

Обратное рассеяние света гексагональными ледяными кристаллами: численное исследование

Э.И. Наац*

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 21.05.2010 г.

Проведено численное исследование характеристик обратного рассеяния света гексагональными кристаллами: деполаризационного отношения и сечения обратного рассеяния. Исследована зависимость микрофизических характеристик обратного рассеяния от формы частиц при хаотической ориентации. Для численного исследования использовалась компьютерная программа, разработанная автором, объединяющая в себе два подхода – трассировки лучей и физической оптики.

Ключевые слова: деполаризационное отношение, обратное рассеяние, кристаллические облака; depolarization ratio, attenuated backscatter, crystal clouds.

Введение

Перенос излучения в атмосфере и обратные задачи лазерного зондирования, связанные с рассеянием света, представляют собой одну из интенсивно развивающихся областей науки в настоящее время. Особые усилия направлены на изучение характеристик рассеяния света несферическими частицами, влияющими на перенос излучения в кристаллических облаках, и обратного рассеяния света [1]. Среди задач, стоящих перед исследователями, важное место занимает разработка корректных моделей, которые необходимы для оценок вклада кристаллических облаков в рассеяние излучения лидаров. Модели строятся на основе знаний о микрофизических свойствах облаков, таких как форма, размер и ориентация частиц.

Основными микрофизическими характеристиками являются деполаризационное отношение и объемный коэффициент обратного рассеяния. Деполаризационное соотношение используется для определения формы частиц и классификации облаков [1]. Объемный коэффициент обратного рассеяния определяется через сечение обратного рассеяния, рассчитываемое на основе моделей конкретных рассеивающих частиц. Для кристаллических облаков в качестве базовой модели рассматривается модель облаков, состоящих из правильных ледяных гексагональных кристаллов. Именно изучению характеристик рассеяния света на таких частицах посвящена данная статья.

1. Численный метод трассировки лучей и векторная формула Кирхгофа

Основным подходом в изучении рассеяния света на ледяных кристаллах в случае больших, по сравнению с длиной волны падающего излучения, размеров

частиц является использование геометрической оптики. Для программной реализации данного подхода используется метод трассировки лучей. Ранее автором была разработана компьютерная программа LАSPAS, реализующая данную методику для частиц с различной сложной формой [2]. Программа позволяет рассчитать основные характеристики рассеяния света, такие как индикатриса рассеяния, сечение рассеяния и элементы матрицы Мюллера [3–5].

Однако данный подход не позволяет корректно учесть волновые эффекты, особенно при расчете поляризационных характеристик рассеяния. Одним из решений данной проблемы является использование метода трассировки лучей для расчета поля на поверхности частицы, которое затем преобразуется в поле дальней волновой зоны на основе векторной формулы Кирхгофа [6]. В настоящей статье применен именно такой подход. Для реализации использовалась программа LАSPAS, модифицированная для расчета поля на поверхности частицы с последующим расчетом поля в дальней волновой зоне на основе векторной формулы Кирхгофа (LАSPAS + WA – wave approach).

Существует много формулировок векторной формулы Кирхгофа и соответственно формул для расчета поля дальней зоны. Нами использовалась следующая формула для определения поля рассеянной волны [6]:

$$\mathbf{E}^s(\mathbf{r})|_{kr \rightarrow \infty} = \frac{\exp(ikr)}{-ikr} \frac{k^2}{4\pi} \hat{\mathbf{r}} \times \left\{ \hat{\mathbf{r}} \times \iint_s \left[\hat{\mathbf{n}}_s \cdot \hat{\mathbf{r}} \mathbf{E}(\mathbf{r}') + \frac{1}{ik} \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{r}')}{\partial n_s} \right] \exp(ik\hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}') d^2\mathbf{r}' \right\},$$

где $\hat{\mathbf{r}}$ – единичный вектор в направлении рассеяния; $\hat{\mathbf{n}}_s$ – единичный вектор нормали на поверхности частицы; \mathbf{r}' – радиус-вектор точки на поверхности

* Эдуард Игоревич Наац (naatz@iao.ru).

частицы; k — волновое число; \mathbf{E}^s — вектор напряженности электрического поля рассеянной волны в дальней волновой зоне; \mathbf{E} — вектор напряженности электрического поля на поверхности частицы.

