

Влияние микроструктуры облака на состояние поляризации лидарного сигнала

БРЮХАНОВА В.В.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия
leo@elefot.tsu.ru

Актуальность регулярных наблюдений за аэрозольными полями объясняется большой ролью аэрозоля в облако- и осадкообразовании, радиационном теплообмене, переносе излучения и т.д. Высокая чувствительность лидаров (от англ. light identification, detection and ranging) [1] при обнаружении малых аэрозольных примесей в атмосфере, дистанционность и большая оперативность получения данных делают реальной перспективу их использования для исследования динамики развития и распространения облачных образований и трансформации микрофизических характеристик аэрозоля во времени. Суть методов лазерного зондирования атмосферы заключается в посылке излучателем короткого импульса электромагнитных волн в узком спектральном интервале с центром на длине волны λ , регистрации приемной системой излучения, рассеянного средой, по мере удаления импульса в глубину исследуемой среды и последующем анализе, основанном на сравнении характеристик посылаемого и принимаемого излучения. Сегодняшние лидары создаются на основе различных явлений, сопровождающих распространение электромагнитного излучения в исследуемых средах; данная работа посвящена упругому рассеянию на аэрозольных частицах.

Несмотря на полувековую историю лидаров, до сих пор не решены многие технические и методические вопросы лазерного зондирования. К числу направлений, все еще нуждающихся в существенной проработке, относится и лазерное зондирование оптически плотных аэрозольных образований, таких как облака, туманы, плотные дымки и т.п. Это объясняется тем, что лидарный сигнал от таких образований обусловлен не только однократным, но и многократным рассеянием, т.е. фотоны, прежде чем попасть в приемную систему лидара испытывают не один акт рассеяния (как в слабых дымках или тонких облаках), а несколько (рисунок 1). Как следует из [2], во многих практически значимых случаях можно ограничиться моделью лидарного сигнала в приближении двукратного рассеяния.

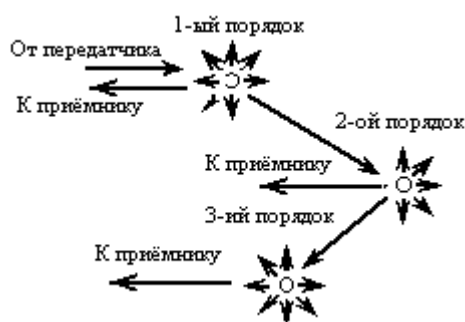


Рис. 1. К объяснению многократного рассеяния

Информация об объекте заключается не только в энергетических, но и в поляризационных характеристиках лидарного сигнала. Первые работы по лазерному поляризационному зондированию появились в начале 70-х годов прошлого века. Однако, в большинстве работ до сих пор измеряются только два первых компонента вектора Стокса при одном состоянии поляризации лазерного излучения. Этой информации достаточно для определения характеристик ансамблей изометричных хаотически ориентированных частиц, но в атмосфере часто встречаются облака, содержащие кристаллы льда (например, облака верхнего

яруса) и являющиеся оптически анизотропными. Ослабление и изменение состояния поляризации излучения, рассеянного такими облаками, зависят от состояния поляризации падающего на среду излучения и направления распространения излучения относительно ориентации кристаллов.

Таблица 1. Концентрация частиц, параметры аппроксимации функции распределения частиц по размерам и коэффициент рассеяния облака

Вид облака	r_{mod} , мкм	μ	N , см $^{-3}$	$\sigma(\lambda=0.532 \text{ мкм})$, км $^{-1}$
Мелкокапельное	1	2	971	20.23
Среднекапельное	6	2	28	19.32
	6	10	65	20.31
Крупнокапельное	10	2	10	18.97
	10	10	23	19.68

