

**КОНФЕРЕНЦИЯ С**

**ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ И  
ОКЕАНА ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

## РАСЧЕТ РАДАРНОГО СИГНАЛА ОТРАЖЕННОГО ОТ ПЕРИСТОЙ ОБЛАЧНОСТИ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ДИПОЛЕЙ

Шишко В.А., Тимофеев Д.Н., Кустова Н.В., Коношонкин А.В., Боровой А.Г.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

e-mail: sva@iao.ru, tdn@iao.ru, kustova@iao.ru, sasha\_tvo@iao.ru, borovoi@iao.ru

Ключевые слова: матрица рассеяния, радар, атмосферные ледяные частицы, перистые облака, метод дискретных диполей

В докладе представляется база данных матриц рассеяния микроволнового излучения для ледяных частиц перистых облаков. Расчеты выполнены для метеорологических радаров, работающих на частотах 35 и 94 ГГц. Расчет проводился для хаотически ориентированных ледяных частиц следующих форм: ледяные гексагональные пластинки и столбики, агрегаты, bullet-rosette, дроксталлы и частиц случайной формы. Размер частиц варьировался в диапазоне от 10 до 10000 мкм. Установлено, что не для всего спектра наблюдаемых в облаках ледяных кристаллов применима теория рассеяния Рэлея для указанных длин волн радара. Установлены конкретные пороговые значения размеров для каждой формы кристаллов. В дальнейшем полученные результаты будут применяться для интерпретации совместных радар-лидарных измерений.

Перистые облака составляют до 30% от облаков покрывающих поверхность земли и являются одним из основных источников неопределенности в современных численных моделях радиационного баланса Земли и, соответственно, климата. Однако, не смотря на многолетние исследования, в настоящее время их радиационные и микрофизические характеристики изучены недостаточно. Дистанционные методы исследования этих характеристик с помощью лидаров и метеорологических радаров призваны заполнить данный пробел. В рамках данного доклада был выполнен расчет базы данных матриц рассеяния микроволнового излучения для радаров 35 и 94 ГГц. База данных включает хаотически ориентированные ледяные частицы следующих форм: гексагональные столбики и пластинки, агрегаты, bullet-rosette, дроксталлы и частицы произвольной формы. В дальнейшем этот банк данных будет применяться при интерпретации совместных радар-лидарных измерений.

Моделирование проводилось методом дискретных диполей, разработанным М. Юркиным [1], для радаров с частотой 35 и 94 ГГц (длины волн 3189 и 8565 мкм) и показателями преломления льда  $1,7864-0,0032i$  и  $1,7861-0,0011i$  соответственно). Расчет проводился для следующих форм ледяных частиц: гексагональные столбики, пластинки, агрегаты, bullet-rosette, дроксталлов и частицы произвольной формы. Размеры крупных несферических частиц перистых облаков в литературе принято определять их максимальным размером  $D_{max}$  [2], который в наших расчетах варьировался в диапазоне от 10 до 10000 мкм. При моделировании

методом дискретных диполей частицы представлялись набором от 4000 до 20000 диполей в зависимости от размера частицы. Пример представления частицы набором диполей представлен на рисунке 1.

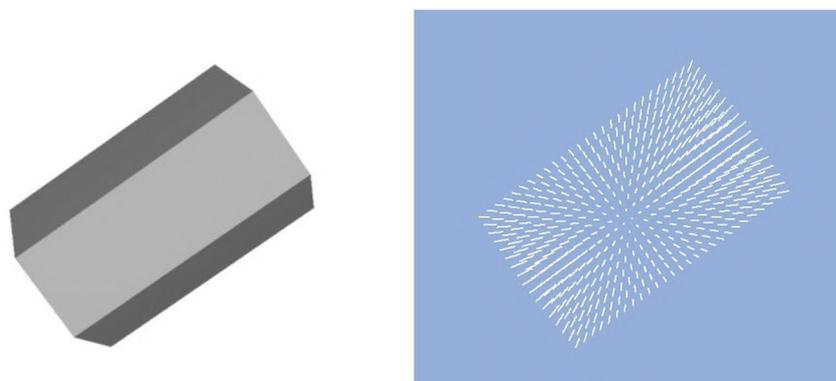


Рисунок 1 — Форма гексагонального столбика (слева) и ее модельное представление набором диполей (справа)

