

О возможности определения водности капельных облаков по поляризационным характеристикам лидарного сигнала двукратного рассеяния

Ни Е. В., Брюханова В. В., Дорошкевич А. А.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск,
Россия

e-mail: wolf.ni@yandex.ru, leo@mail.tsu.ru, antdoro@mail.ru

Большой вклад в радиационный баланс Земли вносят облака. Оптические же свойства облаков определяются их микроструктурой (фазовым составом, формой и размерами частиц). Поэтому задача получения оперативных данных о параметрах микроструктуры облачных образований является важной для прогнозирования изменения погоды и климата на Земле. В настоящее время для определения микроструктуры дисперсных сред широко используются методы лазерного зондирования. Преимущества этих методов заключаются в малой длительности проведения эксперимента, высоком пространственном разрешении и проведении экспериментов без внесения изменений в исследуемый объект. Чаще всего интерпретация лидарных данных осуществляется в приближении однократного рассеяния, а вкладом многократного рассеяния пренебрегают в силу сложности его описания. Такой подход оправдан при зондировании образований малой оптической плотности [1]. Распространение света в облаках, туманах, плотных дымаках сопровождается явлением многократного рассеяния, т.е. излучение рассеивается не один раз прежде, чем попасть на приемник лидара, что приводит к необходимости учитывать в лидарном сигнале потоки энергии всех кратностей рассеяния, поступающие на вход приемной системы лидара [2]:

$$P(r) = P^{(1)}(r) + P^{(2)}(r) + \dots + P^{(i)}(r).$$

Интенсивность сигнала многократного рассеяния распределена по всей площади фотодетектора установленного в фокальной плоскости приемного телескопа, в то время как интенсивность сигнала однократного рассеяния сосредоточена в околоосевой области определяемой диаграммой направленности передатчика. Следовательно, в центральной области приемной системы лидара будет формироваться сигнал однократного рассеяния, а в периферийной – многократного рассеяния. Это позволяет выделить компоненту многократного рассеяния, используя лидар с изменяемым углом поля зрения [3, 4]. Использование ПЗС-камеры в качестве фотодетектора эквивалентно одновременным измерениям интенсивности рассеянного излучения, поступающего в приемную систему лидара с несколькими каналами, отличающимися полем зрения [4, 5].

Во многих практически значимых случаях лидарный сигнал с достаточной точностью можно описать в приближении двукратного рассеяния. Каулем Б.В. и Самохваловым И.В. было получено уравнение лазерного зондирования в приближении двукратного рассеяния [6].

Согласно [7] при обратном рассеянии излучения сферическими однородными частицами состояние поляризации отраженного пучка не изменяется по сравнению с падающим на частицы излучением. Поэтому, если при зондировании аэрозоля линейно поляризованным излучением в отраженном сигнале появляется кроссполяризованный компонент, то он обусловлен либо несферичностью и анизотропией частиц, либо многократным рассеянием.

Состояние поляризации произвольного светового пучка принято описывать четырьмя параметрами вектора Стокса. Тогда в силу свойства аддитивности потоков одно- и двукратного рассеяния вектор Стокса лидарного сигнала от удаленного однородного облака

представляется следующим образом [8]:

$$\vec{S}(r) = \vec{S}^{(1)}(r) + \vec{S}^{(2)}(r) = \frac{P^{(1)}(r)}{\chi(\pi)} \left[\hat{M}(\pi) \vec{S}_0 + 2\sigma_0 r (\vec{I}_1 + \vec{I}_2) \right],$$

$$\vec{I}_1 = \sigma_0 (r - H) \int_0^{\gamma_1} \int_0^{2\pi} \vec{G}(\phi, \gamma, \pi - \gamma) \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} d\phi d\gamma, \quad \vec{I}_2 = \int_{\gamma_1}^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \vec{G}(\phi, \pi - \gamma, \gamma) d\phi d\gamma$$

$$\vec{G}(\phi, \gamma, \pi - \gamma) = \hat{R}(\phi) \hat{M}(\pi - \gamma) \hat{M}(\gamma) \hat{R}(\phi) \vec{S}^0, \quad \gamma_1 = 2 \operatorname{arctg} \left(\frac{r}{r - H} \operatorname{tg} \frac{\theta_0}{2} \right)$$

где $S^{(1)}(r)$ – вектор Стокса однократного рассеяния; $S^{(2)}(r)$ – вектор Стокса двукратного рассеяния; $P^{(1)}(r)$ – мощность принимаемого сигнала однократного рассеяния; $\chi(\pi)$ – индикатриса рассеяния в направлении π ; S_0 – вектор Стокса зондирующего излучения; σ_0 – коэффициент рассеяния; $r - H$ – глубина проникновения импульса в облако; H – высота нижней границы облака; θ – угол поля зрения приемной системы лидара;

