

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 535.36; 535.44

Оптические характеристики деформированных атмосферных ледяных столбиков

А.В. Коношонкин^{1,2*}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 20.02.2017 г.

Исследование перистых облаков, оказывающих значительное влияние на климат, проводится с использованием лидаров. Интерпретация лидарных данных опирается на решение прямой задачи рассеяния на ледяных кристаллических частицах облаков. Рассчитанные ранее оптические характеристики идеальных ледяных гексагональных столбиков плохо согласуются с результатами лидарных наблюдений. В статье представлены результаты расчетов оптических характеристик деформированных гексагональных ледяных столбиков, которые дают хорошее согласие с экспериментальными результатами. Проведены расчеты для частиц с деформированным двугранным углом 90° . Показано, что логарифм матрицы рассеяния может быть с хорошей точностью аппроксимирован линейной функцией логарифма размера частицы, что позволяет значительно ускорить получение оптических характеристик облака. Установлено, что уже при углах деформации в несколько градусов оптические характеристики хорошо согласуются с результатами лидарных наблюдений во всем диапазоне рассчитанных размеров.

Ключевые слова: деформированный ледяной столбик, перистые облака, физическая оптика, рассеяние света, ледяные кристаллы; irregular ice columns, cirrus clouds, physical optics, light scattering, ice crystals.

Введение

Перистые облака представляют собой тонкие полупрозрачные облака, расположенные на высотах 5–12 км и состоящие преимущественно из частиц льда размерами от десятков до тысяч микрон. Изучение перистых облаков имеет важное прикладное значение, поскольку они оказывают значительное влияние на радиационный баланс планеты [1–5]. Современные численные модели прогноза погоды требуют оперативной информации о состоянии облачности в глобальном масштабе для повышения точности прогнозов [6–8]. Оптические характеристики перистых облаков существенно зависят от микрофизических параметров: формы и ориентации ледяных кристаллических частиц, образующих облако [9–11]. Основным инструментом, позволяющим оперативно получать информацию о микрофизических параметрах облаков, являются лидары [12–14], однако интерпретация лидарного сигнала — сложная задача.

Значительным шагом в решении проблемы интерпретации лидарного сигнала является разработанный в Томском государственном университете (ТГУ) и Институте оптики атмосферы (ИОА СО РАН) метод лазерного поляризационного зондирования [15–18].

Этот метод позволяет эффективно определять пространственную ориентацию плоских кристаллических частиц перистых облаков.

Интерпретация лидарного сигнала требует решение прямой задачи рассеяния света на частицах, характерных для перистых облаков. Разработанный в ИОА СО РАН метод физической оптики [19, 20], основанный на алгоритме трассировки оптических пучков [21–23], позволяет решить эту задачу. Указанным методом удалось получить решение для квазигоризонтально ориентированных ледяных частиц [24, 25], что играет важную роль при интерпретации данных сканирующего лидара [26]. Однако решение, полученное для идеальных гексагональных ледяных столбиков, плохо согласуется с данными экспериментальных наблюдений в случае их хаотической ориентации [27–29].

В настоящей работе представлено решение для деформированных гексагональных столбиков, которое хорошо согласуется с результатами лидарных измерений и может быть использовано для их интерпретации.

Деформированные частицы

Результаты численного решения задачи рассеяния света для идеальных гексагональных ледяных столбиков отличаются от результатов экспериментальных

* Александр Владимирович Коношонкин (sasha_tvo@iao.ru).

наблюдений. На рис. 1 и 2 представлены лидарное (LR) и деполяризационное (DR) отношения, рассчитанные для идеального ледяного столбика, в зависимости от размера частицы.

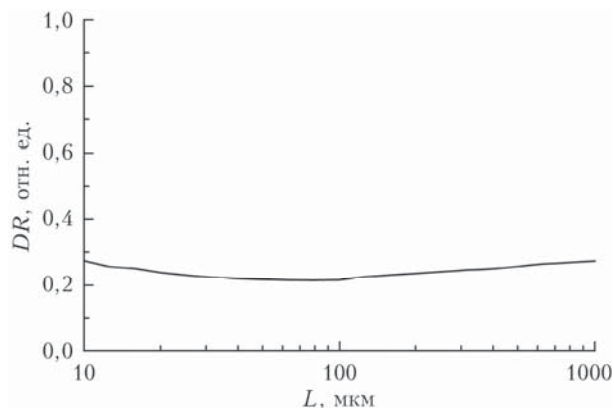


Рис. 1. Деполяризационное отношение для идеального гексагонального столбика в зависимости от его длины

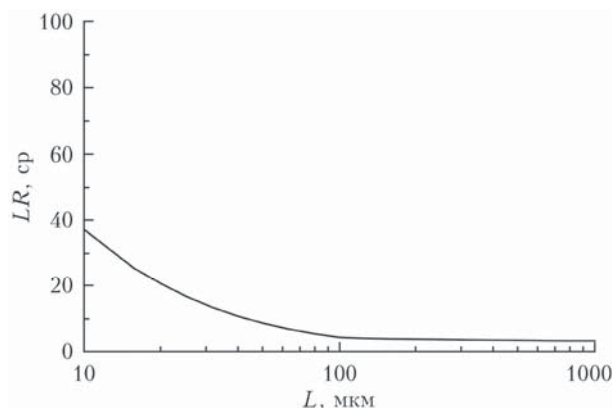


Рис. 2. Лидарное отношение для идеального гексагонального столбика в зависимости от его длины

В расчетах использовалась экспериментально полученная зависимость [30] между диаметром и длиной гексагонального столбика:

$$\begin{cases} D = 0,7L, & L < 100 \text{ мкм}, \\ D = 0,96\sqrt{L}, & L > 100 \text{ мкм}, \end{cases} \quad (1)$$

где L — длина столбика; D — диаметр окружности, описанной вокруг гексагонального основания.

