

Обнаружение и исследование зеркально отражающих слоёв облаков верхнего яруса высотным поляризационным лидаром

¹И.В.Самохвалов, ²Б.В. Кауль, ¹С.В. Насонов, ²С.Н.Волков, ¹И.В. Животенюк,
¹И.Д. Брюханов

¹Томский государственный университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36
E-mail: sam@elefot.tsu.ru

²Институт оптики атмосферы СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 1
E-mail: kaul@iao.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований матрицы обратного рассеяния перистых облаков с «зеркальным отражением». Для оценки условий формирования в атмосфере облаков с аномальным обратным рассеянием, проведен анализ имеющейся информации о метеорологических параметрах на соответствующих высотах вблизи пункта наблюдения.

In this article results of experimental measurement backscattering phase matrices of cirrus clouds with specular reflection are presented. Information about meteorological parameters near point of observations is analyzed for the estimate cases of forming in the atmosphere clouds with “anomalous backscattering”.

Облака верхнего яруса (ОВЯ) или наиболее общая их форма перистые облака, по протяженности простираются на сотни километров и постоянно покрывают до 20-30% поверхности Земли, поэтому оказывают существенное влияние на теплоэнергетический баланс системы земля-атмосфера. Однако, до сих пор нет микрофизической ОВЯ, адекватно отражающей их оптические свойства, так как в существующих моделях не учитывается преимущественная ориентация кристаллов в облаках. Причина состоит в том, что контактными методами определить ориентацию несферических частиц в условиях естественной атмосферы невозможно, поскольку при использовании контактных приборов информация об ориентации кристаллов безвозвратно теряется. С развитием метода лазерного поляризационного зондирования [1], который чувствителен к форме и ориентации частиц, это стало возможным. В его основу положено измерение матриц обратного рассеяния света (МОРС) с дальнейшим анализом свойств их симметрии.

Эффект зеркального отражения при лазерном зондировании кристаллических облаков был впервые описан в работе [2]. Однако, как правило, подобные наблюдения ограничивались констатацией обнаружения зеркальных слоёв без рассмотрения условий их возникновения [3].

В настоящей работе, сделана попытка объяснить: при каких метеоусловиях формируются в атмосфере облака с зеркальным отражением? С этой целью для анализа экспериментально полученных МОРС, привлечена информация о вертикальной стратификации (вблизи точки наблюдения) давления, температуры, направления и модуля скорости ветра и других метеовеличин, размещённая на сайте Вайомингского университета (США) [4].

Эксперименты по зондированию перистых облаков проводились на уникальном высотном поляризационном лидаре Томского государственного университета. Зондирование осуществлялось в зенит. В качестве источника зондирующего излучения используется Nd:YAG лазер с рабочей длиной волны 532нм, частотой следования импульсов 10Гц и энергией в импульсе 40мДж. Приёмной антенной служит зеркальный объектив Кассегрена с диаметром главного зеркала 0,5м и фокусным расстоянием 5м.

На пути рассеянного излучения в приёмном канале последовательно расположены: диафрагма диаметром 3 мм, определяющая поле зрения телескопа, положительная линза, преобразующая расходящийся пучок в квазипараллельный, интерференционный фильтр и, далее, призма Волластона, на выходе которой формируется два пучка с взаимно ортогональными поляризациями. Их интенсивности регистрируются фотоэлектронными умножителями, работающими в режиме счёта фотонов. Первым каналом регистрации считается тот, который регистрирует излучение, линейно поляризованное в плоскости, совпадающей с плоскостью колебаний электрического вектора излучения лазера (плоскость референции).

