

¹Национальный Исследовательский Томский
Государственный Университет
²Институт оптики атмосферы имени В. Е. Зуева СО РАН



Методы оценки микрофизических параметров ледяных кристаллов и атмосферных агрегатов для задач дистанционного зондирования атмосферы

Докладчик: студент¹, техник²

Бабинович Анастасия Евгеньевна

Научный руководитель: Коношонкин

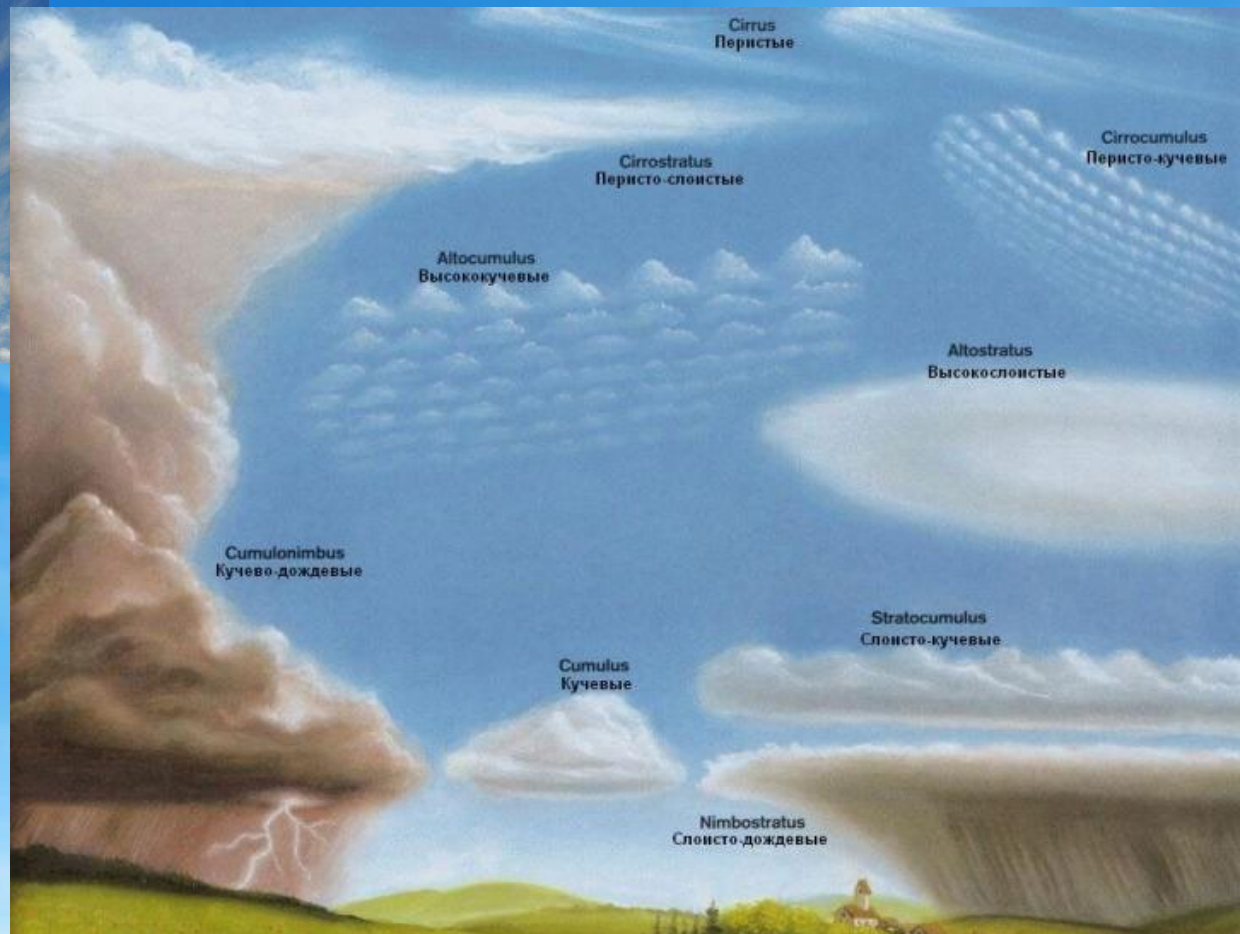
Александр Владимирович^{1,2}, д.ф-м.н.

г. Москва



Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса

Перистые облака



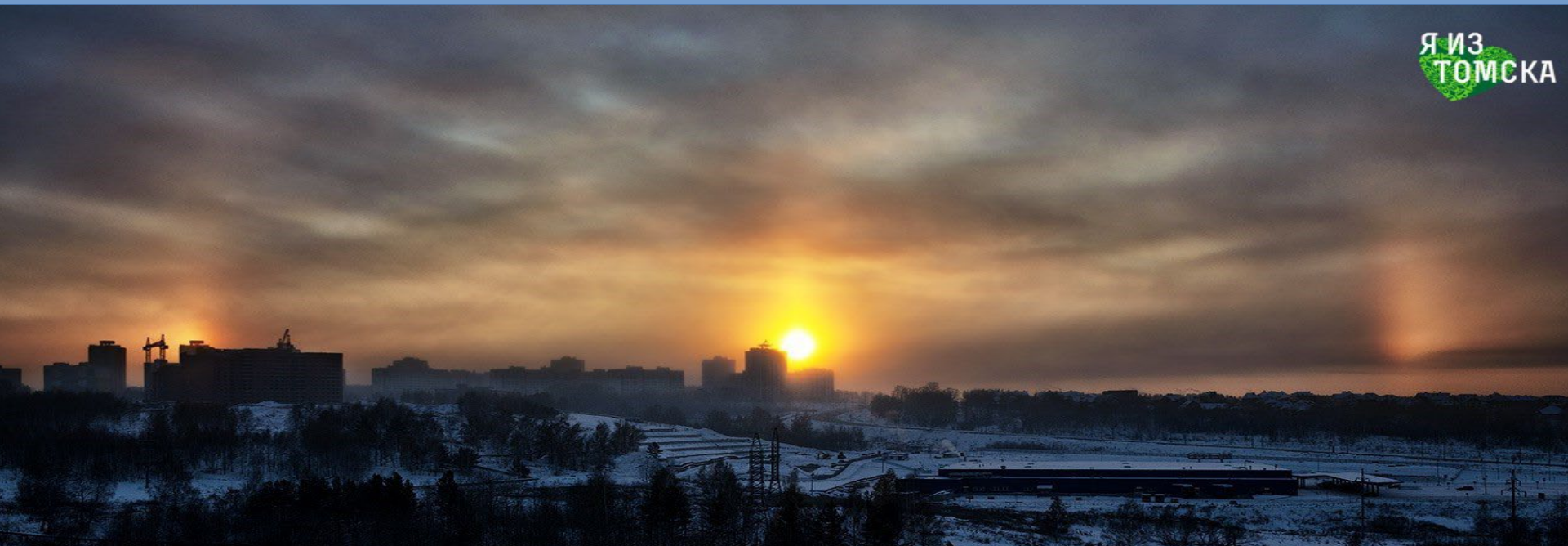
Перистые облака



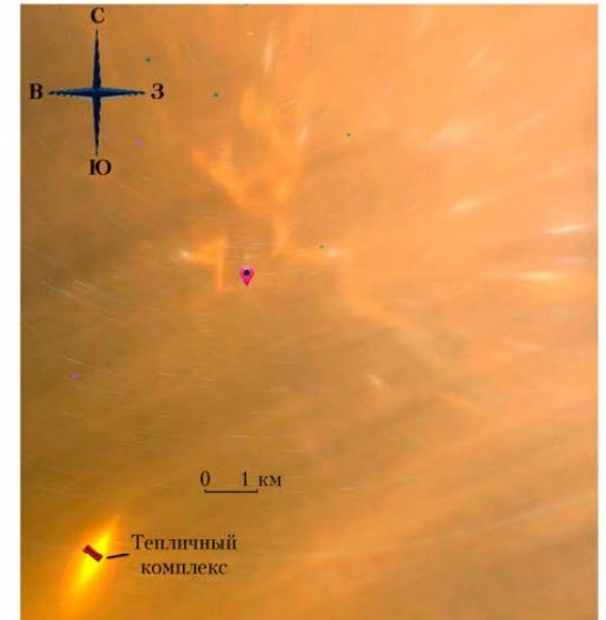
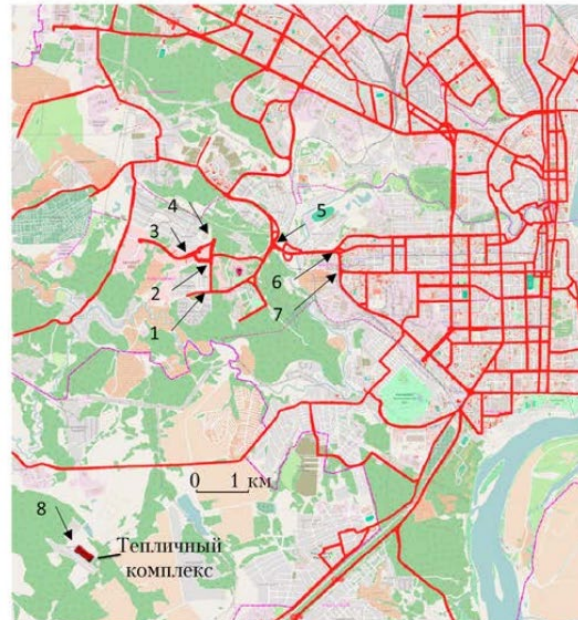
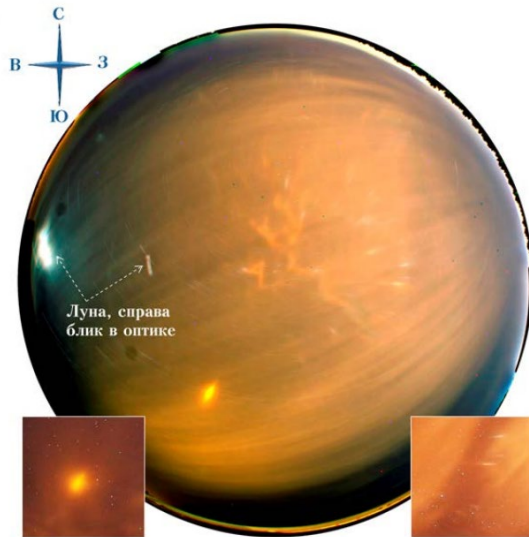


Оптические явления (световые столбы)

Я ИЗ
ТОМСКА



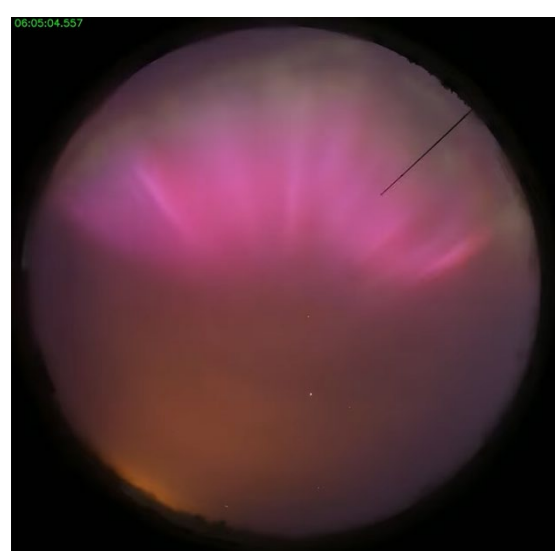
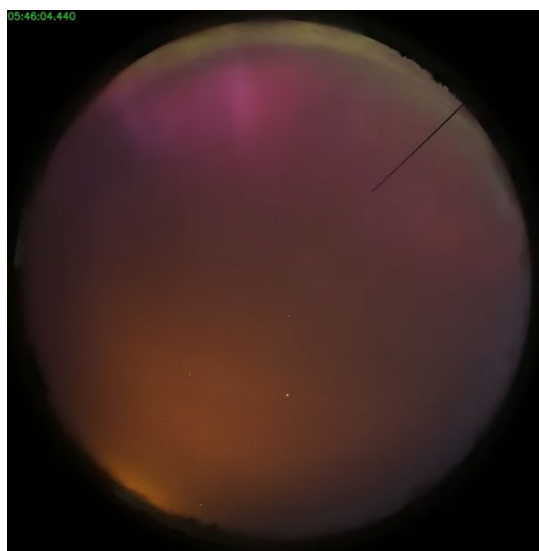
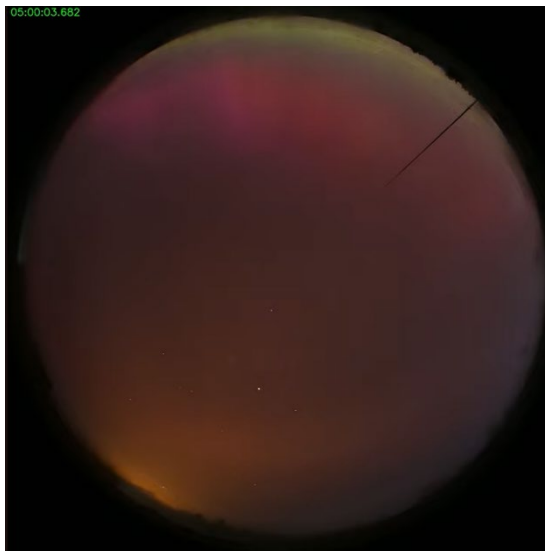
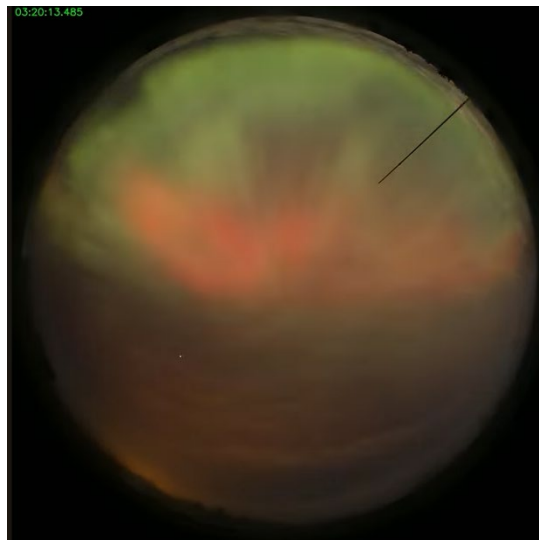
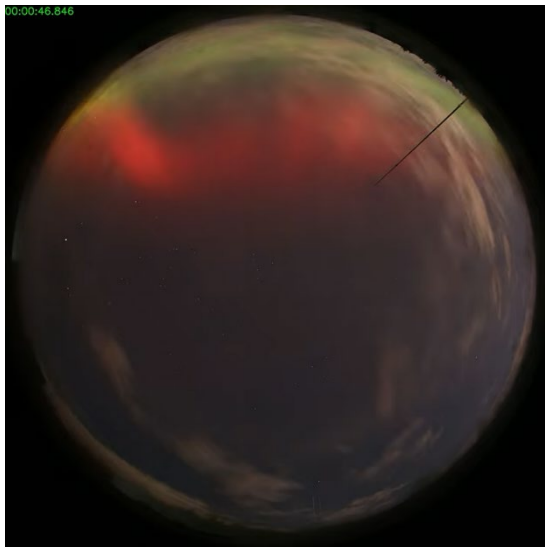
Станция оптических наблюдений небосвода над Академгородком г. Томска (TomSky) [1].



1. <https://sky.iao.ru/>

2. Морозов А. М., Галилейский В. П., Елизаров А. И., Кокарев Д. В. Наблюдение зеркального отражения освещенной подстилающей поверхности облачным слоем из ледяных пластинок. // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 01. С. 88-92. DOI: 10.15372/AOO20170112.