В настоящей статье рассчитывались следующие характеристики рассеяния света: деполяризационное отношение, определяемое как отношение перпендикулярной и параллельной составляющих интенсивности обратного сигнала по отношению к направлению поляризации падающей волны:

$$\Delta = I_{\perp}/I_{\parallel};$$

сечение обратного рассеяния (радарное сечение)

$$\sigma_{\pi} = 4\pi\sigma_d(\pi),$$

где $\sigma_d(\pi)$ — дифференциальное сечение рассеяния в направлении обратного рассеяния. Фактор эффективности обратного рассеяния:

$$K_{\pi} = \sigma_{\pi}/Q_s.$$

Здесь Q_s — площадь поперечного сечения частицы.

2. Результаты расчетов

Основное внимание в расчетах уделялось определению зависимости характеристик рассеяния от размеров и форм частиц при их хаотической ориентации. При этом рассчитывалось распределение поля в направлении назад в пределах зоны радиусом 0,015 рад. Это примерно соответствует условиям в лидарных экспериментах при приеме обратного сигнала. Для каждой конкретной частицы и конкретной ориентации рассчитывалось поле дальней зоны. Конкретная ориентация частицы определялась заданием трех параметров: углом вращения вокруг продольной оси симметрии (главная ось симметрии гексагонального цилиндра), углом наклона главной оси симметрии кристалла по отношению к направлению падающего поля плоской волны, азимутальным углом (положение в плоскости, перпендикулярной направлению падающей волны). Диапазон изменения данных параметров ограничивался с учетом свойств симметрии частицы.

Конкретные значения параметров выбирались случайным образом, с обеспечением условий равномерного распределения для заданного количества всех ориентаций. Всего использовалось порядка 2000 ориентаций для одной частицы. Используя набор рассчитанных полей для каждой ориентации, вычислялось усредненное поле, по которому и определялись характеристики рассеяния. Далее расчеты повторялись для различных частиц, характеризующихся параметром $L/2a$ (L — высота кристалла, a — радиус основания). Радиус основания брался одинаковым для всех частиц — 40 мкм. Это примерно соответствует радиусам основания, наблюдаемым в реальных облаках.

Стоит отметить, что при расчетах по геометрической оптике обычно важен только параметр $L/2a$, характеризующий форму частицы. Однако при учете волновых эффектов важен реальный размер частицы по отношению к длине волны падающего на

частицу излучения. Несомненно, в дальнейшем необходимо изучение поведения характеристик рассеяния при изменении радиуса основания гексагонального кристалла.

В данном исследовании изучение ограничено фиксированным поперечным размером. Диапазон изменения параметра $L/2a$ составлял 0,01–2,5. При этом шаг изменения параметра брался 0,01. Все расчеты проводились для длины волны падающего излучения 0,532 мкм и показателя преломления 1,311 (вещественный, поглощение отсутствует).

На рис. 1 представлены результаты расчетов деполяризационного отношения для хаотически ориентированных частиц при изменяющемся значении параметра $L/2a$.

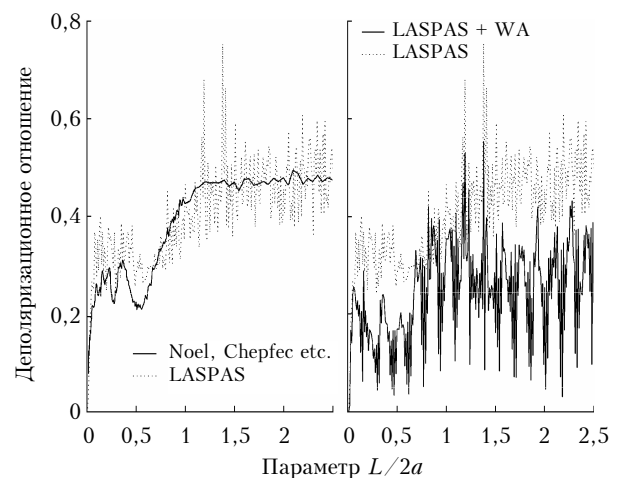


Рис. 1. Деполяризационное отношение для различных форм и размеров частиц

Рис. 1, а иллюстрирует результаты расчетов по геометрической оптике (метод трассировки лучей), для сравнения приводятся аналогичные результаты расчетов [7]. Сравнение показывает достаточно хорошее их совпадение. На рис. 1, б приведены результаты расчетов по геометрической и физической оптике (с учетом волновых эффектов, как это описано выше). Наблюдаются различия, хотя сами значения деполяризационного соотношения близки по порядку величины.