Отличительной особенностью лидара ТГУ является наличие в передающем и приёмном каналах идентичных узлов трансформации состояния поляризации излучения [5]. В зависимости от конфигурации элементов в этих узлах, зондирующее излучение принимает четыре состояния поляризации, характеризующееся нормированным вектором Стокса S_i , а поляризационные элементы в приёмном канале образуют поляриметр с соответствующим набором приборных векторов G_j (индексы i, j принимают значения 1,2,3,4). При четырёх комбинациях вектора Стокса передатчика и четырёх состояниях приборного вектора измеряется 16 интенсивностей рассеянного назад излучения, что позволяет вычислить 16 элементов МОРС. Продолжительность измерения 16 профилей интенсивности рассеянного назад излучения составляет 6-14 минут (при накоплении по 200-500 импульсам лазера, с частотой 10Гц). Управление лидаром осуществляется в полуавтоматическом режиме оператором с помощью компьютера.

Всего в 2011г. отмечено около 15 случаев наблюдения зеркально отражающих слоёв в облаках верхнего яруса. Эксперименты проводились исключительно при отсутствии облачности нижних ярусов. Кратко рассмотрим один из случаев наблюдения зеркального слоя в ОВЯ.

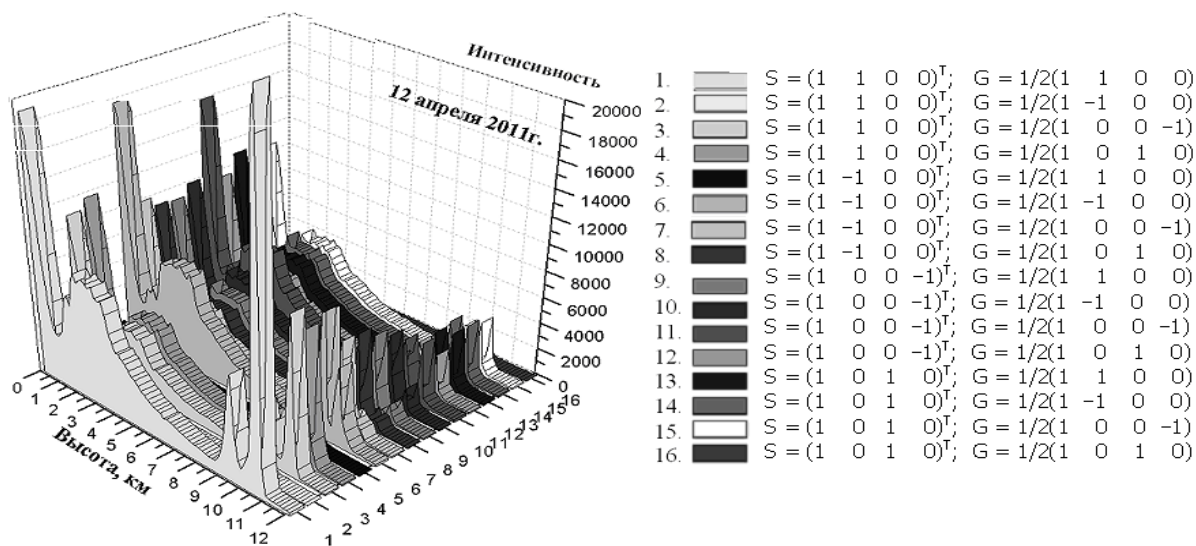


Рис. 1. Вертикальные профили интенсивности обратно рассеянного излучения (12 апреля 2011г.)

На рис. 1 приведен пример высотных профилей интенсивности обратного рассеяния излучения полученных 12 апреля 2011г. (местное время 21:32-21:46). Продолжительность серии составляет ~14 мин, что соответствует накоплению по 500 импульсам лазера. По оси x обозначена высота в километрах, по оси y – суммарное количество одноэлектронных импульсов, приходящих с соответствующей высоты и накопленных системой регистрации. В таблице справа приведено пояснение к каждому

профиллю: S_i - состояние поляризации зондирующего излучения характеризуется нормированным вектором Стокса, G_j - приборный вектор приёмной системы лидара, характеризующий совокупное действие поляризационных приборов в приёмном канале

