

Об определении параметров ориентированности частиц льда в облаках верхнего яруса по данным спутниковых радиометров и наземного поляризационного лидара

И.В.Самохвалов¹, В.В.Брюханова, С.В. Насонов¹, И.Д. Брюханов¹, Б.В. Кауль², С.Н.Волков²

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

Проводится совместный анализ данных зондирования облаков верхнего яруса наземным поляризационным лидаром и спутниковым радиометром MODIS. Обсуждается возможность обнаружения из космоса перистых облаков с преимущественной ориентацией кристаллов льда.

We present a joint analysis of the data sensing high-level clouds by polarization lidar and satellite radiometer MODIS. The possibility of detection of cirrus clouds with the preferred orientation of ice crystals from space is discussed.

Изучению радиационных свойств облаков верхнего яруса (ОВЯ) в последнее время уделяется большее внимание в связи с их важной ролью в процессах формировании климата и теплового баланса нашей планеты. Согласно современным представлениям, ОВЯ образуются в верхней тропосфере в результате упорядоченного подъема и адиабатического охлаждения воздуха. На процесс образования ОВЯ влияют турбулентный обмен, контрасты температуры и влажности воздуха. Обычно такие условия возникают при фронтальных процессах (особенно вблизи центра циклона) и активной конвекции, когда наблюдаются волновые и восходящие движения в верхней тропосфере. Различные сочетания указанных процессов обуславливают многообразие видов и разновидностей ОВЯ.

Определяющим источником погрешностей в расчётах радиационного баланса является несовершенство оптических моделей ОВЯ, так как в программах расчета широко используются модели, в которых не учитывается свойство *ориентированности несферических облачных частиц* - кристаллов льда в перистых облаках. По этой причине используется модель, в лучшем случае, предполагающая хаотическую ориентацию частиц. Сложившаяся ситуация легко объяснима тем фактом, что нет микрофизической модели, адекватно описывающей реальное облако с преимущественной ориентацией кристаллов льда, так как до сих пор не существовало инструментальных методов определения ориентации несферических частиц в атмосфере, тем более, на высотах образования перистых облаков

Нами показано, что по матрице обратного рассеяния света (МОРС) можно оценить состояние ориентированности кристаллических частиц льда, из которых состоят ОВЯ [1,2]. Внешними условиями приводящими к ориентации частиц можно отнести аэродинамические силы, возникающие при падении частиц и, вероятно, ветровые сдвиги и электрические поля. Совместное действие этих сил приводит к тому, что в ансамбле кристаллических частиц появляется направление преимущественной ориентации, связанное с направлением действия этих сил.

Разумно предположить, что в пределах малого исследуемого объема среды, который определяется диаграммой направленности передатчика лидара и длительностью импульса лазерного излучения, на частицы действует однородное поле векторных сил.

Если оптическая ось приёмной системы лидара ориентирована в зенит, в направлении зондирования z , в ансамбле кристаллических частиц существует плоскость зеркальной симметрии. Если плоскость зеркальной симметрии составляет азимутальный угол φ с плоскостью ориентации базисалидара (плоскость XOZ), то преобразованием поворота эти плоскости можно совместить и получить из экспериментально полученной МОРС $M(\pi)$, приведённую матрицу - $M'(\pi)$ [1].

Рассматривая параметр несферичности, как инвариант к ориентированности ансамбля кристаллических частиц в облаке, количественно его можно представить в виде

$$e = 1 - \frac{M'_{22} - M'_{33}}{2M'_{11}}. \quad (1)$$

Параметр ориентированности можно определить из диагональных элементов приведённой матрицы

$$f = \frac{M'_{22} + M'_{33}}{2M'_{11}}. \quad (2)$$

Область определения параметров несферичности и ориентированности, соответственно, находятся в интервале величин $0 \leq e \leq 1$, $0 \leq f \leq 1$.

Некоторые результаты статистической обработки массива из 600 экспериментально полученных МОРС приведены на рис.1 и 2.