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

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ МАТРИЧНЫЙ ВЕКТОР-ПАРАМЕТР, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЙ ОПЕРАТОРОМ ПОВОРОТА ПЛОСКОСТИ РЕФЕРЕНЦИИ НА УГОЛ ϑ ОТНОСИТЕЛЬНО БАЗИСА;

$$\hat{M} = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & f_{24} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & f_{34} \\ f_{41} & f_{42} & f_{43} & f_{44} \end{pmatrix}$$

матрица рассеяния света (МРС). В общем случае МРС является матрицей с 16 элементами, от комплексного показателя преломления, размеров и формы частиц, а ее элементы представляют собой некоторую комбинацию из выражения для амплитуд рассеянного поля [9].

Для расчета поляризационных характеристик лидарного сигнала двукратного рассеяния из работы [10] были отобраны модели капельных облаков, наиболее характерных для Камчатского региона [11], параметры микроструктуры которых приведены в таблице 1. Оптические характеристики этих облаков были рассчитаны с помощью программы PolyMie [12].

Таблица 1 – Параметры микроструктуры капельных облаков

№	r_m , МКМ	μ	N , см^{-3}	δ , $\text{г}/\text{м}^3$	S_M , км^{-1}
1	4,48	10,6	350	0,220	0,197
2	5,46	2,8	59	0,194	0,179
3	5,95	22,2	165	0,188	0,189
4	5,72	6,4	103	0,180	0,203
5	5,95	3,4	39	0,133	0,175
6	4,94	7,2	96	0,100	0,212
7	5,28	8,5	80	0,092	0,206
8	4,94	5,8	58	0,070	0,213

Здесь r_m – модальный радиус распределения частиц по размерам; μ – параметр формы, характеризующий полуширину распределения; N – концентрация частиц; δ – водность облака; S_M – дальность видимости.

Исследование отношение степеней поляризации лидарного сигнала двукратного рассеяния при зондировании циркулярно и линейно поляризованным излучением показало, что оно не зависит от угла поля зрения приемной системы лидара (рисунок 1). Это позволяет ускорить обработку экспериментальных данных за счет уменьшения объема считываемых с ПЗС-матрицы и используемых для интерпретации экспериментальных данных.

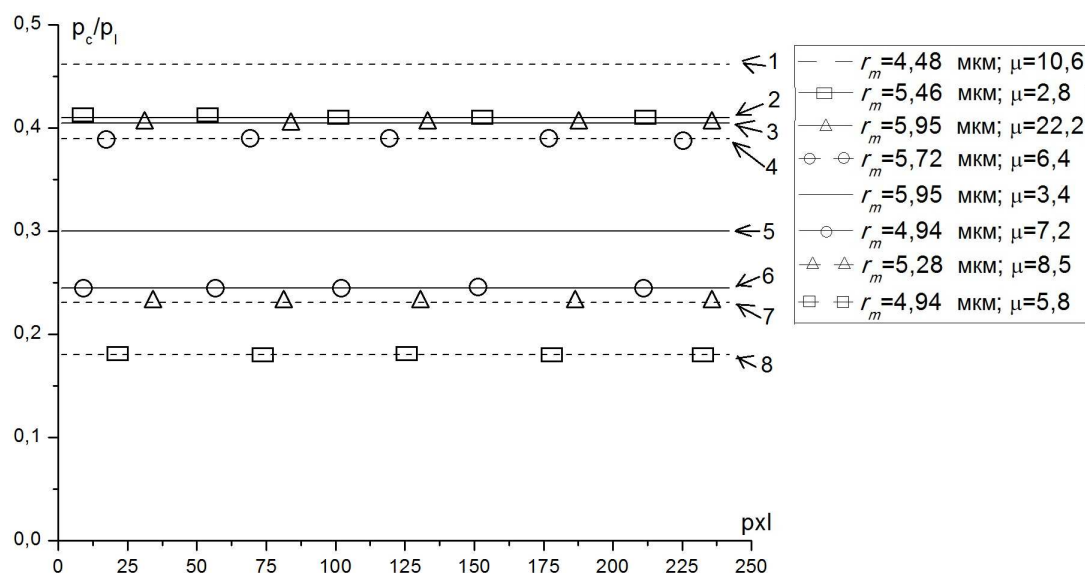


Рис. 1. Зависимость отношения степеней поляризации лидарного сигнала двукратного рассеяния при зондировании циркулярно и линейно поляризованным излучением от угла поля зрения приемной системы лидара