На рис. 2 представлены результаты расчетов фактора эффективности обратного рассеяния и сечения обратного рассеяния на основе физической оптики. Сечение обратного рассеяния нормировано на среднюю площадь поперечного сечения хаотически ориентированной частицы размерами, определяемыми параметром $L/2a = 1$. Средняя площадь поперечного сечения частицы (с любым $L/2a$) рассчитывалась исходя из набора конкретных ориентаций для данной частицы, получаемых в ходе вычислений.

Волновые эффекты наглядно проявляются в представленных результатах расчетов. Обращает также на себя внимание поведение фактора эффективности обратного рассеяния, а именно уменьшение величины максимумов с ростом размера частиц и изменением их формы.

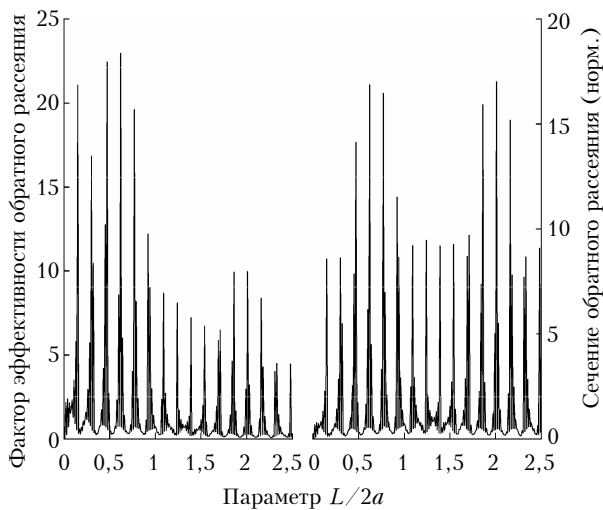


Рис. 2. Характеристики обратного рассеяния для различных форм и размеров частиц

Как уже упоминалось выше, результаты расчетов для каждой отдельной частицы усреднялись по ориентациям для получения усредненного поля в пределах зоны $0,015$ рад. Это можно рассматривать как модель реального сигнала, который регистрируется приемником лидара. Анализ таких сигналов позволяет сегодня исследователям [1] осуществлять классификацию облаков по поляризационным характеристикам (деполяризационное соотношение). Представляет интерес в рамках модели одной частицы применить ту же методику анализа [1]. Методика данных вычислений сводится к следующему алгоритму. Анализируются два двумерных распределения сигнала: распределение интенсивности и соответствующее распределение величины деполяризационного соотношения. Общая интенсивность нормируется на единицу. Таким образом, для каждой точки в двумерном распределении величины деполяризационного соотношения получаем соответствующий вес, характеризующий его вклад.

Диапазон изменения деполяризационного соотношения и интенсивности разбивается на интервалы, подсчитывается количество точек, попадающих в данный интервал интенсивности, при заданном интервале величины деполяризационного соотношения. Таким образом, мы можем оценить вклад (относительно интенсивности) в распределение назад областей обратного сигнала с определенной величиной деполяризационного соотношения. Результаты расчетов представлены на рис. 3 и 4.

На рис. 3 приведены результаты расчетов по описанному выше алгоритму для гексагонального столбика с параметром $L/2a = 2,5$, а на рис. 4 для пластинки с параметром $L/2a = 0,1$. Сравнивая полученные результаты с результатами [1], можно сделать вывод об их близком сходстве. И несмотря на то что в [1] представлены результаты, усредненные по массиву различных размеров и типов частиц, можно заключить: основой наблюдаемой картины являются микрофизические свойства отдельных частиц.

