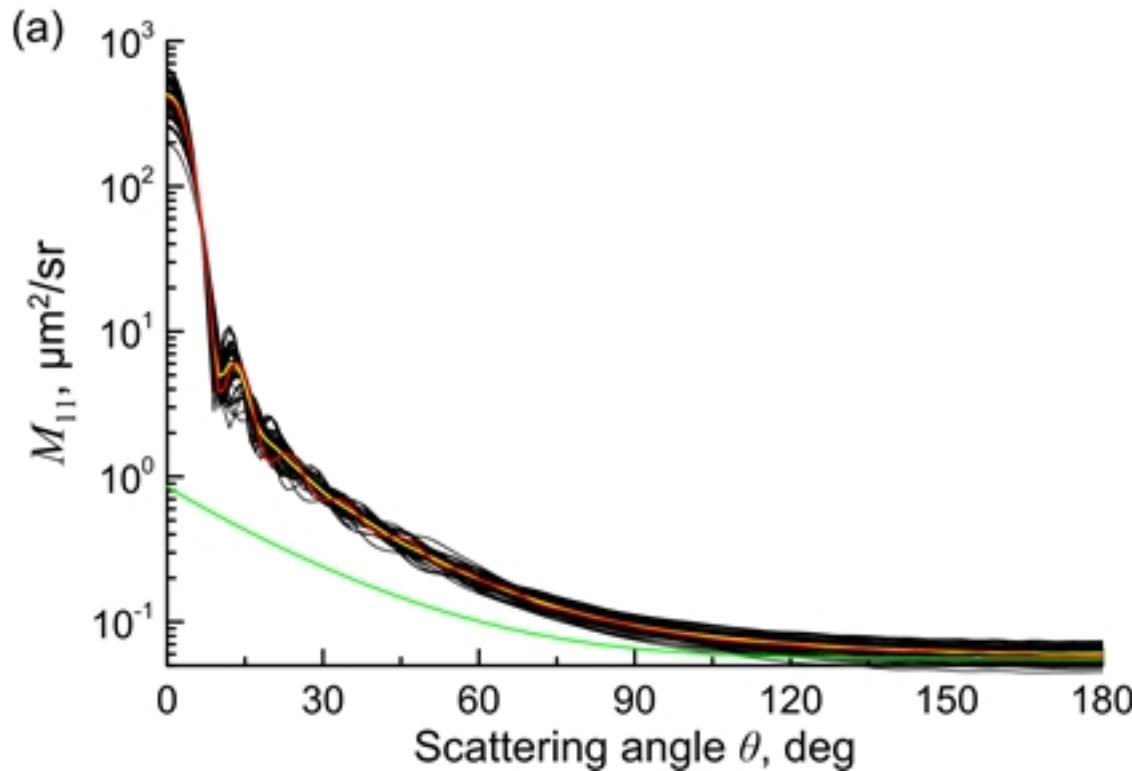
Модель формы пылевой частицы

Были сгенерированы 55
случайных неправильных
форм для выбора средней.