Так как параметр формы

$$Q = \frac{L}{D} \quad (2)$$

и зависимость диаметра от длины столбика меняются с размером частицы, удобно использовать для определения характерного размера гексагональной частицы ее максимальный размер, равный

$$D_{\max} = \sqrt{D^2 + L^2}. \quad (3)$$

Поскольку экспериментально наблюдаемые значения деполяризационного отношения, лежащие в диапазоне 0,3–0,5, а лидарного — в диапазоне 20–40 [31],

не согласуются с результатами расчетов, представленными на рис. 1, 2 практически во всем диапазоне размеров частиц, можно сделать вывод, что модель идеальных гексагональных частиц плохо описывает микрофизический состав облаков.

Подтверждением вышесказанному также является тот факт, что присущее задаче рассеяния света на идеальных гексагональных кристаллах гало 46° [32] (рис. 3) редко наблюдается экспериментально по сравнению с гало 22° , о чем свидетельствуют наблюдения, проводимые, например, на TomSky-камере [33, 34].

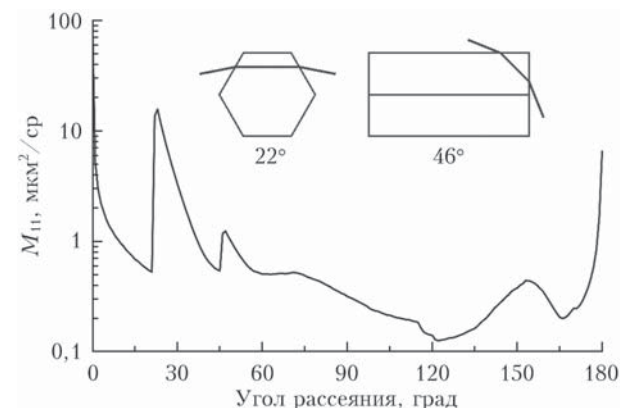


Рис. 3. Дифференциальное сечение рассеяния M_{11} для хаотически ориентированного гексагонального столбика длиной 150 мкм и диаметром 60 мкм. Длина волны 532 нм

Стоит отметить, что формирование гало 22° происходит на боковых гранях кристалла, угол между которыми равен 60° . Гало 46° формируется за счет угла 90° , образованного основанием и боковыми гранями кристалла (см., например, [32]). Учитывая результаты наблюдений, можно утверждать, что в подавляющем большинстве случаев, т.е. когда наблюдается гало 22° и не наблюдается гало 46° , перистые облака состоят из гексагональных ледяных частиц с деформированным основанием.

Существует большое количество частиц, у которых присутствует двухгранный угол 60° и отсутствует угол 90° . Однако необходимо учитывать тот факт, что рассеянный в направлении назад свет состоит, в основном, из двух составляющих: зеркальной и уголкового. Подробно обе компоненты описаны в работах [25, 27]. При этом для идеальных гексагональных столбиков зеркальная составляющая значительно меньше уголкового и, как следствие, лидарное отношение очень мало (порядка 5). Лидарное отношение определяется формулой

$$LR = \frac{2A}{M_{11}}, \quad (4)$$

где $2A$ — сечение экстинкции, A — средняя площадь проекции частицы; M_{11} — дифференциальное сечение рассеяния, включающее в себя уголкового и зеркальную компоненты.

Для частицы, у которой отсутствует угол 90° , отсутствует уголкового компонента, и лидарное отношение, формируемое только зеркальной компонентой,

очень велико, больше нескольких сотен. При этом результаты лидарных наблюдений указывают на величину лидарного отношения в районе 20–40, т.е. уголковая компонента присутствует, но в меньшей степени, чем у идеальных гексагональных столбиков. Такому описанию удовлетворяет частица с деформированным углом 90° .

Таким образом, можно ожидать хорошее согласие теоретических оптических характеристик для частиц с малым углом деформации с результатами лидарных наблюдений. Для проверки этой гипотезы исследуем оптические характеристики частиц в зависимости от величины их деформации. Это позволит уточнить существующие алгоритмы интерпретации лидарного сигнала.

Для оценки влияния величины деформации на оптические характеристики использовалась частица, изображенная на рис. 4. Величина деформации определяется углом ξ , который варьировался в диапазоне от 0 до 10° . Деформация частицы выбрана таким образом, чтобы избавиться от симметрии частицы.

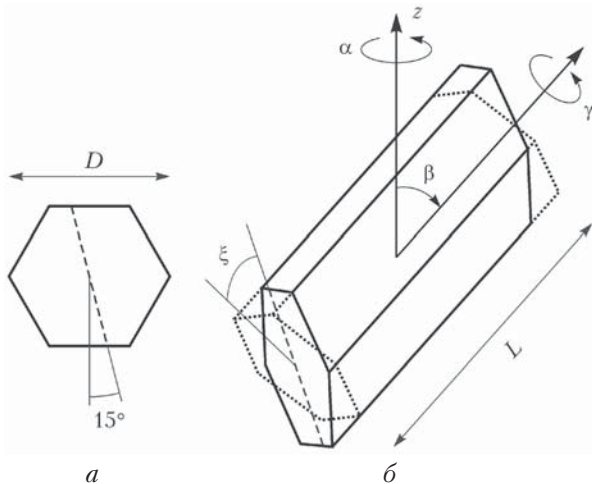


Рис. 4. Модель деформированной частицы

В рамках данной статьи рассматриваются оптические характеристики только хаотически ориентированных деформированных столбиков, для которых матрица Мюллера

$$\mathbf{M} = \frac{1}{8\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \mathbf{M}_f \sin\beta \, d\beta \, d\gamma \, d\alpha, \quad (5)$$

где \mathbf{M}_f – матрица Мюллера при фиксированной ориентации; α , β , γ – углы Эйлера (см. рис. 4).

