

# Обнаружение кристаллических частиц в атмосфере методом лазерного поляризационного зондирования

САМОХВАЛОВ И.В.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия

sam@elefot.tsu.ru

Формирование кристаллических частиц перистых облаков происходит в процессе охлаждения восходящих потоков теплого воздуха. На форму образующихся ледяных кристаллов оказывают существенное влияние ряд важных параметров, таких как: влажность, температура, наличие аэрозольной составляющей играющей роль инициации центров формирования кристаллов, скорость восходящих потоков, влияющая на динамику роста кристаллов, распределение по размерам жидкой фазы в облаке. Энергия турбулентного и ламинарного движения облачных масс также участвует в процессе формообразования кристаллических частиц облаков. В результате этих взаимодействий в кристаллических облаках часто наблюдаются оптические эффекты типа гало, на возникновение которых влияют как форма, так и ориентированность кристаллических частиц в облаке.

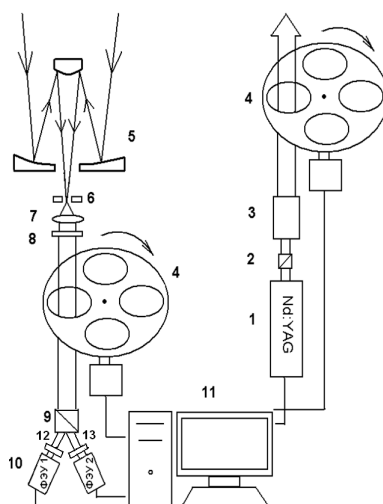


Рис. 1. Блок-схема поляризационного лидара ТГУ: 1 – Nd:YAG лазер,  $\lambda=532$  нм, энергия импульса до 400 мДж, частота следования импульсов 10 Гц; 2 – призма Глана; 3 – коллиматор; 4 – узел трансформации состояния поляризации; 5 – зеркальный объектив Кассегрена; 6 – диафрагма; 7 – линза; 8 – интерференционный фильтр; 9 – призма Волластона; 10 – фотоэлектронные умножители; 11 – аппаратура регистрации и отображения данных на основе компьютера; 12, 13 – электрооптические затворы.

Источником неточности в расчетах радиационного баланса является оптическая анизотропия кристаллических облаков, вызванная такой особенностью их микрофизики, как пространственная ориентация частиц. Подобная ориентация вызвана в первую очередь воздействием на несферические частицы облаков аэродинамических сил, возникающих при их падении в свободной атмосфере [1]. В настоящее время в большинстве работ посвященных решению задач светорассеяния кристаллическими частицами облаков, авторы ограничиваются предположением об их хаотической ориентации. Дело в том, что непосредственное экспериментальное определение ориентации кристаллов в облаках было затруднено отсутствием доступных инструментальных методов

Метод лазерного поляризационного зондирования [2] является эффективным инструментом для определения ориентации частиц в облаках. Лидарные измерения матриц обратного рассеяния света (МОРС) позволяют оценить состояние ориентации ансамбля облачных частиц через соотношение элементов матриц, рассчитываемых из экспериментальных данных. Метод реализован на уникальном поляризационном лидаре Национального исследовательского Томского государственного университета, где в настоящее время ведутся работы по изучению оптических характеристик облаков верхнего яруса (ОВЯ). На рисунке 1 приведена блок-схема этого лидара.

Лидар построен по моностатической схеме с разнесенными оптическими осями приемной и передающей антенн. Зондирование осуществляется в зенит. В качестве источника зондирующего излучения используется Nd:YAG лазер с рабочей длиной волны 532 нм, частотой следования импульсов 10 Гц и энергией в импульсе до 400 мДж. Приемной антенной служит зеркальный объектив Кассегрена с диаметром главного зеркала 0,5 м и фокусным расстоянием 5 м. На пути рассеянного излучения расположена диафрагма, определяющая поле зрения, линза и интерференционный фильтр. Далее призма Волластона формирует два пучка с взаимно ортогональными поляризациями. В качестве фотодетекторов используются два ФЭУ фирмы Hamamatsu, система регистрации – счетчик одноэлектронных импульсов. Перед ФЭУ установлены электрооптические затворы, с помощью которых производится подавление помехи обратного рассеяния из ближней зоны лидара. Система сбора, обработки и отображения информации расположена на компьютере. Управление лидаром осуществляется в полуавтоматическом режиме оператором.