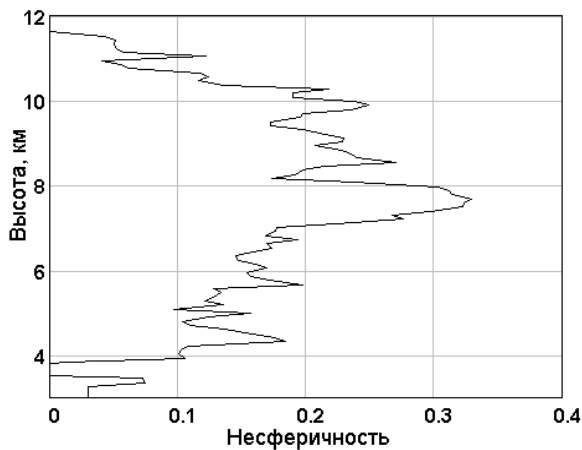


Рис. 1. Параметр несферичности, усреднённый по 600 МОРС

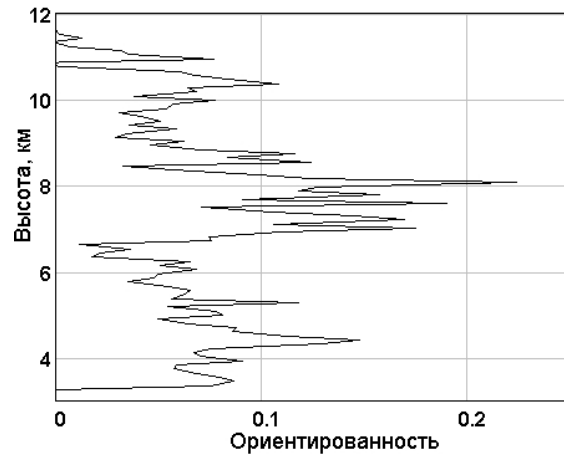


Рис.2. Параметр ориентированности, усреднённый по 600 МОРС

Из приведенных на рис.1. данных видно, что параметр несферичности плавно меняется от величины 0,1 на высоте 4 км, принимая максимальные значения около 0,33 в диапазоне высот 7-8 км, и, затем, после выраженного постоянного значения 0,2-0,25 с учетом статистической погрешности определения, на высотах 8-10 км снижается опять к величине 0,1. Детальный анализ показывает, что наибольшая частота появления ансамблей несферических на высотах 7-8 км при значении параметра несферичности около 0,5.

Из рис. 2. следует, что, в среднем, наибольшая ориентированность в ансамбле рассеивающих частиц наблюдается на высотах 7-8,5 км и, в несколько меньшей степени, на высотах 10-11 км.

Приведённые выше результаты показывают, что по характеристикам МОРС можно оценить состояние ориентированности кристаллических частиц льда, из которых состоят ОВЯ, и затем использовать эту информацию при выборе той или иной оптической модели облака для расчёта радиационного баланса. Однако существующие

в мировом научном сообществе лидары (за исключением 2-3) не могут измерять полную МОРС облаков в режиме мониторинга. Более того, при зондировании с поверхности Земли, часто ОВЯ закрыты облаками нижнего яруса. Поэтому очень важно (например, для оперативного прогноза) найти способ распознавания ОВЯ с преимущественно ориентированными частицами льда по снимкам облачных полей из Космоса с помощью аппаратуры, устанавливаемой на метеорологических спутниках.

Методы регистрации облачности по спутниковым измерениям основаны на том факте, что облака имеют более высокую отражательную способность и более низкую температуру по сравнению с поверхностью Земли. Поэтому возможно определение наличия облачности на основе пороговых тестов в видимом и инфракрасном спектральных диапазонах из космоса с использованием систем глобального и регионального мониторинга NOAA/AVHRR и EOS/MODIS.

Анализ данных, поступающих с американских спутников TERRA и AQUA осуществляющих исследование Земли из Космоса по программе EOS (Earth Observing System, NASA США) и приведенных в [3-5] показывает, что 26 спектральный канал (длина волны $\lambda = 1,38$ мкм) радиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) при дневных условиях наблюдений позволяет осуществлять детектирование перистой облачности в верхних слоях атмосферы. Этот спектральный канал попадает в сильную полосу поглощения водяного пара, поэтому отраженное от поверхности Земли солнечное излучение при влагосодержании атмосферы $W > 1\text{г/см}^2$ практически полностью поглощается в атмосфере. В этом канале спутниковый прибор фиксирует рассеянное излучение от слоев аэрозоля или перистой облачности в верхних слоях атмосферы. Тогда, используя пороговое значение (0.03-0.04) для коэффициента отражения $R_{1,38}$ системы «атмосфера – подстилающая поверхность» в канале $\lambda = 1,38$ мкм, можно разделить оптические ситуации безоблачной атмосферы, наличия перистой облачности и наличия плотной облачности с оптической толщиной > 0.5 .