Расчет оптических характеристик деформированных частиц

Оптические характеристики в направлении рассеяния назад для хаотически ориентированной выпуклой частицы полностью определяются средней площадью проекции частицы A и матрицей Мюллера, имеющей вид

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} M_{11} & 0 & 0 & M_{14} \\ 0 & M_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -M_{22} & M_{34} \\ -M_{14} & 0 & -M_{34} & 1 - M_{22} \end{pmatrix} = M_{11} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & m_{14} \\ 0 & m_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -m_{22} & m_{34} \\ -m_{14} & 0 & -m_{34} & 1 - 2m_{22} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где $m_{14} = 0$ для идеальных гексагональных частиц и $< 0,05$ при углах деформации до 10° , поэтому этим элементом можно пренебречь.

Поскольку практический интерес представляют лидарное (4), деполаризационное

$$DR = \frac{M_{11} - M_{22}}{M_{11} + M_{22}} \quad (7)$$

и спектральное

$$CR = \frac{M_{11}^{1064}}{M_{11}^{532}} \quad (8)$$

отношения, то необходимо вычислить только три величины: A , M_{11} и M_{22} – для каждой длины волны. Здесь индексы 1064 и 532 указывают длину волны, при которой рассчитаны величины.

Несмотря на то что метод физической оптики существенно превосходит по скорости точные методы [35, 36], расчет оптических свойств хаотически ориентированной частицы заданного размера занимает длительное время, поскольку для адекватного усреднения по ориентациям требуется предварительный расчет миллионов фиксированных ориентаций [36]. Поэтому важно определить минимальное необходимое количество частиц для расчета, адекватно описывающих зависимость оптических характеристик от угла деформации частицы. Пример зависимости оптических характеристик на длине волны 532 нм от угла деформации для 100-мкм частицы представлен на рис. 5.

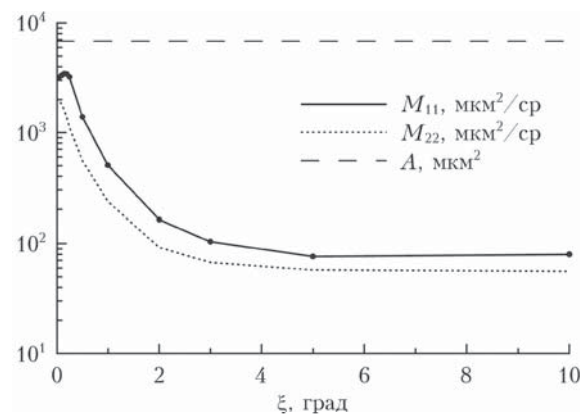


Рис. 5. Зависимость оптических характеристик от угла деформации частицы. Точками обозначены выбранные для расчета деформированные частицы

Как видно из рис. 5, зависимость оптических характеристик от величины деформации можно адекватно описать, рассчитав оптические характеристики

ки для небольшого количества соответствующим образом подобранных деформированных частиц.

Рис. 5 показывает, что элементы матрицы Мюллера значительно меняются с величиной деформации, подтверждая тот факт, что слабое искажение двугранного угла 90° вызывает значительные изменения оптических характеристик гексагональных ледяных столбиков. Стоит отметить, что искажение формы практически не влияет на среднюю площадь A .

Результаты расчета также показали, что скорость изменения оптических характеристик растет с увеличением размера частицы и уменьшением длины волны (рис. 6).

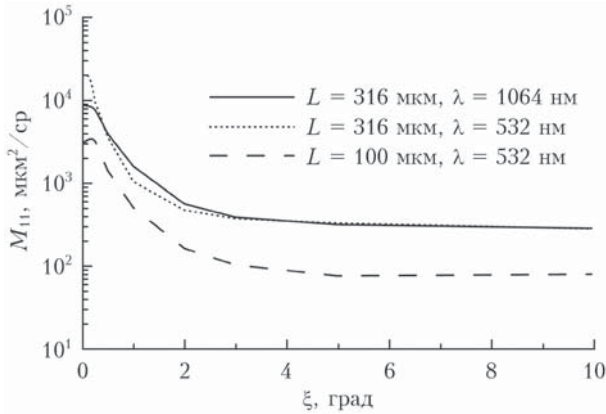


Рис. 6. Зависимость дифференциального сечения рассеяния от угла деформации, размера частицы и длины волны

Поскольку величина и форма деформации кристаллов в реальном облаке неизвестны, нами предполагается, что угол деформации частиц подчиняется распределению Мизеса [37]:

$$p(\xi, \xi_{eff}) = N_p \exp\left(\frac{\cos(\xi)}{\xi_{eff}^2}\right). \quad (9)$$

Здесь ξ_{eff} — эффективный угол деформации кристалла; N_p — нормировочная константа.

Практический интерес представляет зависимость оптических характеристик кристаллов от эффективного угла деформации, т.е. значения, усредненные согласно формуле

$$\mathbf{M}(\xi_{eff}) = \frac{\int_0^{10^\circ} \mathbf{M}(\xi) p(\xi, \xi_{eff}) d\xi}{\int_0^{10^\circ} p(\xi, \xi_{eff}) d\xi}, \quad (10)$$

где пределы интегрирования соответствуют исходным данным, а интеграл в знаменателе представляет собой нормировочную константу для распределения Мизеса. Результаты усреднения для частицы размером 100 мкм показаны на рис. 7.

Экстраполяция рассчитанных данных

Наблюдаемые в перистых облаках гексагональные частицы существенно отличаются по своим

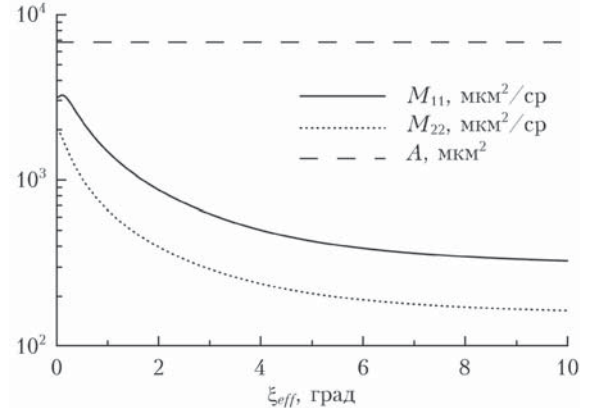


Рис. 7. Зависимость оптических характеристик от эффективного угла деформации частицы. Длина волны 532 нм

размерам. Основная масса частиц имеют размеры от 10 до 1000 мкм [30, 38, 39], однако могут наблюдаться как очень малые (~ 5 мкм), так и очень большие частицы (~ 10000 мкм).

