

Стендовый доклад по теме:

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДИСКРЕТНЫХ ДИПОЛЕЙ И
ПРИБЛИЖЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ В ЗАДАЧЕ
РАССЕЯНИЯ СВЕТА НА АТМОСФЕРНЫХ ЛЕДЯНЫХ
КРИСТАЛЛАХ ПЕРИСТЫХ ОБЛАКОВ ДЛЯ ЗАДАЧ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Сальников Кирилл Сергеевич^[2], Коношонкин А. В.^{[1],[2]}, Шишко
В. А.^{[1],[2]}, Тимофеев Д. Н.^[2], Кустова Н. В.^[2], Томск, ИОА СО
РАН^[1], ТГУ^[2]

e-mail: 1015k@mail.ru, sasha_tvo@iao.ru, sva@iao.ru, tdn@iao.ru,
kustova@iao.ru



Перистые облака представляют собой тонкие полупрозрачные облака, расположенные на высотах 5-12 км и состоящие преимущественно из ледяных кристаллов размерами от единиц до тысяч микрон. Они покрывают около 30% поверхности Земли и существенным образом влияют на ее радиационный баланс и, следовательно, на климат. Недостаток знаний о радиационных характеристиках перистых облаков являются одним из основных источников неопределенности в современных климатических моделях и долгосрочном прогнозировании погоды.



Рис. 1: Перистые облака.

Основным инструментом, позволяющим оперативно получать информацию о микрофизических параметрах облаков, являются лидары, например, установленные в космических спутниках CALIPSO ($\lambda = 0.532$ мкм) и планируемом EarthCARE ($\lambda = 0.322$ мкм).



Рис. 2: Спутник EarthCARE.

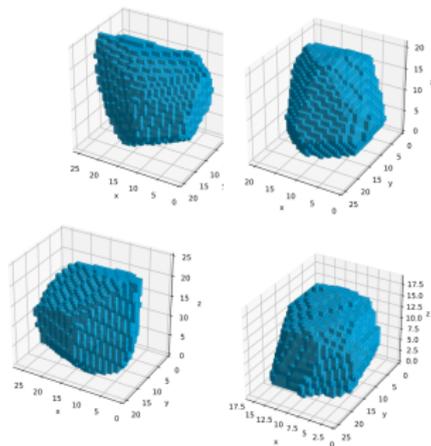


Рис. 3: Спутник CALIPSO.

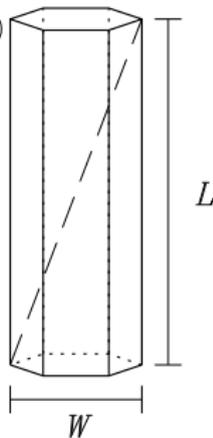
Интерпретация лидарного сигнала требует решения прямой задачи рассеяния света на частицах, характерных для перистых облаков.

Исследованно рассеяние плоской и монохроматической электромагнитной волны на отдельных составляющих перистого облака: ледяных частицах произвольной формы(а), столбиках(б), пластинках(с). Рассмотрены 90% размеров частиц, встречающихся в перистых облаках.

(a)



(b)



(c)

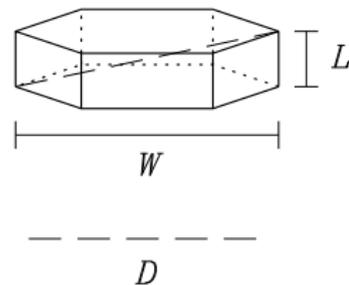


Рис. 4, 5: Модели частицы случайной формы(а), столбиков(б), пластинок(с).

Приближение физической оптики[1] демонстрирует наибольшую эффективность при решении задачи рассеяния света на ледяных кристаллах размерами от десятка до тысяч микрометров (для длины волны $\lambda = 0.532$ мкм), однако для успешной интерпретации лидарных данных также необходимо получить решения для размеров частиц от 0.02 до 10 микрон. Для этих размеров решение можно получить, используя приближение дискретных диполей. Будем использовать программную реализацию приближения дискретных диполей ADDA[2].

