



# Моделирование зодиакального излучения на основе расчетной фазовой функции межпланетной пыли

Институт оптики атмосферы СО РАН

Лаборатория рассеяния электромагнитных волн

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



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: Пойнтинга-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].

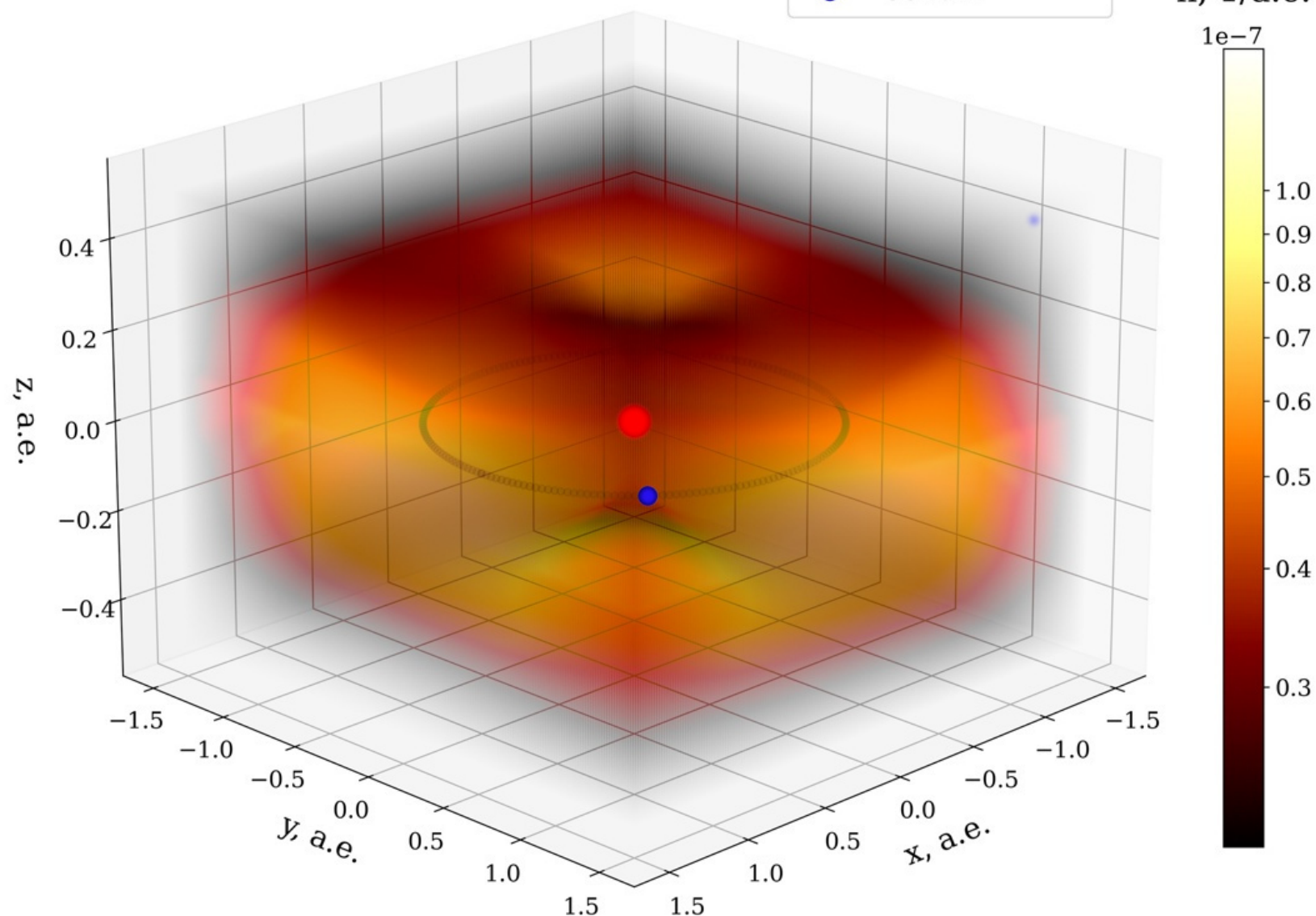
[4] San et. al. Cosmoglobe: Simualting zodiacal emission with ZodiPy. A & A, 666:A107, 2022.

[5] Ермаков В. И., Охлопков В. П., Стожков 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].