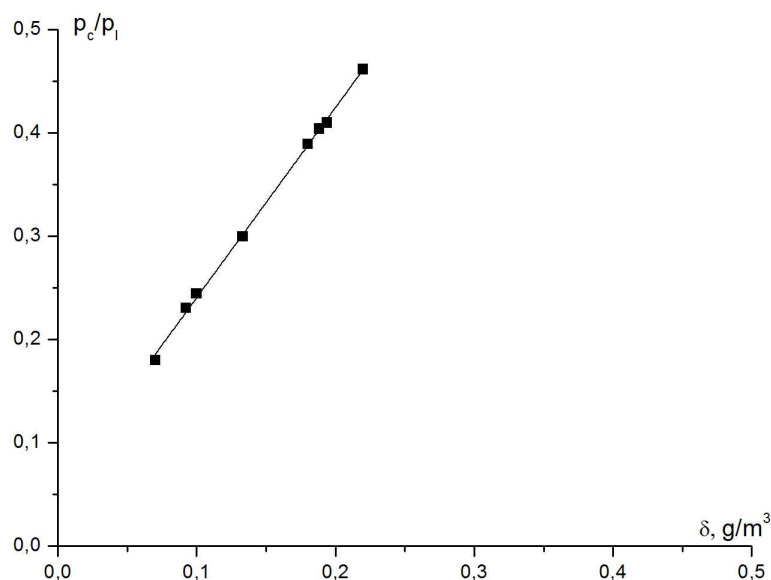


Рис. 2. Зависимость отношения степеней поляризации лидарного сигнала двукратного рассеяния при зондировании циркулярно и линейно поляризованным излучением от водности облака

Более детальное исследование зависимости отношения степеней поляризации лидарного сигнала двукратного рассеяния от параметров микроструктуры облака показало, что

с увеличением водности облака происходит увеличение отношения степеней поляризации (рисунок 2).

Данную зависимость хорошо аппроксимируется линейной функцией, а угол ее наклона составляет $1,07 \pm 0,06$ рад.

Представленные результаты позволяют предположить о возможности определения водности капельных облаков по поляризационным характеристикам лидарного сигнала двукратного рассеяния.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Грант № 16-05-00710).

Литература

1. Samokhvalov I.V., Bryukhanov I.D., Nasonov S.V., Zhivotenyuk I.V., Stykon A.P. Investigation of the optical characteristics of cirrus clouds with anomalous backscattering // Russian Physics Journal. – 2013. – Т. 55. – № 8. – С. 925-929.
2. Зуев В.Е., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. и др. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. – Новосибирск: Наука, 1986. 185 с.
3. Bissonnette L.R., Brusaglioni P., Ismaelli A., etc. LIDAR multiple scattering from clouds // Applied Physics. – 1995. – P. 355–362.
4. Chaikovskaya L.I., Zege E.P., Katsev I.L. et al. Lidar return from multiply scattering media in multiple-field-of-view and CCD lidars with polarization devices: comparison of semi-analytical solution and Monte-Carlo data // Applied Optics. – 2009. – P. 623–632.
5. Устройство регистрации лидарного сигнала: Пат. 100636. Рос. Федерация: МПК⁷ G 01 S 17/88 / Брюханова В.В., Самохвалов И.В., Симонова Г.В.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО ТГУ, ИМКЭС СО РАН. – №2010123565/28; заявл. 09.06.10; опубл. 20.12.10. Бюл. № 35.
6. Kaul B.V., Samokhvalov I.V. Double scattering approximation of the atmospheric laser location equation taking polarization effects into account // Soviet Physics Journal. – 1976. – V. 19. – No 1. – P. 64-67.
7. Perrin F. Polarization of light scattered by isotropic opalescent media // J. Chem. Phys. – 1942 – P. 415-427.
8. Bryukhanova V.V. Calculation of polarization characteristics of lidar return from clouds in double scattering approach // Proc. SPIE 9292, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 92922C (3 December 2014); doi: 10.1117/12.2075868
9. Rozenberg G.V. Light scattering in the Earth's atmosphere (an essay on the 150th anniversary of the discovery by Arago of the polarization of light in the daytime sky, and on the 100th anniversary of the discovery by Govi of the polarization of light in scattering) // Sov. Phys. Usp. – 1960. – V. 3. – P. 346–371.
10. Kokhanovsky A.A. Cloud Optics. – Springer, 2006. 283 p.
11. Атлас облаков. – А/Д Петропавловск-Камчатский (Елизарово), 2015. 22 с.
12. Program PolyMie to calculate optical properties of water droplet clouds. URL http://osmf.sccc.ru/~smp/INTAS_01-0239/main.html. (дата обращения 17.05.2011).