[1]URL:<https://github.com/sasha-tvo/Beam-Splitting>.

[2]URL:<https://github.com/adda-team/adda>.

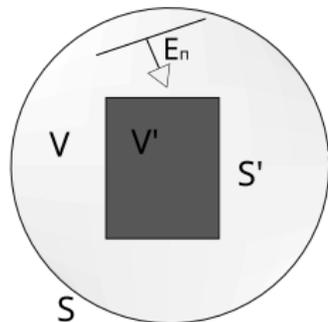


Рис. 6: Постановка задачи.

Теоретическая основа методов

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

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

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

Интегральное уравнение для приближения физической оптики:

$$\{\vec{E}(\vec{r}) - \vec{E}^n(\vec{r})\} \cdot \vec{e}_m = \oint_{S'} \{\vec{E}(\vec{r}') \times \text{rot } \vec{G}_m(\vec{r}, \vec{r}') + \text{rot } \vec{E}(\vec{r}') \times \vec{G}_m(\vec{r}, \vec{r}')\} \cdot d\vec{S}', \quad (4)$$

$$\{\vec{E}(\vec{r}) - \vec{E}_n(\vec{r})\} \cdot \vec{e}_m \approx ik \frac{e^{ikr}}{2\pi r} \times (\vec{n} \times \vec{E}_n) \oint_{S'} e^{-i\vec{s} \cdot \vec{r}'} \cdot d\vec{S}', \quad (5)$$

Интегральное уравнение для приближения дискретных диполей:

$$\{\vec{E}(\vec{r}) - \vec{E}^n(\vec{r})\} \cdot \vec{e}_m = k_0^2(\varepsilon - 1) \int_{V'} \hat{G}(\vec{r}', \vec{r}) \vec{E}(\vec{r}') d\vec{r}' \quad (6)$$

$$\{\vec{E}_1(\vec{r}) - \vec{E}_1^n(\vec{r})\} \cdot \vec{e}_m \approx k_0^2(\varepsilon - 1) \sum_{n=1, n \neq 1}^N \hat{G}_{n,1} \vec{E}_n V_n, \quad (7)$$

$$\vec{E}^n \cdot \vec{e}_m = i\omega \mu \mu_0 \int_V \vec{j}(\vec{r}') \cdot \vec{G}_m(\vec{r}', \vec{r}) dV', \vec{E}_i = \vec{E}(\vec{r})|_{r \in V_i} \quad (8)$$

