

КОНФЕРЕНЦИЯ С

**ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА
ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ЛИДАРЫ С КОНИЧЕСКИМ СКАНИРОВАНИЕМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРИСТЫХ ОБЛАКОВ

А.Г. Боровой^{1,2}, Dong Liu³, Zhenzhu Wang³, Ю.С. Балин¹, А.В. Коношонкин^{1,2}, Н.В. Кустова¹,
Г.П. Коханенко¹, И.Э. Пеннер¹, С.В. Насонов^{1,2}, И.Д. Брюханов², А.А. Дорошкевич²,
Chenbo Xie³, Decheng Wu³, Heli Wei³, Yingjian Wang³

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

²Национальный исследовательский Томский государственный университет

³Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei, China

borovoi@iao.ru, dliu@aiofm.ac.cn, zzwang@aiofm.ac.cn, sasha_tvo@sibmail.com, kustova@iao.ru,
balin@iao.ru, kokh@iao.ru, marina@iao.ru, nsergeyvlad@sibmail.com, plyton2121@mail.ru,
adoro@sibmail.com, cbxie@aiofm.cas.cn, dchwu@aiofm.cas.cn, hlwei@aiofm.ac.cn,
wyj@aiofm.cas.cn

Ключевые слова: рассеяние света, лидары, перистые облака

Представлены первые результаты исследования перистых облаков поляризационными лидарами с коническим сканированием, разработанные в г. Томске и г. Хэфэй (Китай). Эти результаты интерпретируются на основе впервые рассчитанных авторами в приближении физической оптики матриц обратного рассеяния света на преимущественно ориентированных ледяных кристаллах перистых облаков.

Перистые облака покрывают около 30% поверхности Земли и существенным образом влияют на радиационный бюджет Земли и, соответственно, на климат. Радиационные характеристики перистых облаков (коэффициенты рассеяния и экстинкции, а также индикатрисы и матрицы рассеяния света) слабо изучены в настоящее время из-за сильной пространственной и временной изменчивости облаков. Недостаток знаний о радиационных характеристиках перистых облаков является одним из основных источников неопределенности в современных численных моделях радиационного баланса Земли.

На протяжении последних 20 лет был выполнен ряд национальных и международных проектов по исследованию характеристик перистых облаков. В этих проектах радиационные характеристики облаков измерялись, в основном, радиометрами, расположенными как на Земле, так и на спутниках. Но радиометрические измерения не дают разрешения по высоте над поверхностью Земли, что затрудняет построение моделей циркуляции атмосферы. Лидары призваны устранить этот недостаток, так как они измеряют высотные профили радиационных характеристик. Однако лидарам также присущ ряд недостатков. В частности, стандартные моностатические лидары регистрируют свет, рассеянный только в направлении назад. Поэтому восстановление как оптических, так и микрофизических характеристик перистых облаков из лидарных сигналов (т.е. восстановление размеров, формы и ориентации в пространстве

ледяных кристаллов, составляющих перистые облака) является трудной обратной задачей оптики рассеивающих сред, которая в настоящее время не имеет удовлетворительного решения.

При интерпретации лидарных сигналов, отраженных от перистых облаков, возникают две проблемы. Во-первых, задача рассеяния света в направлении назад на ледяных кристаллах перистых облаков до последнего времени не была решена ни теоретически, ни численно. Только в последние годы авторами данного сообщения разработаны надежные численные алгоритмы метода физической оптики, позволяющие численно решать данную задачу. Во-вторых, стандартные двух-волновые или трех-волновые лидары дают небольшое число экспериментально измеряемых величин. Это приводит к значительной неопределенности при восстановлении микрофизических параметров перистых облаков. У поляризационных лидаров число экспериментально измеряемых величин существенно увеличивается, что делает их наиболее перспективными для диагностики перистых облаков.

Проведенные в последние годы в г. Томске работы по зондированию перистых облаков поляризационными лидарами ЛОЗА (ИОА СО РАН) [1-4] и Стратосфера (Томский госуниверситет) [5-7] показали, что ледяные кристаллы в перистых облаках зачастую проявляют не только преимущественную ориентацию относительно горизонта (зенитную ориентацию), но имеют также преимущественную ориентацию в горизонтальной плоскости (азимутальную ориентацию), связанную в направлением ветра. Пространственная ориентация кристаллов существенно изменяет оптические характеристики кристаллов (сечения и индикатрисы рассеяния света), которые необходимы для построения адекватной численной модели радиационного бюджета Земли. Используемые ранее схемы лидарного поляризационного зондирования перистых облаков (когда лидар был направлен или строго вертикально, или отклонялся от вертикального направления на некоторый фиксированный угол) затрудняли интерпретацию полученных данных.