Если речь идет об облаке частиц, то для простоты предполагают, что распределение размеров частиц подчиняется гамма-распределению

$$\eta(D_{max}, D_m) = \frac{1}{\Gamma(p) D_m} \left(\frac{D_{max}}{D_m}\right)^{p-1} \exp\left(-\frac{D_{max}}{D_m}\right) \quad (11)$$

(D_m — модальный размер; $\Gamma(p)$ — гамма-функция, а p можно принять равным 2 [40]). В этом случае оптические характеристики, усредненные по размерам $\mathbf{M}(D_m)$, можно вычислить по формуле

$$\mathbf{M}(D_m) = \int \mathbf{M}(D_{max}) \eta(D_{max}, D_m) dD_{max}, \quad (12)$$

когда модальный размер варьируется от 10 до 1000 мкм, а интеграл, вообще говоря, берется от 0 до бесконечности.

Для того чтобы осуществить адекватное усреднение в указанном диапазоне модальных размеров, достаточно иметь исходные данные в диапазоне хотя бы от 5 до 10000 мкм и произвести перенормировку гамма-распределения с учетом ограниченного диапазона интегрирования:

$$\mathbf{M}(D_m) = \frac{\int_5^{10000} \mathbf{M}(D_{max}) \eta(D_{max}, D_m) D_{max}}{\int_5^{10000} \eta(D_{max}, D_m) D_{max}}. \quad (13)$$

Расчет оптических характеристик частиц фиксированного размера проводился методом физической оптики [19, 20] согласно представленной ранее методике [41].

Поскольку вычислительная трудоемкость метода растет с увеличением размера частицы, в разумные сроки удалось получить оптические характеристики только для частиц размером до 1000 мкм. Нижняя граница размеров в 10 мкм продиктована границей применимости метода физической оптики [42].

Результаты расчетов позволили выявить очень важный факт: логарифмы элементов M_{11} и M_{22} могут быть с хорошей точностью аппроксимированы линейными функциями от логарифма размера

$$\begin{aligned} \log(M_{11}) &= a \log(x) + b, \\ \log(M_{22}) &= c \log(x) + d, \end{aligned} \quad (14)$$

где x равен диаметру D для пластинок и дроксталлов и длине L для столбиков и «пуль», а коэффициенты a, b, c, d даны в таблице.

В качестве примера на рис. 8 приведены расчетные значения и результаты интерполяции при длине волны 532 нм. Погрешности интерполяции показаны на рис. 9.

Зависимость от размера оптических характеристик A, M_{11} и M_{22} для идеального гексагонального столбика показана на рис. 10. Видно, что изменение

зависимости длины столбика от диаметра в точке 100 мкм согласно формуле (1) приводит к изменению линейной аппроксимации величин.

Возможность линейной аппроксимации всех трех необходимых величин позволяет экстраполировать численное решение для идеальных гексагональных столбиков на необходимый диапазон 5–10000 мкм.

Такая экстраполяция возможна также и для деформированных частиц. В качестве примера на рис. 11 приведена зависимость элемента M_{11} от размера и величины деформации (длина волны 532 нм). Расчет проводился для частиц семи размеров: 10; 31,6; 100; 316; 526 и 1000 мкм.

На рис. 12 и 13 представлены линейные аппроксимации оптических характеристик для эффективных углов деформации 3 и 7°. Рис. 12 и 13 подтверждают возможность линейной экстраполяции также и для деформированных столбиков.

Тип частицы	Диапазон и соотношение размеров	Длина волны, нм	a	b	c	d	Максимальная погрешность, %
Гексагональный столбик	$D = 0,7L$, $10 < L < 100$	355	2,981	-2,230	3,003	-2,465	0,4
		532	2,942	-2,395	2,994	-2,679	0,6
		1064	2,903	-2,652	2,993	-3,007	1,0
	$D = 6,96L^{0,5}$, $100 \leq L < 1000$	355	1,558	0,627	1,491	0,562	0,2
		532	1,542	0,424	1,490	0,337	0,3
		1064	1,530	0,108	1,494	-0,002	0,4
Гексагональная пластинка	$L = 2,0202D^{0,449}$, $10 < D < 1000$	355	1,884	-0,982	1,875	-1,297	4,4
		532	1,875	-1,213	1,870	-1,493	3,8
		1064	1,869	-1,545	1,869	-1,796	2,5
«Пуля»	$D = 2,31L^{0,63}$, $10 < L < 1000$	355	1,947	-1,116	1,905	-1,280	1,7
		532	1,917	-1,280	1,893	-1,471	1,6
		1064	1,870	-1,485	1,875	-1,729	2,2
Дроксталл	$10 < D < 80$	355	2,247	-1,783	2,198	-2,061	2,1
		532	2,314	-1,915	2,272	-2,222	1,5
		1064	2,616	-2,493	2,536	-2,750	1,8
	$80 \leq D < 1000$	355	2,132	-1,595	2,142	-2,011	0,7
		532	2,132	-1,595	2,142	-2,011	0,6
		1064	2,132	-1,595	2,142	-2,011	0,8

