

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЛЕДЯНЫХ КРИСТАЛЛОВ ПЕРИСТОЙ ОБЛАЧНОСТИ ДЛЯ ЗАДАЧ АКТИВНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

В.А. Шишко, Д.Н. Тимофеев, Н.В. Кустова, Т.В. Русскова, А.В. Коношонкин

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия,
sva@iao.ru

OPTICAL MODELS OF ICE CRYSTALS OF CIRRUS CLOUDS FOR ACTIVE REMOTE SENSING OF THE ATMOSPHERE

V.A. Shishko, D.N. Timofeev, N.V. Kustova, T.V. Russkova, A.V. Konoshonkin

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia,
sva@iao.ru

Аннотация. Перистые облака являются объектом активных исследований в последние десятилетия. Однако их влияние на перенос солнечной радиации в атмосфере Земли и, следовательно, на климат планеты изучено недостаточно. Космические лидары, такие как CALIPSO и EarthCARE, являются основными инструментами, используемыми для изучения перистых облаков посредством активного дистанционного зондирования. Однако интерпретация лидарных данных представляет собой сложную задачу оптики атмосферы. Основным препятствием в интерпретации лидарных данных является отсутствие полного решения прямой задачи рассеяния света на кристаллических частицах льда перистых облаков.

В докладе представлено решение задачи рассеяния света для ледяных кристаллических частиц, типичных для перистых облаков, включая гексагональные пластинки и столбики, дроксталлы и частицы произвольной формы. Размеры частиц варьировались от 10 до 1000 мкм, а расчеты проводились для шести длин волн, типичных для лидаров: 0.355, 0.532, 1.064, 1.55, 2 и 2.15 мкм. Решение представлено в виде банка данных матриц Мюллера обратного рассеяния.

Ключевые слова: рассеяние света, лидар, физическая оптика, атмосферные ледяные кристаллы, перистые облака.

Abstract. Cirrus clouds have been the subject of active study in recent decades. However, their influence on solar radiation transfer in the Earth's atmosphere and, consequently, on the planet's climate, has not been sufficiently explored. Space lidars, such as the CALIPSO and EarthCARE, are the primary tools used to study cirrus clouds through active remote sensing. However, interpreting lidar data poses a challenging problem in atmospheric optics. The main obstacle in interpreting lidar data is the lack of a complete solution to the direct problem of light scattering on ice crystal particles of cirrus clouds.

This report presents a solution to the problem of light scattering for ice crystal particles commonly found in cirrus clouds, including hexagonal plates and columns, droxtals, and particles of arbitrary shape. The particle sizes ranged from 10 to 1000 μm , and the calculations were performed for six wavelengths 0.355, 0.532, 1.064, 1.55, 2 and 2.15 μm . The solution is presented as a databank of backscattering Mueller matrices.

Keywords: light scattering, lidar, physical optics, atmospheric ice crystals, cirrus clouds.

ВВЕДЕНИЕ

Атмосферные кристаллические частицы являются естественным препятствием, как для солнечного света, так и для различных видов излучения технических устройств с поверхности Земли и спутников, находящихся на околоземной орбите. Кроме того, Межправительственная группа экспертов по изменению климата ООН и Всемирная метеорологическая организация рассматривает атмосферный аэрозоль, в том числе и кристаллические частицы перистых облаков, как наибольший фактор неопределенности в оценках радиационного баланса Земли. Поэтому изучение оптических и микрофизических характеристик различных частиц в атмосфере является одной из приоритетных задач в области климатологии, прогнозирования погоды и изучения атмосферы.

Кристаллические (или перистые) облака образуются на высотах от 5 до 14 км, в зависимости от широты, при температурах приблизительно от -10 до -50°C . Они состоят из частиц льда преимущественно в виде гексагональных призм размерами от 10 до 1000 мкм. Эти облака тоньше по сравнению с облаками нижних слоев атмосферы, однако, они составляют примерно одну треть всех облаков,

покрывающих земную поверхность, а их протяженность может достигать тысячи километров. Состояние атмосферы сильно зависит от солнечного излучения, проходящего через частицы этих облаков. В зависимости от формы и отражающих свойств, они могут, как отражать падающий на них солнечный свет, не давая нагреваться нижним слоям атмосферы, так и возвращать излучение, переотраженное с поверхности Земли, усиливая парниковый эффект.

Наблюдение за состоянием атмосферы и подстилающей поверхности Земли с помощью приборов активного дистанционного зондирования (таких как лидары и радары), установленных на космических аппаратах, позволяют оперативно и в глобальном масштабе проводить исследования климатообразующих факторов и их взаимосвязи внутри климатической системы в целом [Sassen и др., 2008].