Северное сияние снятое камерой полного неба



Содержание

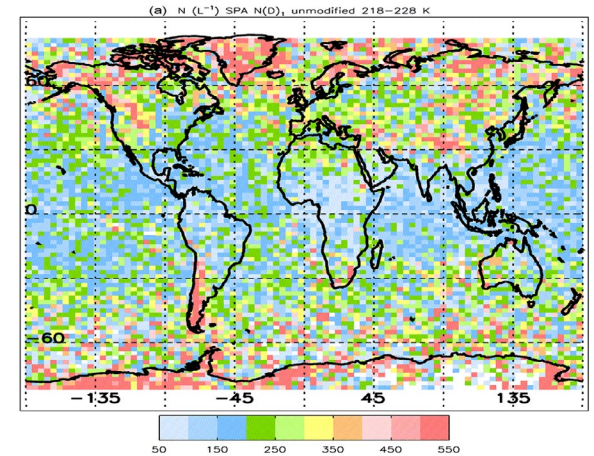
1. Из чего состоят перистые облака?
2. Почему их важно изучать?
3. Исследование характеристик обратного рассеяния света для полых гексагональных столбиков
4. Оптическая модель перистого облака, состоящего из полых гексагональных столбиков
5. Агрегаты в перистых облаках
6. Заключение

A photograph of a bright blue sky filled with soft, white, wispy clouds. The clouds are scattered across the frame, with some appearing more dense and others more delicate. The overall tone is serene and clear.

Из чего состоят перистые облака?

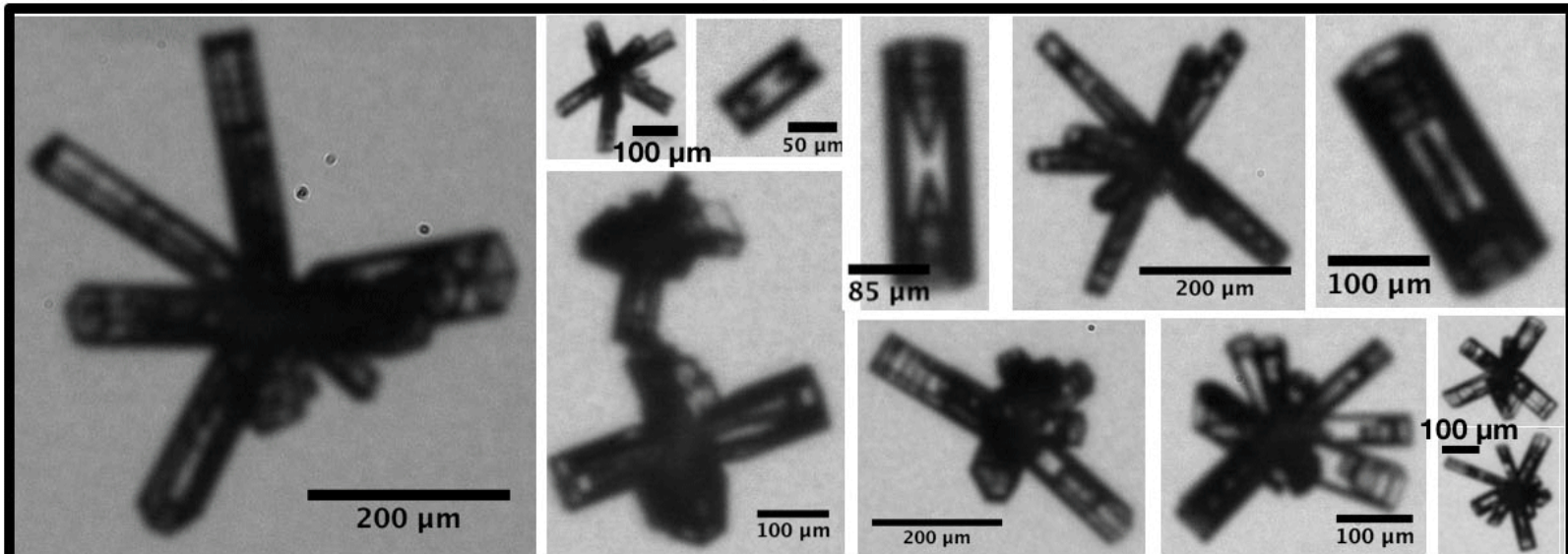
Объект исследования

В природе не все атмосферные кристаллы имеют правильную форму!

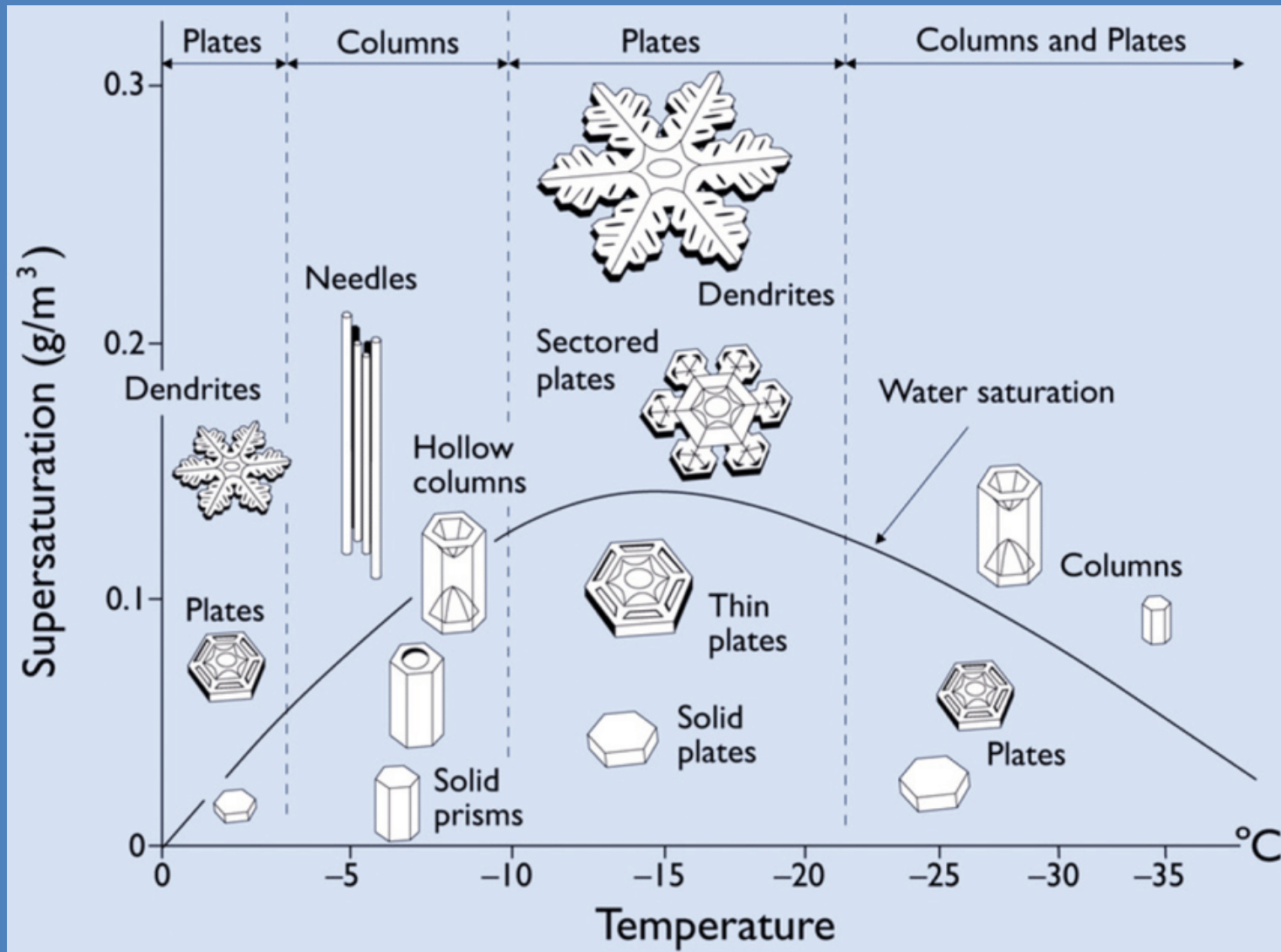


Географическое распределение медианной концентрации ледяных частиц в атмосфере

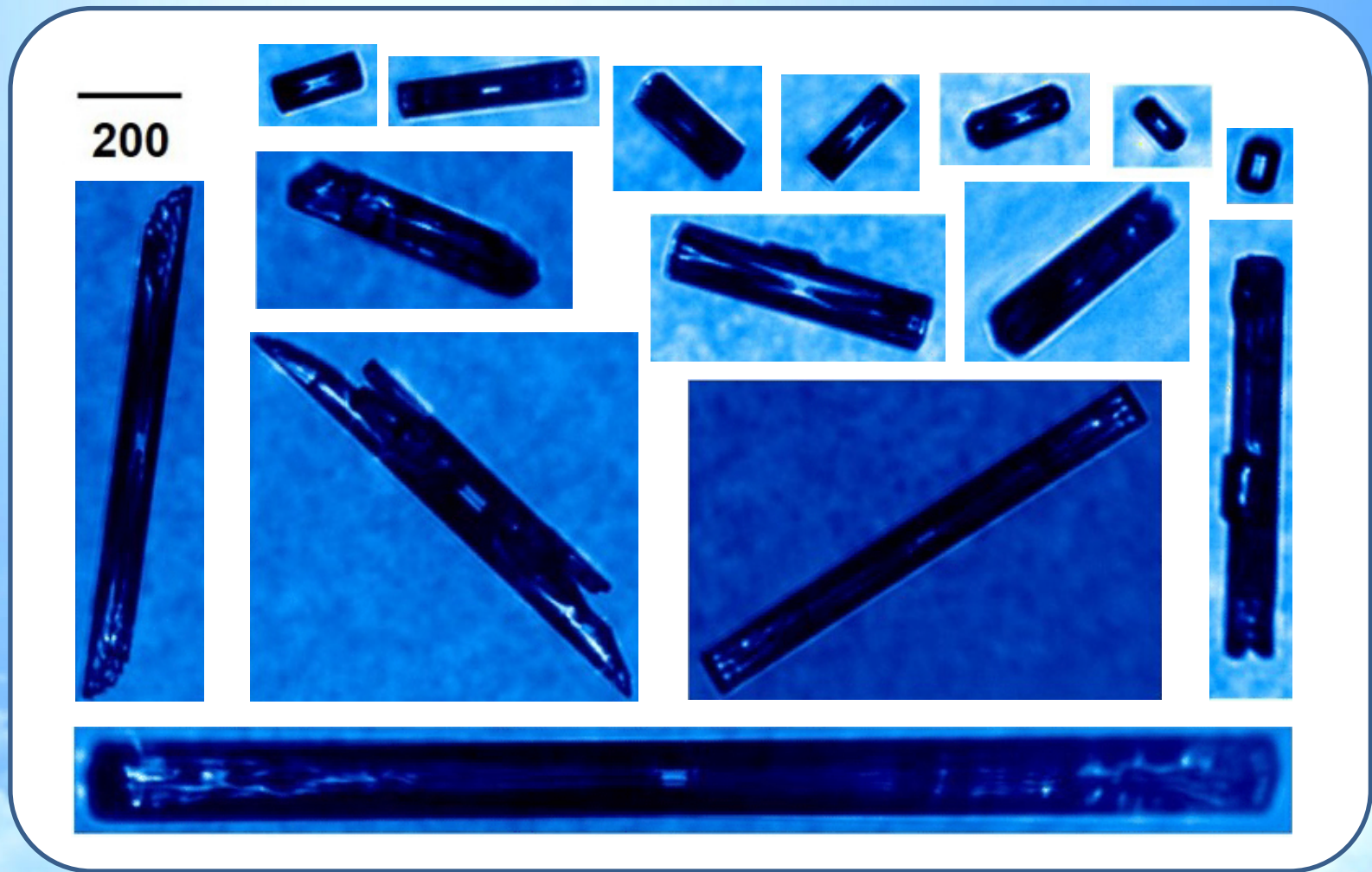
(b) Ice particles in a tropical cirrus



Ледяные атмосферные кристаллы



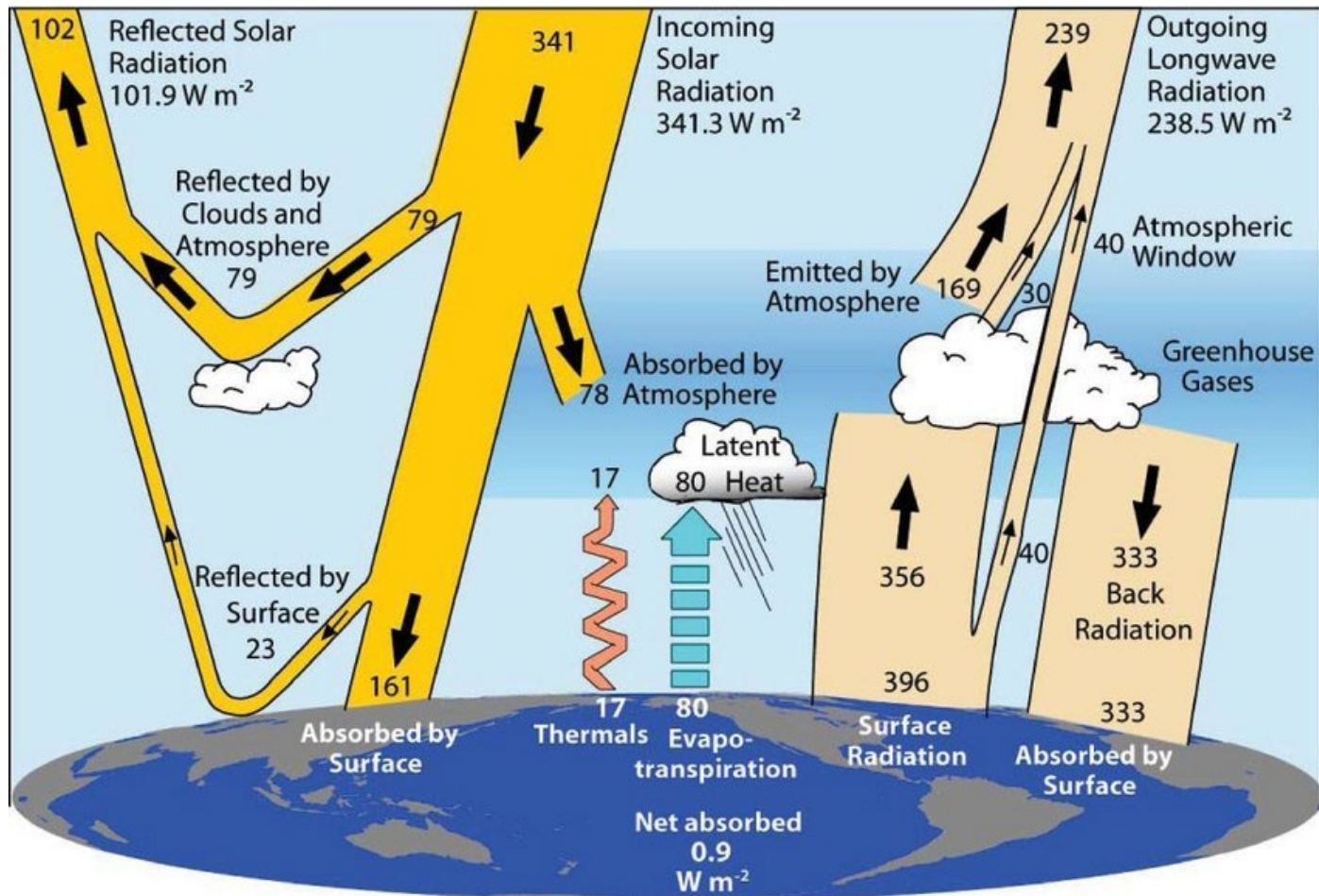
Атмосферные кристаллы



1. J. Um, G. M. McFarquhar, Y. P. Hong, S.-S. Lee, C. H. Jung, R. P. Lawson, and Q. Mo. Dimensions and aspect ratios of natural ice crystals // Atmos. Chem. Phys. 15, 3933–3956 (2015)

Почему их важно изучать?