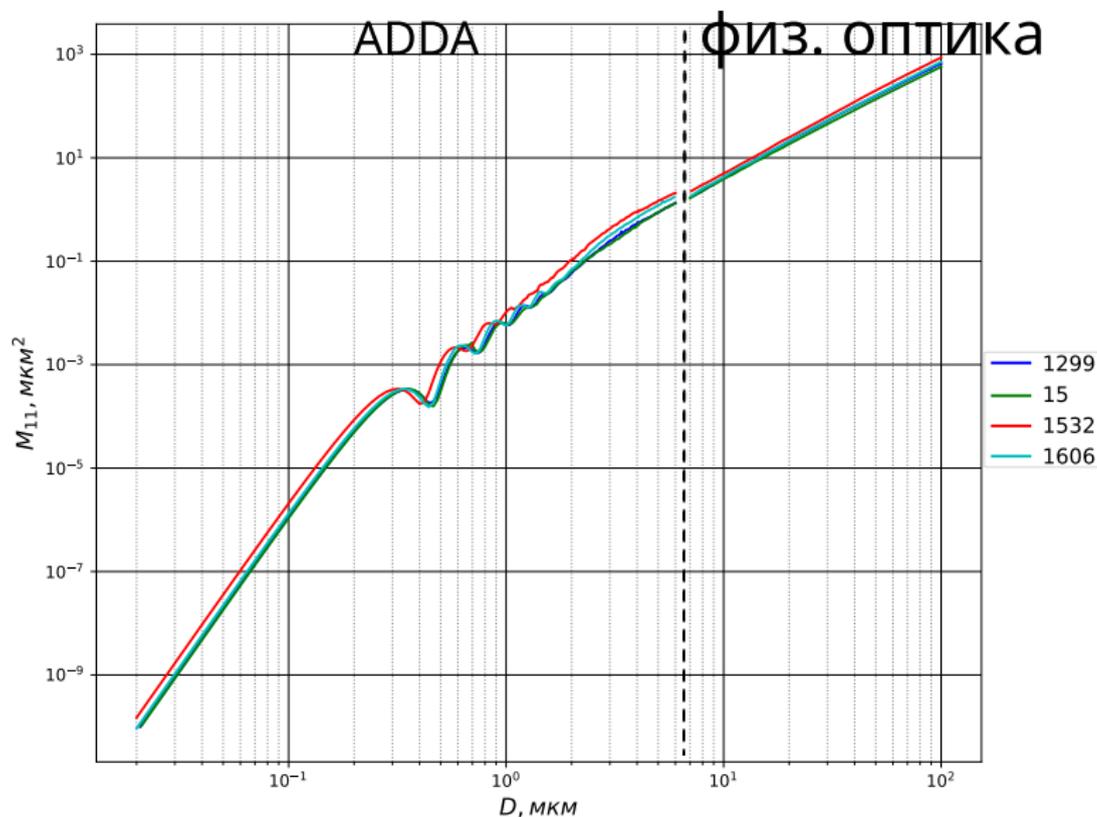


Рис. 7: Дифференциальное сечение рассеяния $M_{11}(D)$. Хаотически ориентированная пыль. $\theta = 180^\circ$, $n = 1.3116$, $\lambda = 0.532 \mu\text{км}$.