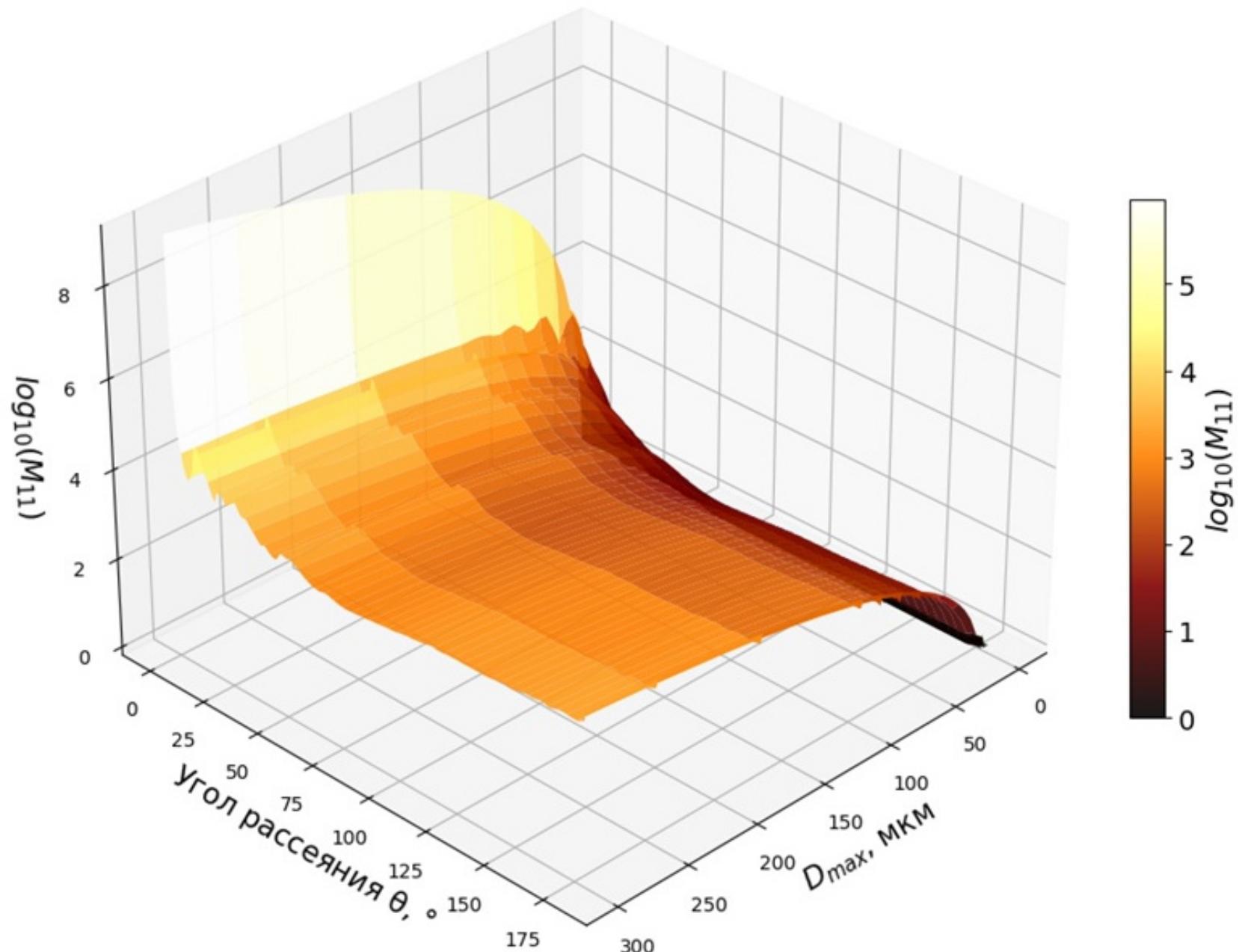
Была выбрана частица 1 из критерия наиболее близких к средним оптическим характеристикам на размере 5 мкм, материал оливин.



Красная линия – среднее значение, жёлтая – частица 1, зелёная – зеркальная составляющая сигнала.

Решения рассеяния света на частице 1

Рассмотрен элемент матрицы Мюллера M_{11} , который пропорционален фазовой функции $\Phi(\theta) = \frac{4\pi}{C_{\text{sca}}} M_{11}(\theta)$, C_{sca} – сечение рассеяния = $2\pi \int_0^\pi M_{11}(\theta) \sin \theta d\theta$.



Степень линейной поляризации

Вторая измеряемая величина - степень линейной поляризации $p = -\frac{M_{12}}{M_{11}} = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}}$; где M_{12}, M_{11} - элементы матрицы Мюллера, I_{\parallel}, I_{\perp} - компоненты интенсивности с электрическим вектором параллельным и перпендикулярным плоскости рассеяния.

Величина p отрицательна, если направление колебаний вектора \vec{E} лежит в плоскости рассеяния, что характерно для частиц, размеры которых сравнимы с длиной волны.