Влияние на радиационный баланс планеты и климат



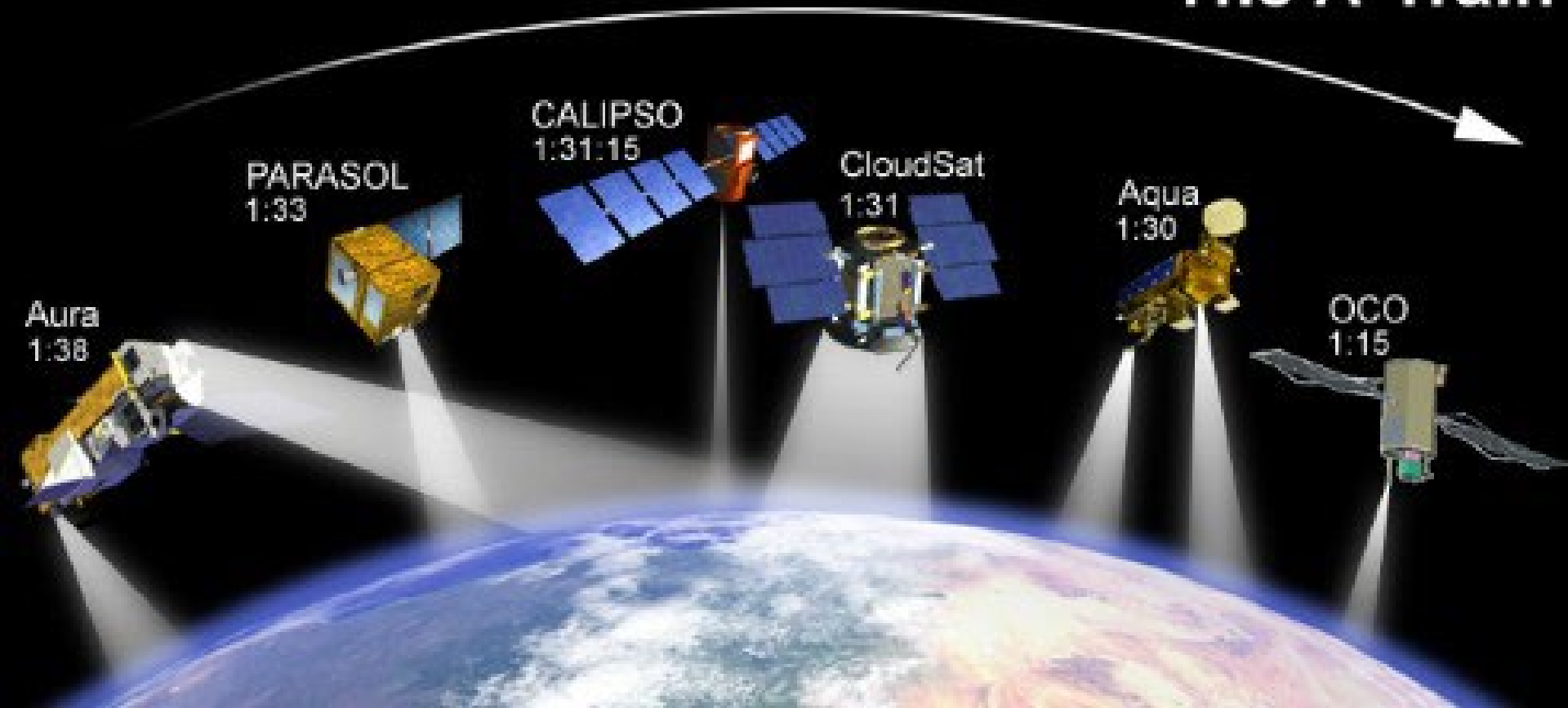
Sancho, J.M. & Cos, M.C. & Jiménez, C.. (2011). Comparison of global irradiance measurements of the official Spanish radiometric network for 2006 with satellite estimated data. Tethys. 8. 43-52.

Актуальность

Актуальность темы обосновывается тем, что с запуском космических инструментов дистанционного зондирования появился высокий спрос на оптические модели кристаллических облаков, которые используются для обработки лидарных и радарных данных.

Актуальность

The A-Train



Наземные лидарные сети:

- EARLINET (Европа);
- AD-Net (Азия);
- LALINET/ALINET (Лат. Амер.);

Космические лидары:

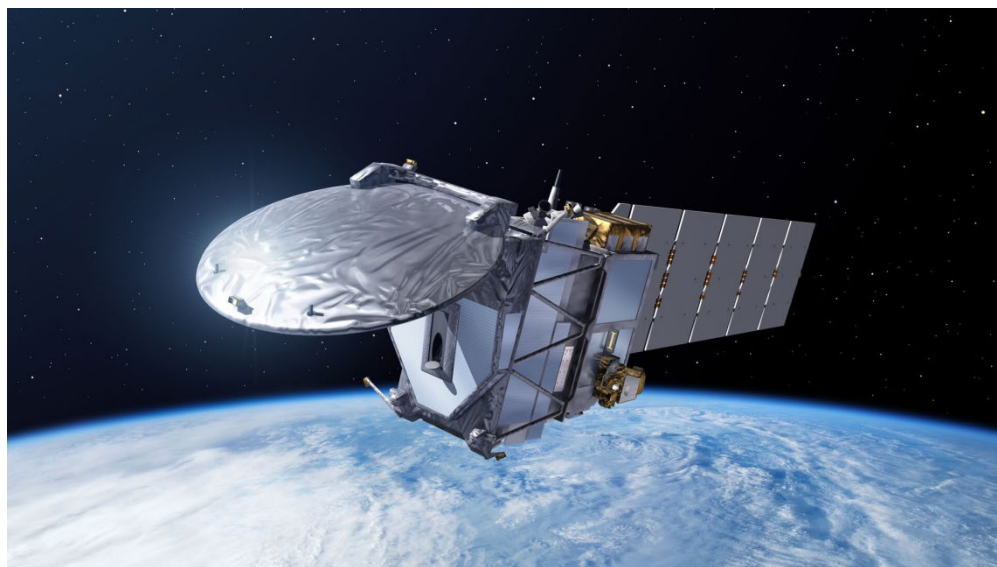
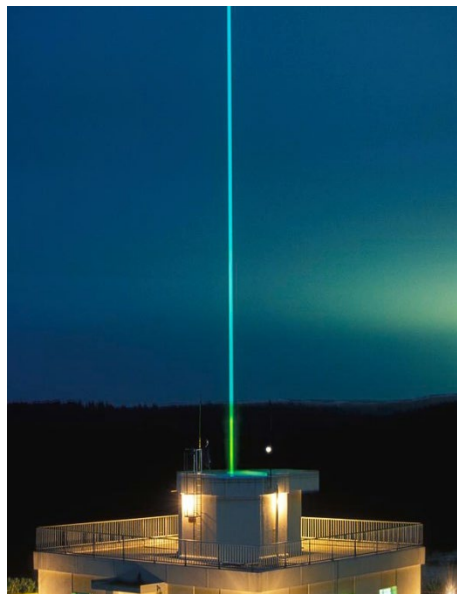
- БАЛКАН (СССР);
- ATLID (ESA-JAXA);
- CALIOP (CNES-NASA);
- CATS (NASA-SpaceX).

Наземные лидары:

- Серия «ЛОЗА» (Ю.С. Балин);
- ВПЛ ТГУ (И.В. Самохвалов);
- RAMSES (J. Reichardt, Германия).

Лидары наземные и космического базирования

- LITE (1994 – 9 days);
- BALKAN (1995 – 1997);
- GLAS-ICESat (2003-2009);
- CALIOP (2006-2023);
- CATS (2015 – 2017);
- ALADIN (2018);
- ATLAS-ICESat-2 (2018);
- GEDI (2019);
- MOLI (2022);
- ACDL (2022);
- ACHSRL (2022);
- ATLID-EarthCARE (2024).



ГЛОНАСС - Глобальная навигационная спутниковая система



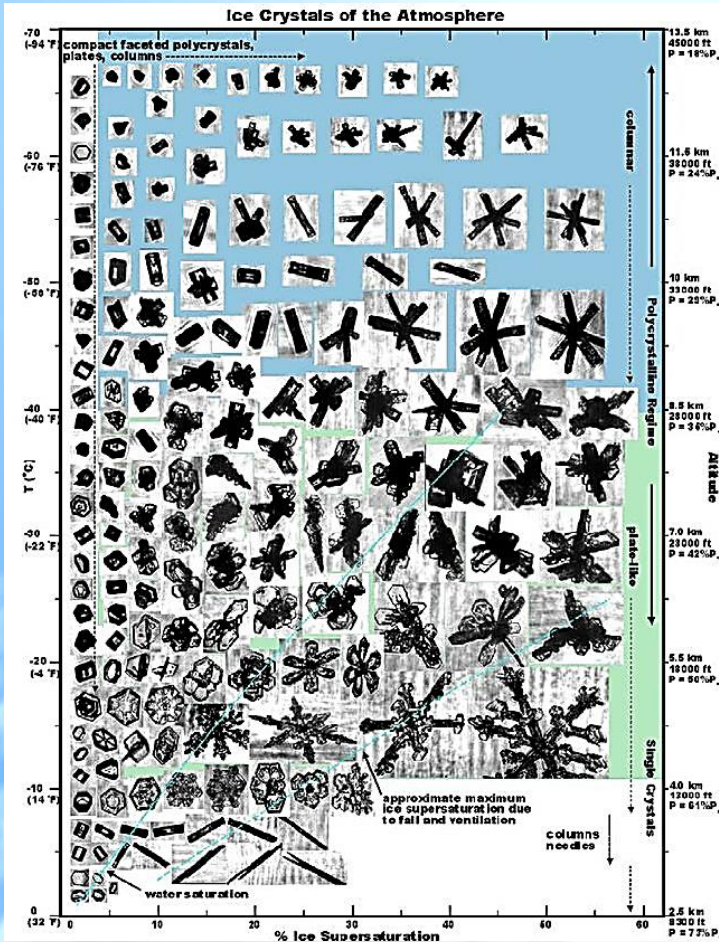
Задача

Интерпретация лидарного сигнала требует решения задачи рассеяния света на атмосферных частицах.

В настоящее время отсутствует полное решение задачи рассеяния света для крупных несферических частиц аэрозоля и ледяных кристаллов перистых облаков.

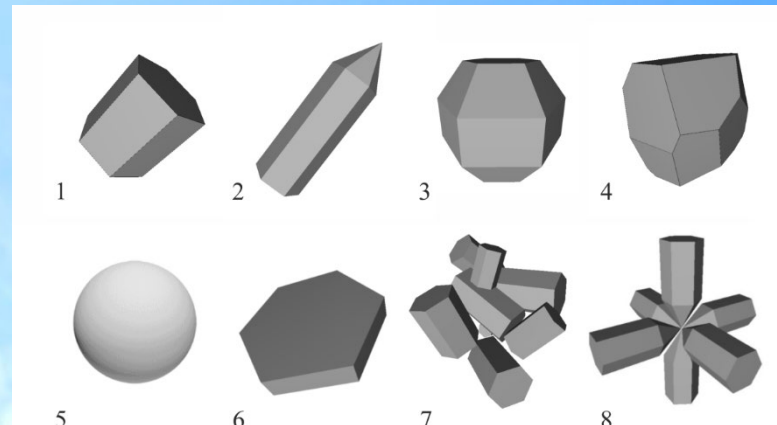
Это значительно усложняет интерпретацию лидарного сигнала.

Микрофизические параметры кристаллов перистых облаков



Экспедиция	Число исследуемых образцов	Концентрация форм, %		
		Столбики	Пластинки	Другие
TWP-ICE	4799	40,9%	43,5%	14,5%
SPARTICUS	13 919	48,3%	10,8%	40,9%
ISDAC	3787	70,7%	9,2%	20,1%

Моделируемые формы:



1. Um J., McFarquhar G.M., Hong Y.P., et. Dimensions and aspect ratios of natural ice crystals // Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15. P. 3933–3956.

$$\langle \mathbf{M} \rangle = \int_{L \min}^{L \max} \int_0^1 \iiint_{\alpha, \beta, \gamma} \mathbf{M}_0(\alpha, \beta, \gamma, \mu, L) p(\alpha, \beta, \gamma, \mu, L) \sin(\beta) d\alpha d\beta d\gamma d\mu dL$$

$$p(\alpha, \beta, \gamma, \mu, L) = p_1(\alpha, \beta, \gamma) \cdot p_2(\mu) \cdot p_3(L)$$

$$\mathbf{M}_2(L) = \int_0^1 \mathbf{M}_1(L, \mu) p_2(\mu) d\mu$$

$$\mathbf{M}_1(L, \mu) = \iiint_{\alpha, \beta, \gamma} \mathbf{M}_0(\alpha, \beta, \gamma, \mu, L) p_1(\alpha, \beta, \gamma) \sin(\beta) d\alpha d\beta d\gamma$$

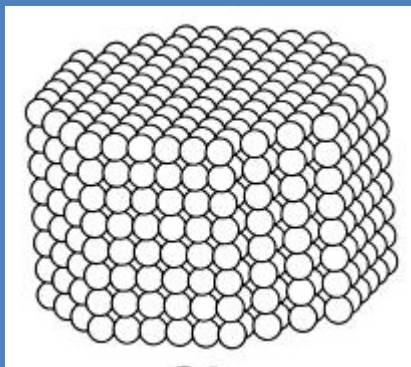
$$\langle \mathbf{M} \rangle = \int_{L \min}^{L \max} \mathbf{M}_2(L) p_3(L) dL$$

$$p_1(\alpha, \beta, \gamma) = \frac{1}{\iiint_{\alpha, \beta, \gamma} \sin(\beta) d\alpha d\beta d\gamma} = \frac{1}{8\pi^2}$$

$$\mathbf{M}_1 = \begin{pmatrix} M_{11} & 0 & 0 & M_{14} \\ 0 & M_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -M_{22} & 0 \\ M_{14} & 0 & 0 & M_{11} - 2M_{22} \end{pmatrix}$$

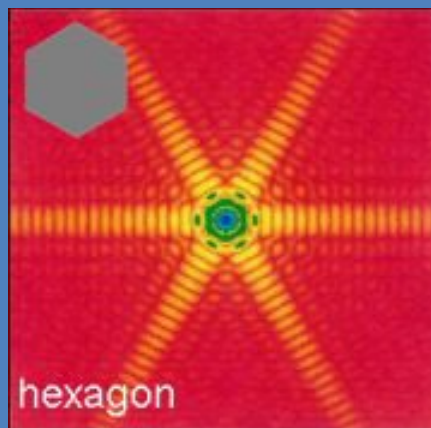
$$\beta = cM_{11}; \delta = \frac{M_{11} - M_{22}}{M_{11} + M_{22}}; \chi = \frac{M_{11}(\lambda_1)}{M_{11}(\lambda_2)}; S = \frac{c\sigma_{ext}}{\beta} \approx \frac{2s}{M_{11}}$$

Три вида методов решения задачи



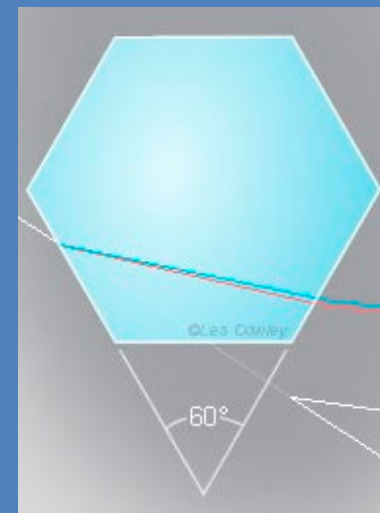
Точные численные
методы[1]
(e.g. DDA[4])

$x=35, m=1.3$ **20 h.**
 $x=35, m=2.0$ **148 h.**
 $x \leq \lambda$



Приближение
физической оптики[2]

$\forall x, \forall m$
time = **1 min.**
 $x > \lambda$



Приближение
геометрической оптики[3]

$\forall x, \forall m$
time = **0.1 sec.**
 $x \gg \lambda$

1. Mishchenko M.I., Hovenier J.W., and Travis L.D. // Academic Press, 1999. –690 p.

2. Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N., Okamoto H. // Opt. Express 2012. V.20. №27. P. 29222–28233.