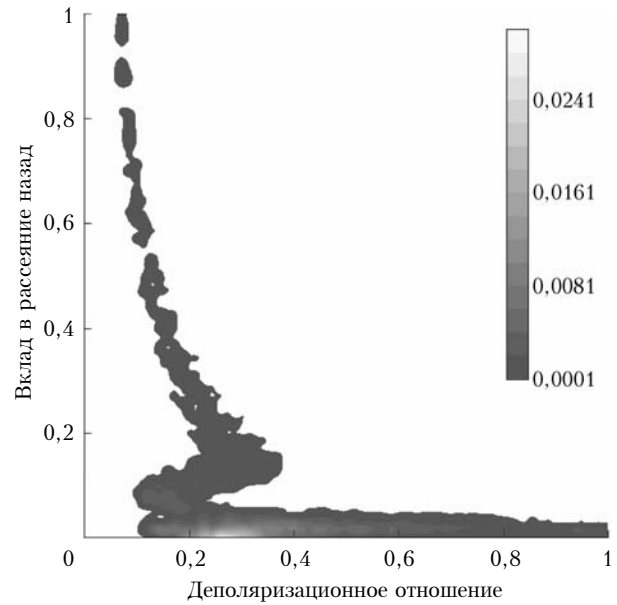


Рис. 3. Деполяризационное соотношение для гексагонального столбика

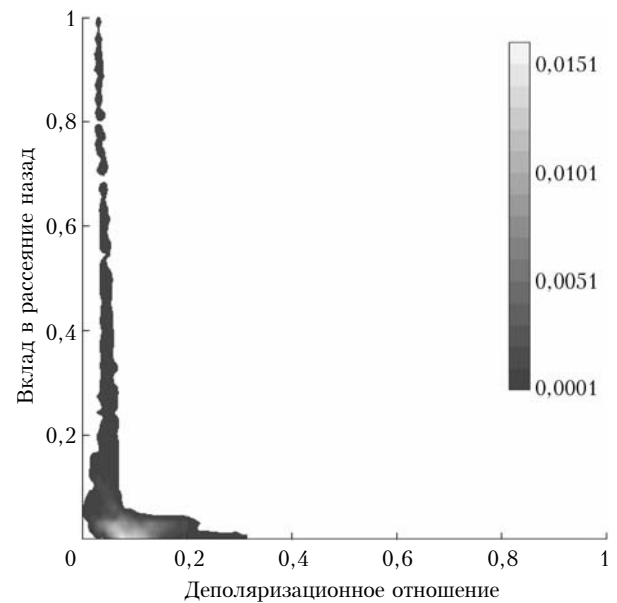


Рис. 4. Деполяризационное соотношение для гексагональной пластинки

Заключение

Представлены результаты расчетов характеристик рассеяния света ледяными кристаллами, имеющими форму гексагональной призмы. Показано влияние учета волновых эффектов на поведение деполяризационного соотношения, фактора эффективности обратного рассеяния и сечения обратного рассеяния при изменении формы и размера частиц. Приведены результаты анализа модели обратного сигнала для отдельных частиц (деполяризационное соотношение), и отмечено их сходство с экспериментально наблюдаемой картиной, что является проявлением микрофизических свойств рассеяния света гексагональными кристаллами.

1. *Cho H., 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*. 2008. V. 16, N 19. P. 3931–3948.
2. *Наац Э.И., Боровой А.Г., Оппель У.Г.* Расчет характеристик рассеяния света несферическими частицами произвольной формы // *Оптика атмосф. и океана*. 1998. Т. 11, № 1. С. 12–16.
3. *Borovoi A., Naats E., Ooppel U., Grishin I.* Shape characterization of a large nonspherical particle by use of its Fraunhofer diffraction pattern // *Appl. Opt.* 2000. V. 39, N 34. P. 1989–1997.
4. *Borovoi A.G., Grishin I.S., Naats E.I., Ooppel U.G.* Backscattering peak of hexagonal ice columns and plates // *Opt. Lett.* 2000. V. 25, N 18. P. 1388–1390.
5. *Borovoi A., Grishin I., Naats E., Ooppel U.* Light backscattering by hexagonal ice crystals // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer*. 2002. V. 72, N 4. P. 403–407.
6. *Yang P., Liou K.N.* Geometric-optics-integral-equation method for light scattering by nonspherical ice crystals // *Appl. Opt.* 1996. V. 35, N 33. P. 6568–6584.
7. *Noel V., Chepfer H., Ledanois G., Delaval A., Flamant P.H.* Classification of effective shape ratios in cirrus clouds based on lidar depolarization ratio // *Appl. Opt.* 2002. V. 41, N 2. P. 4245–4257.

E.I. Naats. Light backscatter for hexagonal ice crystals: numerical study.

Numerical study of backscattered and depolarized light from hexagonal ice crystals has been made. A composite ray-tracing code has been developed to simulate backscattered and depolarized light from hexagonal particles. The numerical study of dependences of microphysical backscattering characteristics for case of chaotic orientation and various cases of orientation in the fixed range has been made. The code uses the ray-tracing technique to solve the field on the ice crystal surface, which is then transformed to the far wave field on the basis of the electromagnetic equivalence theorem.