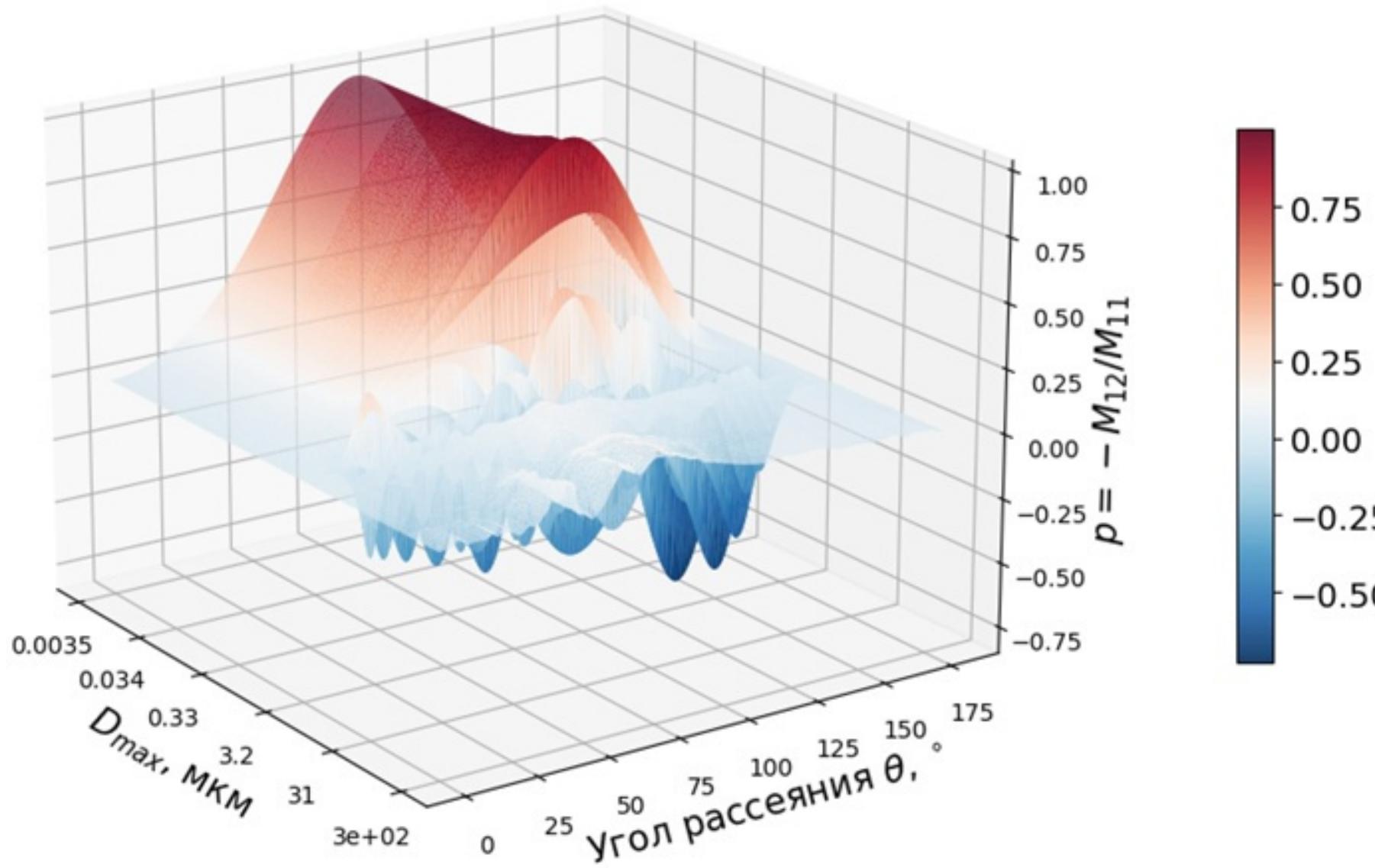
Измерения из [6] аппроксимируют функцией $0.33 \sin^5(\theta)$, т.е. данная величина может достигать 33 %.

Далее будет видно, что для этих измерений больше соответствуют характерный размер частиц около 2 мкм.

[6] Leinert C. Zodiacal light - A measure of the interplanetary environment. Space Sci Rev 18, 281-339 (1975).