В настоящее время исследование атмосферы поляризационными лидарами космического базирования имеет уже долгую историю. Несмотря на то, что первый космический лидарный эксперимент был проведен NASA на Space Shuttle «Discovery» (программа Lidar In Space Technology Experiment (LITE)) в сентябре 1994 г. [Winker и др., 1996], первый полноценный космический лидар «БАЛКАН»

был запущен Россией и установлен на орбитальной станции «МИР» в мае 1995 г. [Балин и др., 2011]. Он проработал 4 года и позволил набрать большой опыт и получить уникальные данные, которые хорошо были восприняты научным сообществом. Благодаря этим данным в 2006 г. был запущен хорошо известный лидар CALIOP, установленный на спутнике CALIPSO, который функционирует по настоящее время и является основным инструментом сбора информации о состоянии атмосферы Земли [Winker и др., 2002].

Своевременное создание оптической модели перистых облаков позволит вовремя сформулировать необходимые предложения по техническим характеристикам космического лидара и внести соответствующие изменения в конструкцию лидара для его максимально эффективного использования.

МЕТОДЫ

Однако для разработки оптической модели необходимо построение базы данных матриц обратного рассеяния света, созданной как с учетом технических характеристик конкретного космического лидара (угла поля зрения, используемых длин волн, каналов поляризации и т.д.), так и с учетом многообразия микрофизических характеристик перистых облаков — размеров и форм кристаллов, их пространственной ориентации и концентрации, показателя преломления и т.д. Разработка такого банка данных ведется в ИОА СО РАН уже на протяжении многих лет [Shishko и др., 2019]. Банк данных представляет собой матрицы обратного рассеяния света для длин волн 0.355, 0.532, 1.064, 1.55, 2, 2.15 мкм и показателей преломления льда 1.3249; 1.3116; 1.3004 – 1.90*10⁻⁶i; 1.2893 – 4.24*10⁻⁴i; 1.2744 – 1.64*10⁻³i; 1.2663 – 4.92*10⁻⁴i, соответственно. Решение получено для различных форм хаотически ориентированных ледяных частиц: гексагональная пластинка, дроксталл, гексагональный столбик, bullet (гексагональная пуля), произвольная форма. Размер частиц варьировался в диапазоне от 5 до 1000 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве примера, на основе банка данных, были построены измеряемые лидаром оптические характеристики для типичных длин волн (0.355; 0.532; 1.064 мкм), а именно: спектральное, деполаризационное и лидарное отношения.

На рис. 1 представлена диаграмма рассеяния для спектрального (длины волн 1.064/0.532) и деполаризационного отношений (0.532 мкм) для различных форм ледяных частиц. Из рис. 1 видно, что такой подход позволяет отличать частицы гексагональной формы от частиц произвольной формы и дроксталлов.

На рис. 2 представлена диаграмма рассеяния для лидарного и деполаризационного отношений

(длина волны 0.355 мкм). Рис. 2 также демонстрирует возможность восстанавливать форму частиц.

На рис. 3 представлена зависимость спектрального отношения от максимального размера частицы D_{max} для длин волн: без поглощения (1.064/0.532) и с поглощением (2.15/1.064 и 1.55/1.064). Видно, что длины волн с поглощением демонстрируют более сильную зависимость от размера частицы, что позволяет их использовать для восстановления размера частиц.

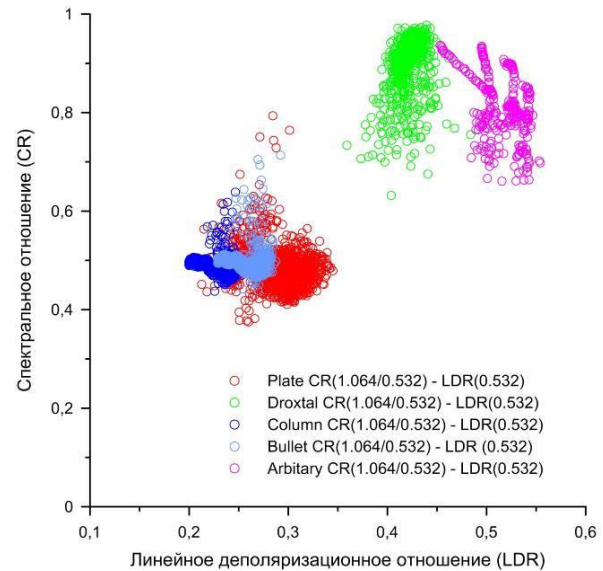


Рис. 1. Диаграмма рассеяния для спектрального и деполаризационного отношений. Символами отмечены различные формы ледяных частиц: гексагональная пластинка, дроксталл, гексагональный столбик, bullet (гексагональная пуля), произвольная форма