Из рисунка 1 видно, что на высотах 9-11км наблюдается всплеск интенсивности сигнала, обусловленный наличием двух облачных слоёв. На рис. 2 приведены два сигнала, измеренных одним из каналов приёмника. При этом зондирующее излучение имело поляризацию $S_1 = (1 \ 1 \ 0 \ 0)^T$, а приёмный канал - приборные векторы: $G_1 = 1/2(1 \ 1 \ 0 \ 0)$ - сплошная кривая и $G_2 = 1/2(1 \ -1 \ 0 \ 0)$ - штриховая кривая. Иными словами, при линейной поляризации зондирующего излучения приведены параллельный и кросс-поляризованный компоненты рассеянного назад излучения.

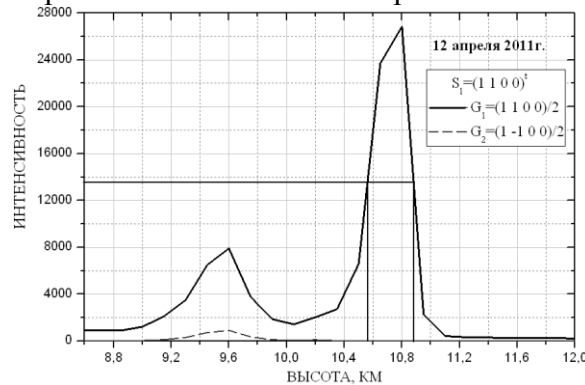


Рис. 2. Лидарные сигналы, полученные 12.04.2011: поляризация зондирующего излучения S_1 , приборные вектора приёмного канала G_1 и G_2

Представление о величине коэффициента обратного рассеяния даёт «отношение рассеяния» $R(h) = (\beta_\pi^m + \beta_\pi^a) / \beta_\pi^m$, то есть отношение суммы коэффициентов обратного аэрозольного и молекулярного рассеяния к коэффициенту обратного молекулярного рассеяния [6]. Для слоя 9,6км эта величина составила 18. Слой на высоте на высоте 10,65км характеризуется отношением рассеяния 73, что соответствует коэффициенту обратного рассеяния около $0,04 \text{ км}^{-1} \text{ ср}^{-1}$. Матрица обратного рассеяния в обоих слоях близка к диагональной.

Для слоя 9,6км нормированная МОРС имеет следующий вид

$$M_\pi(9,6\text{км}) = \begin{bmatrix} 1 & -0.02 & 0.06 & -0.05 \\ -0.02 & 0.56 & 0.09 & 0.00 \\ -0.06 & 0.09 & -0.46 & -0.04 \\ -0.05 & 0.04 & 0.11 & -0.07 \end{bmatrix}.$$

Степень поляризации отражённого этим слоем излучения (вектор Стокса посылаемого излучения $S_1 = (1 \ 1 \ 0 \ 0)^T$) составляет 0,61 и соответственно деполаризация равна 0,39. Элемент матрицы m_{44} близок к нулю, что соответствует практически полному отсутствию ориентации большими диаметрами в горизонтальное положение [1,7].

Деполаризация отражённого излучения слоем частиц, расположенных на высоте 10,65км составляла менее одного процента. Это говорит о том, что состояние поляризации отражённого слоем частиц излучения практически совпадает с поляризацией падающего на слой. Столь высокая степень поляризации позволяет предположить, что аэрозольный слой представлен сильно ориентированными частицами, имеющими совершенные геометрические грани. Согласно работам [1,8] условия для ориентации с углом флаттера менее 4° могут сложиться для достаточно крупных, порядка 150–200мкм, частиц при относительно слабой турбулентности

воздуха. Если принять эти условия, то приведённый выше коэффициент обратного рассеяния можно трактовать как площадь частиц находящихся в единице объёма и оценить их концентрацию. Оценка даёт величину $0,3-0,5\text{л}^{-1}$. Разумеется, это весьма произвольная оценка, но возможно она не очень далека от истины, так как облако оптически тонкое. Его оптическая толщина около 0,02.