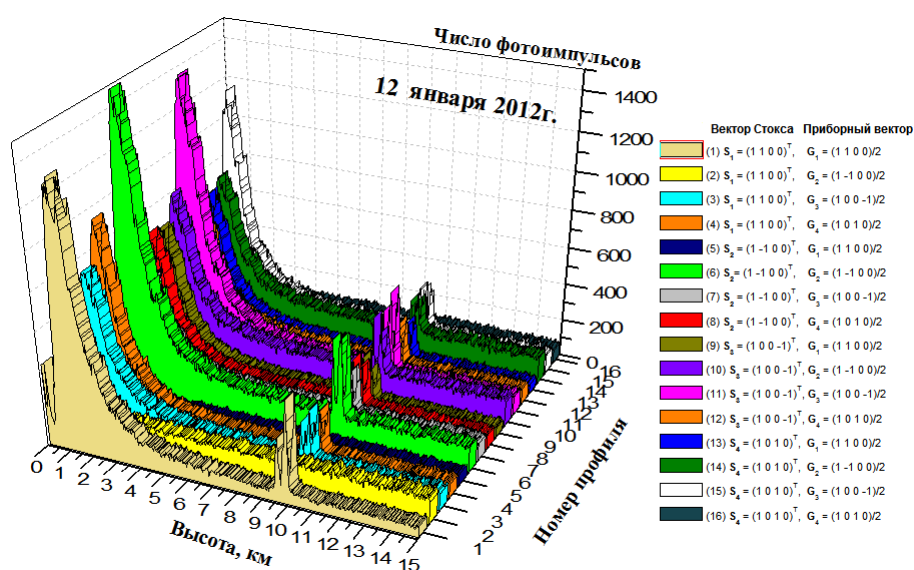


Рис. 2. Вертикальные профили интенсивности обратного рассеянного излучения, зарегистрированные 12 января 2012 г.; местное время 12:37–12:44.

Отличительной особенностью поляризационного лидара ТГУ является наличие в нем идентичных узлов трансформации состояния поляризации рассеянного и лазерного излучения, что делает возможным измерение МОРС. Для автоматизации измерения в каналах передатчика и приемника на роторы шаговых двигателей насажены диски 4 с четырьмя отверстиями, в которые закрепляются соответствующие оптические элементы. Это позволяет формировать на выходе передающего канала излучение с четырьмя поляризациями: три линейных, характеризующихся нормированными векторами Стокса  $S_1=(1 \ 1 \ 0 \ 0)^T$ ,  $S_2=(1 \ -1 \ 0 \ 0)^T$ ,  $S_3=(1 \ 0 \ -1 \ 0)^T$  и одну циркулярную –  $S_4=(1 \ 0 \ 0 \ 1)^T$ . В приёмный канал в определённой последовательности вводятся элементы, которые можно описать четырьмя

приборными векторами (матрица–строка), подобными вектору–параметру Стокса

$$\vec{G}_1 = \frac{1}{2} (1 \ 1 \ 0 \ 0)^T, \quad \vec{G}_2 = \frac{1}{2} (1 \ -1 \ 0 \ 0)^T,$$

$$\vec{G}_3 = \frac{1}{2} (1 \ 0 \ -1 \ 0)^T, \quad \vec{G}_4 = \frac{1}{2} (1 \ 0 \ 0 \ -1)^T.$$

Под приборным вектором подразумевается первая строка матрицы, являющаяся произведением матриц Мюллера оптического элемента для вращения фазы (фазовой пластинки) и призмы Волластона. Процедура измерений МОРС заключается в следующем: при определенном состоянии поляризации лазерного излучения, например  $\mathbf{S}_1 = (1 \ 1 \ 0 \ 0)^T$ , происходит полный оборот диска поляризационной приставки приемного канала и реализуются все четыре пары приборных векторов. Затем поворотом диска поляризационной приставки лазера устанавливается следующая поляризация лазерного излучения и снова производится полный оборот диска приставки приемника. После реализации всех четырех состояний поляризации лазерного излучения весь цикл повторяется. Таким образом получается система из 16 уравнений, решением которой является МОРС размерностью  $4 \times 4$  элемента.