Вектор Стокса лидарного сигнала в приближении двукратного рассеяния в силу определяется суммой векторов Стокса лидарного сигнала однократного $\vec{S}^{(1)}$ и двукратного рассеяния $\vec{S}^{(2)}$

$$\vec{S}(r) = \vec{S}^{(1)}(r) + \vec{S}^{(2)}(r),$$

в силу свойства их аддитивности. Здесь

$$\vec{S}^{(1)}(r) = \frac{P_0 A c \tau_n}{2r^2} \hat{M}_\pi(r) \vec{S}_0 e^{-2\tau(r)} = P^{(1)}(r) \vec{S}_0, \quad \vec{S}^{(2)}(r) = P^{(1)}(r) \frac{r^2 (\vec{G}_1 + \vec{G}_2)}{2\chi_\pi \sigma(r)},$$

где \vec{S}_0 – безразмерный нормированный вектор Стокса посылаемого излучения; $M_\pi(r)$ – матрица обратного рассеяния света (МОРС), \vec{G}_1 и \vec{G}_2 – интегральные векторные параметры

$$\begin{aligned} \vec{G}_1 &= \int_0^{\frac{\theta_0}{2}} \int_H^r \frac{\sigma(z)\sigma(z_1)\sin\gamma}{R(r,z,\gamma)} \left(\int_0^{2\pi} \hat{K}(\varphi) \hat{f}(z_1, \pi - \gamma) \hat{f}(z, \gamma) \hat{K}(\varphi) \vec{S}_0 d\varphi + \right. \\ &\quad \left. + \int_0^{2\pi} \hat{K}(\varphi) \hat{f}(z_1, \pi - \gamma) \hat{f}(z, \gamma) \hat{K}(\varphi) \vec{S}_0 d\varphi \right) dz d\gamma, \\ \vec{G}_2 &= \int_{\frac{\theta_0}{2}}^\pi \int_{z'(\gamma)}^r \frac{\sigma(z)\sigma(z_1)\sin\gamma}{R(r,z,\gamma)} \left(\int_0^{2\pi} \hat{K}(\varphi) \hat{f}(z_1, \pi - \gamma) \hat{f}(z, \gamma) \hat{K}(\varphi) \vec{S}_0 d\varphi + \right. \\ &\quad \left. + \int_0^{2\pi} \hat{K}(\varphi) \hat{f}(z_1, \pi - \gamma) \hat{f}(z, \gamma) \hat{K}(\varphi) \vec{S}_0 d\varphi \right) dz d\gamma, \end{aligned}$$

$\hat{K}(\varphi)$ – оператор поворота плоскости референции на угол φ относительно базиса

$$\hat{K}(\varphi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\varphi & \sin 2\varphi & 0 \\ 0 & -\sin 2\varphi & \cos 2\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

\hat{f} – нормированная к единице матрица рассеяния света (МРС) облака;

$$R(z, \gamma, r) = r^2 - (2r - z)z \sin \frac{\gamma}{2}, \quad z_1 = z + \frac{r(r - z) \cos \frac{\gamma}{2}}{r - z \sin^2 \frac{\gamma}{2}}, \quad z'(\gamma) = r \left(1 - tg \frac{\theta_0}{4} ctg \frac{\gamma}{2} \right).$$

К облакам верхнего яруса относятся перистые облака, достаточно часто встречающиеся в атмосфере, особенно в умеренных и высоких широтах. Обычно эти облака являются частью крупномасштабной облачной системы теплого или холодного фронта, поэтому горизонтальная протяженность полей перистых облаков часто составляет сотни и даже тысячи километров. Толщина, или мощность, перистых облаков может достигать нескольких километров. Кристаллические облака отличаются большим разнообразием форм частиц; наиболее характерной формой кристаллов перистых облаков являются столбики, реже – пластинки. Характерными размерами пластинчатых кристаллов являются диаметр и толщина, а столбчатых или игольчатых – диаметр и длина. Обычно толщина пластин и диаметр столбиков составляют десятки микрометров, а диаметр пластин и длина столбиков – от десятков до тысяч микрометров.