1. Зондирование перистых облаков поляризационными лидарами с коническим сканированием

В настоящее время в ИОА СО РАН русскими соавторами данного сообщения изготавливается лидар с плавно изменяющимся углом наклона от вертикали и с одновременным коническим (азимутальным) сканированием. Такая схема измерений позволит детально исследовать преимущественную ориентацию ледяных кристаллов в облаках (причем как квази-горизонтальную, так и азимутальную преимущественную ориентацию), а также устранить возникающие ранее неопределенности при интерпретации поляризации света в лидарных сигналах. Две длины волны источника излучения 532 нм и 1064 нм, а также прием

рамановского сигнала на длине волны 607 нм, дадут дополнительную информацию о микрофизических параметрах облаков.

Аналогичный лидар уже изготовлен китайскими соавторами данного сообщения [8], на котором они получили предварительные данные, представленные на рисунке.

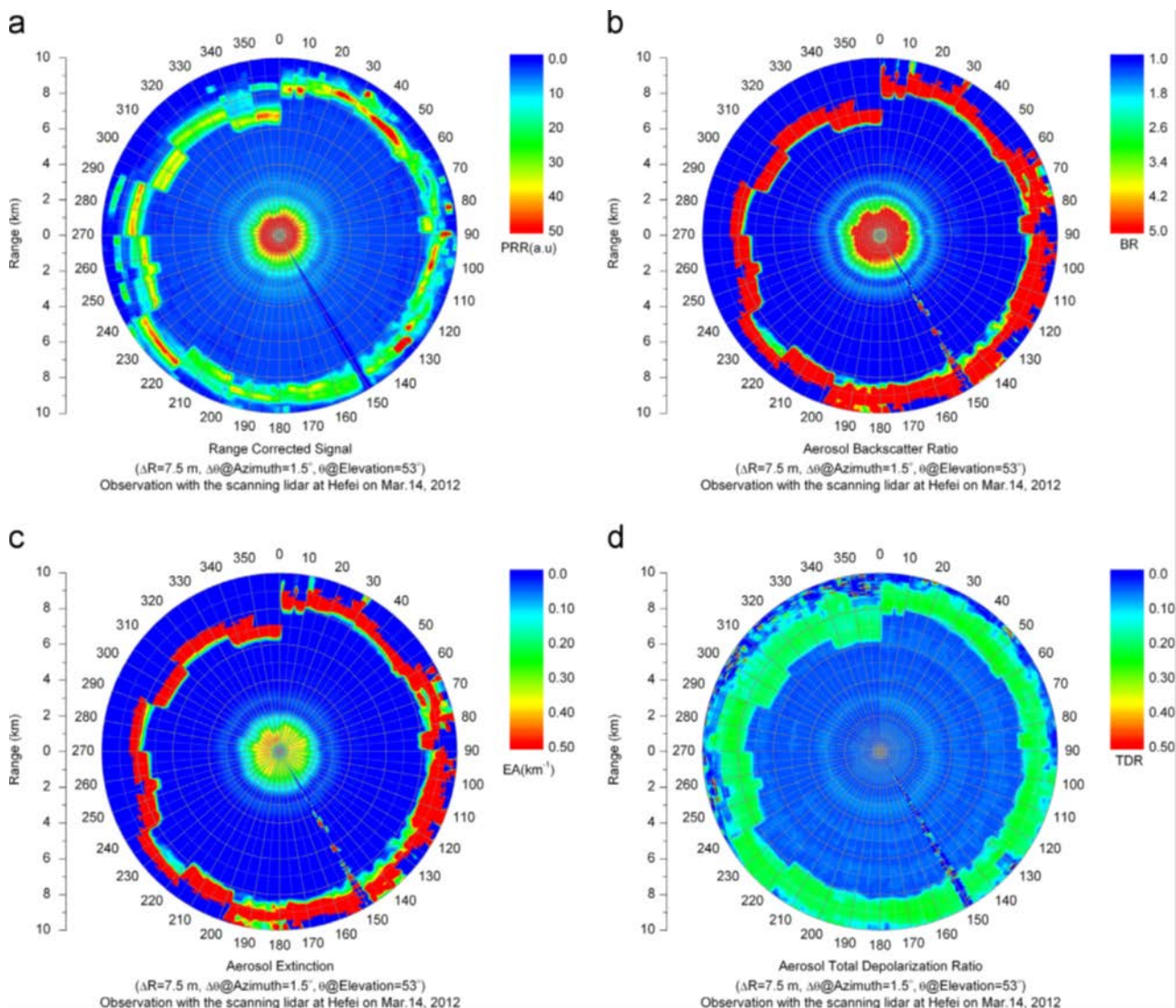


Рис.1. Результаты конического сканирования облачной атмосферы в Китае 14.03.2012 при зенитном угле наклона лидара 37° (а - общий лидарный сигнал, б - исключено молекулярное рассеяние, в - коэффициент экстинкции, д - деполяризационное отношение). Перистое облако находилось на высоте около 8 км.

2. Расчет матриц обратного рассеяния света для ледяных кристаллов перистых облаков при их произвольной пространственной ориентации

Хотя задача рассеяния света на атмосферных ледяных кристаллах интенсивно рассматривается в научной литературе на протяжении последних 40 лет, полученные результаты все еще непосредственно неприменимы для интерпретации лидарных измерений. Проблема расчета матриц обратного рассеяния осложняется тем, что в направлении рассеяния назад приближение геометрической оптики не применимо, так как приводит к сингулярностям,

т.е. к бесконечно большим значениям интенсивности света. Это связано с тем, что ледяные кристаллы обладают свойствами двумерных уголкового отражателей. Поэтому в последние годы мы перешли к приближению физической оптики, в котором вышеуказанные сингулярности не появляются. К настоящему времени мы разработали численный алгоритм приближения физической оптики и впервые в мире провели вычисления матриц обратного рассеяния света на ледяных кристаллах [9]. В этих работах, для упрощения, распределение частиц по ориентациям принималось не зависящим от азимутального угла.