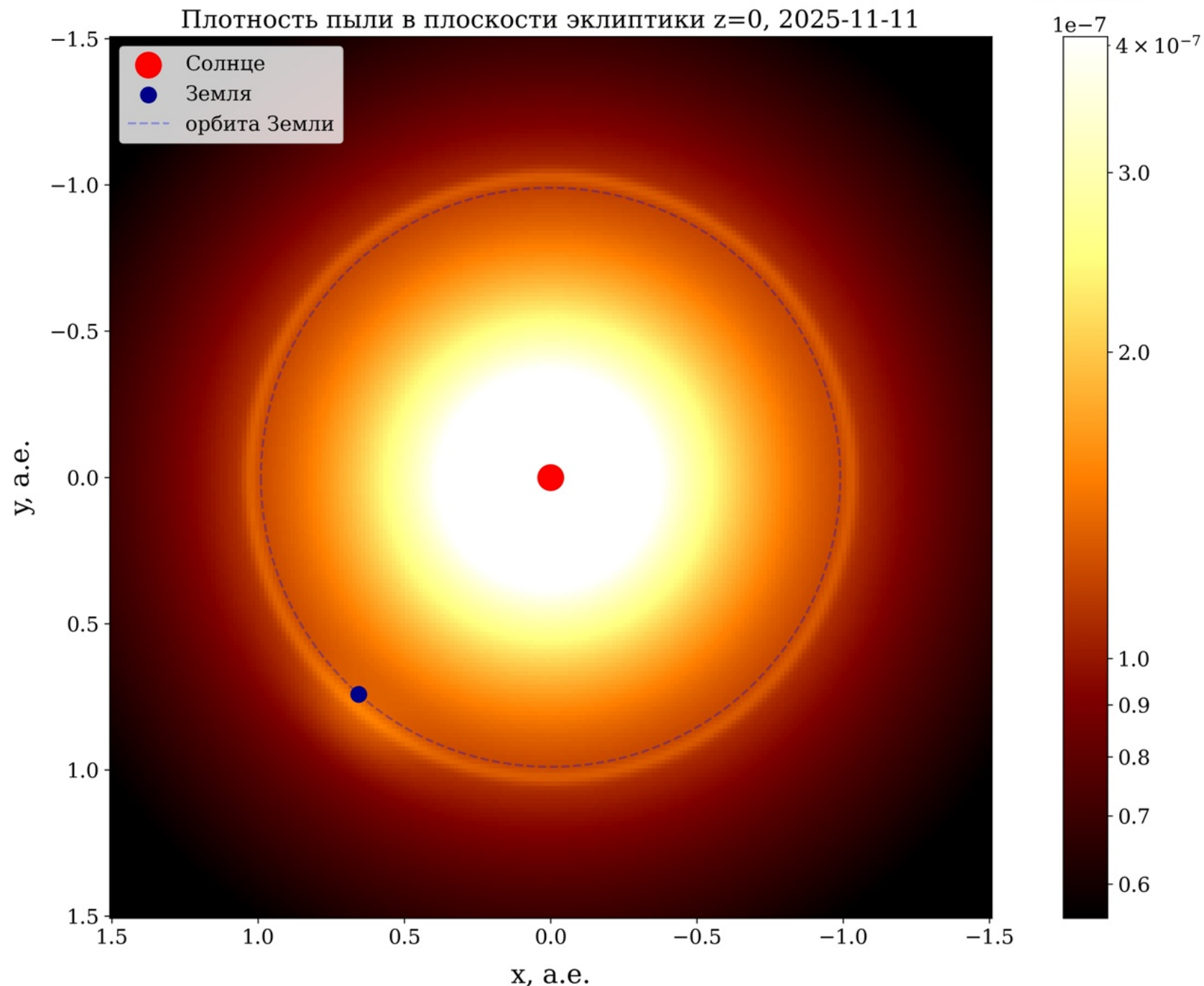




# Распределение пыли в плоскости эклиптики

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,  $F_{\lambda}$ — 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

$$\begin{cases} \text{rot } \vec{H}(\vec{r}) = -i\omega\varepsilon_0\varepsilon(\vec{r})\vec{E}(\vec{r}) + \vec{j}_{\text{CT}}, \\ \text{rot } \vec{E}(\vec{r}) = i\omega\mu_0\mu\vec{H}(\vec{r}). \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{rot rot } \vec{E}(\vec{r}) - \omega^2\varepsilon(\vec{r})\varepsilon_0\mu\mu_0\vec{E}(\vec{r}) &= i\omega\mu\mu_0\vec{j}(\vec{r}), \\ \text{rot rot } \vec{G}_{\text{m}}(\vec{r}_0, \vec{r}) - k^2\vec{G}_{\text{m}}(\vec{r}_0, \vec{r}) &= \vec{e}_{\text{m}}\delta(\vec{r}_0, \vec{r}). \end{aligned} \quad (2)$$

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

Выражения в приближении физической оптики:

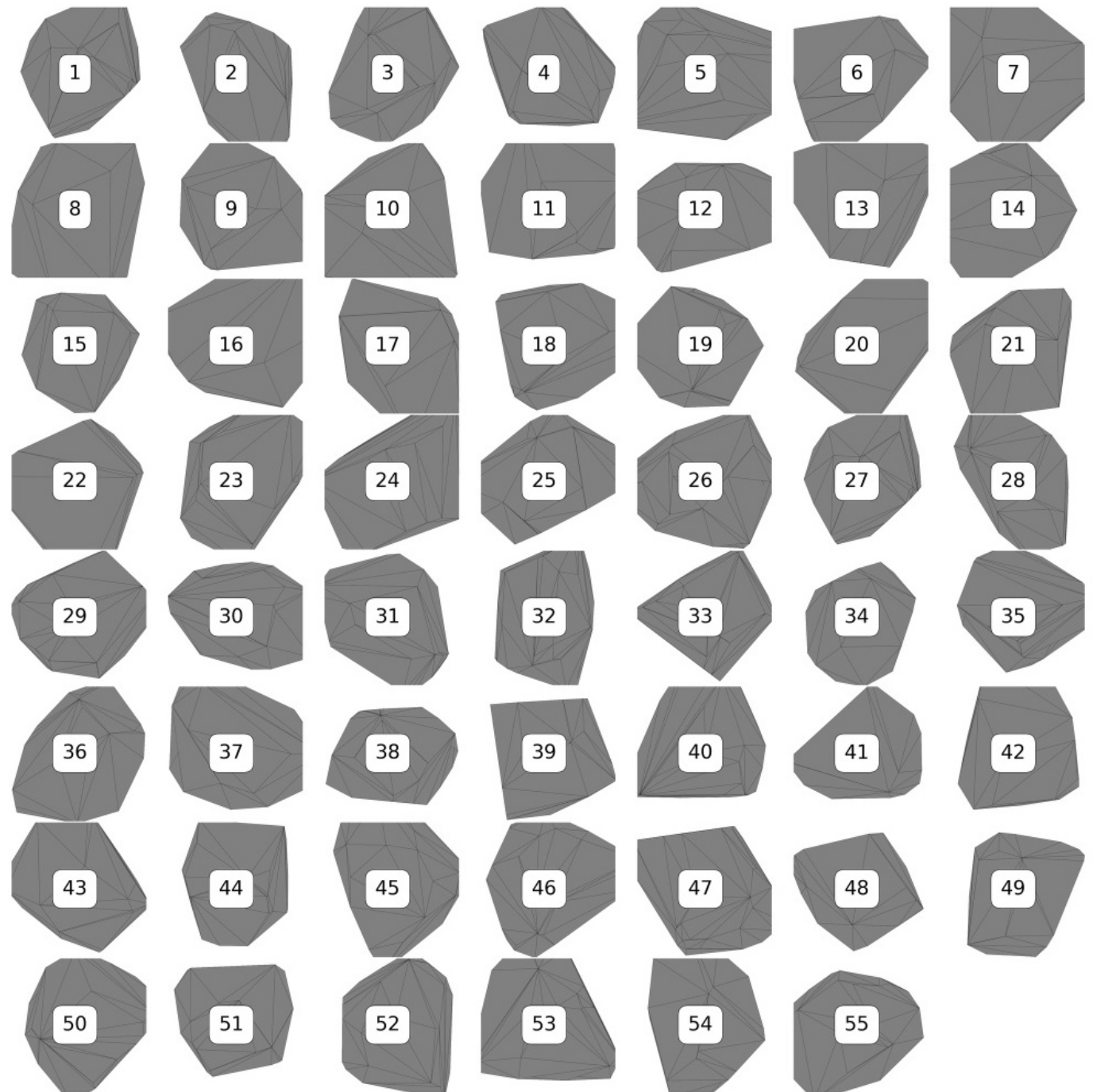
$$\vec{E}_{\text{m}}^{\text{scat}}(\vec{r}) = \frac{\exp(ikr)}{r} \vec{F}_{\text{m}}(\vec{n}), \quad \vec{F}_{\text{m}}(\vec{n}) = \vec{E}_{\text{m}}^0 \frac{k}{2\pi i} \int \int \exp(-ik(\vec{n} - \vec{n}_{\text{m}})\vec{\rho}) d\vec{\rho}. \quad (4)$$