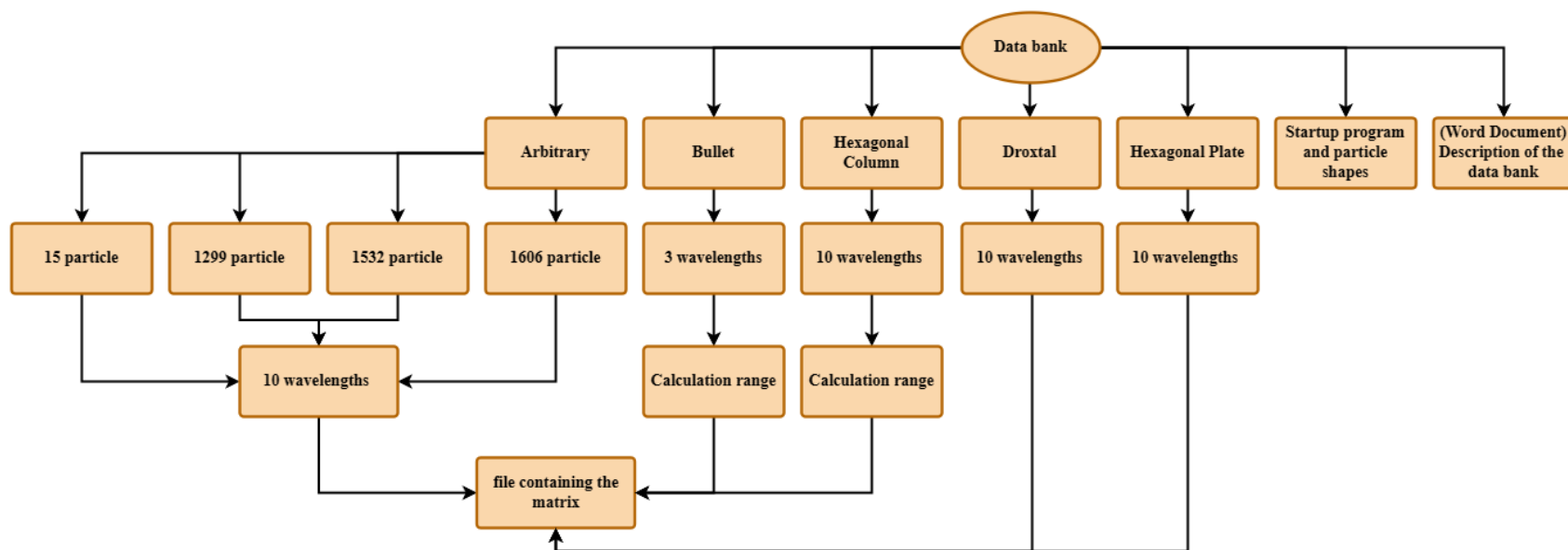
3. Borovoi A.G., Grishin I.A. // J. Opt.Soc. Amer. A. 2003. V.20, N 11. P. 2071–2080.

4. Yurkin M.A., Hoekstra A.G. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 2011. V.112 P. 2234–2247

Банк данных решений для атмосферных кристаллов




3 года расчетов



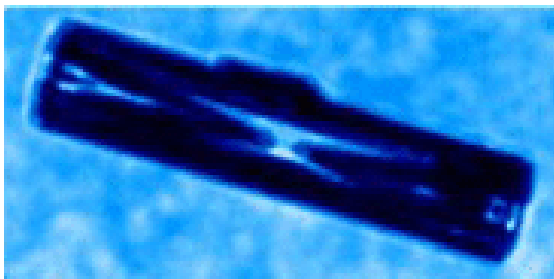
$\lambda = 0.355 \mu\text{m}$, $n = 1.3249$
 $\lambda = 0.532 \mu\text{m}$, $n = 1.3116$
 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$, $n = 1.3004 + i \cdot 0.0000019$
 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $n = 1.2893 + i \cdot 0.000424$
 $\lambda = 2 \mu\text{m}$, $n = 1.2744 + i \cdot 0.00164$
 $\lambda = 2.15 \mu\text{m}$, $n = 1.2663 + i \cdot 0.000403$

$\lambda = 1.064 \mu\text{m}$, $n = 1.6 + i \cdot 0.002$
 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$, $n = 1.6$
 $\lambda = 0.532 \mu\text{m}$, $n = 1.48 + i \cdot 0.002$
 $\lambda = 0.532 \mu\text{m}$, $n = 1.48$
 $\lambda = 0.532 \mu\text{m}$, $n = 1.3116$

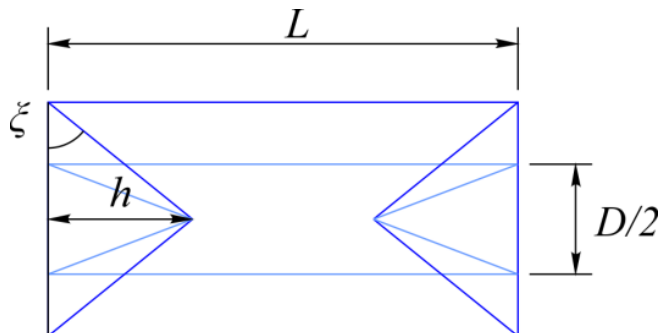
Результаты исследований



**Исследование характеристик
обратного рассеяния света
для полых гексагональных
столбиков**

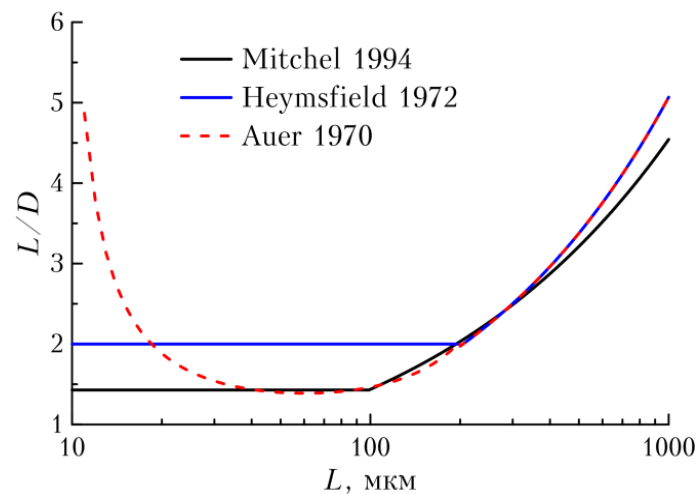
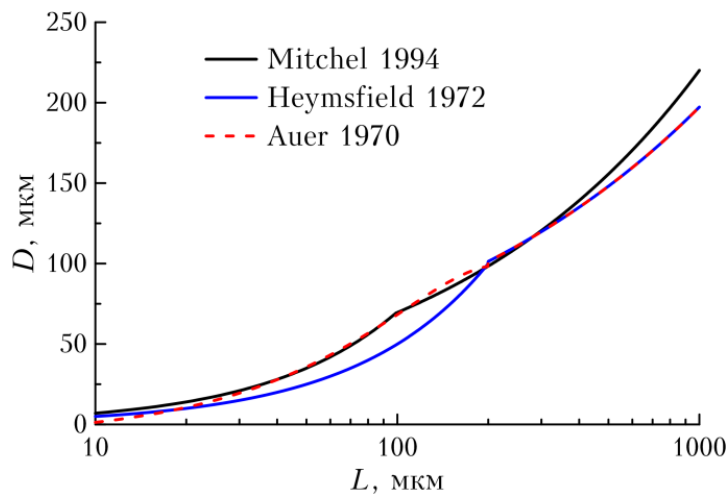
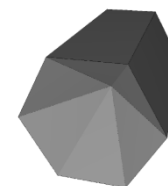


$$\mu = \frac{2h}{L} \quad \text{tg } \xi = \frac{h}{D/2} = \frac{L}{D} \mu$$

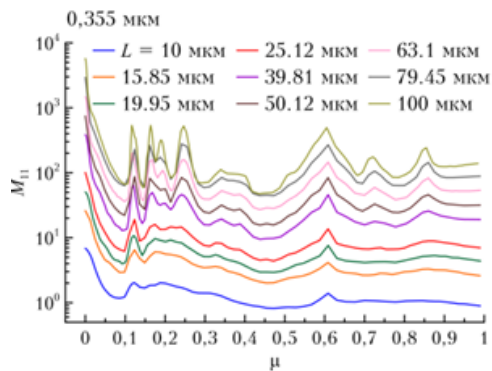


$$D = 0.7L, \quad L < 100 \text{ мкм}$$

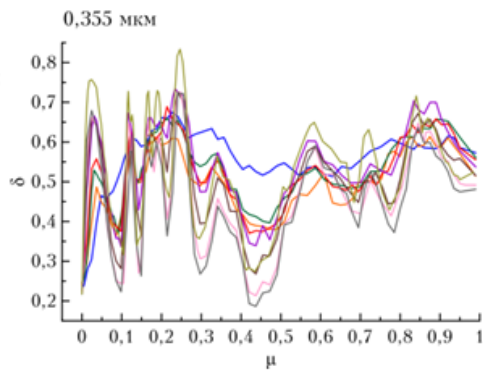
$$D = 6.96\sqrt{L}, \quad L \geq 100 \text{ мкм}$$



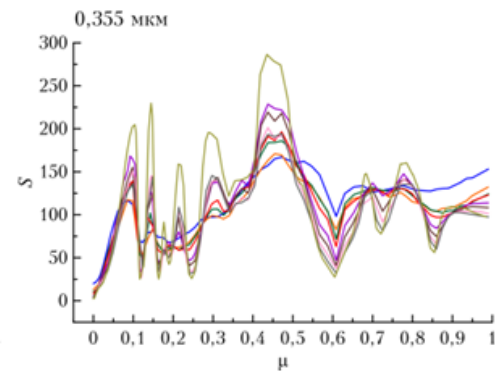
Зависимость ширины (а) и параметра формы (б) гексагонального кристалла от его длины.



