

Проблема интерпретации данных лазерного поляризационного зондирования облаков верхнего яруса на основе теоретически рассчитанных матриц обратного рассеяния света монодисперсными кристаллами льда

САМОХВАЛОВ И. В., БРЮХАНОВ И. Д.

Национальный исследовательский Томский государственный университет г. Томск,
Россия

email: lidar@mail.tsu.ru, plyton2121@mail.ru

Изучению радиационных свойств облаков верхнего яруса (ОВЯ), связанному с их важной ролью в процессах формирования климата и радиационного баланса Земли, уделяется всё больше внимания. Отсутствие учёта влияния ряда явлений и процессов, происходящих в таких облаках, приводит к неточностям в расчётах радиационного баланса. К числу таких малоизученных факторов относится пространственная ориентация облачных несферических кристаллов льда. Её влияние на пропускание проходящего Солнечного излучения и уходящего теплового излучения Земли определяет необходимость построения микрофизической модели ОВЯ, учитывающей этот параметр. Отсутствие таких моделей является следствием невозможности измерения ориентации частиц в облаках контактными методами ввиду её нарушения при заборе проб, например, с самолёта.

Полная информация о микроструктуре облака содержится в его матрице обратного рассеяния света (МОРС), связывающей вектор-параметр Стокса зондирующего лазерного излучения и излучения, рассеянного назад облачными частицами. Таким образом, для оценки параметров микроструктуры облака необходимо определить его МОРС. Метод поляризационного лазерного зондирования [1] используется на высотном поляризационном лидаре Национального исследовательского Томского государственного университета [2] для изучения особенностей микроструктуры перистых облаков. Использование оригинальных технических решений в лидаре ТГУ позволяет, в отличие от его существующих аналогов [например, 3–5], экспериментально определять все 16 элементов МОРС, не прибегая к использованию свойств их попарного равенства. Зондирование осуществляется в зенит, что вместе с измерением параллельной и ортогональной поляризационных компонент обратно рассеянного излучения делает возможным детектирование ансамблей аэрозолей с преимущественной горизонтальной пространственной ориентацией [6]. При этом используется приближение однократного рассеяния, что аргументировано в [7]. Результаты экспериментов по поляризационному лазерному зондированию атмосферы сопоставляются с метеорологическими параметрами на высотах наблюдения облаков [2].

Накопленный массив экспериментальных данных, полученных методом поляризационного лазерного зондирования, статистически значим, однако проблема их интерпретации, связанная с оценкой параметров ориентации кристаллических частиц, до сих пор не решена. Это связано с отсутствием строгой теории рассеяния электромагнитных волн на совокупности пространственно ориентированных частиц льда. Наш подход к решению обратной задачи – определению параметров микроструктуры облаков – заключается в сопоставлении экспериментально полученных МОРС с рассчитанными теоретически. Для этого используется база данных Института оптики атмосферы (ИОА СО РАН, г. Томск), включающая в себя МОРС монодисперсных ансамблей ледяных кристаллов для различных параметров пространственной ориентации [8]. При вычислении элементов матриц использовался метод физической оптики, основанный на теории дифракции Кирхгофа [9]. Данные из указанной базы были аппроксимированы с целью получения МОРС для полидисперсных ансамблей гексагональных ледяных пластинок [10]. Такие матрицы рассчи-

ывались как аддитивные суммы (с весовыми коэффициентами) МОРС монодисперсных ансамблей с учётом реальных параметров функций распределения частиц в облаках по размерам и параметрам пространственной ориентации. При этом толщина h и эффективный диаметр D пластинки связаны [11] соотношением $h \approx 2,02D^{0,449}$. Для аппроксимации массива теоретических рассчитанных МОРС по размерам гексагональных частиц (Рис. 1) была выбрана гамма-функция [12, 13]:

$$f(a_0) = \frac{\mu^{\mu+1}}{\Gamma(\mu+1)a_{0m}} \left(\frac{a_0}{a_{0m}}\right)^\mu \exp\left(-\mu\frac{a_0}{a_{0m}}\right),$$

где $a_0 = \sqrt{hD/\pi}$ – эквивалентный размер пластинок, μ – дисперсия распределения и a_{0m} – модальный эквивалентный размер. Для аппроксимации распределения частиц по углам ориентации (Рис. 2) использована функция Гаусса [9, 14]:

$$f(\theta) = b \cdot \exp\left[-(\theta - \theta_0)^2/2\theta_s\right],$$

где b – нормировочная константа, θ_0 – модальный угол и θ_s – дисперсия распределения. Поскольку диапазоны изменения значений размеров частиц отличаются от таковых в [12], были использованы другие значения модальных размеров.