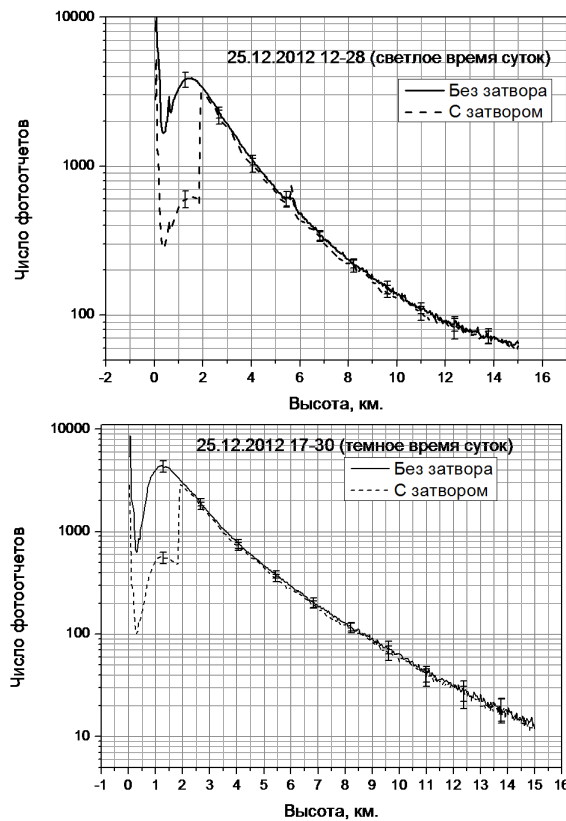


Рис. 3. Высотные профили интенсивности обратно рассеянного излучения, полученные 25 декабря 2012 г. при зондировании атмосферы: а) с не работающим и б) работающим затвором.

На рисунке 2 приведен пример высотных профилей интенсивности обратного рассеяния излучения полученных 12.01.2012 г. (с 12:37 до 12:44 по местному времени). Продолжительность серии составляет  $\sim 14$  мин, что соответствует накоплению по 500 импульсам лазера. По оси  $x$  обозначена высота в километрах, по оси  $y$  – суммарное количество одно-электронных импульсов, приходящих с соответствующей высоты и накопленных системой регистрации. Справа приведено пояснение к каждому профилю:  $S_i$  – состояние поляризации зондирующего излучения, характеризующееся нормированным вектором Стокса,  $G_j$

– приборный вектор приёмной системы лидара, характеризующий совокупное действие поляризационных приборов в приёмном канале. На высотах 9–10 км наблюдается всплеск интенсивности сигнала, обусловленный наличием двух облачных слоёв.

Ниже представлена МОРС, рассчитанная для зарегистрированного 12.01.2012 г. слоя

$$M_{\pi}(9.9\text{км}) = \begin{pmatrix} 1 & 0,02 & 0,02 & -0,03 \\ 0,02 & 0,96 & -0,05 & -0,04 \\ -0,02 & 0,11 & -0,92 & 0,03 \\ -0,03 & 0,05 & 0,13 & -0,96 \end{pmatrix}.$$

Матрица имеет диагональный вид, с элементами главной диагонали по модулю близкими к значению 1, а недиагональные элементы в пределах погрешности измерений близки к 0. Степень поляризации в слое была 0,99. Параметром, характеризующим полярную ориентацию, является элемент  $m_{44}$  нормированной МОРС независимо от наличия или отсутствия азимутальной ориентации [2]. Общая тенденция состоит в том, что по мере группирования больших диаметров частиц возле плоскости перпендикулярной направлению зондирования  $m_{44}$  принимает все большие отрицательные значения, стремясь к асимптотическому значению  $-1$ .