Рассмотрим, при каких условиях происходило формирование облачного слоя. Для этого используем метеоданные, взятые с сайта Вайоминского университета США [4]. Наиболее близкие к месту наблюдений станция в г. Колпашево (~240 км от Томска) и станция в г. Новосибирске (~250 км от Томска). Следует отметить, что, несмотря на расстояние между станциями около 500 км, на высотах вблизи тропопаузы метеорологическая ситуация на них обычно примерно одинакова. Наблюдения на них проводятся каждый день в 00:00 и 12:00 UTC (Универсальное координированное время), что соответствует 06:00 и 18:00 местного времени. Номер станции г. Колпашево – 29231, г. Новосибирска – 29634.

Ниже в таблицах представлены примеры метеорологических данных взятых с описанного выше сайта на высотах существования отмеченных выше слоёв. Первая таблица относится к дате предшествовавшей эксперименту, а, именно, к 18:00 11 апреля 2011г., а вторая к дате 12.04.2011 и времени 18:00, что близко ко времени проведения сеанса лазерного зондирования.

Таблица 1. Данные со станции в г. Колпашево в 12-00 11.04.2011 (Местное время 18:00)

PRES	HGHT	TEMP	DWPT	RELH	MIXR	DRCT	SKNT	THTA	THTE	THTV
hPa	m	С	С	%	g/kg	deg	knot	К	К	К
266.0	9907	-53.9	-64.9	25	0.02	291	27	320.1	320.2	320.1
250.0	10300	-57.9	-68.9	23	0.01	285	29	319.9	319.9	319.9
243.0	10477	-59.2	-70.0	23	0.01	285	27	320.5	320.5	320.5
220.0	11097	-63.9	-73.9	24	0.01	293	30	322.5	322.6	322.5
213.0	11295	-64.7	-74.7	24	0.01	295	31	324.2	324.3	324.2
200.0	11680	-66.3	-76.3	23	0.01	305	47	327.6	327.6	327.6
198.0	11741	-66.6	-76.5	24	0.01	305	49	328.0	328.1	328.0
185.0	12150	-68.9	-78.0	26	0.00	305	45	330.8	330.8	330.8
184.0	12183	-69.1	-78.1	26	0.00	305	45	331.0	331.0	331.0
182.0	12248	-69.1	-78.1	26	0.00	304	44	332.0	332.0	332.0
172.0	12589	-66.6	-75.6	27	0.01	300	43	341.5	341.6	341.5
170.0	12660	-66.1	-75.1	27	0.01	298	43	343.5	343.6	343.5

Таблица 2. Данные со станции в г. Колпашево в 12-00 12.04. 2011 (Местное время 18:00)

PRES	HGHT	TEMP	DWPT	RELH	MIXR	DRCT	SKNT	THTA	THTE	THTV
hPa	m	С	С	%	g/kg	deg	knot	К	К	К
342.0	8246	-43.4	-49.0	54	0.13	280	41	312.2	312.7	312.2
300.0	9130	-51.3	-55.8	58	0.07	275	45	312.9	313.2	312.9
293.0	9283	-53.1	-57.5	59	0.06	273	46	312.5	312.7	312.5
263.0	9968	-57.7	-62.0	58	0.03	265	52	315.5	315.7	315.5
250.0	10290	-59.9	-64.1	58	0.03	265	54	316.9	317.0	316.9
222.0	11026	-63.5	-67.6	57	0.02	275	52	322.3	322.4	322.3
214.0	11252	-62.7	-66.6	59	0.02	275	52	327.0	327.1	327.0
207.0	11457	-61.9	-65.7	60	0.03	273	50	331.3	331.4	331.3
200.0	11670	-61.1	-65.1	59	0.03	270	47	335.9	336.0	335.9
166.0	12830	-60.1	-65.1	52	0.04	273	55	355.9	356.1	355.9