$$\text{Энстатит: } n = 1.5563 + i3.8 \times 10^{-5}$$

Решения для степени линейной поляризации

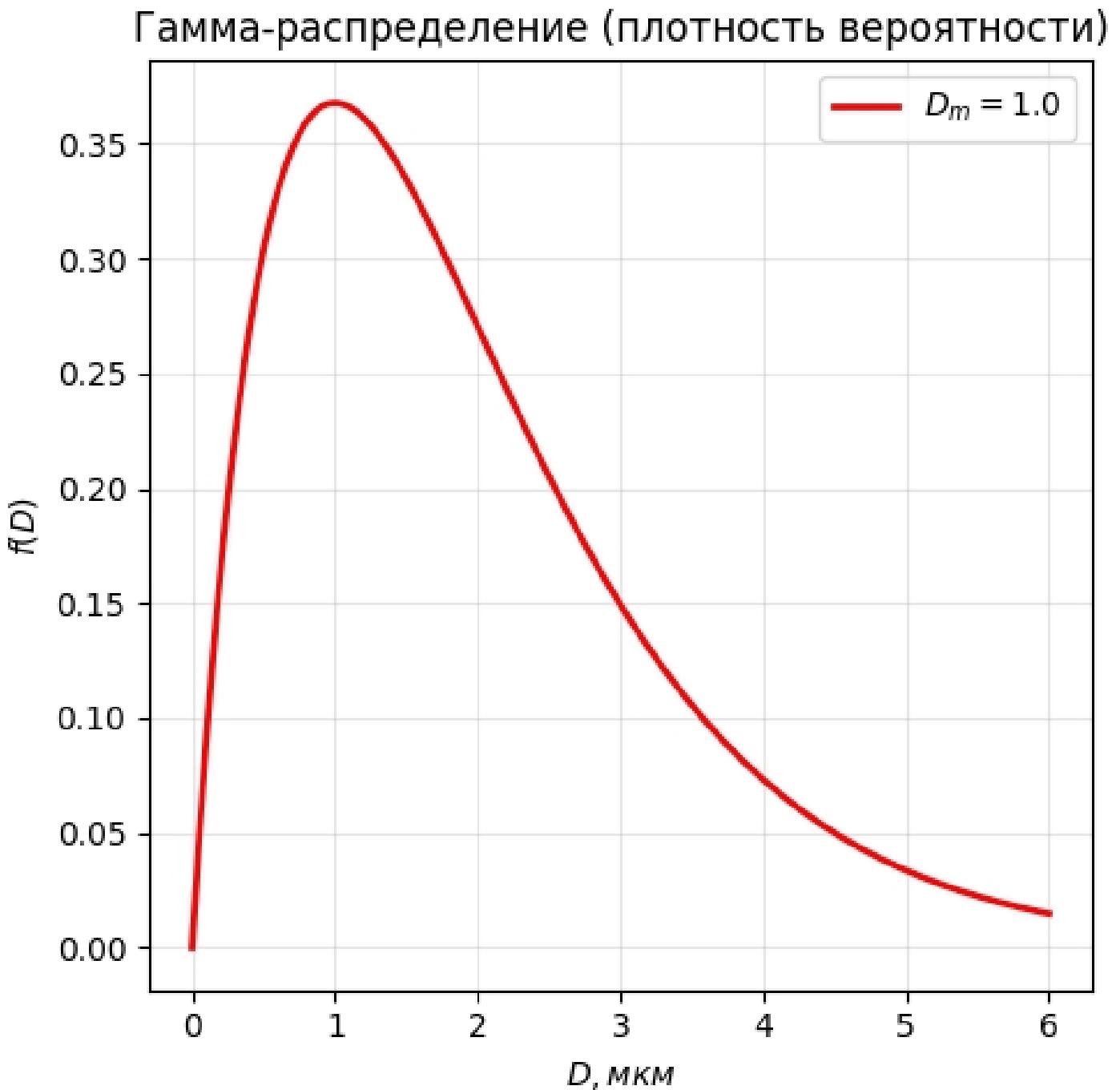


Распределение по размерам

Усреднение оптических характеристик по диапазону размеров производилось по гамма-распределению

$$f(D) = \frac{D}{D_m^2} e^{-\frac{D}{D_m}}$$

Варьировалось модальное значение размера D_m для наилучшего согласования с экспериментальными данными для фазовой функции[2] и степени линейной поляризации[6].