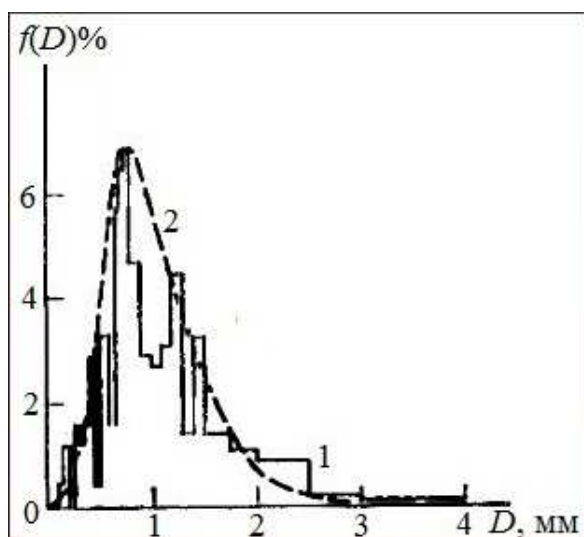


Рис. 1. Распределение по размерам D пластинчатых кристаллов в перистом облаке: 1 – эксперимент, 2 – гамма-распределение с параметрами $D_m = 0,8$ мм, $\mu = 4$ [12]

Расширенная версия базы данных ИОА СО РАН содержит МОРС, рассчитанные для гексагональных пластинок и столбиков правильной формы [15]. Для формирования МОРС полидисперсных ансамблей кристаллов льда, состоящих из частиц обеих форм, с параметрами распределений частиц, отвечающими реальным перистым облакам, использовано соотношение их долей по результатам работы [16]. В ней приведены обобщённые данные по экспериментальным исследованиям микроструктуры перистых облаков в рамках проектов TWP-ICE (тропики, 2006 г.), ISDAC (Арктика, 2008 г.) и SPARTICUS (средние широты, 2010 г.) для ледяных кристаллов пластинчатой, столбчатой и других форм. В качестве наиболее близких к климатическим условиям Западной Сибири выбраны данные проекта SPARTICUS [17]. Поскольку при обработке данных, получаемых с помощью высотного поляризационного лидара НИ ТГУ, морфологические признаки исследуемых облаков пока не учитываются, для получения МОРС полидисперсных ансамблей частиц использованы средние значения процентных долей кристаллов.

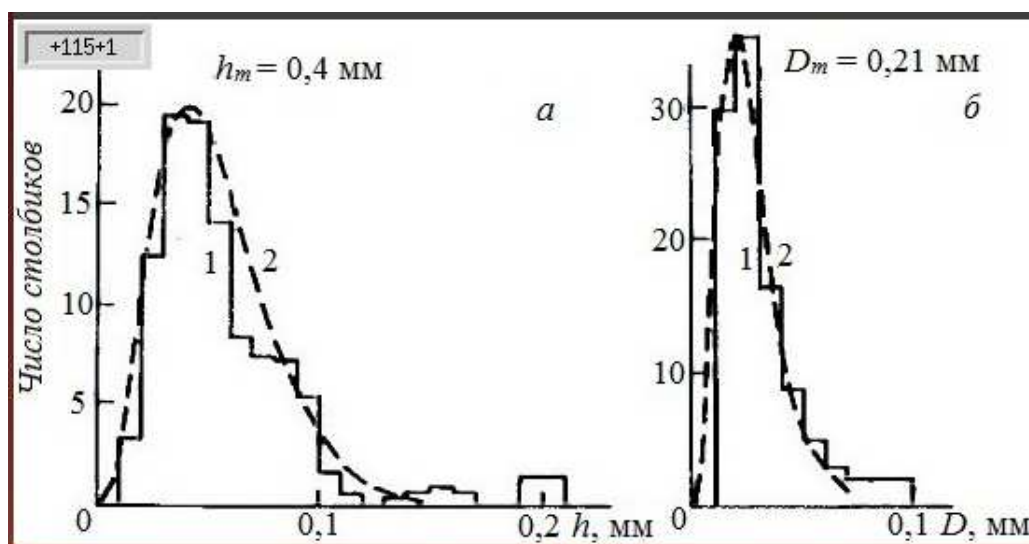


Рис. 2. Распределение кристаллов столбиков по размерам h и D (а и б, соответственно) при $\mu = 3$: 1 – эксперимент, 2 – гамма-распределение [12]

Температура	$-67 < T < -35^{\circ}\text{C}$	$-40 < T < -15^{\circ}\text{C}$
Столбики	47,9 (43,7; 48,7)	45,4 (27,66; 52,6)
Пластинки	7,9 (30,6; 3,9)	24,3 (57,85; 10,6)

Таблица 1. Процентные доли гексагональных столбиков и пластинок правильной формы в перистых облаках, нормированные на общее количество ледяных кристаллов правильных форм, по данным проекта SPARTICUS [16].