Интегральное уравнение для приближения дискретных диполей:

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

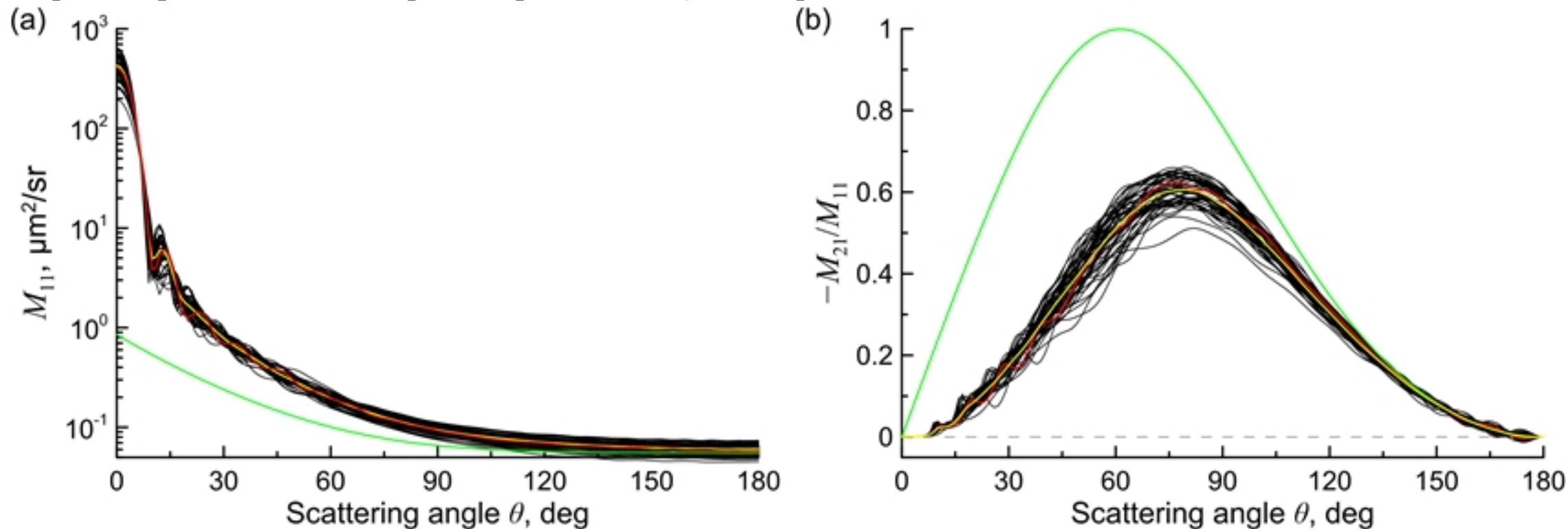
# Модель формы пылевой частицы

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.