В данном сообщении впервые будут представлены результаты расчетов матриц обратного рассеяния света для произвольно ориентированных кристаллов. Нами исследовано влияние преимущественной ориентации кристаллов как по зенитному, так и по азимутальному углам на поляризационные характеристики лидарных сигналов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 15-05-06100, № 15-55-53081), частичной поддержке Российского научного фонда (соглашение № 14-27-00022), гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-4714.2014.5, гранта Президента РФ № МК-6680.2015.5 и программы 5-100 Минобрнауки РФ в ТГУ.

- [1] *Balin Yu., Kaul B., Kokhanenko G., Winker D.* Application of circularly polarized laser radiation for sensing of crystal clouds // Opt. Exp. 2009. V.17. P. 6849-6859.
- [2] *Балин Ю.С., Кауль Б.В., Коханенко Г.П.* Наблюдения зеркально отражающих частиц и слоев в кристаллических облаках // Опт. атмосфер. и океана. 2011. Т. 24. С. 293-299.
- [3] *Balin Yu. S., Kaul B. V., Kokhanenko G. P., Penner I. E.* Observations of specular reflective particles and layers in crystal clouds // Opt. Exp. 2011. V. 19. P. 6209-6214.
- [4] *Balin Yu., Kaul B., Kokhanenko G., Winker D.* Transformation of light backscattering phase matrices of crystal clouds depending on the zenith sensing angle // Opt. Exp. 2013. V. 21. P. 13408-13418.
- [5] *Kaul B.V., Samokhvalov I.V., Volkov S.N.* Investigation of particle orientation in cirrus clouds by measuring backscattering phase matrix with lidar // Appl. Opt. 2004. V. 43. P. 6620-6628.
- [6] *Кауль Б.В., Самохвалов И.В.* Теория и результаты лазерного зондирования ориентированных кристаллических частиц в облаках // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18. С.1051-1057.
- [7] *Самохвалов И.В., Кауль Б.В., Насонов С.В., Животенюк И.В., Брюханов И.Д.* Матрица обратного рассеяния света зеркально отражающих слоев облаков верхнего яруса, образованных кристаллическими частицами, преимущественно ориентированными в горизонтальной плоскости // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25. С. 403-411.
- [8] *Chenbo Xie, Ming Zhao, Bangxin Wang, Zhiqing Zhong, Lin Wang, Dong Liu, Yingjian Wang.* Study of the scanning lidar on the atmospheric detection // Journ. Quantit. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2015. V. 150. P. 114-120.
- [9] *Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N., Okamoto H.* Backscattering Mueller matrix for quasi-horizontally oriented ice plates of cirrus clouds: application to CALIPSO signals // Opt. Express 2012. V.20. № 27. P. 29222-28233.