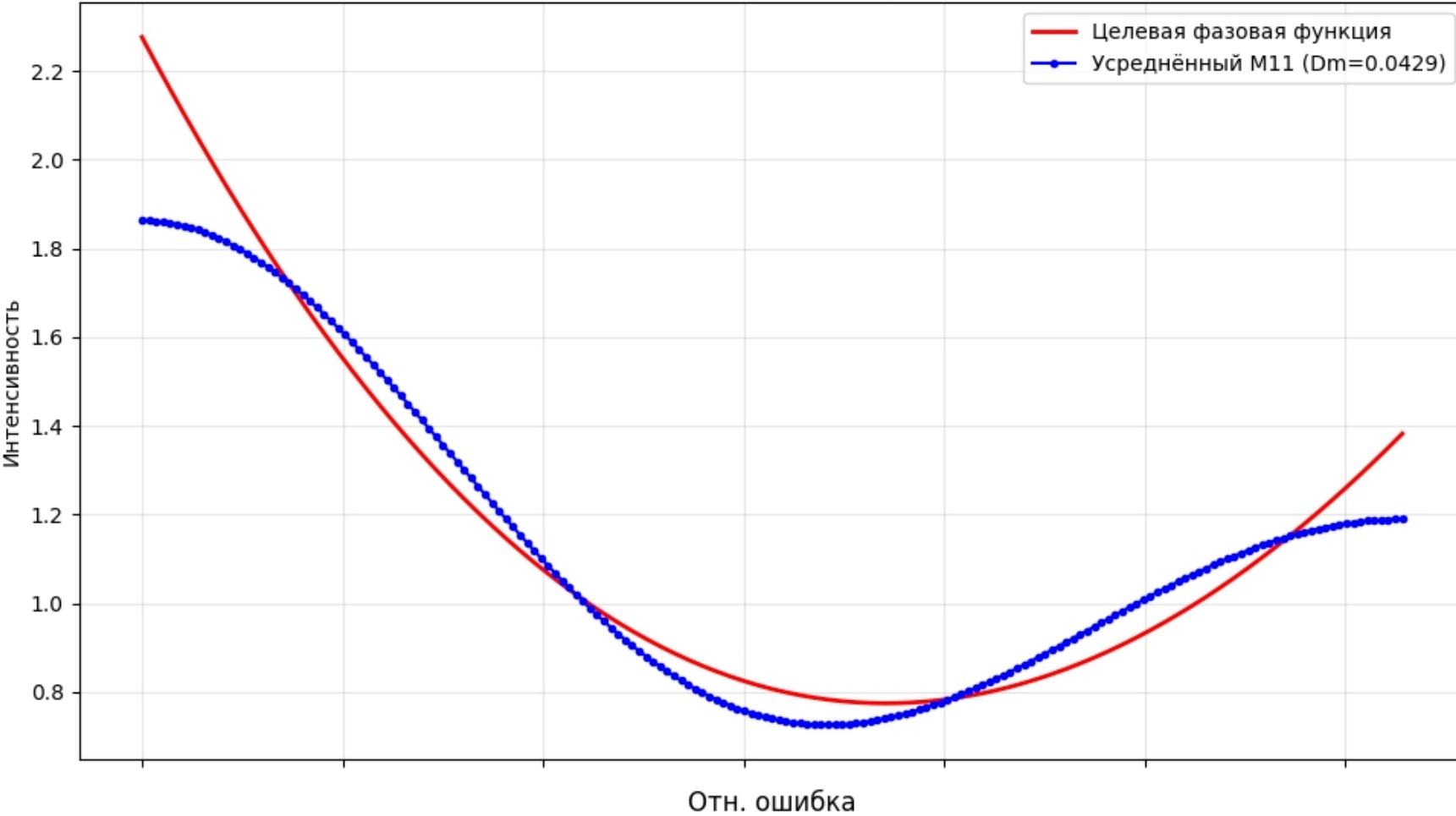


Путём минимизации ошибки
 $|P_{D_m} - P_{\text{цель}}| \sin(\theta)$
методом Nelder-Mead[7]
была получена
наиболее подходящая
фазовая функция.

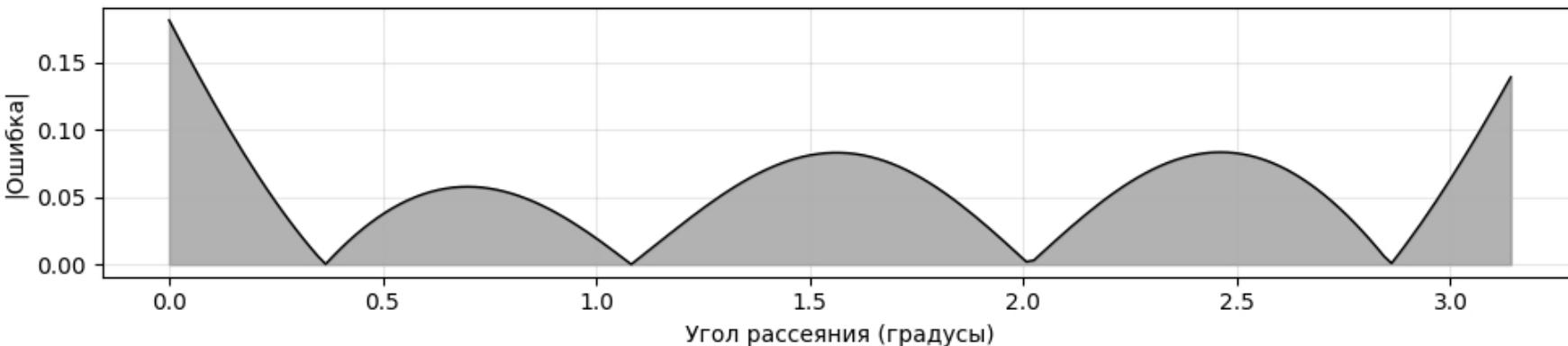
Размер частиц для измеренной фазовой функции равен 43 нм.

[7] Gao F. and Han L.
Implementing the
Nelder-Mead simplex
algorithm with adaptive
parameters. 2012.
Computational
Optimization and
Application. 51:1, pp.
259-277.