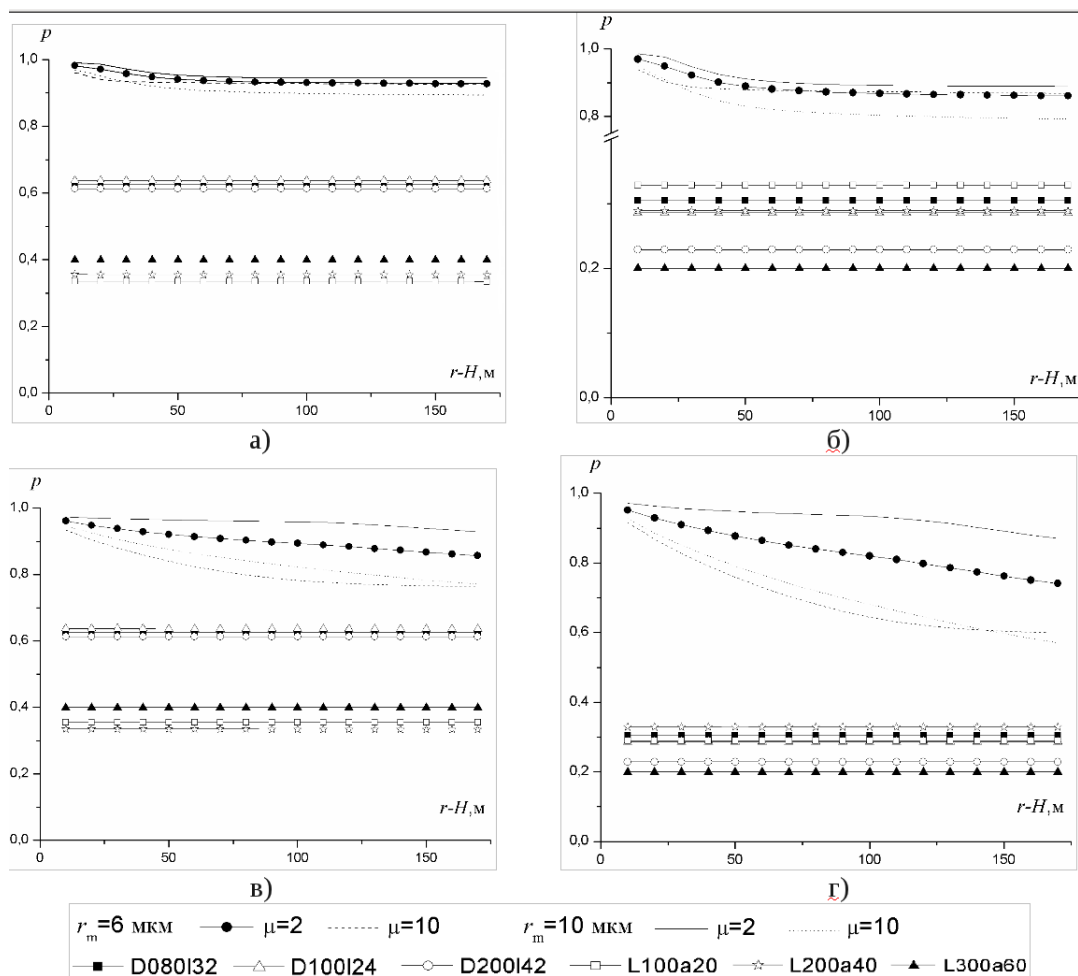


Рис. 2. Зависимость степени поляризации лидарного сигнала в приближении двукратного рассеяния от глубины зондирования.

Для анализа влияния микроструктуры облака на степень поляризации лидарного сигнала в приближении двукратного рассеяния были использованы матрицы рассеяния света монодисперсных хаотически ориентированных столбиков и пластинок Д.Н. Ромашова [3] и полидисперсных капельных облаков [4], параметры микроструктуры которых приведены в таблице 1. Характеристики светорассеяния капельных облаков были рассчитаны с помощью программы [5]; длина волны для капельных облаков принималась равной 0.532 мкм (вторая гармоника лазера LS-2137U фирмы LOTIS TII).