Хорошо известно, что при решении задачи рассеяния света на частицах, размер которых много меньше длины волны падающего излучения, решение может быть представлено аналитически, так называемое рассеяние Рэлея [3]:

$$I = I_0 \frac{1 + \cos^2 \theta}{2R^2} \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \left( \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \left( \frac{d}{2} \right)^6$$

Однако полученные методом дискретных диполей расчеты показали принципиально иной результат. На рисунке 2 приведен элемент  $S_{11}$  матрицы рассеяния построенный в зависимости от максимального размера  $D_{\max}$ , который равен расстоянию между двумя наиболее удаленными точками частицы. Из рисунка 2 видно, что решение имеет сильный разброс в зависимости от формы частицы. Объяснить данное противоречие можно учитывая тот факт, что рассеяние на частицах меньше длины волны падающего излучения зависит не от размера частицы, а от ее объема. Поэтому далее мы предлагаем ввести другой параметр, характеризующий размер частиц: эквивалентный объем  $R_{\text{eq}}$ , который имеет простой физический смысл: радиус шара, объем которого совпадает с объемом исследуемой частицы.

$$R_{\text{eq}} = \sqrt[3]{\frac{3V_{\text{part}}}{4\pi}}$$

где  $V_{\text{part}}$  – объем несферической частицы.