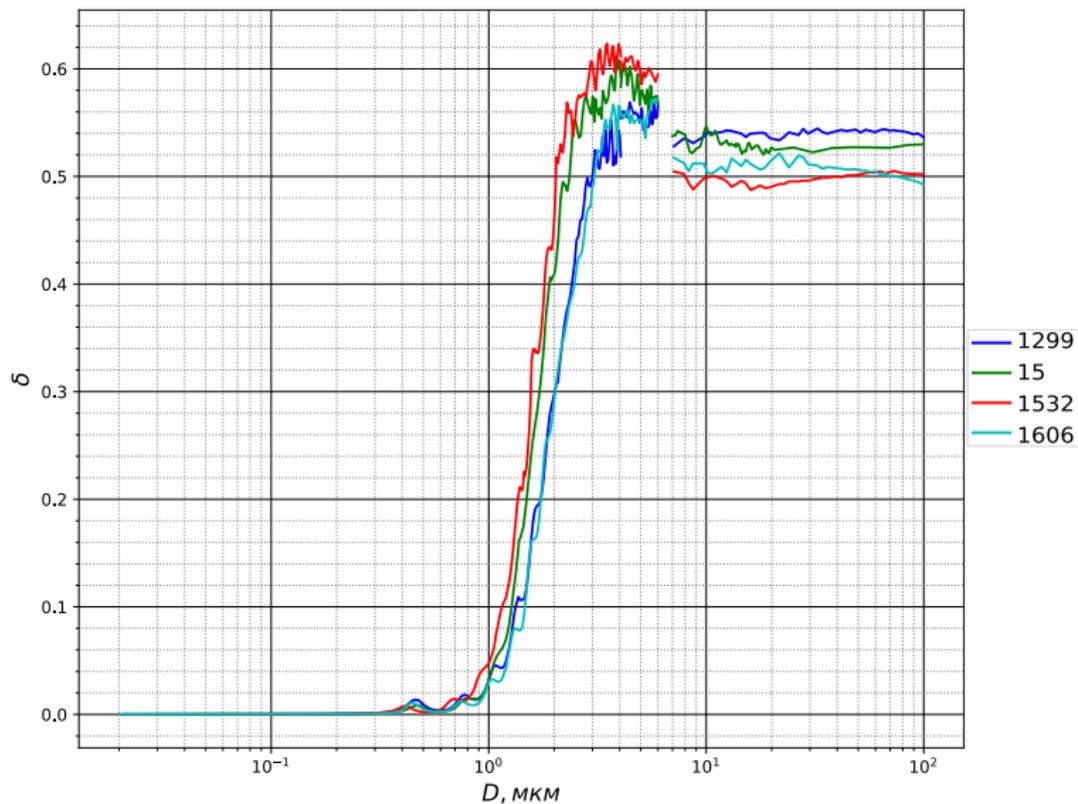


Рис. 8: Линейное деполаризационное отношение $\delta(D)$. Хаотически ориентированная пыль. $\theta = 180^\circ$, $n = 1.3116$, $\lambda = 0.532$ мкм.

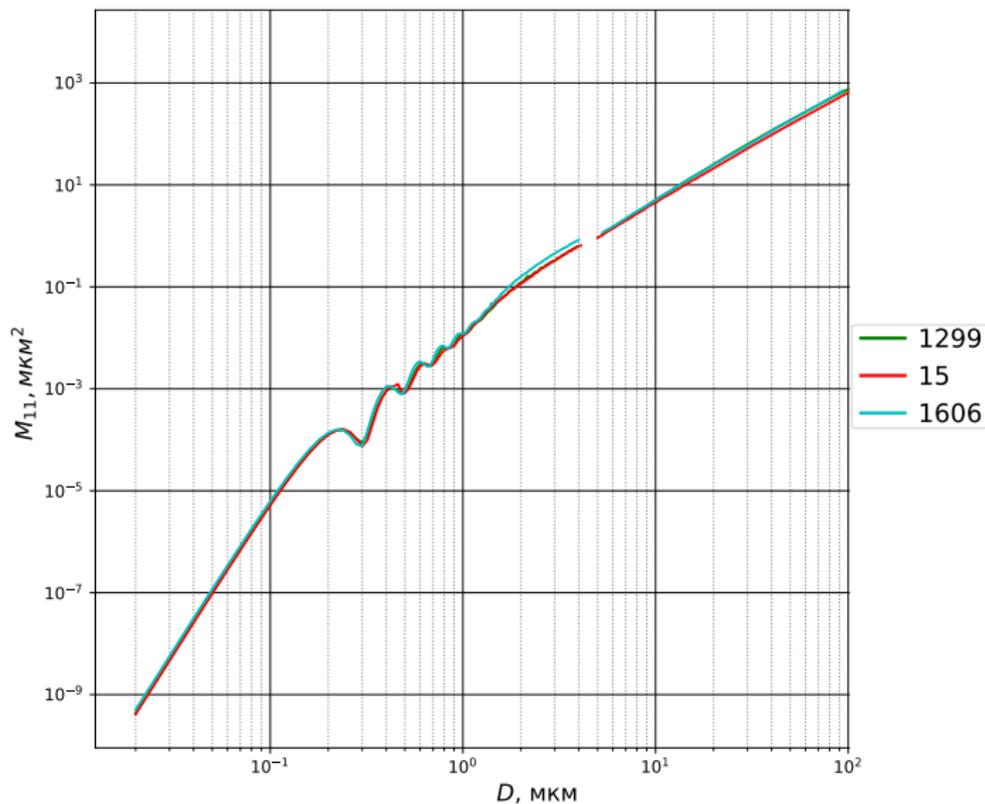


Рис. 9: Дифференциальное сечение рассеяния $M_{11}(D)$. Хаотически ориентированная пыль. $\theta = 180^\circ$, $n = 1.3249$, $\lambda = 0.355$ $\mu\text{км}$.