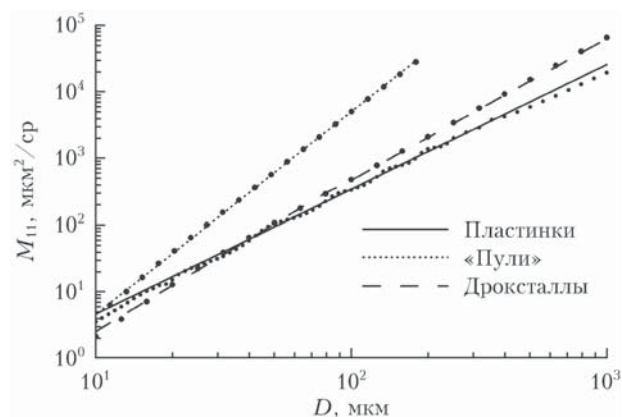


Рис. 8. Дифференциальное сечение рассеяния M_{11} для пластинок, «пуль» и дроксталлов. Точками обозначены значения, рассчитанные методом физической оптики

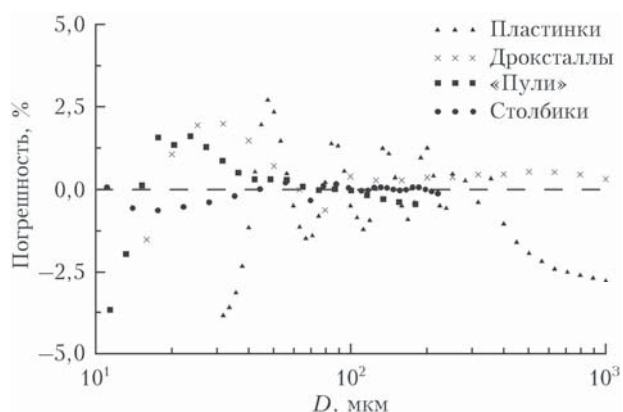


Рис. 9. Погрешности интерполяции в зависимости от диаметра частицы для длины волны падающего света 532 нм

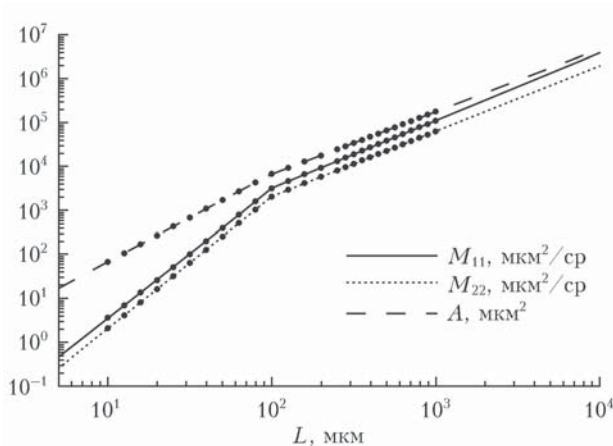


Рис. 10. Зависимость оптических характеристик идеального столбика от размера. Точками обозначены выбранные для расчета размеры

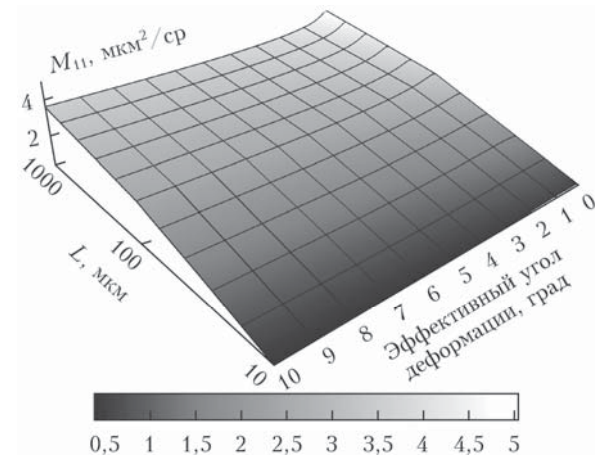


Рис. 11. Зависимость элемента M_{11} матрицы Мюллера для деформированного столбика от размера частицы и эффективного угла деформации

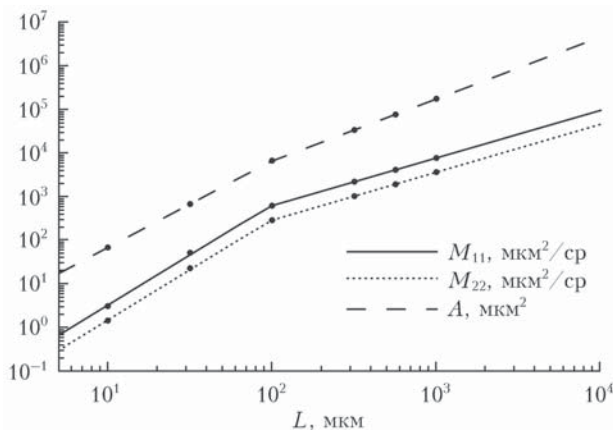


Рис. 12. Зависимость оптических характеристик деформированного столбика от размера. Эффективный угол деформации 3° . Точками обозначены выбранные для расчета размеры

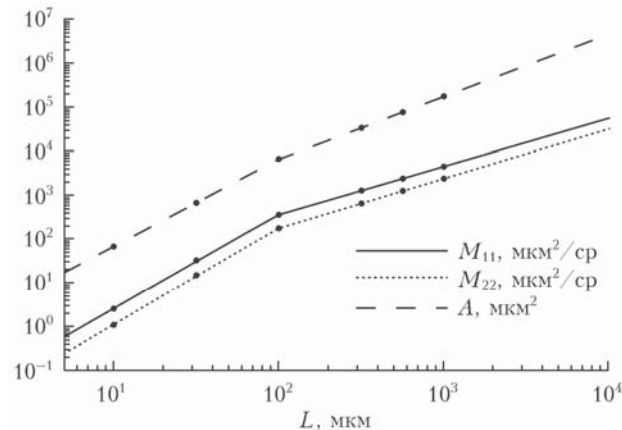


Рис. 13. Зависимость оптических характеристик деформированного столбика от размера. Эффективный угол деформации 7° . Точками обозначены выбранные для расчета размеры

Оптические характеристики деформированных частиц

На рис. 14–17 показаны представляющие практический интерес деполаризационное, лидарное и спектральное отношения, а также дифференциальное сечение рассеяния (M_{11}) для деформированных гексагональных столбиков. На рис. 18 представлено дифференциальное сечение рассеяния по всем углам рассеяния в зависимости от величины деформации, рассчитанное в приближении геометрической оптики для длины волны 532 нм, которое демонстрирует разрушение гало 46° с увеличением угла деформации.