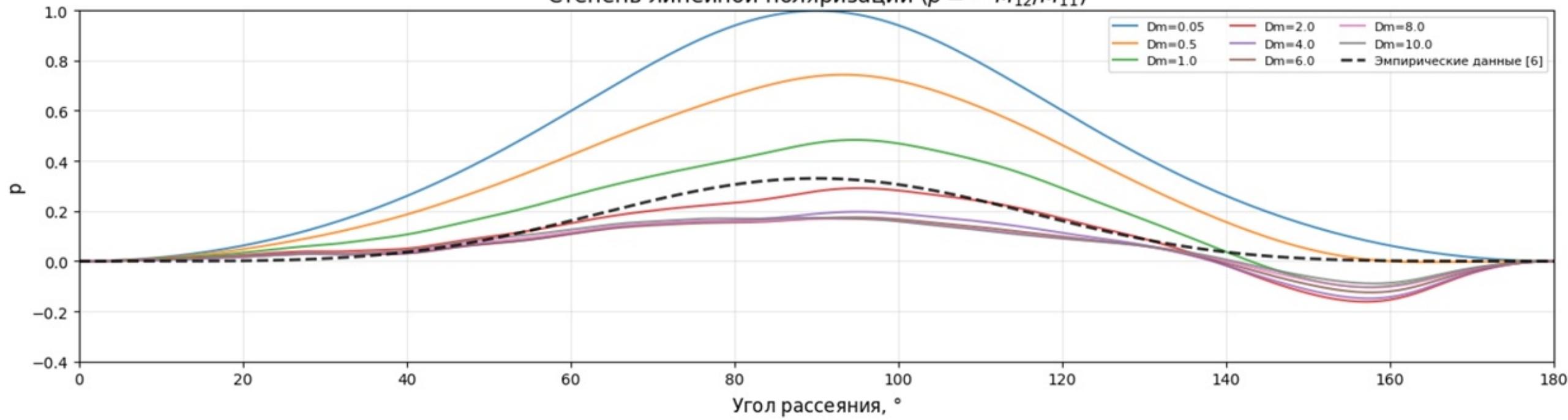
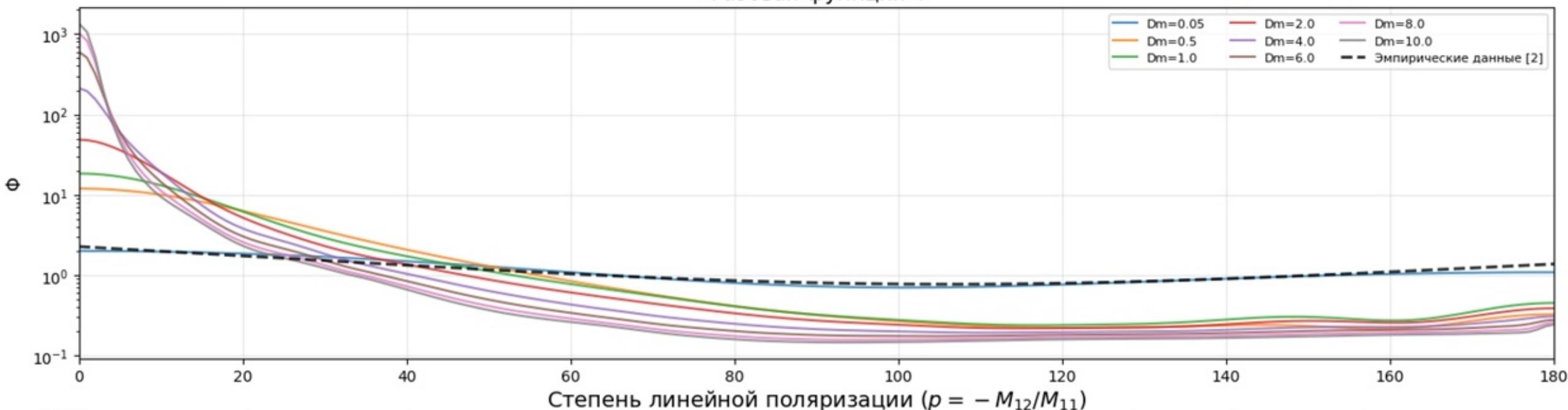
Сравнение фазовых функций