На рисунке 2 приведены результаты расчета степени поляризации лидарного сигнала в приближении двукратного рассеяния от капельных и кристаллических облаков с нижней границей облака 1 км (рисунок 2, а, б) и 6 км (рисунок 2, в, г) при зондировании

линейно (рисунок 2, а, в) и циркулярно (рисунок 2, б, г) поляризованным излучением. Коэффициент рассеяния кристаллических облаков принимался равным 1 км^{-1} , угол поля зрения приемной системы лидара - 1 мрад.

Как следует из результатов расчета, степень поляризации лидарного сигнала, обусловленного одно- и двукратным рассеянием, определяется фазовым составом, формой и размерами аэрозольных частиц, а также состоянием поляризации зондирующего импульса.

Степень поляризации лидарного сигнала в приближении двукратного рассеяния от облака, состоящего из монодисперсных хаотически ориентированных гексагональных кристаллов, практически не меняется с глубиной зондирования и изменением дальности облака. При зондировании пластинок изменение зондирующего излучения с линейно на циркулярно поляризованное степень поляризации меняется в 2-3 раза и составляет в первом случае 61-63% и 23-31% во втором; а при зондировании гексагональных столбиков - 34-40% и 20-32%, соответственно. И чем крупнее кристаллы, тем сильнее выражено это различие.

При зондировании полидисперсных капельных облаков на величину степени поляризации лидарного сигнала в приближении двукратного рассеяния влияют еще и глубина зондирования и дальность облака: чем они больше, тем сильнее деполяризован лидарный сигнал.

Отмеченные особенности позволяют сделать вывод о возможности определения фазового состава облака (капли или кристаллы) и ориентации кристаллических частиц (столбики или пластинки) по характеру изменении степени поляризации лидарного сигнала, обусловленного одно- и двукратным рассеянием, при изменении состояния поляризации лазерного излучения и глубины проникновения зондирующего импульса в облако.

Работа выполнена при финансовой 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. *Межерис Р.* Лазерное дистанционное зондирование. - М.: Мир, 1987. с. 552
2. *Зуев В.Е., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. и др.* Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. - Н.: Наука, 1986. с. 188
3. *Ромашов Д.Н.* Матрица обратного рассеяния для монодисперсных ансамблей гексагональных ледяных кристаллов // Оптика атмосферы и океана. - 1999. - Т. 12. - № 5. - С. 392-400.
4. *Зуев В.Е.* Прозрачность атмосферы для видимых и инфракрасных лучей. - М.: Сов. радио, 1966. с. 318
5. Program PolyMie to calculate optical properties (phase function or matrix, extinction and absorption coefficients) of water droplet clouds.
http://osmf.sccc.ru/~smp/INTAS_01-0239/main.html (дата обращения 17.05.2012).

Cloud microstructure effect on the polarization state of lidar signal

Bryukhanova V.V.

National Research Tomsk State University, Russia

Propagation of optical radiation in the atmosphere depends on the phase structure, and, in the presence of crystalline particles, even on their orientation in space, which is largely determined by crystal sizes. Propagation of laser radiation in clouds is accompanied by multiple scattering of light, which leads to a significant change of intensity value and of the polarization state of the detected radiation. According to Mie theory, the polarization state of the reflected beam is not changed compared to the original radiation if the particles are spherical and homogeneous. Therefore, if a crosspolarized component appears in the lidar reflected signal when aerosol is being sensed by linearly polarized radiation, than it is caused either by nonspherical and anisotropic particles or by multiple scattering.

Multiple scattering in lidar signal is not an easy task and today it is, in general, unsolved. The results of studies of the lidar power structure by Monte Carlo method has shown, that the double scattering approximation is enough for laser sensing of cirrus. In this case the Stokes parameter of lidar signal is equal to the sum of Stokes parameters determined by single and double scattering.

The report presents the results of the calculation of the polarization ratio of lidar signal due to the double scattering of clouds with different microstructures. The effect of particle microstructure on the polarization characteristics of lidar signal is discusses.

The work was supported by the RFBR (N11-05-01200a) and the Ministry of Education and Science of Russian Federation (government contract N14.518.11.7053 and N14.515.11.0032).