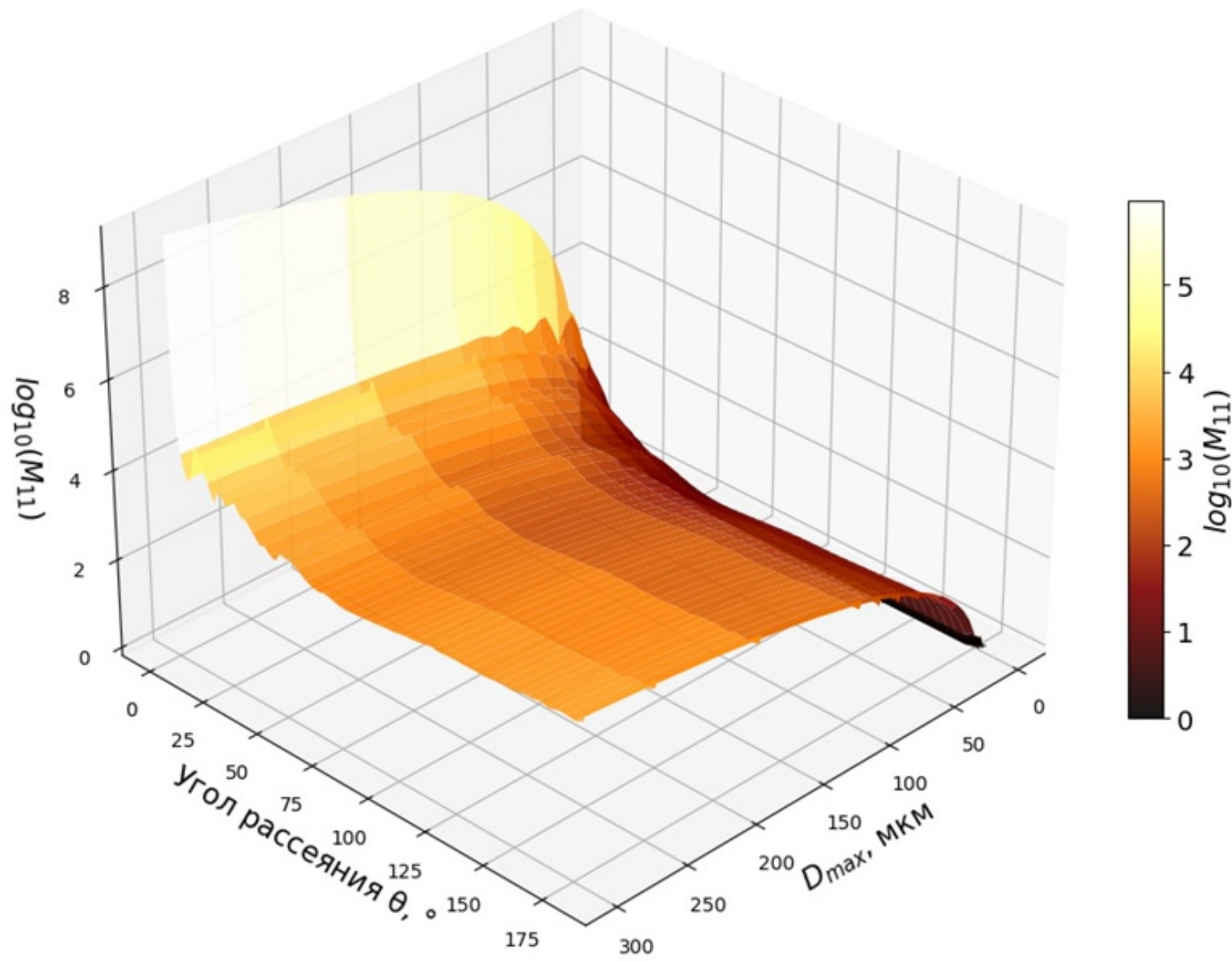


Красная линия – среднее значение, жёлтая – частица 1, зелёная – зеркальная составляющая сигнала.

Энстатит  $1.5563 + i3.8 \cdot 10^{-5}$

# Решения рассеяния света на частице 1

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

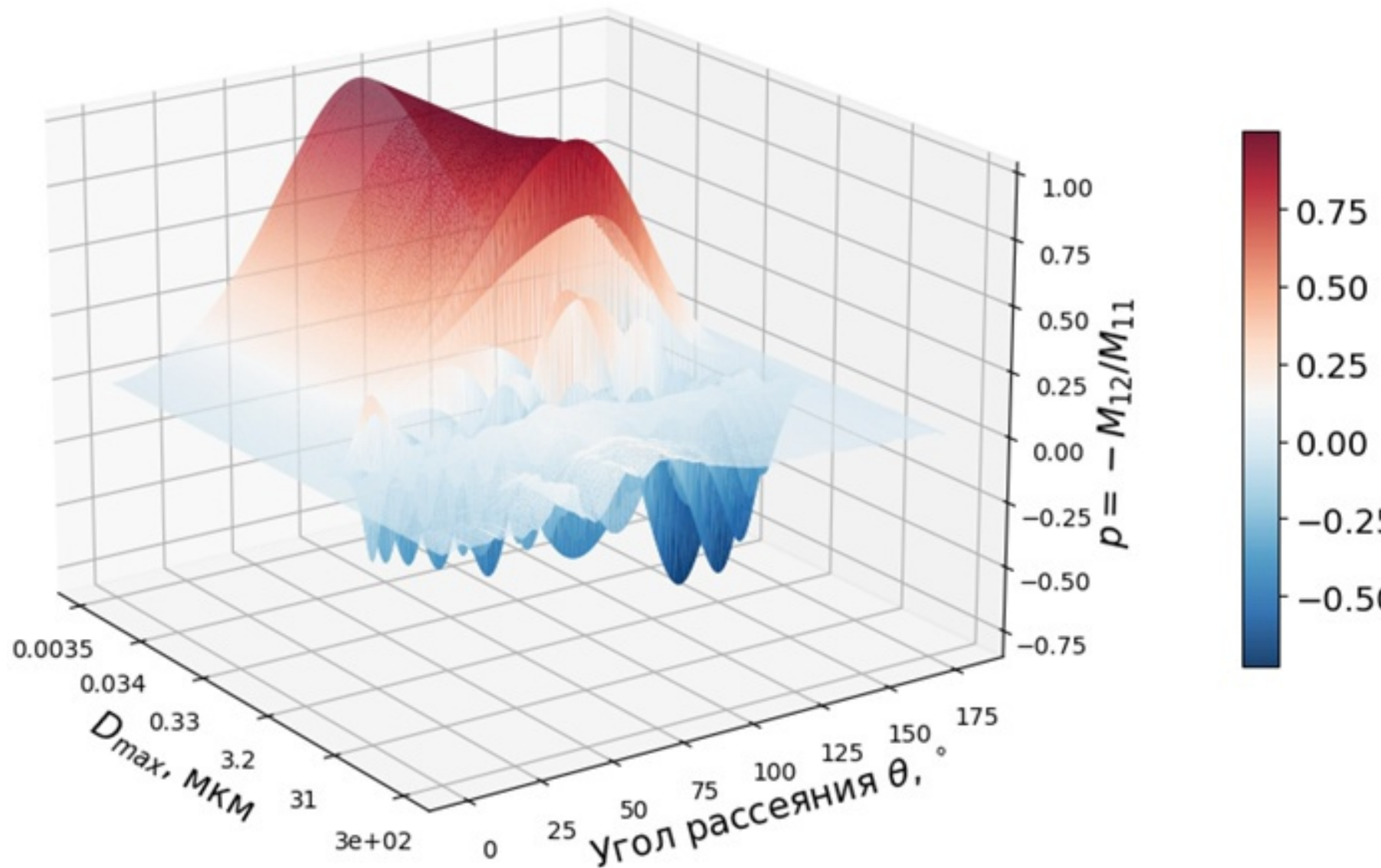
Измерения из [6] аппроксимируют функцией  $0.33 \sin^5(\theta)$ , т.е. данная величина может достигать 33 %.