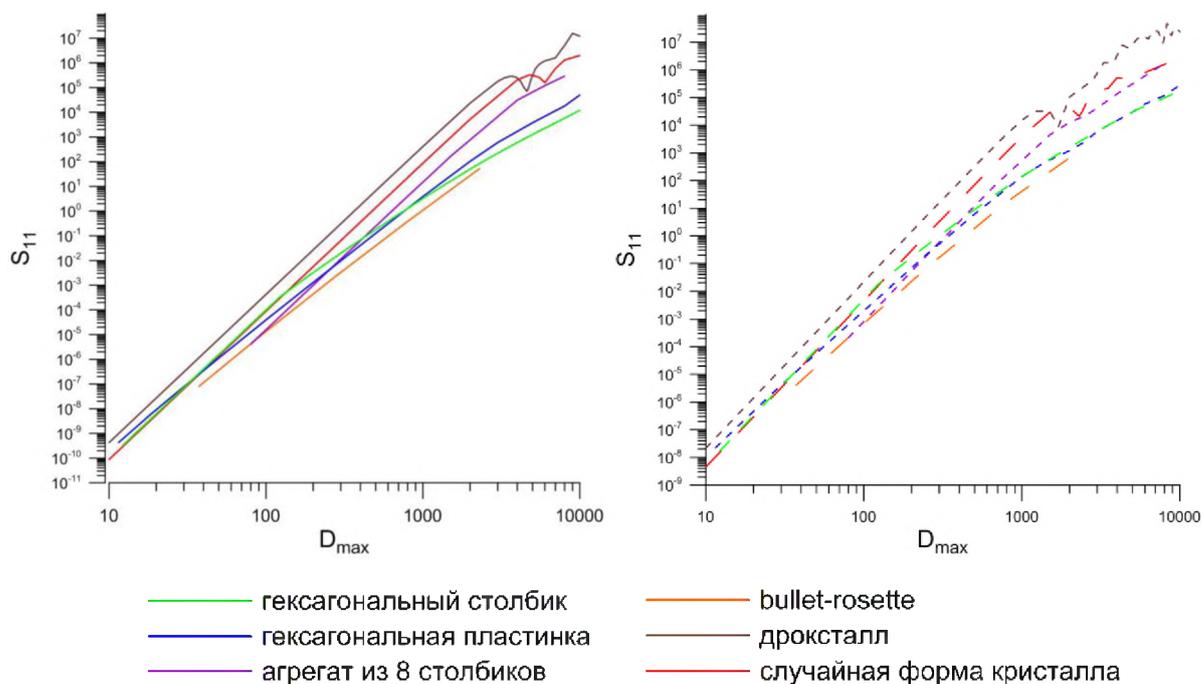


Рисунок 2 — Элемент матрицы рассеяния  $S_{11}$  построенный в зависимости от максимального размера  $D_{\max}$  частицы. Длина волны радара 8565 мкм (слева) и 3189 мкм (справа)

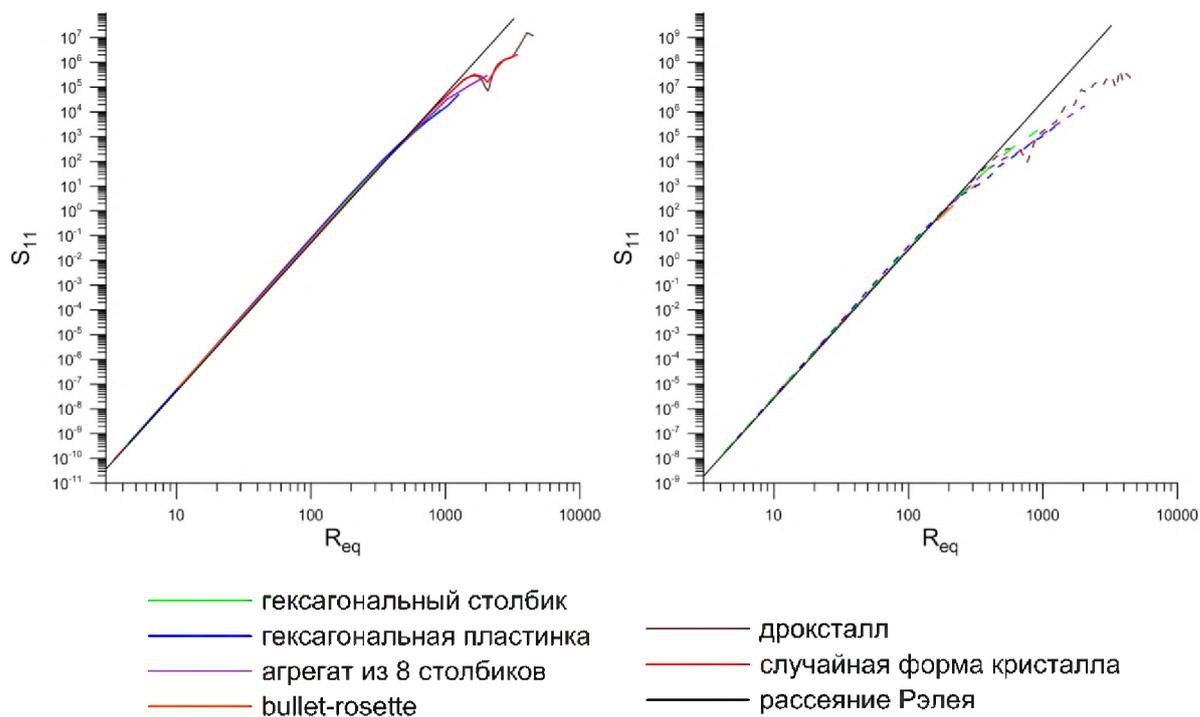


Рисунок 3 — Элемент матрицы рассеяния  $S_{11}$  построенный в зависимости от радиуса эквивалентного объема  $R_{\text{eq}}$ . Длина волны радара 8565 мкм (слева) и 3189 мкм (справа)