Заключение

Таким образом, в работе показано, что оптические характеристики, рассчитанные для деформированных частиц, хорошо согласуются с результатами лидарных наблюдений уже при малых углах деформации. В частности, для облака частиц с мо-

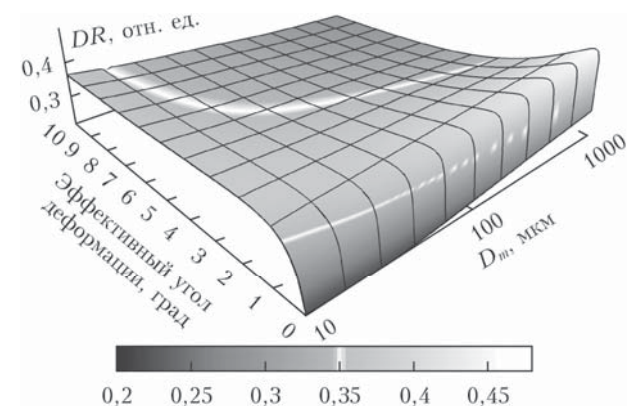


Рис. 14. Деполаризационное отношение для деформированного столбика в зависимости от эффективного угла деформации и модального размера. Длина волны 532 нм

дальным размером 100 мкм при эффективном угле деформации 3° рассчитанные значения деполаризационного (0,38), лидарного (30 ср) и спектрального (0,78) отношений хорошо воспроизводят результаты

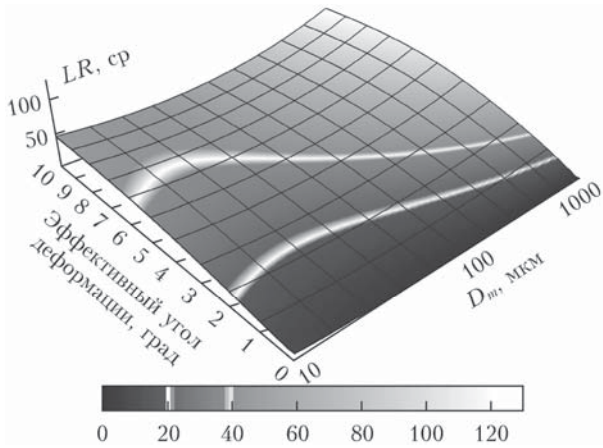


Рис. 15. Лидарное отношение для деформированного столбика в зависимости от эффективного угла деформации и модального размера. Длина волны 532 нм

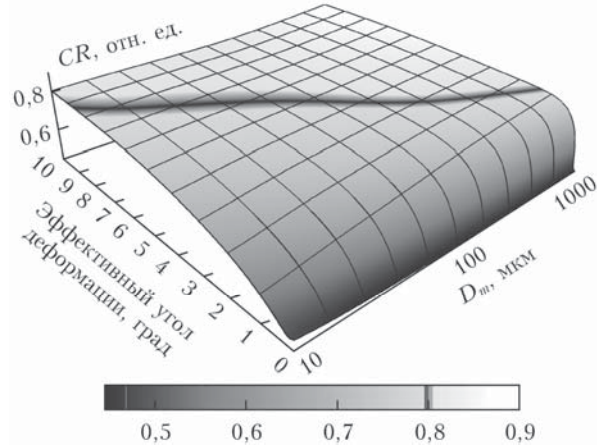


Рис. 16. Спектральное отношение на длинах волн 1064/532 нм для деформированного столбика в зависимости от эффективного угла деформации и модального размера

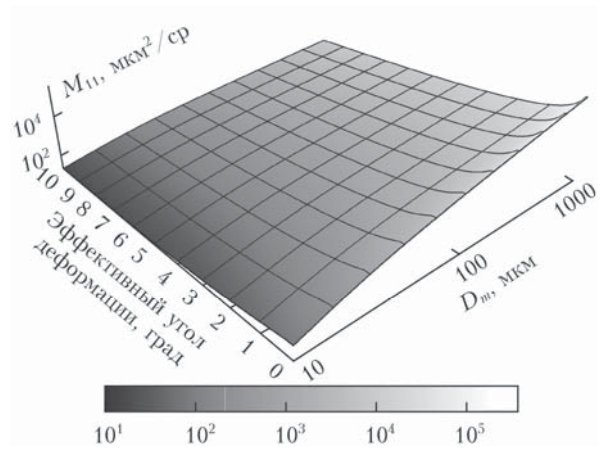


Рис. 17. Дифференциальное сечение рассеяния для деформированного столбика в зависимости от эффективного угла деформации и модального размера. Длина волны 532 нм

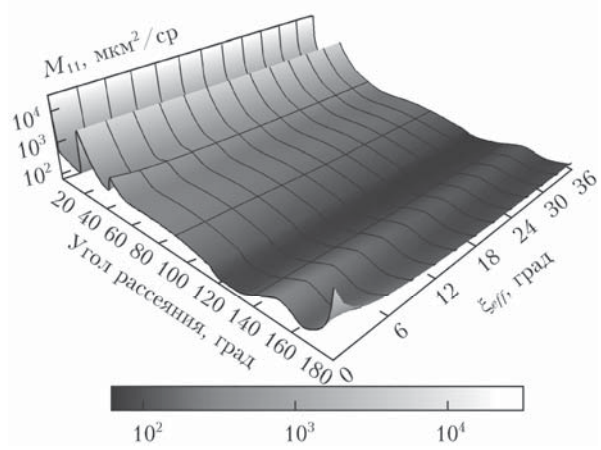


Рис. 18. Дифференциальное сечение рассеяния для деформированного столбика в зависимости от эффективного угла деформации. Длина волны 532 нм для 100-микронной частицы

лидарных наблюдений [43]. Также видно, что для такой частицы отсутствует гало 46°, что соответствует наблюдениям.