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).

Решения для  
степени  
линейной  
поляризации

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

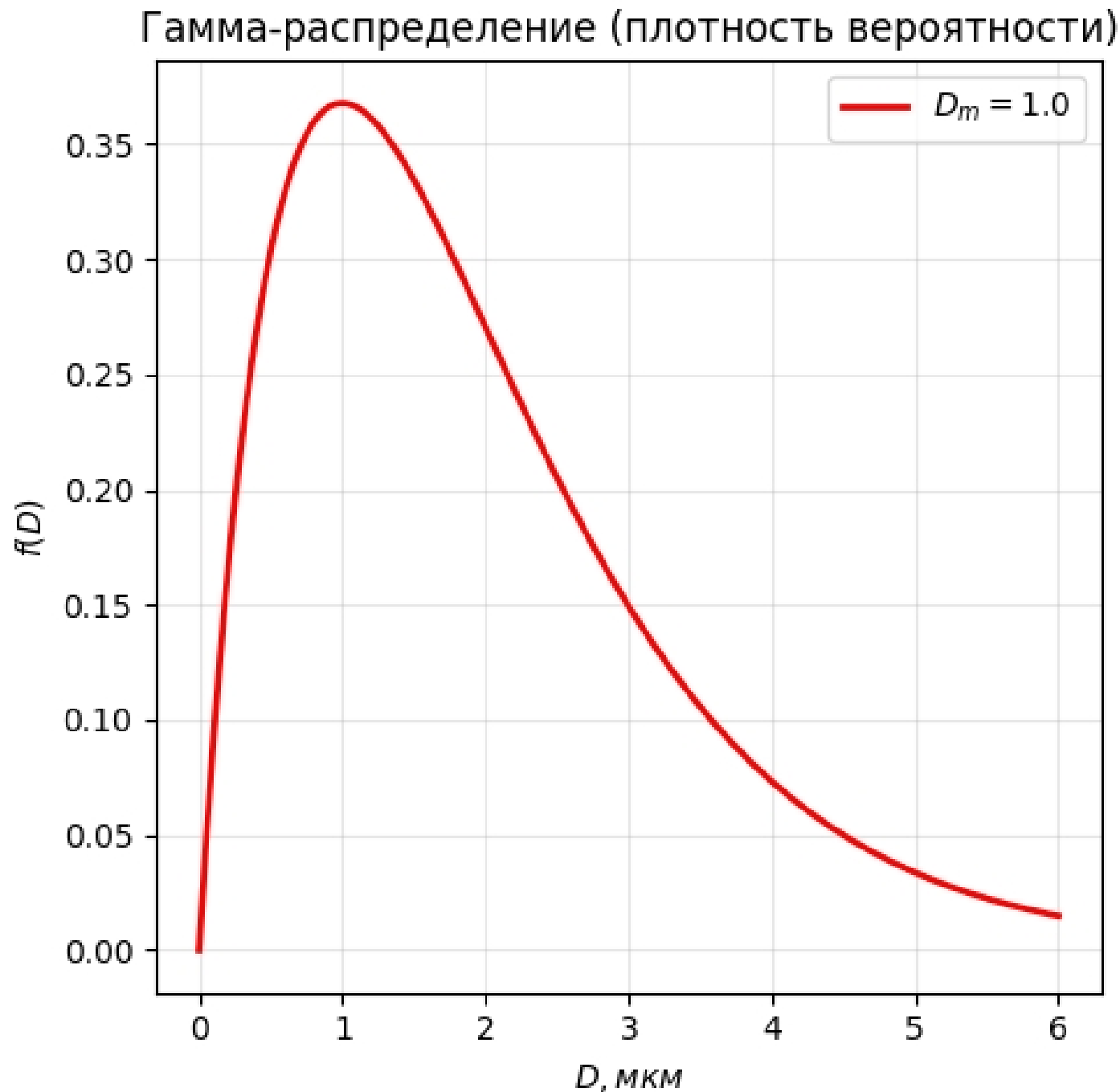


# Распределение по размерам

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].