Для указанных выше частиц существует простая связь между  $R_{\text{eq}}$  и  $D_{\max}$ :

$$R_{\text{eq}} \approx \begin{cases} 0,347D_{\text{max}}, & \text{если } D_{\text{max}} \leq 122 \text{ мкм} \\ 1,597(D_{\text{max}})^{0,691}, & \text{если } D_{\text{max}} > 122 \text{ мкм} \end{cases} \quad \text{– для гексагональных столбиков};$$

$$R_{\text{eq}} \approx 0,623(D_{\text{max}})^{0,827} \quad \text{– для гексагональных пластинок};$$

$$R_{\text{eq}} \approx 0,254D_{\text{max}} \quad \text{– для агрегатов};$$

$$R_{\text{eq}} \approx 0,539(D_{\text{max}})^{0,826} \quad \text{– для bullet-rosette};$$

$$R_{\text{eq}} \approx 0,449D_{\text{max}} \quad \text{– для дроксталлов};$$

$$R_{\text{eq}} \approx 0,343D_{\text{max}} \quad \text{– для частиц произвольной формы}.$$

На рисунке 3 представлено решение задачи рассеяния в зависимости от  $R_{\text{eq}}$ .

Как видно из сравнения рисунков 2 и 3 определение размера частицы через эквивалентный объем  $R_{\text{eq}}$  вместо общепринятого максимального размера  $D_{\text{max}}$  позволяет получить хорошее согласие с рассеянием Рэлея для всех типов частиц в диапазоне размеров до  $R_{\text{eq}} < 540$  мкм для радара с частотой 35 ГГц и  $R_{\text{eq}} < 200$  мкм для радара с частотой 94 ГГц. Напомним, что указанный размер  $R_{\text{eq}} = 540$  мкм и  $R_{\text{eq}} = 200$  мкм соответствуют одному параметру  $R_{\text{eq}}/\lambda \approx 0,063$ . При этом реальный размер частиц  $D_{\text{max}}$  для столбиков равен 4500 и 1050 мкм, для пластинок – 3600 и 1050 мкм, для агрегатов – 2100 и 800 мкм, для bullet-rosette – 4300 и 1300 мкм, для дроксталлов – 1200 и 450 мкм, для частицы произвольной формы – 1600 и 600 мкм. Поскольку в реальных облаках размеры частиц часто превышают указанные значения, то для их крупной фракции необходимо использовать точные численные методы, такие как ADDA. Однако для мелкой фракции можно пользоваться приближением Рэлея.

### Заключение

Для типичных длин волн радара показано, что при анализе решения задачи рассеяния на частицах перистых облаков эффективнее использовать радиус эквивалентного объема  $R_{\text{eq}}$ , а не максимальный размер частицы  $D_{\text{max}}$ . Установлено, что для радара, работающего на длине волны 94 ГГц для гексагональных частиц больше 1050 мкм, для агрегатов больше 800 мкм, для bullet-rosette больше 1300 мкм, для дроксталлов больше 450 мкм, для частиц произвольной формы больше 600 мкм необходимо проводить точные численные расчеты, поскольку теория рассеяния Рэлея для данных частиц не применима. Аналогичный вывод справедлив и для радара работающего на длине волны 35 ГГц: для столбиков крупнее 4500 мкм, для пластинок крупнее 3600 мкм, для агрегатов крупнее 2100 мкм, для bullet-rosette крупнее 4300 мкм, для дроксталлов крупнее 1200 мкм и для частиц произвольной формы крупнее 1600 мкм теория рассеяния Рэлея не применима.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (18-55-53046, 18-05-00568, 20-35-70041)

1. Yurkin M.A., Maltsev V.P., Hoekstra A.G The discrete dipole approximation for simulation of light scattering by particles much larger than the wavelength // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2007. Т. 106. С. 546–557.
2. Yang P., and Liou K. N. Light scattering and absorption by nonspherical ice crystals // *Light Scattering Reviews*, v.1 / Ed. by Kokhanovsky A.A. – Chichester : Springer-Praxis, 2006.
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Рэлеевское рассеяние в газах и жидкостях. // *Теоретическая физика. Электродинамика сплошных сред.* — М.: Наука, 1982. — Т. VIII. — С. 582—583.