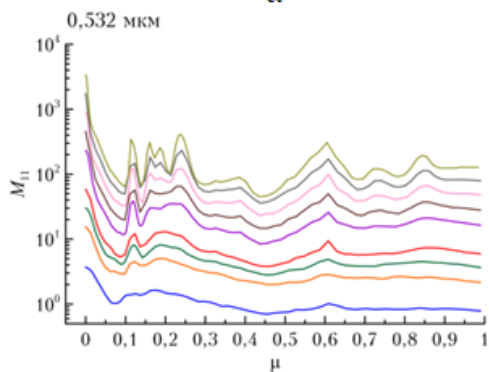
a



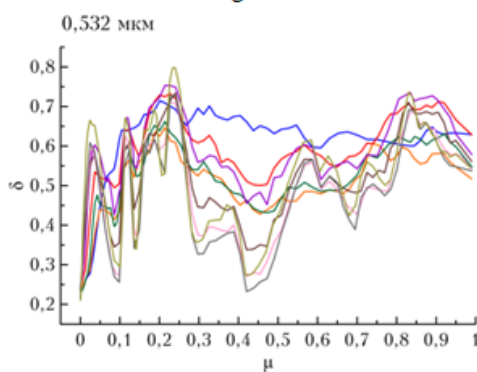
б



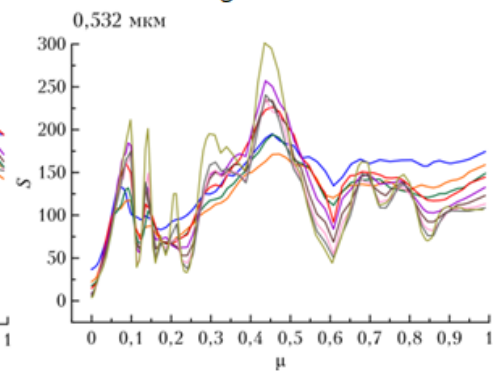
в



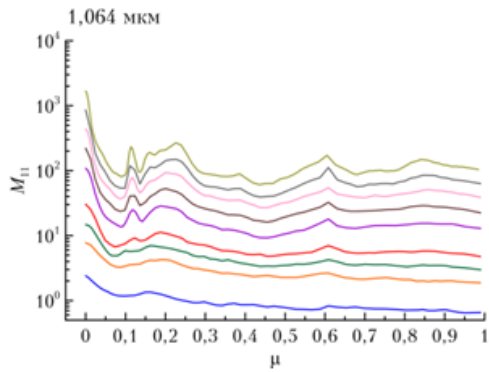
г



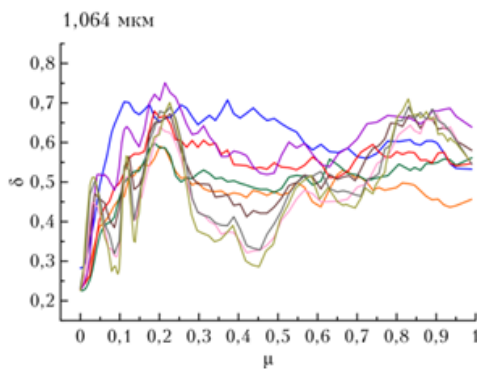
д



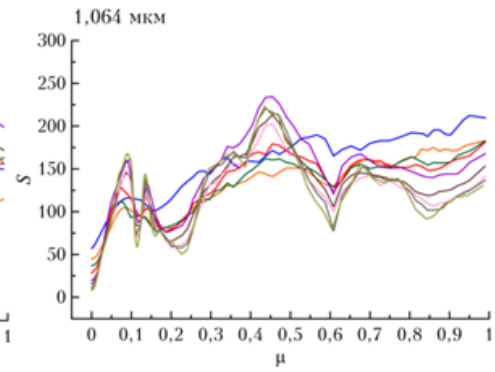
е



ж

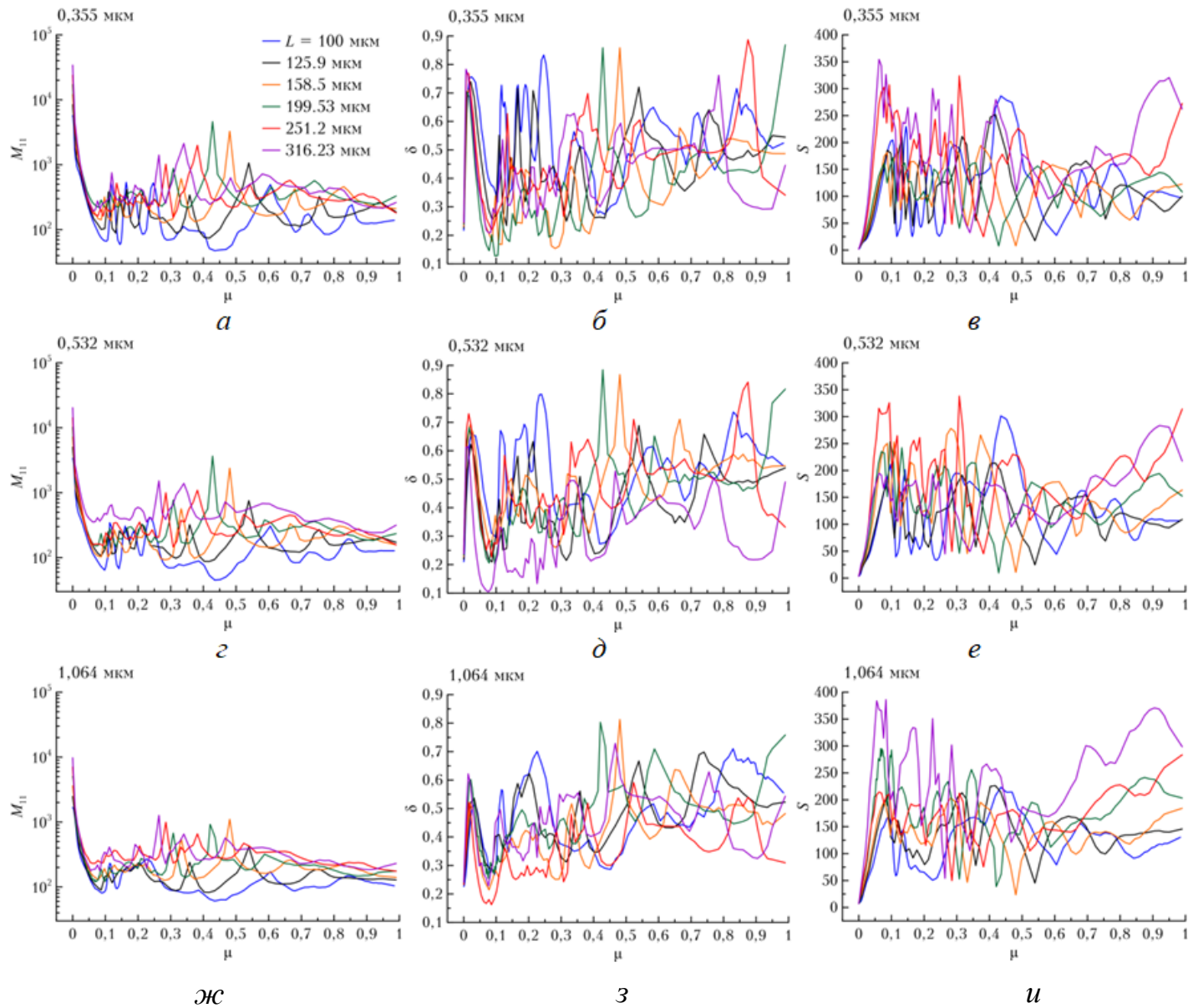


з

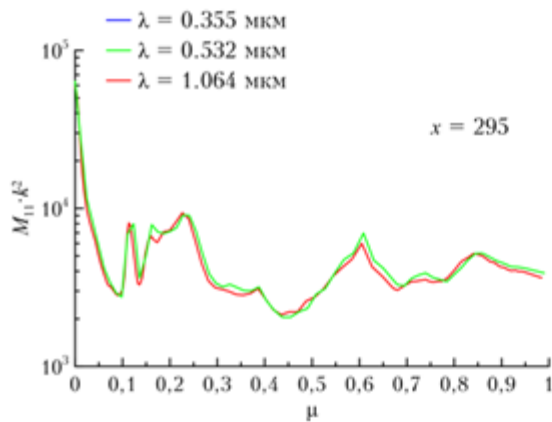


и

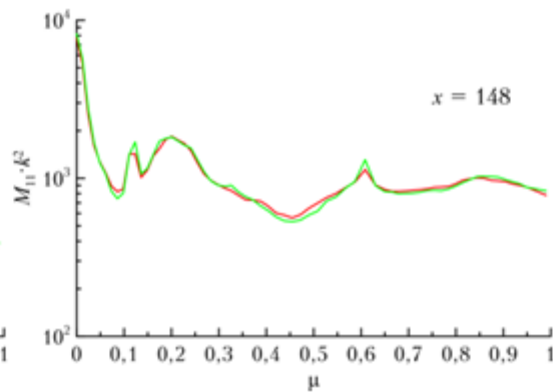
Характеристики обратного рассеяния для длин волн 0,355, 0,532 и 1,064 мкм в зависимости от степени полости для частиц размером менее 100 мкм



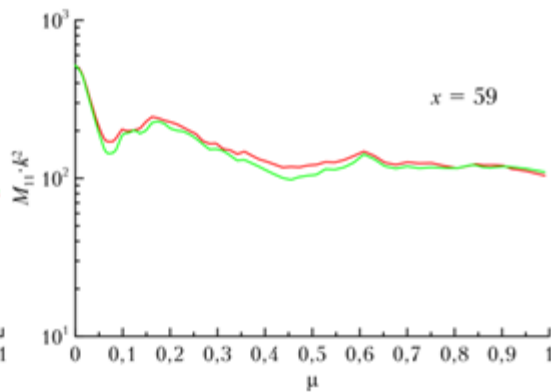
Характеристики обратного рассеяния для длин волн 0,355, 0,532 и 1,064 мкм в зависимости от степени полости для частиц размером более 100 мкм



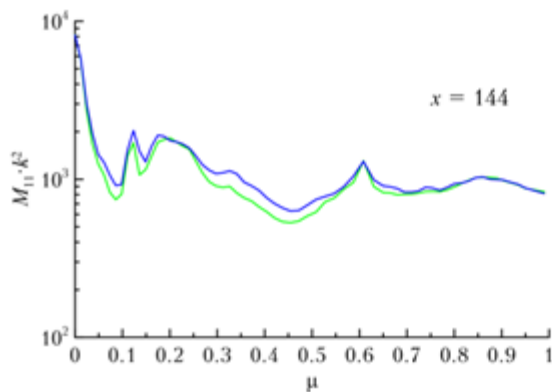
a



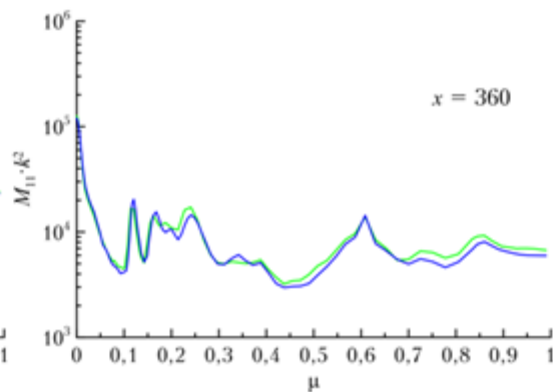
б



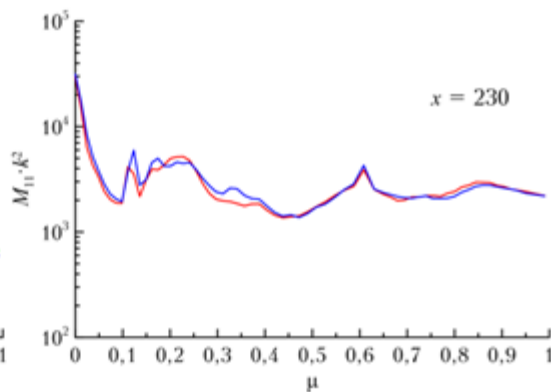
в



г



д




е

Зависимость $M_{11} \cdot k^2$ от дифракционного параметра x , при $x=295$ (а), 148(б), 59(в), 144(г), 360(д), 230(е) для разных комбинаций длин волн и показателей преломления.

Выводы

- эффект углового отражения практически полностью пропадает при величине полости $\mu=0,08$ (при величине угла полости $6,5^\circ$) независимо от длины волны света и от размера кристалла, при этом дифференциальное сечение рассеяния значительно уменьшается: от 10 до 100 раз в зависимости от размера кристалла.
- интерполяцию элемента M_{11} разумнее всего проводить следующим образом: сначала лидарное отношение строится от величины угла полости ξ для всех имеющихся размеров, затем происходит интерполяция лидарного отношения на необходимую расчетную сетку, а далее на его основе вычисляется элемент M_{11}
- что интерполяцию элемента M_{22} удобнее выполнять так: сначала деполяризационное отношение строится от угла полости и размера кристалла, затем оно интерполируется для тех же размеров, для которых интерполировалось лидарное отношение и вычислялся элемент M_{11} . Далее восстанавливается элемент M_{22} из имеющегося деполяризационного отношения и элемента M_{11}



Оптическая модель перистого облака, состоящего из полых гексагональных столбиков

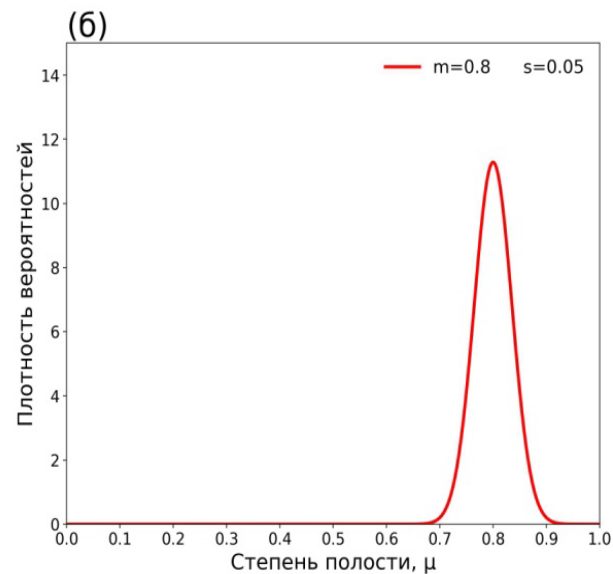
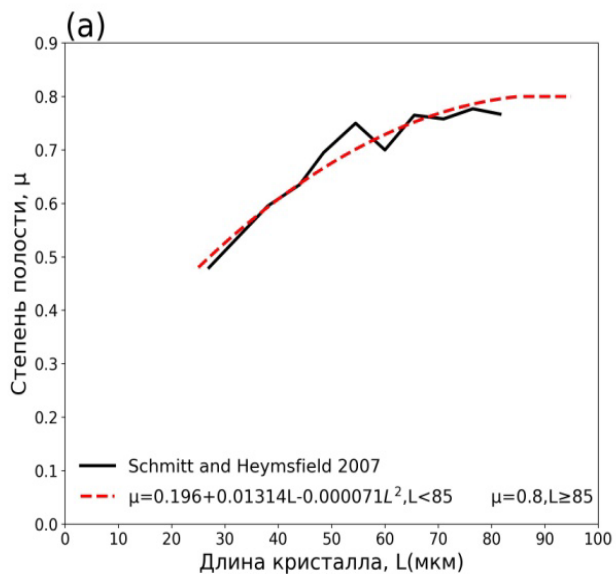
$$\mu_m(L) = 0.196 + 0.01314L - 7.1 \cdot 10^{-5} L^2 .$$

$L < 85$ мкм

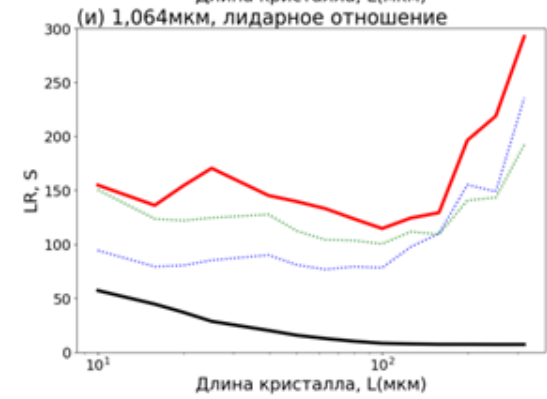
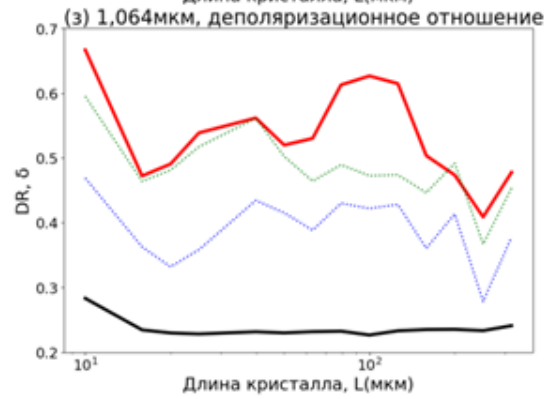
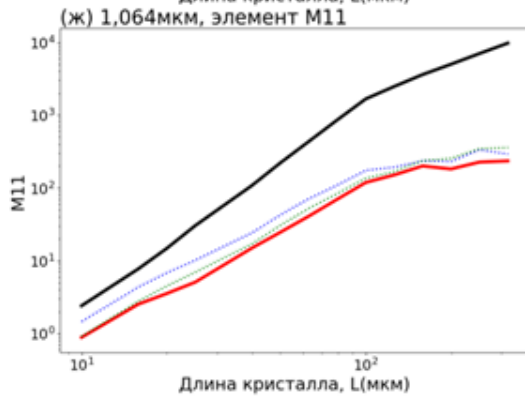
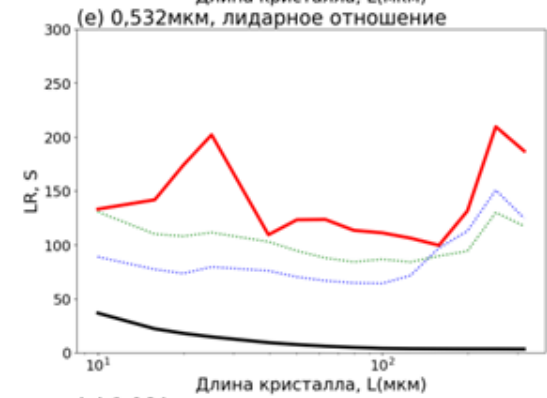
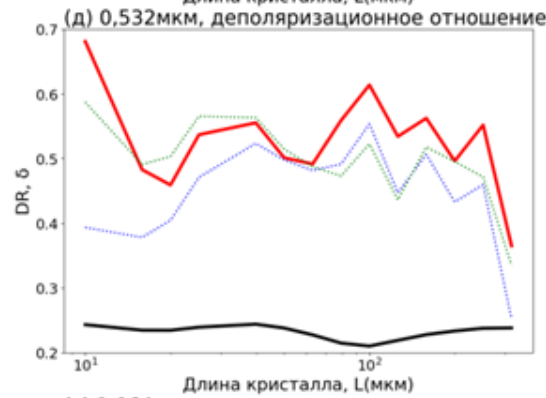
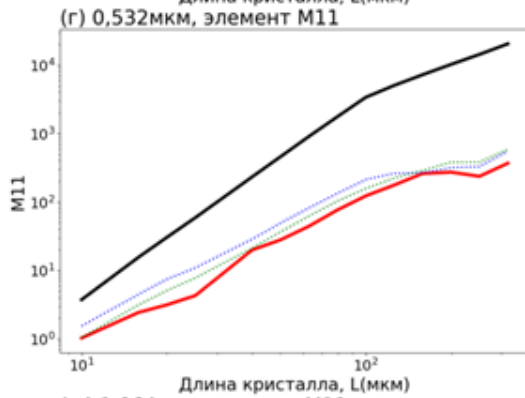
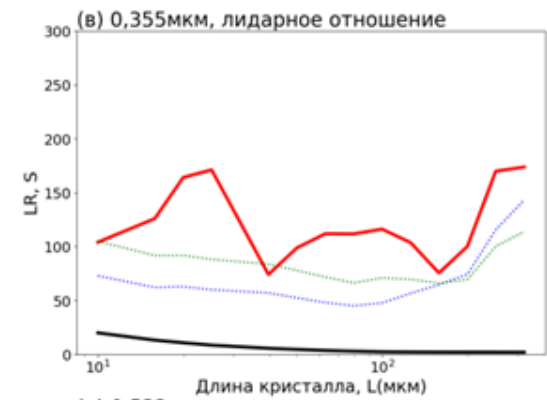
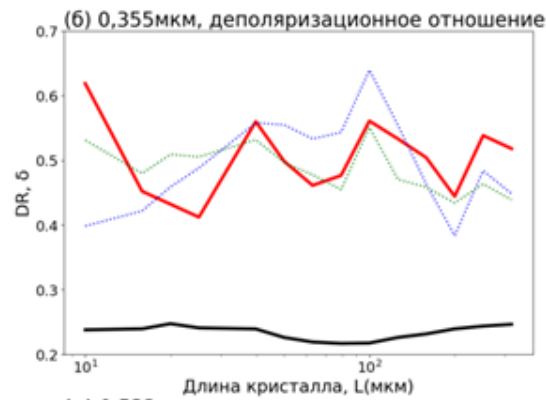
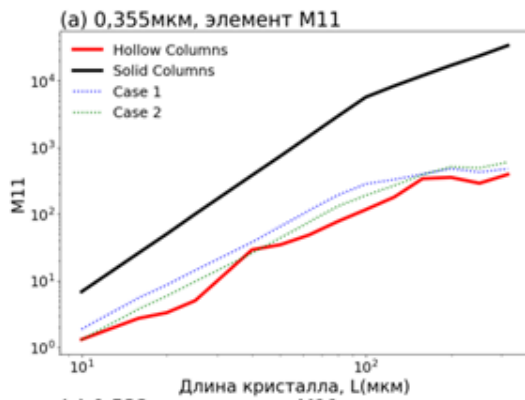
$$\mu_m = 0,8$$