Примечание: в скобках приведены доли кристаллов в облаках, образовавшихся из наковален, и в облаках, не являющихся таковыми.

Таким образом, для получения матриц обратного рассеяния облаков верхнего яруса на основе теоретически рассчитанных использовались функции распределения облачных ледяных кристаллов по форме, размерам и параметрам пространственной ориентации, а также параметры этих функций, соответствующие реальным ОВЯ. С учётом этого, описанные МОРС можно рассматривать как теоретически рассчитанные матрицы ОВЯ. Формирование массива таких матриц, рассчитанных для различных значений параметров распределений, позволит решить обратную задачу оценки параметров микроструктуры реально наблюдаемых облаков. Сопоставление этих данных с метеорологическими на высотах образования ОВЯ позволит делать выводы об условиях формирования облаков с той или иной микроструктурой.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Грант 16-05-00710), Минобрнауки РФ в рамках Программы “Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета” (проект 8.1.12.2015) и в рамках базовой части государственного задания при финансовой поддержке Минобрнауки России (код проекта 1975).

Литература

1. Кауль Б.В., Волков С.Н., Самохвалов И.В. Результаты исследований кристаллических облаков посредством лидарных измерений матриц обратного рассеяния света // Оптика атмосферы и океана. – 2003. – Т. 16. – № 4. – С. 354–361.

2. Самохвалов И.В., Кауль Б.В., Насонов С.В. и др. Матрица обратного рассеяния света зеркально отражающих слоев облаков верхнего яруса, образованных кристаллическими частицами, преимущественно ориентированными в горизонтальной плоскости // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25. – № 5. – С. 403–411.

3. Guasta M.D., Vallar E., Riviere O., *et al.* Use of polarimetric lidar for the study of oriented ice plates in clouds // *Appl. Opt.* – 2006. – Vol. 45. – No. 20. – P. 4878–2887.
4. Hayman M., Spuler S., Morley B., *et al.* Polarization lidar operation for measuring backscatter phase matrices of oriented scatterers // *Opt. Exp.* – 2012. – Vol. 20. – Is. 28. – P. 29553–29567.
5. Volkov S.N., Samokvalov I.V., Cheong H.D., *et al.* Investigation of East Asian clouds with polarization light detection and ranging // *Appl. Opt.* – 2015. – Vol. 54. – No. 11. – P. 3095–3105.
6. Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Ориентация частиц кристаллических облаков Ci: Ч.1. Ориентация при падении // *Оптика атмосферы и океана.* – 2005. – Т. 18. – № 11. – С. 963–967.
7. Nee E.V., Bryukhanova V.V. Influence of droplet cloud water content on the polarization characteristics of the double scattering lidar signal // *Proc. of SPIE.* – 2015. – Vol. 9680. – 96804M-1–96804M-5.
8. ftp://ftp.iao.ru/pub/GWDT/Physical_optics.
9. Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N., *et al.* Backscattering Mueller matrix for quasihorizontally oriented ice plates of cirrus clouds: application to CALIPSO signals // *Optics Express.* – 2012. – Vol. 20. – No. 27. – P. 28222–28233.
10. Самохвалов И.В., Насонов С.В., Брюханов И.Д. и др. Анализ матрицы обратного рассеяния перистых облаков с аномальным обратным рассеянием // *Известия высших учебных заведений. Физика.* – 2013. – Т. 56. – № 8/3. – С. 281–283.
11. Auer A., Veal D. The dimensions of ice crystals in natural clouds // *J. Atm. Sci.* – 1970. – Vol. 27. – No. 6. – P. 919–926.
12. Волковицкий О.А., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г. Оптические свойства кристаллических облаков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 198 с
13. Зуев В.Е. Распространение лазерного излучения в атмосфере. – М.: Радио и связь, 1981. 288 с.
14. Sato K., Okamoto H. Characterization of Ze and LDR of nonspherical and inhomogeneous ice particles for 95-GHz cloud radar: Its implication to microphysical retrievals // *J. Geophys. Res.* – 2006. – Vol. 111. – D22213.
15. Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Шишко В.А. и др. Методика решения задачи рассеяния света на ледяных кристаллах перистых облаков в направлении рассеяния назад методом физической оптики для лидара с зенитным сканированием // *Оптика атмосферы и океана.* – 2016. – Т. 29. – № 1. – С. 40–50.
16. Um J., McFarquhar G.M., Hong Y.P., *et al.*, Dimensions and aspect ratios of natural ice crystals // *Atmos. Chem. Phys.* – 2015. – V. 15. – P. 3933–3956.
17. <http://acrf-campaign.arm.gov/sparticus>.