Результаты расчетов показали, что предложенная модель деформации адекватно описывает оптические характеристики реальных перистых облаков в широком диапазоне экспериментальных значений.

Результаты работы могут быть использованы для интерпретации лидарных сигналов, а также показывают необходимость учета слабых искажений формы частиц перистых облаков при расчете оптических характеристик.

Автор благодарит за помощь в проведении расчетов В.А. Шишко.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 15-05-06100, 16-35-60089) и Президента РФ (гранты МК-2495.2017.5, НШ-8199.2016.5).

1. Liou K.N. Influence of cirrus clouds on weather and climate processes: A global perspective // Mon. Weather Rev. 1986. V. 114, N 6. P. 1167–1199.

2. Stephens G.L., Tsay S.-C., Stackhouse P.W., Jr., Flatau P.J. The relevance of the microphysical and radiative properties of cirrus clouds to climate and climatic feedback // J. Atmos. Sci. 1990. V. 47, N 14. P. 1742–1754.
 3. Baran A.J. From the single-scattering properties of ice crystals to climate prediction: A way forward // Atmos. Res. 2012. V. 112. P. 45–69.
 4. Wendling P., Wendling R., Weickmann H.K. Scattering of solar radiation by hexagonal ice crystals // Appl. Opt. 1979. V. 18, N 15. P. 2663–2671.
 5. Sassen K., Benson S. A midlatitude cirrus cloud climatology from the Facility for Atmospheric Remote Sensing: II. Microphysical properties derived from lidar depolarization // J. Atmos. Sci. 2001. V. 58, N 15. P. 2103–2112.
 6. Кузьмин В.А., Дикинис А.В. Комплексное использование данных дистанционного зондирования, наземных наблюдений и численных прогнозов погоды при автоматизированном прогнозировании стока // Учен. зап. Рос. гос. гидрометеорол. ун-та. 2011. Т. 22, № 22. С. 16–27.
 7. Солдатенко С.А., Тертышников А.В., Ширинов Н.В. Оценка влияния спутниковой информации на качество численных прогнозов погоды // Современные пробле-