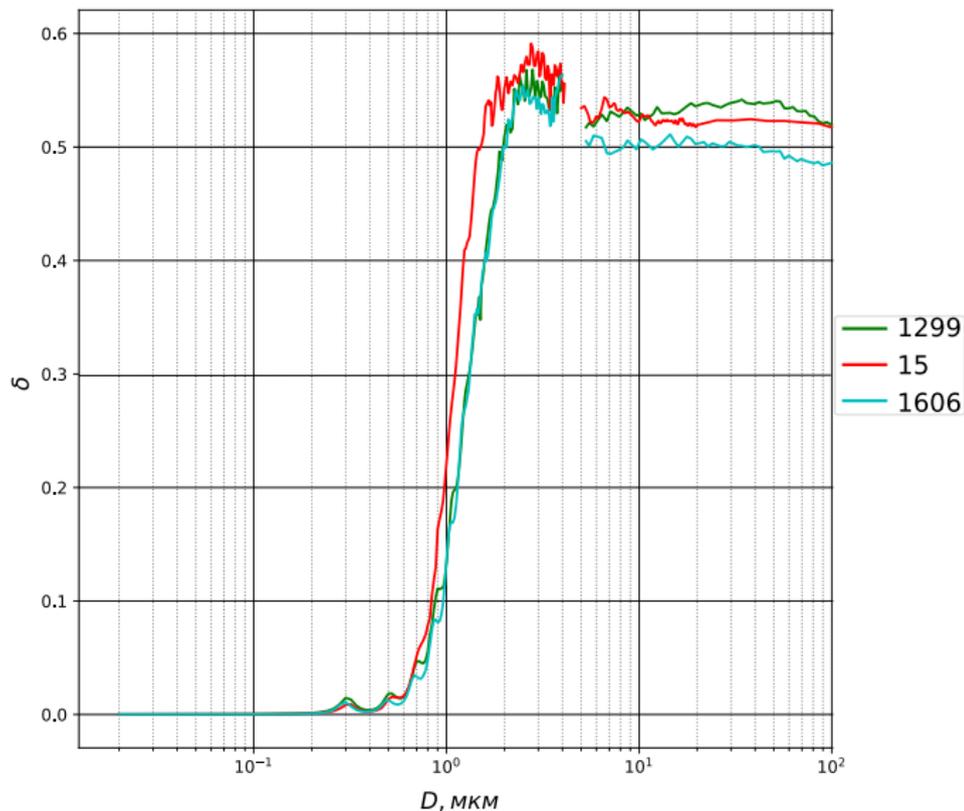


Рис. 10: Линейное деполаризационное отношение $\delta(D)$.

Хаотически ориентированная пыль. $\theta = 180^\circ$, $n = 1.3249$, $\lambda = 0.355_{\mu\text{m}/16}$