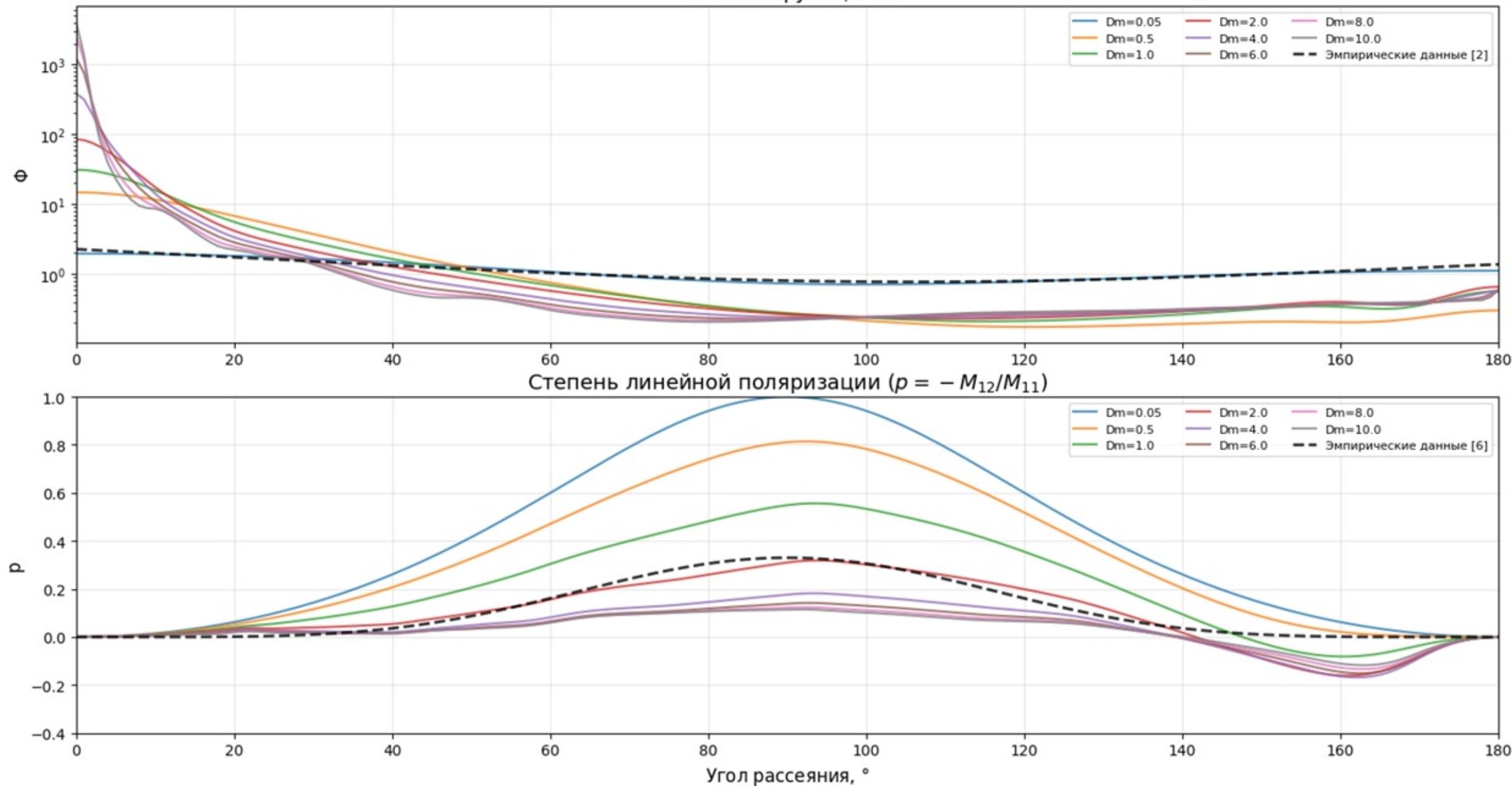
Отн. ошибка



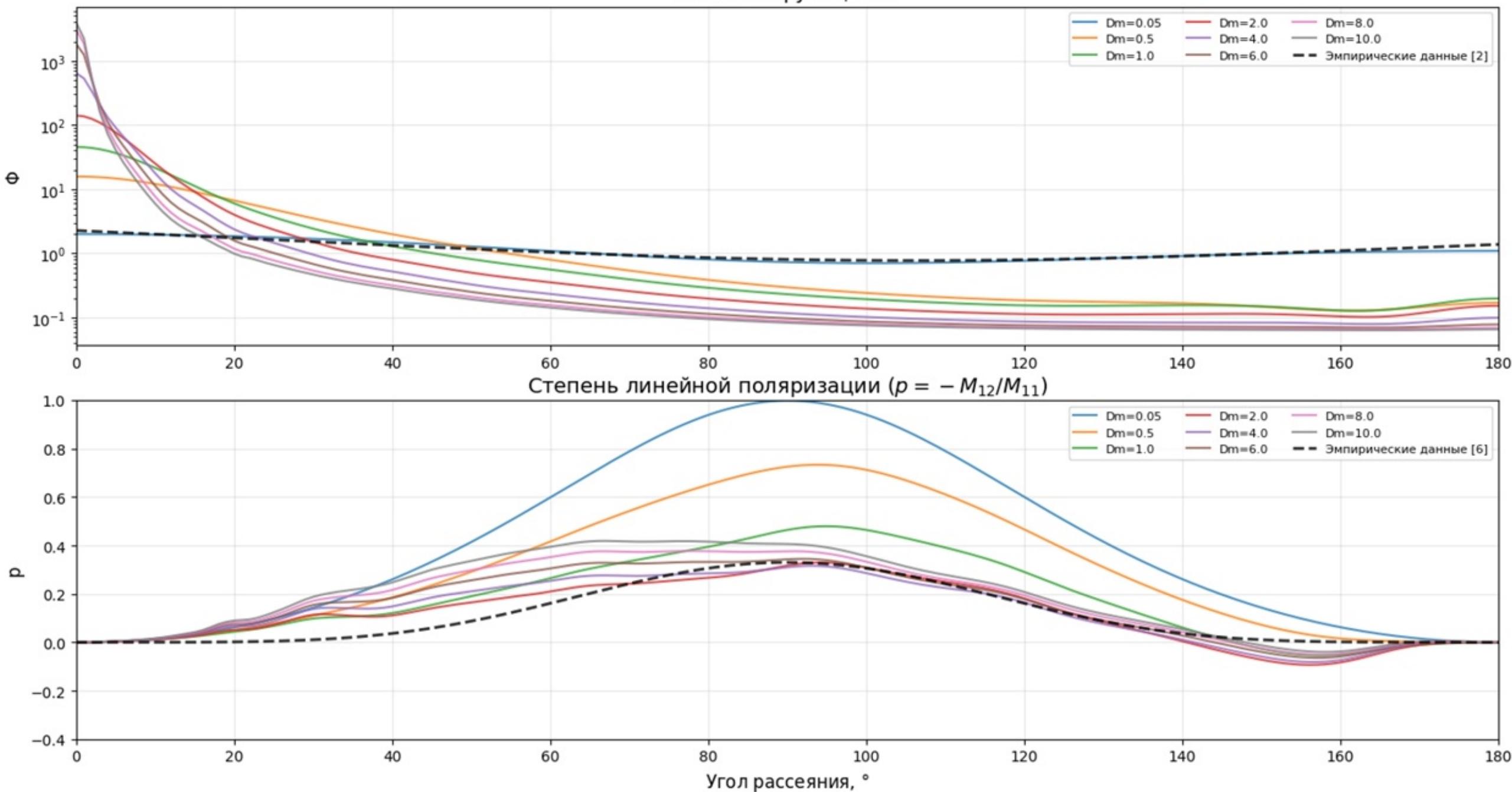
Оптические свойства пироксина $n=1.6636+i0.0098$
Фазовая функция Φ



Оптические свойства энстатита $n=1.5563+i3.8\cdot10^{-5}$
Фазовая функция Φ



Оптические свойства оливина $n=1.7305+i0.073$
Фазовая функция Φ



Выводы:

- На основе данных о фазовой функции [2] был определён характерный размер частиц, составляющий около 43 нм.
- Анализ данных о линейной поляризации [6] показал, что характерный размер частиц для этих измерений составляет около 2 мкм.
- Полученные решения задачи рассеяния могут быть использованы для построения карт яркости неба, необходимых для проведения незашумлённых астрономических наблюдений в инфракрасном диапазоне.

Обнаруженное расхождение в характерных размерах, полученных из разных оптических измерений, связано, прежде всего, с тем, что на фазовую функцию сильно влияет пространственное распределение частиц n_c , в то время как на линейную поляризацию оно влияет в меньшей степени. Однако частицы в этом диапазоне размеров действительно существуют, что подтверждается, в частности, исследованиями лунных кратеров [8], и оказывают существенное влияние на солнечное излучение.

[8] Fechtig H., Hartung J. B., et. al. Lunar microcrater studies, derived meteoroid fluxes, and comparison with satellite-borne experiments. Lunar Science Conference, 5th, Houston, Tex., March 18-22, 1974, Proceedings. Volume 3.

Спасибо!