Для определения усреднённого профиля интенсивности обратно рассеянного излучения необходимо посылать в атмосферу десятки зондирующих импульсов каждой из четырёх поляризаций. Из общих соображений ясно, что для уменьшения времени проведения одного цикла измерений, при заданных параметрах приёмной оптической системы лидара, надо увеличить энергию импульса и частоту посылок зондирующих импульсов излучения. Однако реализовать на практике энергетический потенциал лидара не всегда удаётся, поскольку помеха обратного рассеяния из ближней зоны ослепляет ФЭУ и погрешность оценки величины лидарного сигнала существенно увеличивается. Поэтому в наших экспериментах по диагностике облаков верхнего яруса для обеспечения линейности режима работы высокочувствительных ФЭУ (счёт фотонов), при высокой энергии зондирующих импульсов, используется электрооптический затвор (ЭОЗ), принцип работы которого основан на эффекте Поккельса. Применение электрооптического затвора позволяет эффективно подавить помеху от ближней зоны и увеличить энергию излучения лидара. На рисунке 3 изображены высотные профили интенсивности обратно рассеянного излучения, полученные при зондировании атмосферы с неработающим ( $U_{\text{затвора}}=0$ ) и работающим ( $U_{\text{затвора}}=3,9$  кВ) затвором, в светлое и темное время суток. Зондирование с отключенным и работающим затвором проводилось при одинаковом накоплении по 500 импульсов лазера и энергии излучения 294 мДж днем и 124 мДж ночью. Во время зондирования на высотах до 100 м наблюдалось выпадение кристалликов льда, вызывающих мощную помеху обратного рассеяния. Применение ЭОЗ позволило снизить сигнал обратного рассеяния от этого слоя в 4,8 раза при дневном зондировании и 6,8 раз при ночном зондировании.

Как видно из рисунка, использование электрооптического затвора позволяет подавить сигнал от ближней зоны лидара примерно в 12 раз. Это позволяет увеличить мощность излучения лазера и за счет этого появляется возможность проводить зондирование верхних слоев атмосферы даже в дневное время суток, при высоком уровне пассивных помех.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (ГК №14.518.11.7053 и №14.515.11.0032, соглашение № 14.В37.21.0612) и РФФИ (грант №11-05-01200а).

## Литература

1. Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Ориентация частиц кристаллических облаков Si: Ч.1. Ориентация при падении // Оптика атмосферы и океана. – 2005. Т.18. – №11. С.963–967.

2. *Kaul B.V., Samokhvalov I.V., Volkov S.N.* Investigating of particle orientation in cirrus clouds by measuring backscattering phase matrices with lidar // *Appl. Opt.* – 2004. – V.43. – №36. P.6620–6628.
3. *Самохвалов И.В., Стыжон А.П., Кауль Б.В., Шелефонтьюк Д.И.* Автоматизация измерений матриц обратного рассеяния облаков верхнего яруса на высотном лидаре ТГУ // XVI Международный симпозиум “Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы”. Томск, 2009. С. 394–396.
4. *Самохвалов И.В., Кауль Б.В., Насонов С.В., Животенюк И.В., Брюханов И.Д.* Матрица обратного рассеяния света зеркально отражающих слоёв облаков верхнего яруса, образованных преимущественно ориентированными кристаллическими частицами в горизонтальной плоскости. // *Оптика атмосферы и океана.* 2011. – Т.25. – №5. – С. 403–411.

## **Detection of crystalline particles in the atmosphere by the method of polarization laser sensing**

*Samokhvalov I.V.*

*National Research Tomsk State University, Russia*

The method of laser polarization sensing of the atmosphere is described. It is based on the experimental determination of altitude profiles of backscattering phase matrix (BSPM).

The methodology of measurements and characteristics of the unique polarisation lidar of Tomsk State University are summarized. As an illustration of the possibilities of polarization lidar for monitoring of aerosol anisotropic media, the results of BSPM experimental studies of cirrus with "mirror" reflection of light are presented.

To assess the conditions for cloud formation with anomalous backscattering in the atmosphere, data on meteorological parameters of the atmosphere at the corresponding altitudes near the observation site are presented.

This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under the Target Federal Program "Research and Developments of High-Priority Directions of Scientific-Technical Complex of Russia for 2007-2013" (State Contracts N14.518.11.7053 and N14.515.11.0032) and the Russian Foundation for Basic Research (N11-05-01200a).