$L \geq 85$

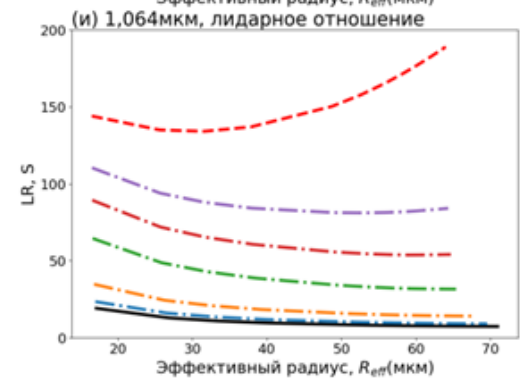
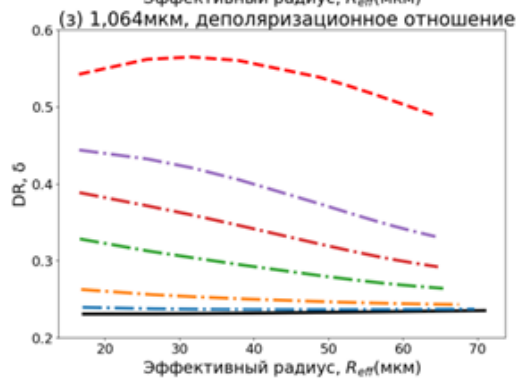
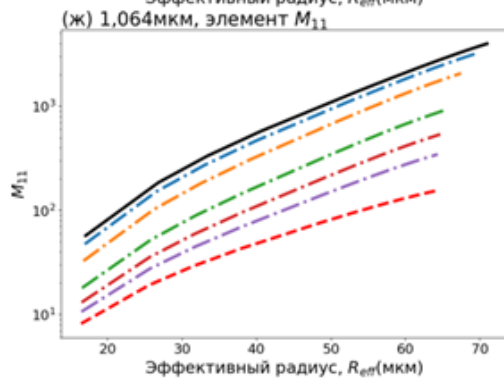
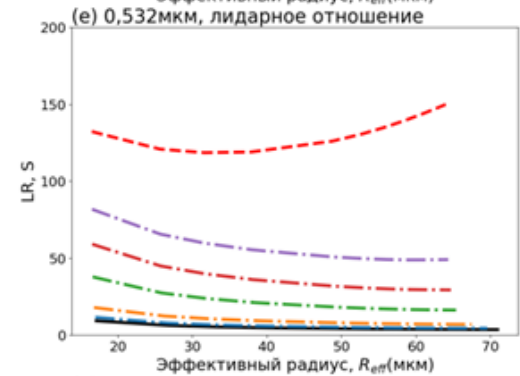
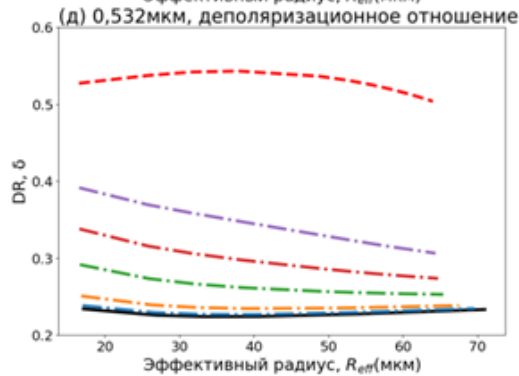
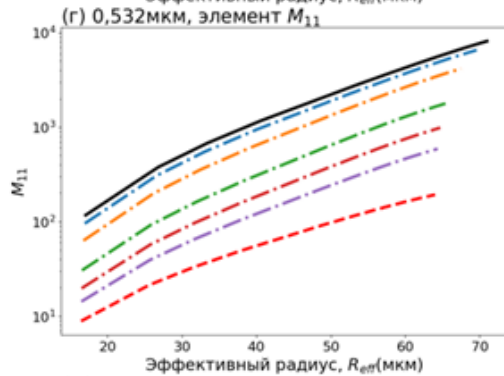
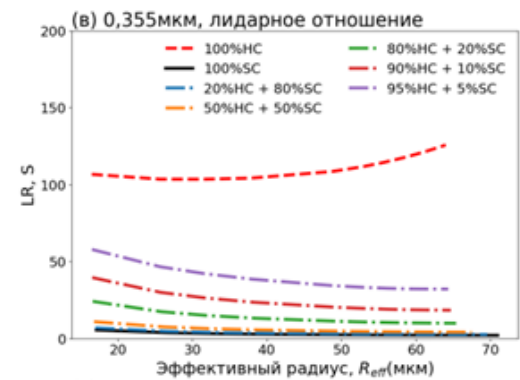
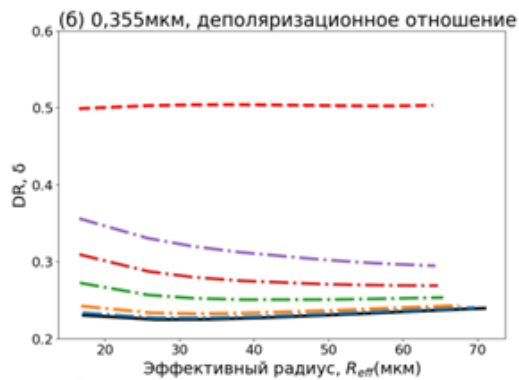
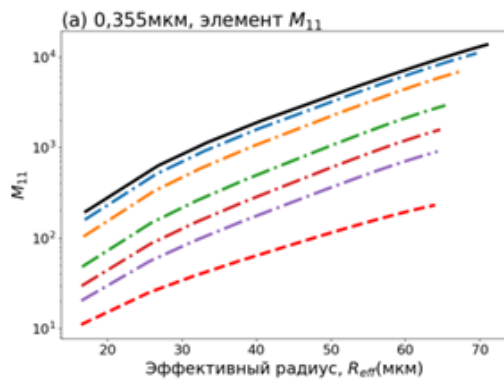
$$p_2(\mu, s, \mu_m) = \frac{\exp\left(-\frac{(\mu - \mu_m)^2}{s^2}\right)}{\int_0^1 \exp\left(-\frac{(\mu - \mu_m)^2}{s^2}\right) d\mu} .$$



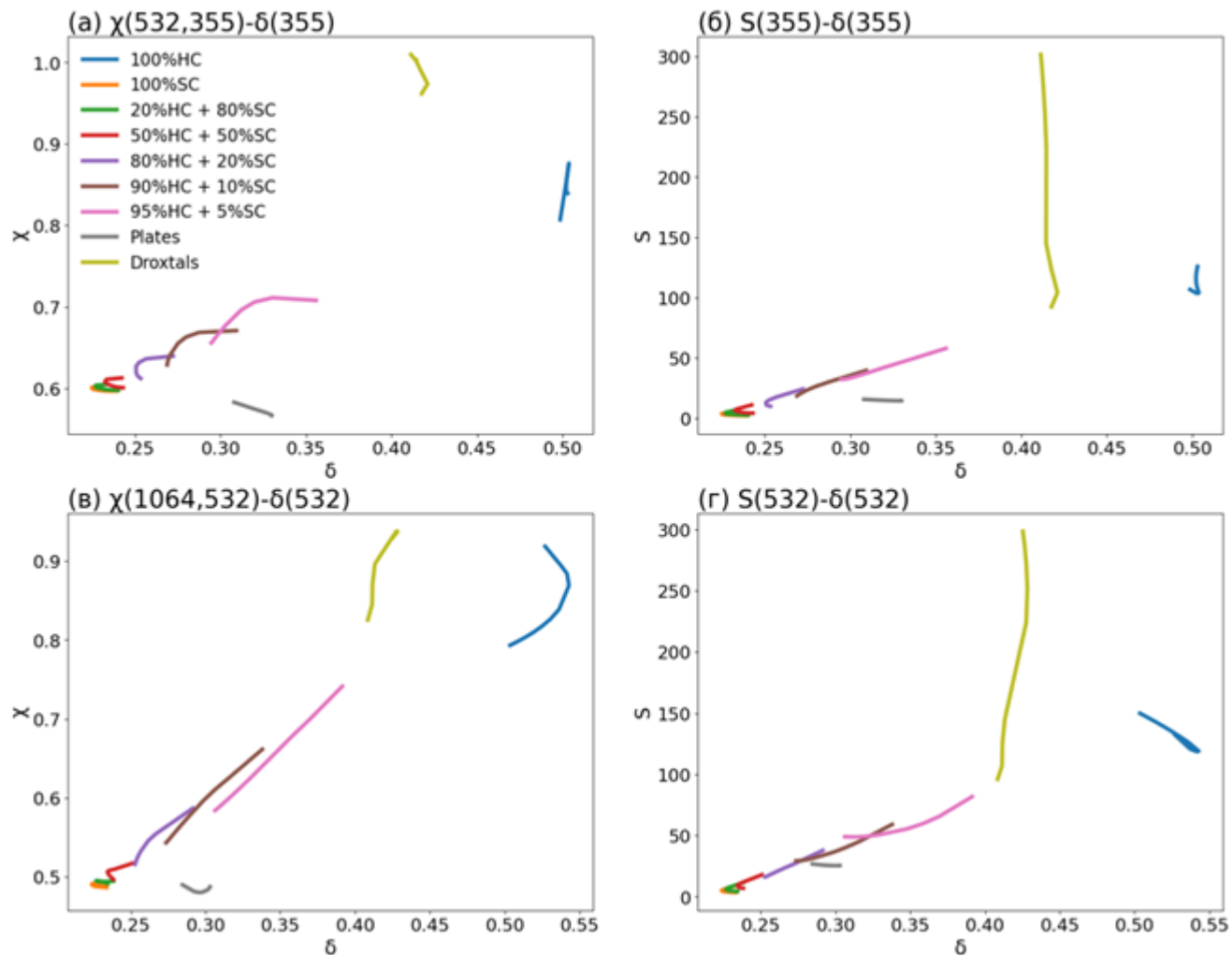
Зависимость параметра μ_m от размера кристалла (а) и вид распределения p_2 для случая $L=100$ и $s=0,05$ (б)



Сравнение характеристик обратного рассеяния для модели идеальных столбиков (черная линия), модели полых столбиков (красная линия) и моделей двух предельных случаев полых столбиков (синяя и зеленая пунктирные линии)



Характеристики обратного рассеяния для смеси идеальных столбиков и полых столбиков в различных пропорциях в зависимости от эффективного радиуса кристаллов

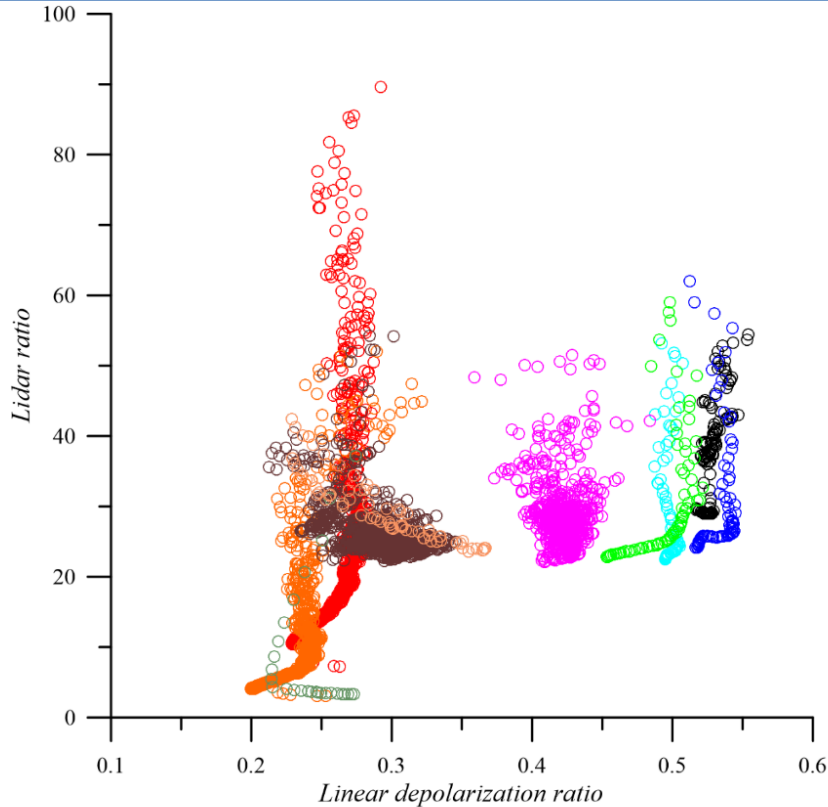


Диаграммы зависимости лидарных параметров для смеси идеальных столбиков и полых столбиков в различных пропорциях. Зависимость $\chi(532,355)$ от $\delta(355)$ – (а), зависимость $S(355)$ от $\delta(355)$ – (б), зависимость $\chi(1064,532)$ от $\delta(532)$ – (в), зависимость $S(532)$ от $\delta(532)$ – (г)

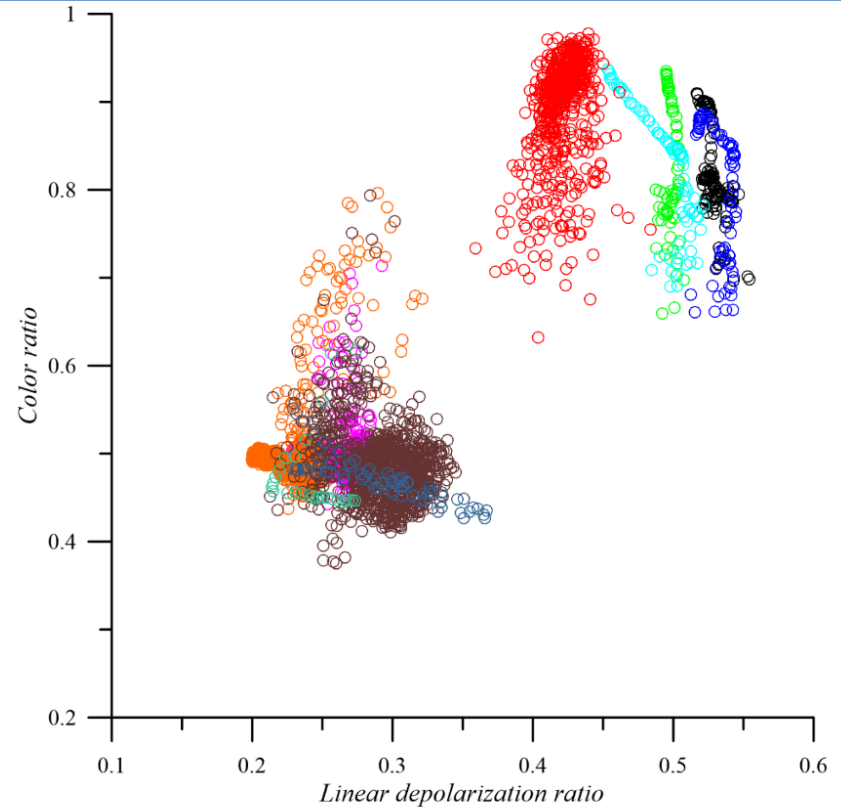
Выводы

- Рассчитана оптическая модель перистых облаков, состоящих из смеси идеальных и полых гексагональных столбиков
- Модель построена для реалистичного распределения глубины полости кристаллов и размеров частиц в облаке
- деполяризационное, спектральное и лидарное отношение, также как и дифференциальное сечение рассеяния для облака полых гексагональных столбиков существенно отличается от облака идеальных столбиков
- Построенная модель облака состоящего из смеси идеальных и полых столбиков перекрывает наблюдаемые в экспериментах по лазерному зондированию характеристики