Наряду с каналом $\lambda = 1,38$ мкм для детектирования перистой облачности используются измерения в каналах инфракрасного диапазона спектра ($\lambda=3,7; 8,8; 11$ и 12 мкм) на основе пороговых тестов для комбинаций радиационных температур.

Рассмотрим результаты обработки массива спутниковых данных, полученных в дневное время суток для окрестности г. Томска (в радиусе 25 км) за временной период 17 мая - 6 июня 2011 года. Номинальное (при измерениях в надири) пространственное разрешение спутниковых данных составило 10 км для аэрозольной оптической толщи (АОТ) и 5 км для остальных атмосферных параметров. Обработка спутниковых данных проведена С.В. Афониним по методикам, описанным в его диссертации [7], а результаты были любезно предоставлены для сопоставления с данными лазерного зондирования.

В таблицах 1 и 2 приведены данные, включая дату и время проведения спутниковых измерений, средние значения параметров атмосферы:

- аэрозольной оптической толщины $\tau_{0,55}$ на длине волны $\lambda=0.55$ мкм;
- балла облака N_C и его оптической толщи τ_C ;
- температуры окружающего воздуха T_A и температуры точки росы T_D на высотах от 8 до 12 км (слой 300-200 мб);
- общего влагосодержания W_{H_2O} ;
- процентное соотношение $N_{p\text{капель}}$ и кристаллов в облаке.
- эффективный размер частиц в облаке r_{ef} ;
- коэффициент отражения $R_{1,38}$ в канале $\lambda=1.38$ мкм.

Значения T_A и T_D на высотах 8-12 км характеризуют температурно-влажностный режим в слое атмосферы, где наблюдается перистая облачность. Диапазоны вариаций для T_A и T_D составили 217-224 К и 199-217 К ($SKO=1.6$ К и 4.3 К), соответственно.

Таблица 1. Параметры атмосферы, полученные по спутниковым данным MODIS в окрестности Томска за период с 17 мая по 6 июня 2011 года (выборочные данные).

Дата	Время	$\tau_{0.55}$	$N_C, \%$	τ_C	$W_{H_2O}, \text{г/см}^2$	$T_A, \text{К}$	$T_D, \text{К}$
17-05-2011	11:30	0.000	80.8	5.6	0.97	220.4	203.1
17-05-2011	15:00	0.000	92.6	5.5	1.01	220.8	203.4
22-05-2011	11:50	0.000	26.3	13.0	1.95	220.3	212.0
23-05-2011	12:30	0.000	48.8	27.1	1.29	221.2	200.7
25-05-2011	14:10	0.046	48.3	6.9	1.34	220.9	208.5
26-05-2011	13:15	0.143	58.2	10.7	1.94	223.7	204.7
26-05-2011	14:50	0.142	47.7	38.4	2.12	223.4	202.6
27-05-2011	13:55	0.325	19.4	16.3	1.62	222.2	203.8
29-05-2011	13:35	0.000	77.8	14.5	1.85	221.8	201.2
30-05-2011	14:25	0.220	69.2	4.6	2.36	222.2	209.6
31-05-2011	11:45	0.158	67.1	1.0	2.08	220.1	213.7
01-06-2011	14:15	0.282	76.2	13.2	2.71	223.3	210.0
02-06-2011	11:30	0.115	88.1	3.0	2.06	222.5	201.6
04-06-2011	13:05	0.256	63.5	3.8	2.45	223.8	209.8
05-06-2011	12:00	0.000	79.1	9.3	2.86	223.9	206.6

Таблица 2. Характеристики облачности, полученные по спутниковым данным MODIS в окрестности Томска за период с 17 мая по 6 июня 2011 года (выборочные данные).

Дата	Время	$N_P, \%$		$r_{ef}, \text{МКМ}$		$R_{1.38}$	
		капли	лед	капли	лед	капли	лед
17-05-2011	11:30	100.0	0.0	11.8	0.0	0.053	0.000
17-05-2011	15:00	100.0	0.0	7.3	0.0	0.032	0.000
21-05-2011	14:35	46.8	53.2	8.7	28.7	0.050	0.164
22-05-2011	11:50	91.0	9.0	12.4	17.2	0.018	0.244
23-05-2011	12:30	93.3	6.7	11.5	9.8	0.027	0.076
23-05-2011	14:20	99.5	0.5	12.6	16.9	0.033	0.071
25-05-2011	14:10	15.3	84.7	12.3	27.5	0.048	0.231
26-05-2011	13:15	55.5	44.5	8.1	19.4	0.026	0.355
26-05-2011	14:50	43.1	56.9	10.4	19.8	0.065	0.538
27-05-2011	13:55	98.3	1.7	10.4	23.0	0.020	0.221
29-05-2011	13:35	80.4	19.6	12.1	24.3	0.036	0.128
30-05-2011	14:25	44.5	55.5	9.1	29.2	0.035	0.125
31-05-2011	11:45	22.3	77.7	0.0	20.4	0.038	0.062
01-06-2011	14:15	53.0	47.0	9.8	18.5	0.059	0.185
02-06-2011	11:30	10.8	89.2	0.0	27.5	0.153	0.228
04-06-2011	13:05	24.5	75.5	16.7	25.7	0.043	0.084
05-06-2011	12:00	72.1	27.9	13.5	16.4	0.064	0.143