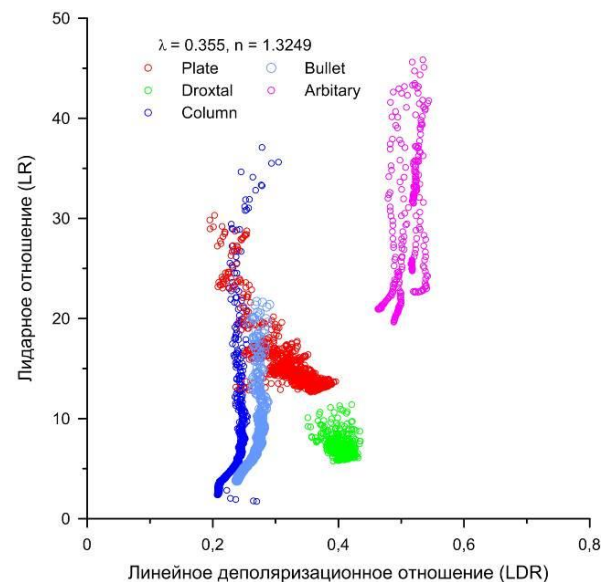


Рис. 2. Диаграмма рассеяния для лидарного и деполаризационного отношений. Символами отмечены различные формы ледяных частиц: гексагональная пластинка, дроксталл, гексагональный столбик, bullet (гексагональная пуля), произвольная форма.

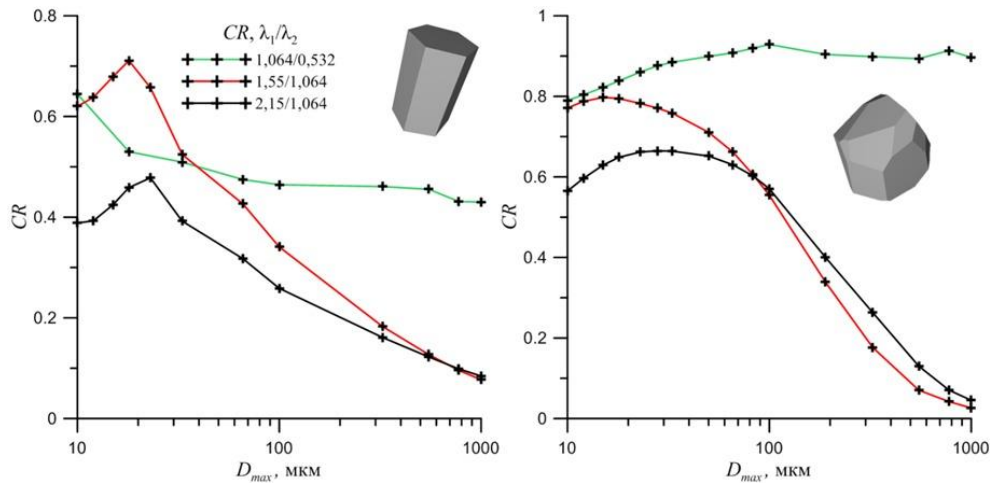


Рис. 3. Зависимость спектрального отношения от максимального размера частицы D_{max} в направлении обратного рассеяния для гексагонального столбика (слева) и частицы произвольной формы (справа)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что для эффективного исследования перистых облаков методом лазерного поляризационного зондирования необходимо иметь минимум две длины волн (например, 0.532 и 1.064 мкм), возможность построения спектрального отношения для этой пары длин волн, а также возможность измерять лидарное и деполаризационное отношения на любой из длин волн. Показана перспективность использования длины волны с сильным поглощением льда (например, 1.55 или 2.15 мкм), для восстановления среднего размера частиц в облаке.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Балин Ю.С., Тихомиров А.А. История создания и работы в составе орбитальной станции «Мир» первого российского космического лидара БАЛКАН // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24, № 12. С. 1078–1087.
- Sassen K., Wang Z., Liu D. Global distribution of cirrus clouds from CloudSat/Cloud-Aerosol lidar and infrared Pathfinder satellite observations (CALIPSO) measurements // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. (D00A12).
- Shishko V., Konoshonkin A., Kustova N. et al. Coherent and incoherent backscattering by a single large particle of irregular shape // Opt. Express. 2019. V. 27. P. 32984–32993.
- Winker D.M., Couch R.H., McCormick M.P. An overview of LITE: NASA's Lidar-in-space Technology Experiment // Proc. IEEE. 1996. V. 84. P. 164–180.
- Winker D.M., Pelon J., McCormick M.P. The CALIPSO mission: Spaceborne lidar for observation of aerosols and clouds // Proc. SPIE. 2002. V. 4893.