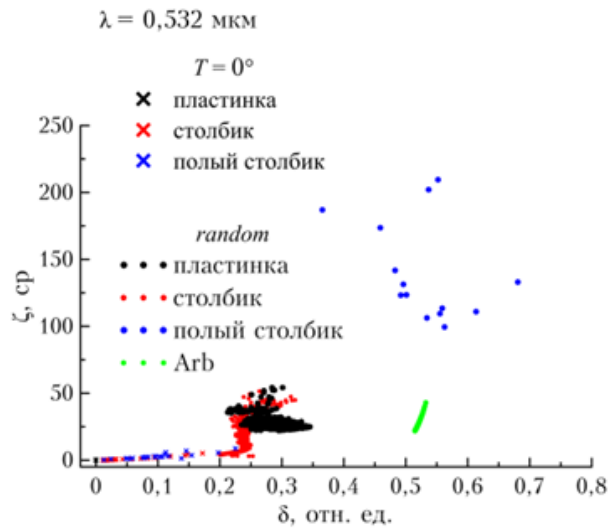
На его основе построены измеряемые лидаром величины:



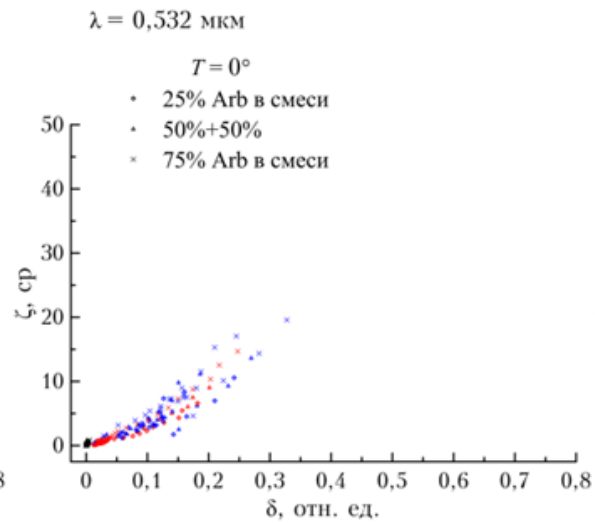
- $\lambda = 0.532$, $n = 1.3116$ (Arbitrary shape particle №1)
- $\lambda = 0.532$, $n = 1.3116$ (Arbitrary shape particle №2)
- $\lambda = 0.532$, $n = 1.3116$ (Arbitrary shape particle №3)
- $\lambda = 0.532$, $n = 1.3116$ (Arbitrary shape particle №4)
- $\lambda = 0.532$, $n = 1.3116$ (Bullet)
- $\lambda = 0.532$, $n = 1.3116$ (Droxtal)
- $\lambda = 0.532$, $n = 1.3116$ (Hexagonal Column)
- $\lambda = 0.532$, $n = 1.3116$ (Hexagonal Plate)
- $\lambda = 0.532$, $n = 1.3116$ (Hexagonal Column_old)
- $\lambda = 0.532$, $n = 1.3116$ (Hexagonal Plate_old)



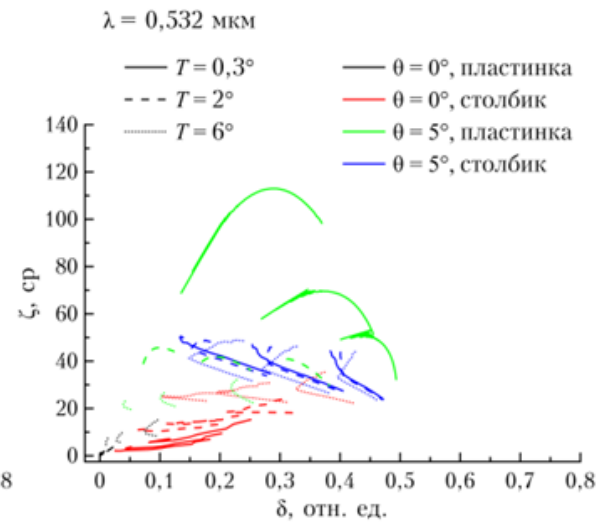
- CR(1.064/0.532) - LDR(0.532) (Arbitrary shape particle №1)
- CR(1.064/0.532) - LDR(0.532) (Arbitrary shape particle №2)
- CR(1.064/0.532) - LDR(0.532) (Arbitrary shape particle №3)
- CR(1.064/0.532) - LDR(0.532) (Arbitrary shape particle №4)
- CR(1.064/0.532) - LDR(0.532) (Bullet)
- CR(1.064/0.532) - LDR(0.532) (Droxtal)
- CR(1.064/0.532) - LDR(0.532) (Hexagonal Column)
- CR(1.064/0.532) - LDR(0.532) (Hexagonal Plate)
- CR(1.064/0.532) - LDR(0.532) (Hexagonal Column_old)
- CR(1.064/0.532) - LDR(0.532) (Hexagonal Plate_old)



а



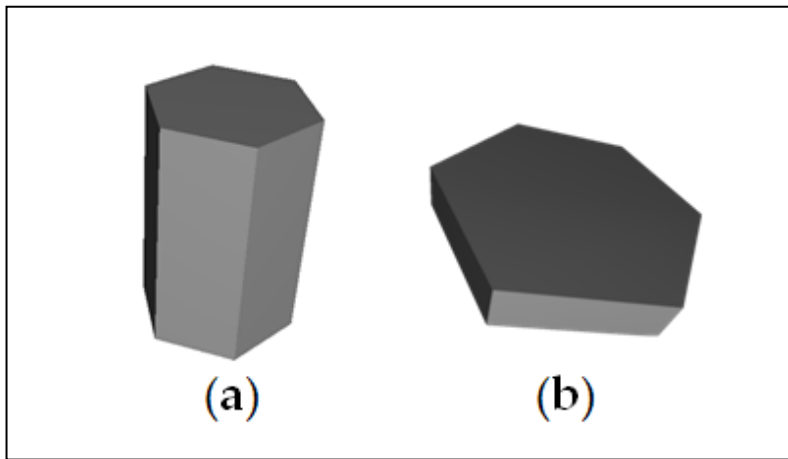
б



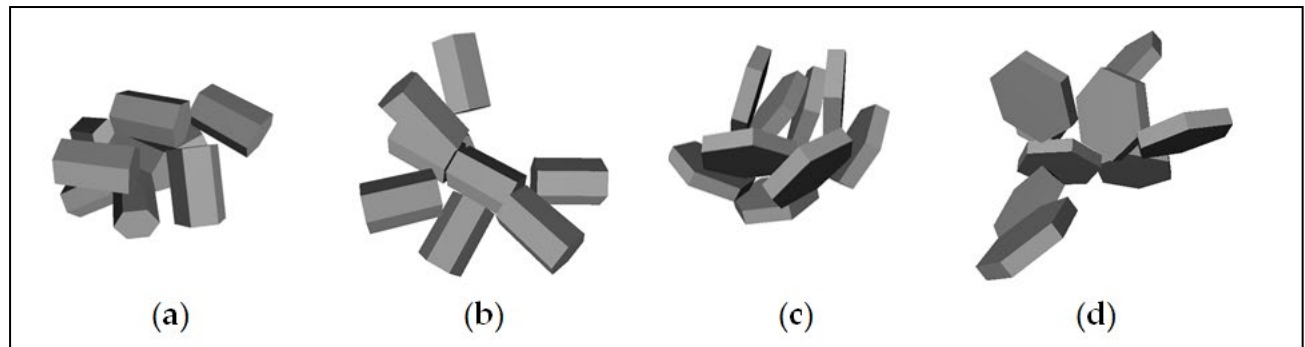
в



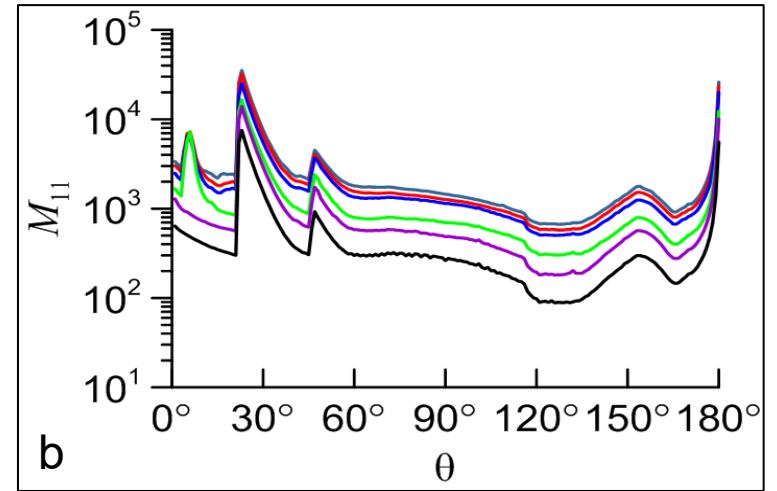
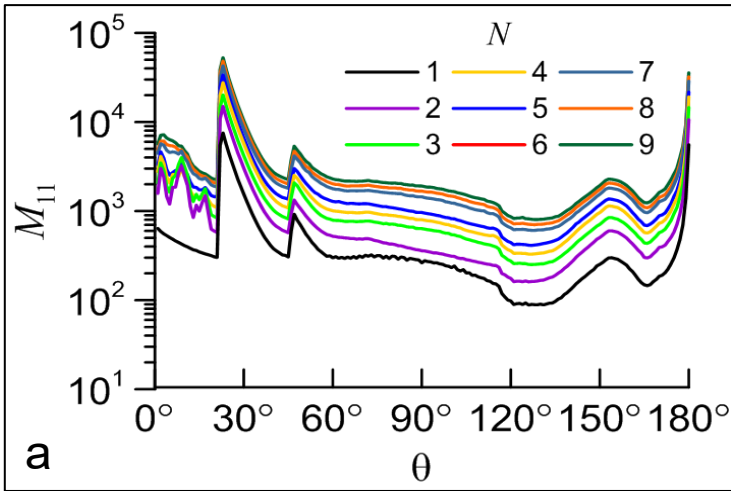
Агрегаты в перистых облаках



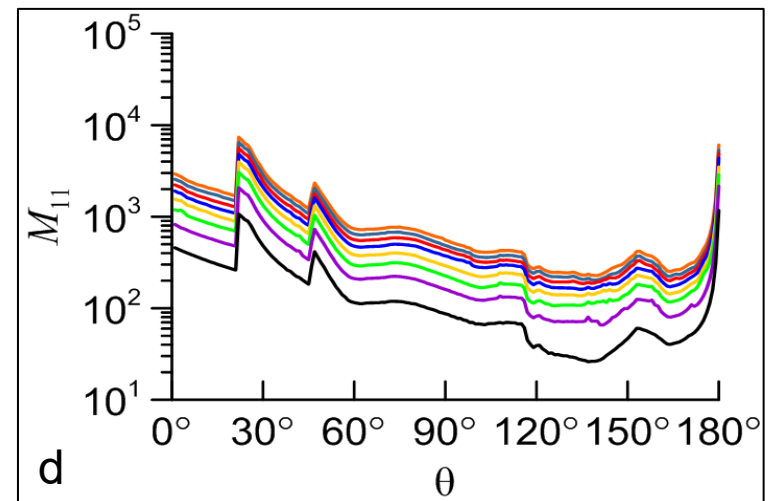
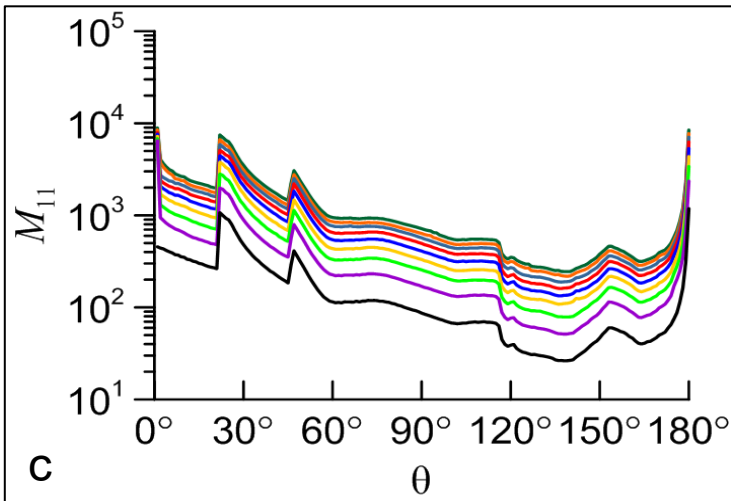
Геометрические формы частиц агрегатов:
(a) – шестиугольный столбик; (b)
шестиугольная пластинка.

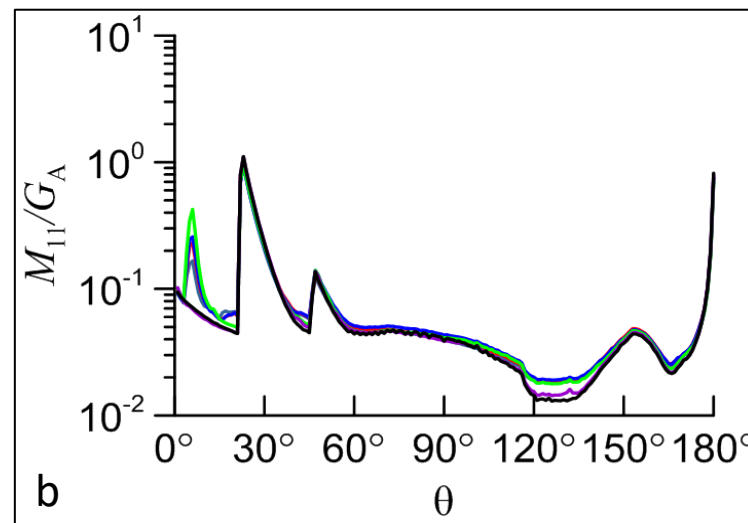
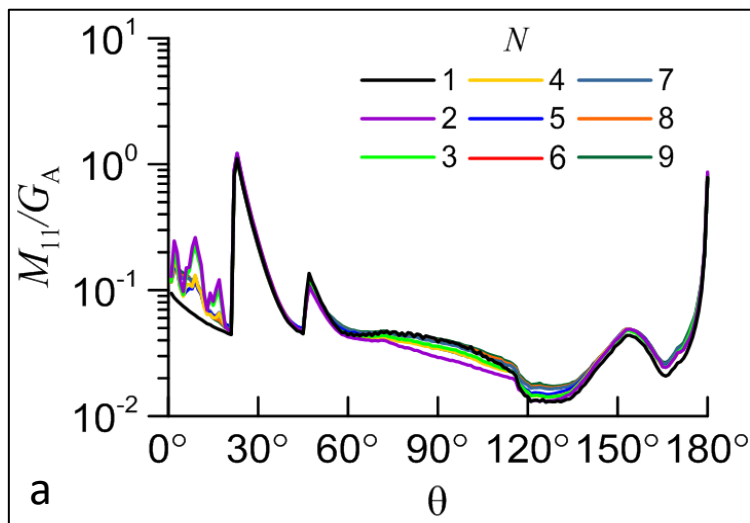


Модели агрегатов из 9 частиц: (a) – компактные столбики; (b) некомпактные столбики; (c) – компактные пластинки; (d) некомпактные пластинки.