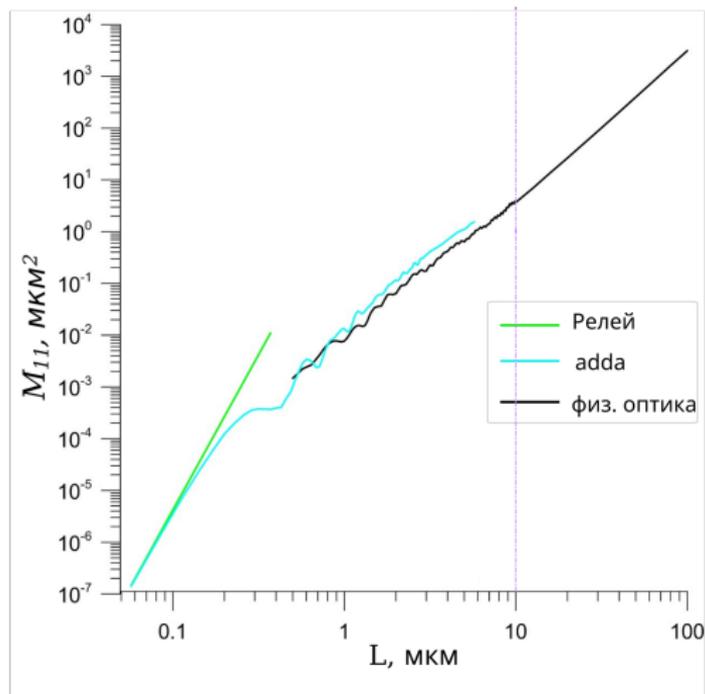


Рис. 11: Элемент $M_{11}(L)$. Хаотически ориентированный столбик.
 $\theta = 180^\circ$, $n = 1.3116$, $\lambda = 0.532$ μKM .

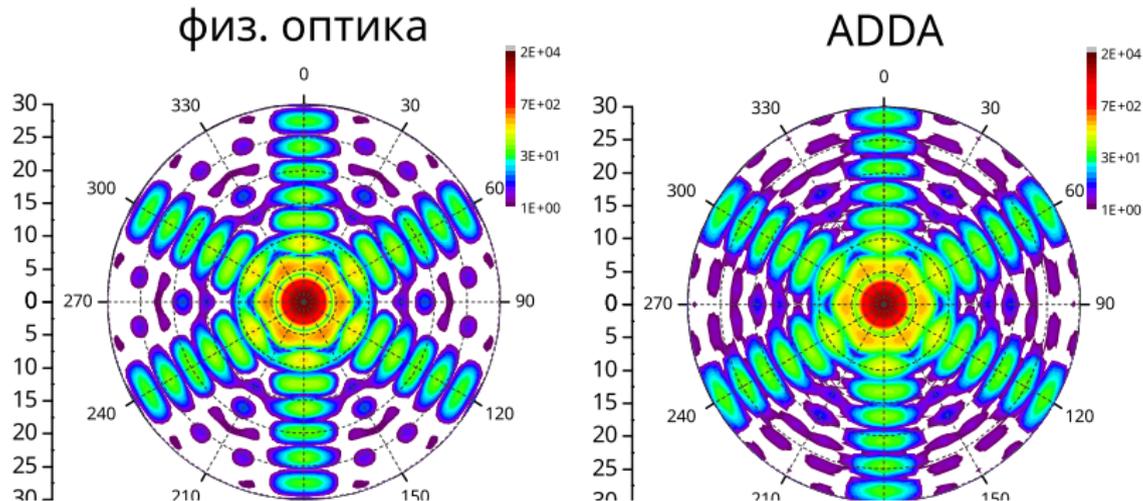


Рис. 12, Рис 13: Полусфера рассеяния $M_{11}(\theta, \phi)$. Пластинка, фиксированной ориентацией $n = 1.3249$, $\lambda = 0.355$ мкм. Ширина $W = 10$ мкм, высота $L = 2$ мкм. В окрестности рассеяния вперед ($\theta = 0$).

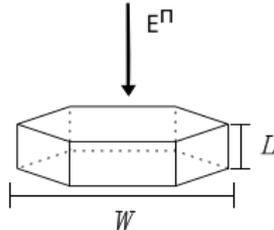


Рис. 14: Ориентация пластинки.