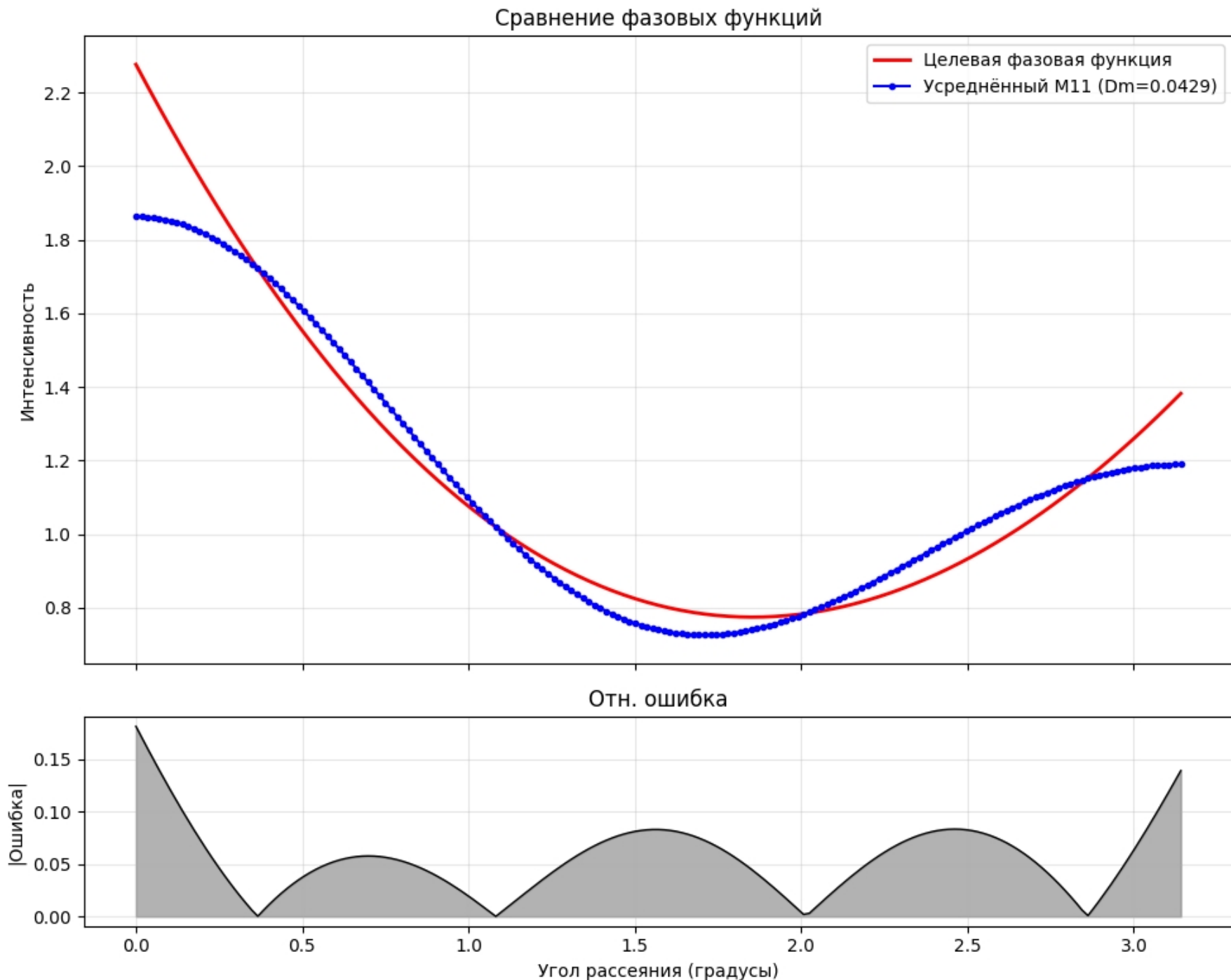




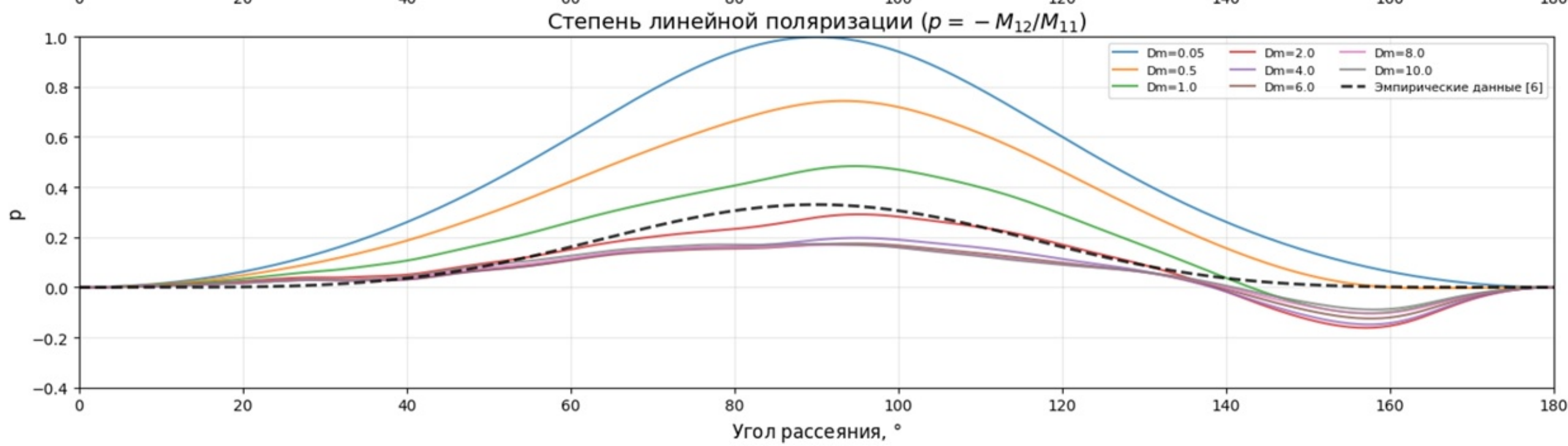
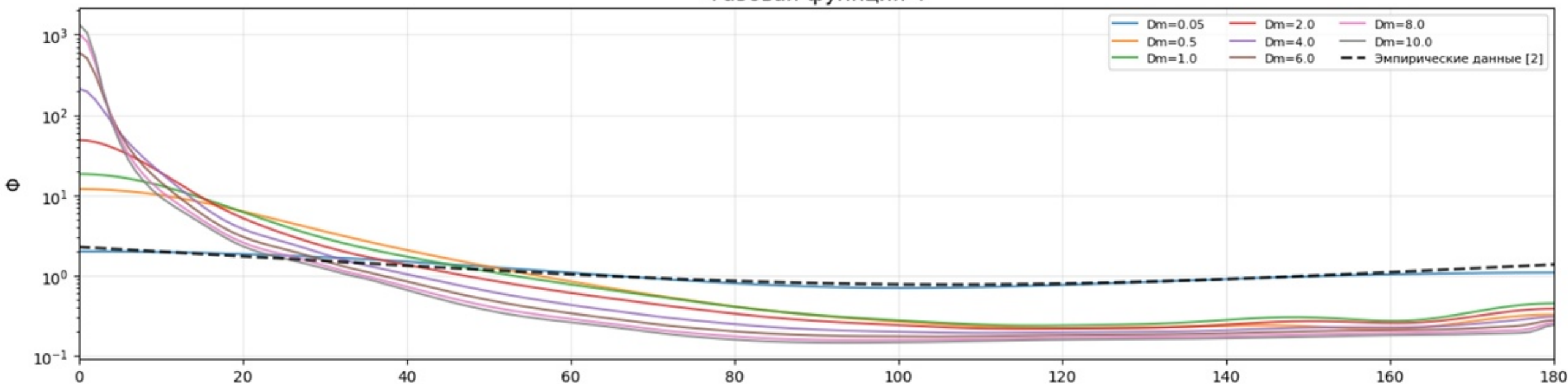
Путём минимизации  
ошибки  
 $|P_{D_m} - P_{\text{цель}}| \sin(\theta)$   
методом Nelder-Mead[7]  
была получена  
наиболее подходящая  
фазовая функция.