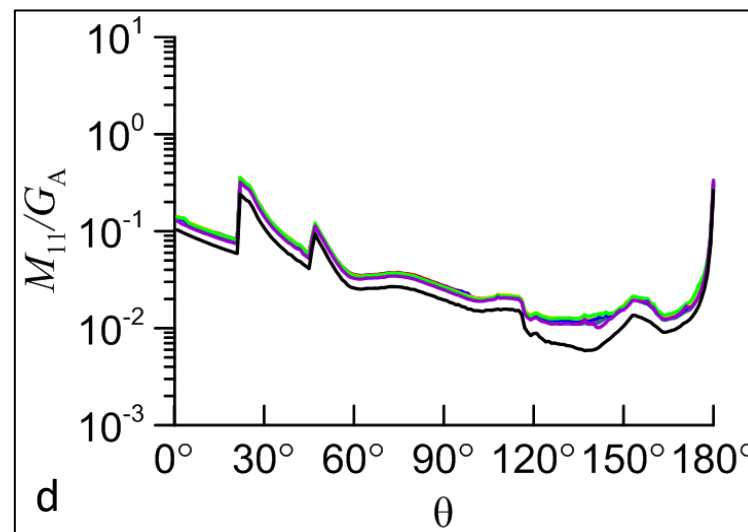
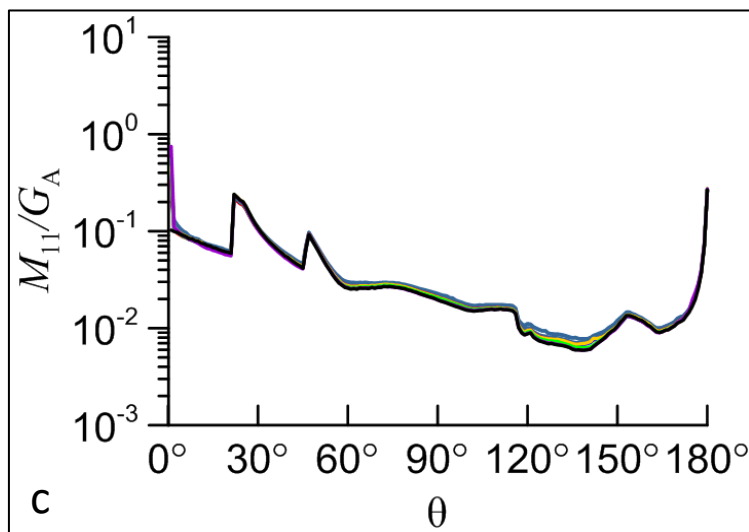


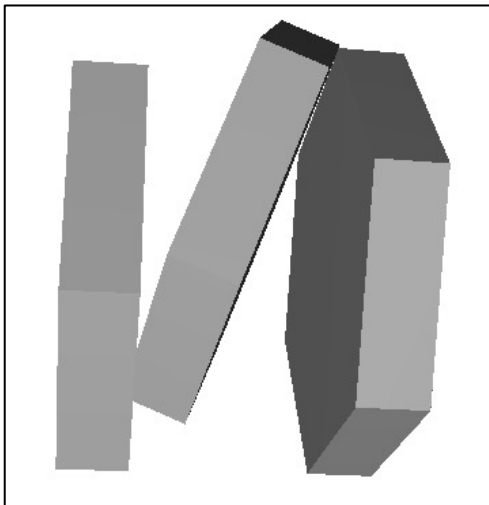
Зависимость M_{11} от угла рассеяния (θ) для: некомпактных агрегатов столбиков (a), компактных агрегатов столбиков (b), некомпактных агрегатов пластинок (c), компактных агрегатов пластинок (d)



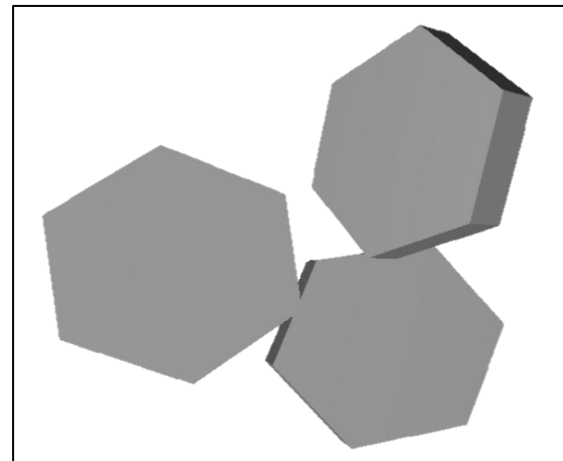


Зависимость M_{11}/G_A от угла рассеяния (θ) для для: некомпактных агрегатов столбиков (a), компактных агрегатов столбиков (b), некомпактных агрегатов пластинок (c), компактных агрегатов пластинок (d)



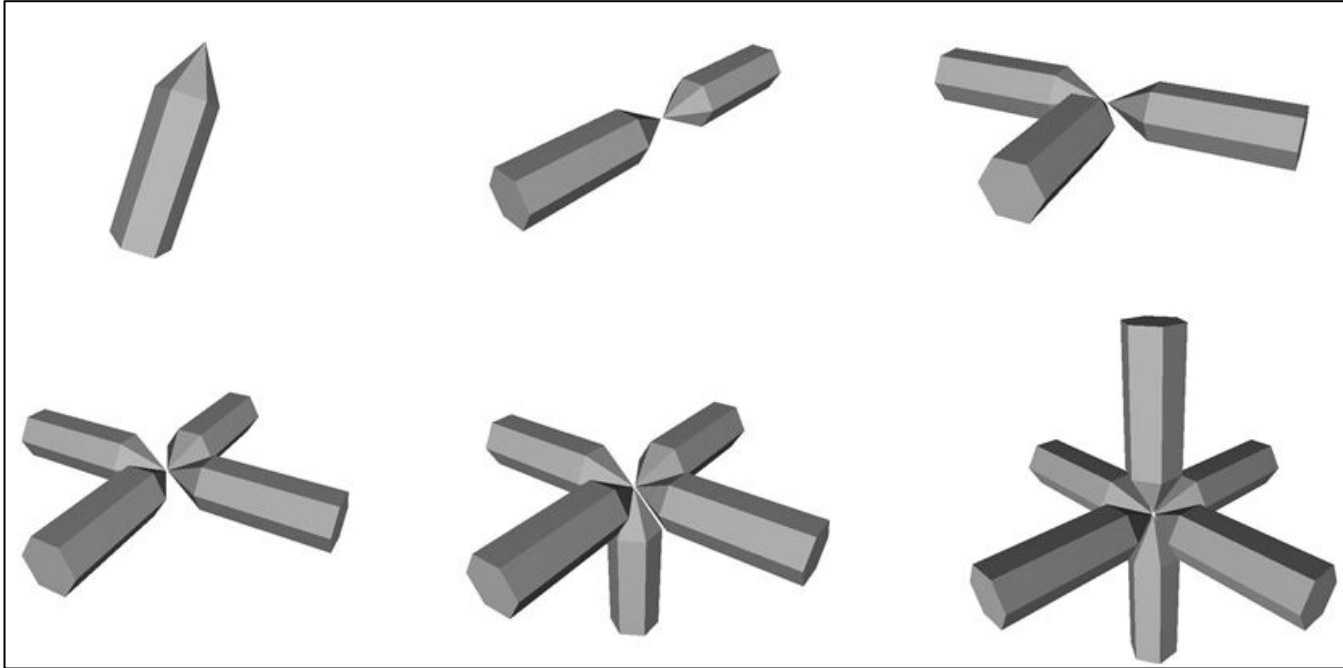


(a)

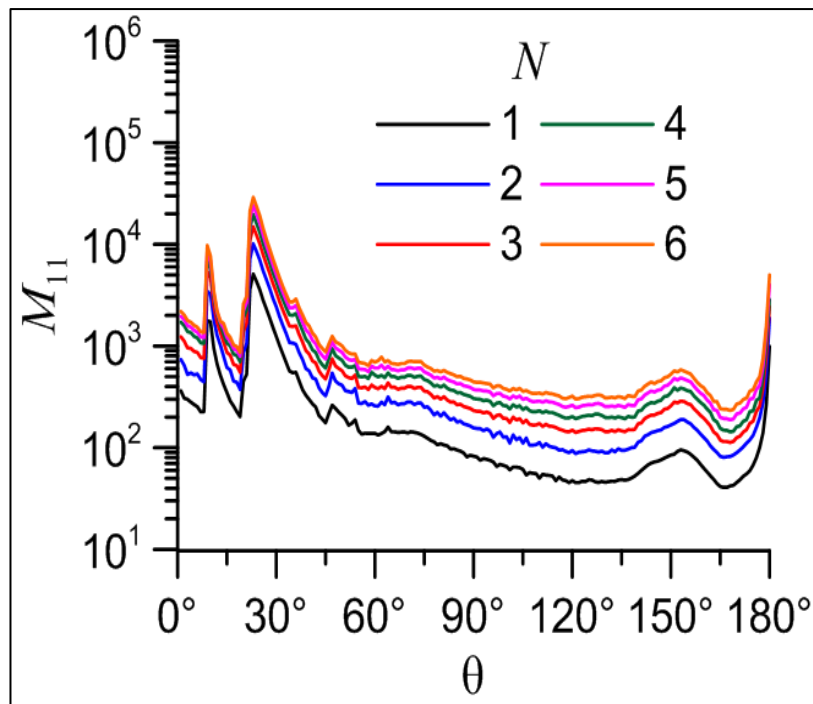


(b)

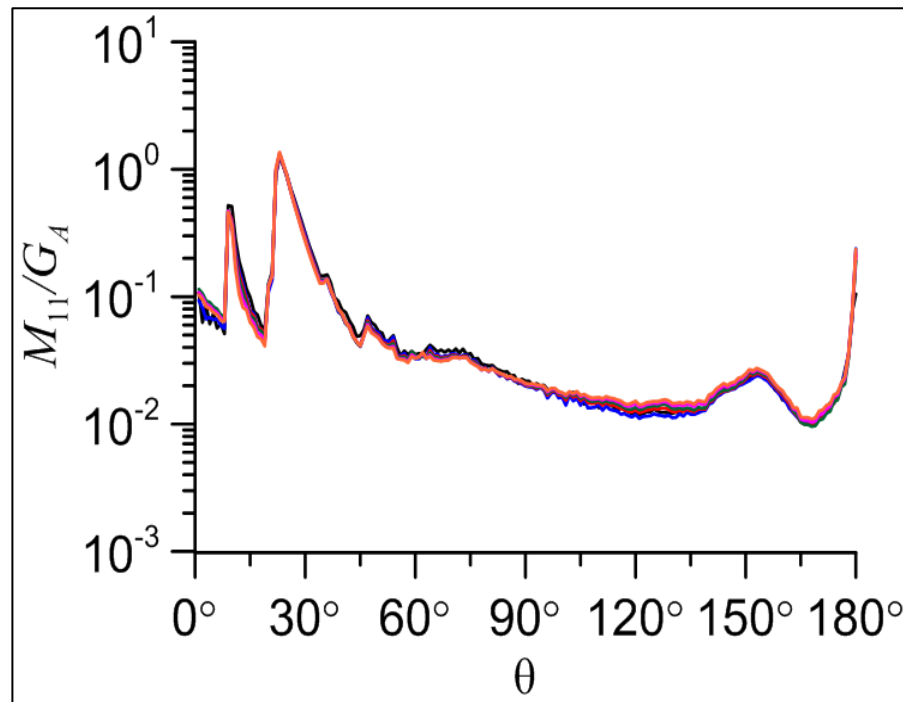
Сравнение компактного и некомпактного
расположения пластинок в агрегате для $N = 3$



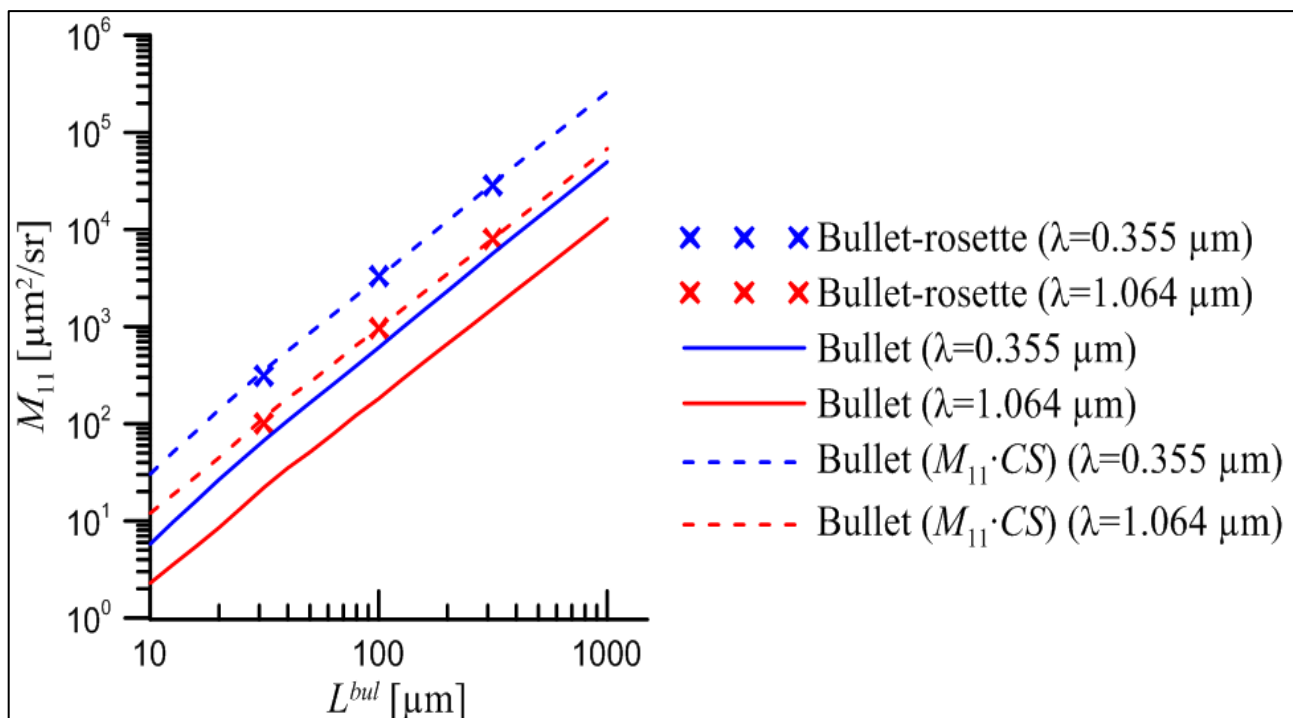
Геометрические модели агрегата типа bullet-rosette с N от 1 до 6



Зависимость элемента M_{11} матрицы рассеяния света от угла рассеяния (θ) для агрегатов типа bullet-rosette при N от 1 до 6



Зависимость M_{11}/G_A от θ агрегатов типа bullet-rosette



Зависимость M_{11} от L^{bul} для частицы типа bullet-rosette и для одиночной «пули» (bullet)

Заключение

- Исследованы микрофизические параметры рассеяния света для полых гексагональных столбиков
- Построена оптическая модель перистого облака, состоящего из полых гексагональных столбиков
- Проведено исследование микрофизических параметров рассеяния света для агрегатов ледяных частиц
- Численные результаты доступны в банке данных матриц рассеяния света ИОА СО РАН

Содержание

1. Из чего состоят перистые облака?
2. Почему их важно изучать?
3. Исследование характеристик обратного рассеяния света для полых гексагональных столбиков
4. Оптическая модель перистого облака, состоящего из полых гексагональных столбиков
5. Агрегаты в перистых облаках
6. Заключение

Литература

1. Характеристики обратного рассеяния света для типичных моделей атмосферных агрегатов в рамках приближения физической и геометрической оптик/В.А. Шишко, А.Е. Бабинович, Д.Н. Тимофеев, А.В. Коношонкин, Н.В. Кустова// Материалы 21-й международной конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса" - Москва, 2023. - С. 61.
2. Коношонкин А. В., Кустова Н. В., Шишко В. А., Тимофеев Д. Н., Ткачев И. В., Бакуте Е., Бабинович А. Е., Zhu X., Wang Zhenzhu. Характеристики обратного рассеяния света на полых ледяных гексагональных столбиках для построения оптической модели перистых облаков . // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36. № 12. С. 1013–1019.
3. Оптическая модель перистого облака, состоящего из полых ледяных гексагональных столбиков, для задач лазерного зондирования/ А.В. Коношонкин, Н.В. Кустова, В.А. Шишко, Д.Н. Тимофеев, И.В. Ткачев, Е. Бакуте, А.Е. Бабинович, X. Zhu, Z. Wang
4. Матрица рассеяния света для горизонтально ориентированных ледяных частиц перистых облаков вида «Пластинка», «столбик», и «полый столбик»/А.В. Коношонкин; Н.В. Кустова, В.А. Шишко, Д.Н. Тимофеев, А.Е. Бабинович
5. Оптическая модель перистых облаков с учетом преимущественной пространственной ориентации частиц для интерпретации данных лазерного зондирования/ А.В. Коношонкин, Н.В. Кустова, В.А. Шишко, Д.Н. Тимофеев, А.Е. Бабинович



Спасибо за внимание!
Буду рада ответить на ваши вопросы

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ No.
23-77-01084, <https://rscf.ru/project/23-77-01084/>