- мы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 4. С. 38–47.
8. Kalnay E. Atmospheric modeling, data assimilation and predictability. Cambridge University Press, 2002. 364 p.
 9. Baran A.J. A review of the light scattering properties of cirrus // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2009. V. 110, N 14–16. P. 1239–1260.
 10. Takano Y., Liou K.N. Solar radiative transfer in cirrus clouds. Part I. Single scattering and optical properties of hexagonal ice crystals // J. Atmos. Sci. 1989. V. 46, N 1. P. 3–19.
 11. Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N. Backscatter ratios for arbitrary oriented hexagonal ice crystals of cirrus clouds // Opt. Lett. 2014. V. 39, N 19. P. 5788–5791.
 12. Samokhvalov I.V., Bryukhanov I.D., Nasonov S.V., Zhi-votenyuk I.V., Stykon A.P. Investigation of the optical characteristics of cirrus clouds with anomalous backscattering // Rus. Phys. J. 2013. V. 55, N 8. P. 925–929.
 13. Sassen K., Kayetha V. K., Zhu J. Ice cloud depolarization for nadir and off-nadir CALIPSO measurements // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39, N 20. P. L20805. DOI: 10.1029/2012GL053116.
 14. Самохвалов И.В., Бобровников С.М., Гейко П.П., Ельников А.В., Кауль Б.В. Развитие высотного лидара Томского государственного университета как уникального комплекса для мониторинга атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19, № 11. С. 995–999.
 15. Кауль Б.В. Оптико-локационный метод поляризации исследований анизотропных аэрозольных сред: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Томск, 2004. 219 с.
 16. Кауль Б.В., Волков С.Н., Самохвалов И.В. Результаты исследований кристаллических облаков посредством лидарных измерений матриц обратного рассеяния света // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16, № 4. С. 354–361.
 17. Ромашиов Д.Н., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Банк данных для интерпретации результатов поляризационного зондирования кристаллических облаков // Оптика атмосфер. и океана. 2000. Т. 13, № 9. С. 854–861.
 18. Самохвалов И.В., Насонов С.В., Брюханов И.Д., Боровой А.Г., Кауль Б.В., Кустова Н.В., Коношонкин А.В. Анализ матрицы обратного рассеяния перистых облаков с аномальным обратным рассеянием // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 8/3. С. 281–283.
 19. Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Осипов В.А., Боровой А.Г., Masuda K., Ishimoto H., Okamoto H. Метод физической оптики для решения задачи рассеяния света на кристаллических ледяных частицах: сравнение дифракционных формул // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 9. С. 830–843.
 20. Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N. The physics-optics approximation and its application to light backscattering by hexagonal ice crystals // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2014. V. 146. P. 181–189.
 21. Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Боровой А.Г. Алгоритм трассировки пучков для задачи рассеяния света на атмосферных ледяных кристаллах. Часть 1. Теоретические основы алгоритма // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 4. С. 324–330; Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Borovoi A.G. Beam splitting algorithm for the problem of light scattering by atmospheric ice crystals. Part 1. Theoretical foundations of the algorithm // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 5. P. 441–447.
 22. Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Боровой А.Г. Алгоритм трассировки пучков для задачи рассеяния света на атмосферных ледяных кристаллах. Часть 2. Сравнение с алгоритмом трассировки лучей // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 4. С. 331–337; Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Borovoi A.G. Beam splitting algorithm for the problem of light scattering by atmospheric ice crystals. Part 2. Comparison with the ray tracing algorithm // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 5. P. 448–454.
 23. Konoshonkin A., Kustova N., Borovoi A. Beam-splitting code for light scattering by ice crystal particles within geometric-optics approximation // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2015. V. 164. P. 175–183.
 24. Borovoi A., Balin Y., Kokhanenko G., Penner I., Konoshonkin A., Kustova N. Layers of quasi-horizontally oriented ice crystals in cirrus clouds observed by a two-wavelength polarization lidar // Opt. Express. 2014. V. 22, N 20. P. 24566–24573.
 25. Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N., Okamoto H. Backscattering Mueller matrix for quasihorizontally oriented ice plates of cirrus clouds: Application to CALIPSO signals // Opt. Express. 2012. V. 20, N 27. P. 28222–28233.
 26. Коношонкин А.В. Моделирование сигнала сканирующего лидара от монодисперсного облака квазигоризонтально ориентированных частиц // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 12. С. 1053–1060.
 27. Borovoi A., Kustova N., Konoshonkin A. Interference phenomena at backscattering by ice crystals of cirrus clouds // Opt. Express. 2015. V. 23, N 19. P. 24557–24571.
 28. Cho H.M., Yang P., Kattawar G.W., Nasiri S.L., Hu Y., Minnis P., Trepte C., Winker D. Depolarization ratio and attenuated backscatter for nine cloud types: Analyses based on collocated CALIPSO lidar and MODIS measurements // Opt. Express. 2014. V. 16, N 6. P. 3931–3948.
 29. Yoshida R., Okamoto H., Hagihara Y., Ishimoto H. Global analysis of cloud phase and ice crystal orientation from Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO) data using attenuated backscattering and depolarization ratio // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. P. D00H32. DOI: 10.1029/2009JD012334.
 30. Mitchell D.L., Arnott W.P. A model predicting the evolution of ice particle size spectra and radiative properties of cirrus clouds. Part II: Dependence of absorption and extinction on ice crystal morphology // J. Atmos. Sci. 1994. V. 51, N 6. P. 817–832.
 31. Wolf V., Reichardt J., Górsdorf U., Reigert A., Leinweber R., Lehmann V. Synergy between ground-based remote sensing systems in microphysical analysis of cirrus clouds // Proc. SPIE. 2014. V. 9246. P. 92460K. DOI: 10.1117/12.2065674.
 32. Волковицкий О.А., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г. Оптические свойства кристаллических облаков. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 197 с.
 33. Панорамно-оптическая станция «TomSky». URL: <http://sky.iao.ru/>
 34. Морозов А.М., Галилейский В.П., Елизаров А.И., Карев Д.В. Наблюдение зеркального отражения освещенной подстилающей поверхности облачным слоем из ледяных пластинок // Оптика атмосфер. и океана. 2017. Т. 30, № 1. С. 88–92.
 35. 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. 2015. V. 182. P. 12–23.
 36. Konoshonkin A.V., Borovoi A.G., Kustova N.V., Okamoto H., Ishimoto H., Grynko Y., Förstner J. Light scattering by ice crystals of cirrus clouds: From exact numerical methods to physical-optics approximation // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2017. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2016.12.024.

37. *Мардуа К.* Статистический анализ угловых наблюдений / Пер. с англ. Э.В. Хмаладзе. М.: Наука, 1978. 240 с.
38. *Mitchell D.L.* A model predicting the evolution of ice particle size spectra and radiative properties of cirrus clouds. Part 1. Microphysics // *J. Atmos. Sci.* 1994. V. 51, N 6. P. 797–816.
39. *Auer A.H., Veal D.L.* The dimension of ice crystals in natural clouds // *J. Atmos. Sci.* 1970. V. 27, N 6. P. 919–926.
40. *Sato K., Okamoto H.* Characterization of Ze and LDR of non-spherical and inhomogeneous ice particles for 95-GHz cloud radar: Its application to microphysical retrievals // *J. Geophys. Res. D.* 2006. V. 111. P. 22213.
41. *Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Шишко В.А., Боровой А.Г.* Методика решения задачи рассеяния света на ледяных кристаллах перистых облаков в направлении рассеяния назад методом физической оптики для лидара с зенитным сканированием // *Оптика атмосф. и океана.* 2016. Т. 29, № 1. С. 40–50; *Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Shishko V.A., Borovoi A.G.* The technique for solving the problem of light backscattering by ice crystals of cirrus clouds by the physical optics method for a lidar with zenith scanning // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 3. P. 252–262.
42. *Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N.* Backscattering reciprocity for large particles // *Opt. Lett.* 2013. V. 38, N 9. P. 1485–1487.
43. *Wang Z., Borovoi A., Liu D., Tao Z., Ji C., Xie C., Wang B., Zhong Z., Wang Y.* Properties of cirrus cloud by a three wavelength Raman Mie Polarization lidar: Observation and model match // *Proc. SPIE.* 2016. V. 10035. P. 100352V.

A.V. Konoshonkin. Optical characteristics of irregular atmospheric ice columns.

The study of cirrus clouds, which significantly affect the climate, is carried out using lidars. Interpretation of the lidar data is based on the direct solution of the problem of light scattering by particles of crystal clouds. Optical characteristics of perfect ice hexagonal columns, obtained previously, poorly agree with the lidar observation results. The work describes calculations of the optical characteristics of irregular hexagonal ice columns, which are in a good agreement with the experimental results. The calculations for particles with deformation of a dihedral angle of 90° are presented. It is shown that the logarithm of the scattering matrix can be well linearly approximated by the logarithm of the particle size. This can significantly speed up the calculations of the optical characteristics of clouds. It is ascertained that the optical characteristics are in a good agreement with the lidar observation results throughout the entire range of sizes calculated even at deformation angles of a few degrees.