Размер частиц для  
измеренной  
фазовой функции  
равен 43 нм.

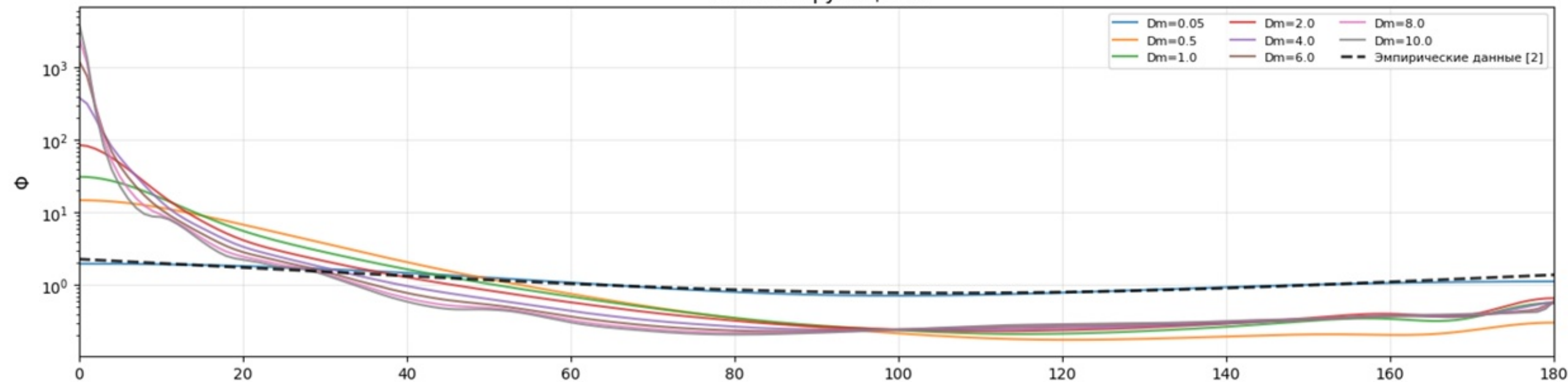
[7] Gao F. and Han L.  
Implementing the  
Nelder-Mead simplex  
algorithm with adaptive  
parameters. 2012.  
Computational  
Optimization and  
Application. 51:1, pp.  
259-277.