150.0 13460 -62.1 -68.1 44 0.03 275 60 362.9 363.0 362.9

В таблицах введены следующие обозначения: PRES – атмосферное давление [гПа], HGHT: высота [метры], TEMP – температура [Цельсий], DWPT – температура конденсации или точка росы [Цельсий], RELH – относительная влажность [%], MIXR – коэффициент смешивания [г/килограмм], DRCT – направление ветра [градусы]. SKNT – скорость ветра [кнот] (1 кнот = 0.514444 м/с = 1.852 км/ч), THTA – потенциальная температура [Кельвин], THTE – эквивалентная потенциальная температура [Кельвин], THTV – виртуальная потенциальная температура [Кельвин].

При сравнении таблиц можно заметить значительную разность в значениях относительной влажности на высотах 9–12 км. В первой таблице она около 24%, а во второй 58-60%. Разница между температурой и точкой росы в первом случае около 9-10°, а во втором около 4-5°. Но, что наиболее существенно, в первом случае ситуация по температуре и влажности далека от насыщения по отношению ко льду. Во второй таблице пресыщение надо льдом оценивается как 108-110%. Из сказанного можно заключить, что к моменту эксперимента по лазерному зондированию в атмосфере на высотах 9-12 км сложилась ситуация, благоприятная для образования кристаллических частиц правильной формы с совершенными гранями. Скорость и направление ветра на высотах расположения слоёв не имеют существенных сдвигов. Это позволяет предположить, что деструктивное влияние турбулентности на ориентацию частиц незначительно. Правда на высотах 10,3 и 9,9 км наблюдается отклонение направления ветра около 10°. Возможно, что этот ветровой сдвиг как-то влияет на дезориентацию частиц в слое 9,6 км. Но вследствие удаленности от пункта наблюдения нельзя утверждать, что та же ситуация была над Томском. При аналогичном анализе вертикальных профилей метеовеличин в атмосфере над Новосибирском ветрового сдвига не обнаружено. Этот факт позволяет сделать следующий вывод о появлении слоя частиц на высоте 9,6 км: нижний слой обусловлен выпадением частиц из верхнего слоя по мере их роста с потерей правильных форм, что и способствовало нарушению ориентации и деполяризации рассеянного излучения.

В докладе приводятся результаты исследований зеркально отражающих слоёв ОВЯ и в другие сезоны 2011 года

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ: ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» (ГК № 16.518.11.7048), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (ГК № 14.740.11) 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. Platt C.M.R. Some microphysical properties of an ice cloud from lidar observation of horizontally oriented crystals. J. Appl. Meteorol. 17, 1220-1224 (1978).
3. Балин Ю.С., Кауль Б.В., Коханенко Г.П. Наблюдения зеркально отражающих частиц и слоев в кристаллических облаках // Оптика атмосферы и океана, 2011. Т. 24. №04. стр.293-299.
4. <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.
5. Самохвалов И.В., Стыкон А.П., Кауль Б.В., Шелефонтьук Д.И. Автоматизация измерений матриц обратного рассеяния облаков верхнего яруса на высотном лидаре ТГУ // XVI Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». – Томск: ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН, 2009, С. 394-396.

6. Rassel P. B., Swisler J.Y. and McCormick P.M. Methodology of error analysis and simulation of lidar aerosol measurements., Appl. Opt., 18, No.22, 3783-3790, (1979).
7. Кауль Б.В. Симметрия матриц обратного рассеяния света в связи с ориентацией несферических аэрозольных частиц // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т.13. №10, с. 895-900.
8. Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Трансформация матриц обратного рассеяния света кристаллических облаков при изменении зенитного угла зондирования // Оптика атмосферы и океана. 2010. Том 23, № 05, с.405-411.