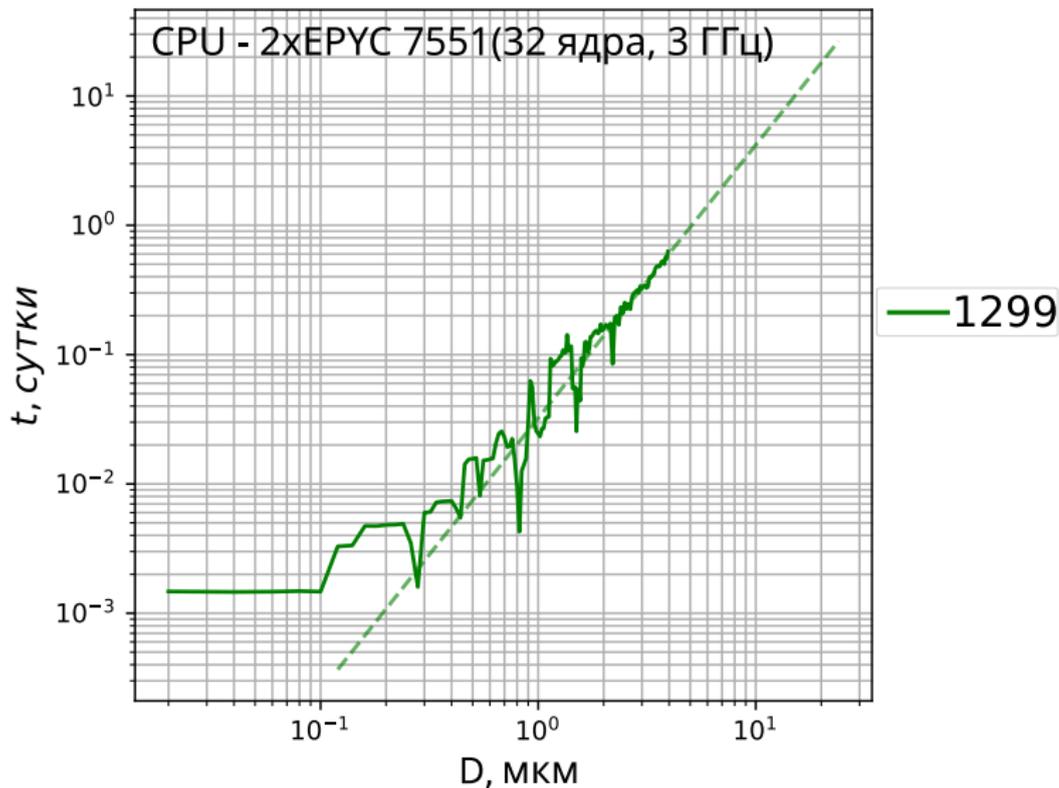


Рис. 15: Зависимость времени расчета от размера для ADDA.

Заключение

В докладе представляются результаты решение задачи рассеяния света на мелких хаотически ориентированных кристаллах неправильной формы размерами от 0.02 до 6 мкм. Решение задачи рассеяния получено в рамках метода ADDA v. 1.4[1] для длин волн 0.532, 0.322 мкм и показателей преломления 1.3116, 1.3249 соответственно. Проведено сопоставление полученных результатов с имеющимся решением, полученным в рамках приближения физической оптики[2].

Расчет матриц рассеяния света для ледяных кристаллических частиц перистых облаков выполнен при финансовой поддержке РНФ (грант № 22-27-00282).

[1] The discrete dipole approximation: An overview and recent developments, M.A. Yurkin, A.G. Hoekstra // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2007. V. 106. P. 558-589.

[2] Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Borovoi A.G., Grynko Y., Förstner J. Light scattering by ice crystals of cirrus clouds: Comparison of the physical optics methods // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2016. V. 182. P. 12–23.

Список литературы

- [1] Borovoi A.G., Kustova N.V., Oppel U.G. Light backscattering by hexagonal ice crystal particles in the geometrical optics approximation // Opt. Engineering. 2005. V. 44. P. 071208.
- [2] Okamoto, H., Sato, K., Borovoi, A., Ishimoto, H., Masuda, K., Konoshonkin, A., Kustova, N. (2020). Wavelength dependence of ice cloud backscatter properties for space-borne polarization lidar applications. In Optics Express (Vol. 28, Issue 20, p. 2917).
- [3] Okamoto, H., Sato, K., Borovoi, A., Ishimoto, H., Masuda, K., Konoshonkin, A., Kustova, N. (2019). Interpretation of lidar ratio and depolarization ratio of ice clouds using spaceborne high-spectral-resolution polarization lidar. In Optics Express (Vol. 27, Issue 25, p. 36587).