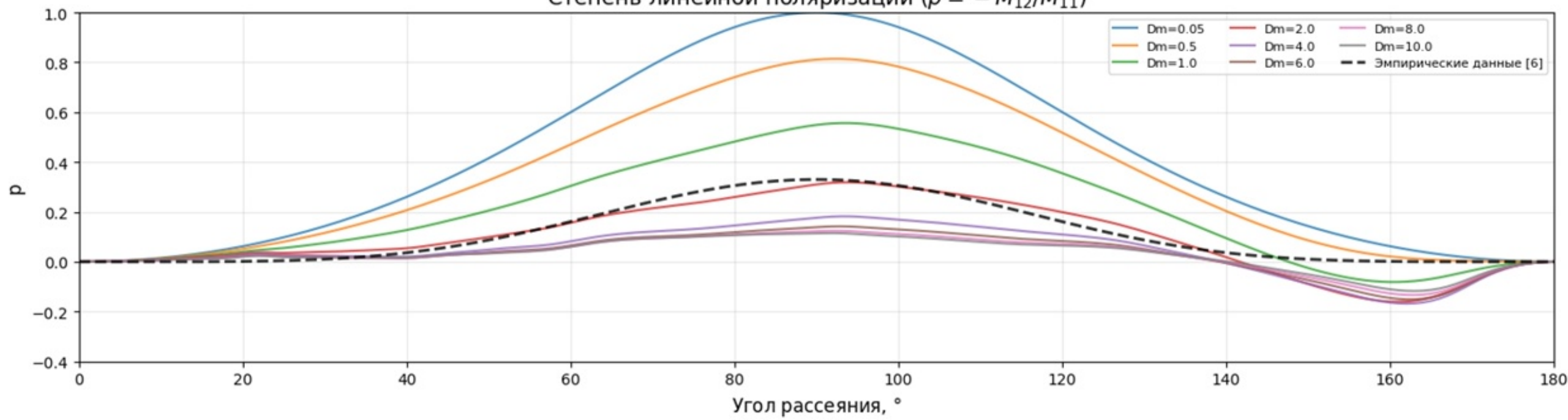
Оптические свойства пироксина  $n=1.6636+i0.0098$   
Фазовая функция  $\Phi$



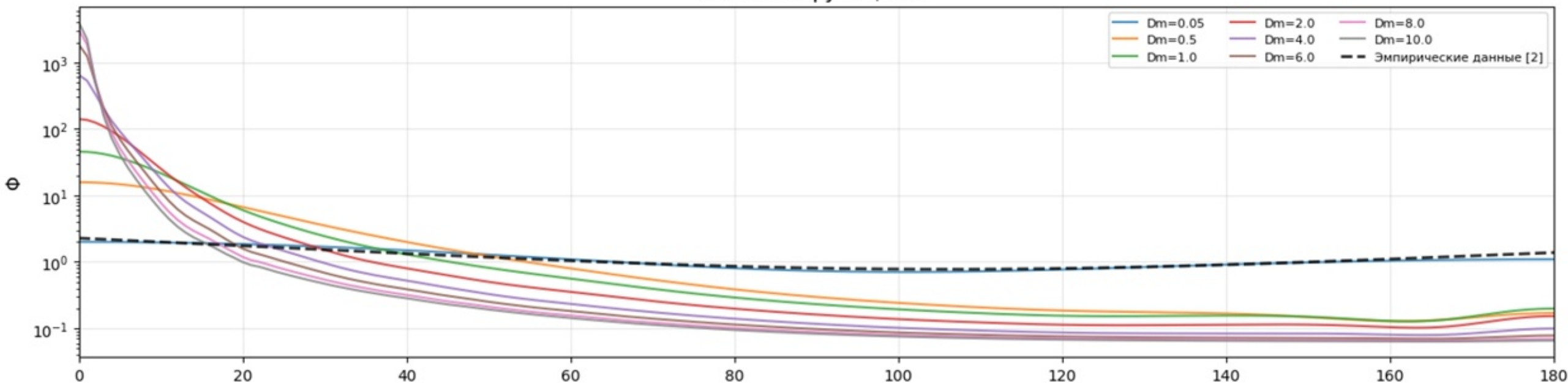
Оптические свойства энстатита  $n=1.5563+i3.8\cdot 10^{-5}$   
Фазовая функция  $\Phi$



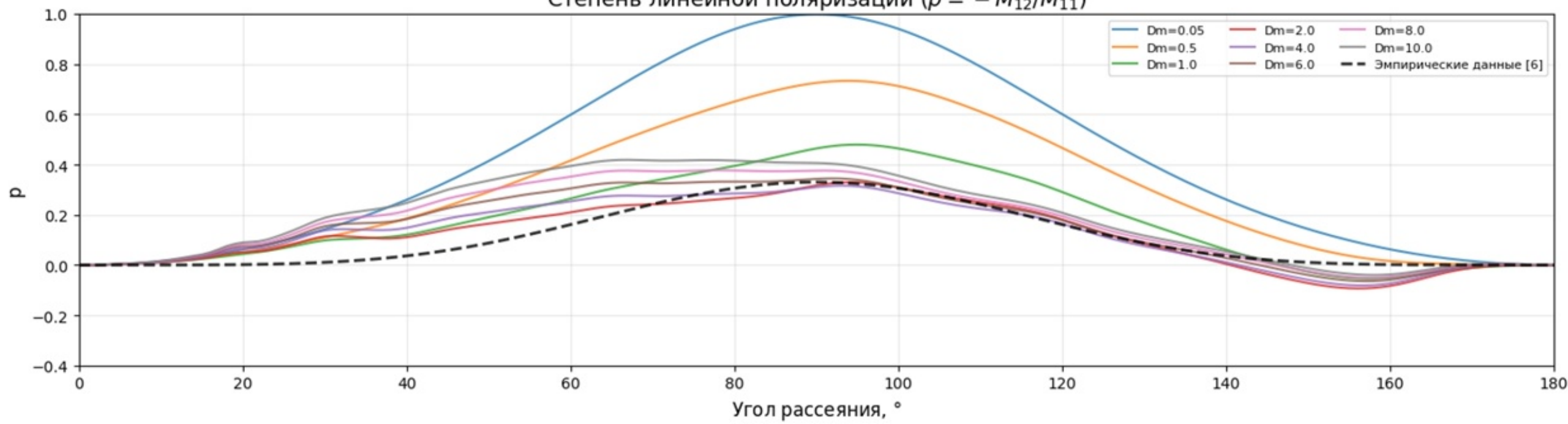
Степень линейной поляризации ( $p = -M_{12}/M_{11}$ )



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



Степень линейной поляризации ( $p = -M_{12}/M_{11}$ )





# 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!