Как уже говорилось, высокие значения $R_{1.38}$ являются индикатором присутствия в верхних слоях тропосферы и стратосфере рассеивающих слоев (чаще перистой облачности). Из массива данных были исключены ситуации практически сплошной облачности при значениях $N_c > 95\%$. Данные таблицы 2, позволяют отметить существенную изменчивость оптических ситуаций за период с 17 мая по 6 июня. В частности, 21-22 мая, 25-26 мая, 30 мая, 1-2 июня и 5-6 июня наблюдались повышенные значения $R_{1.38} > 0.075$, что является одним из признаков присутствия облачности верхнего яруса, состоящего из кристаллов льда. Максимальные значения $R_{1.38} > 0.3-0.5$ наблюдались 26 мая и 6 июня. Максимальное процентное соотношение $N_p > 70\%$ для кристаллов льда были зафиксированы 25 и 31 мая, 2 и 6 июня. По данным табл. 2 характеристики фазового состава облачности, усредненные для периода 17 мая - 6 июня, составляют для капель и кристаллов: $N_p = 64\%$ и 36% , $r_{ef} = 9.4$ мкм и 17.7 мкм, $R_{1.38} = 0.043$ и 0.139 , соответственно.

Лазерное зондирование ОВЯ в мае-июне 2011г. проводилось на Высотном поляризационном лидаре ТГУ, главным достоинством которого является возможность измерения всех 16-ти элементов МОРС. В передающем и приёмном каналах лидара установлены идентичные узлы трансформации состояния поляризации излучения [7,8]. В зависимости от конфигурации элементов в узлах, зондирующее излучение принимает четыре состояния поляризации, характеризующееся нормированным вектором Стокса S_n , а поляризационные элементы в приёмном канале образуют поляриметр с соответствующим набором приборных векторов G_m (индексы n, m 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).

В качестве примера, позволяющего оценить взаимодополняющие возможности одновременных лидарных и спутниковых (радиометрических) исследований перистой облачности, рассмотрим результаты зондирования, полученные в ночь с 30 на 31 мая 2011г. В это время наблюдался слой «зеркального отражения» [8] (аномально высокое значение отношения рассеяния, достигающее 20), который появился над точкой зондирования примерно в 2:43 и ушел в 3:24. На рис.3. приведены высотные профили интенсивности обратного рассеяния, полученные в 2:54–3:00 (серия 19 – продолжительность 6 минут, накопление 200 импульсов лазера).

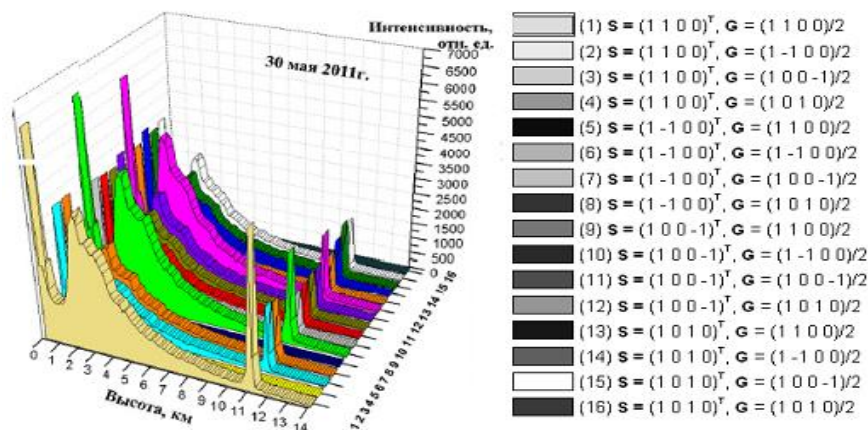


Рис.3. Высотные профили интенсивности обратного рассеяния (30.05.2011)

По оси x обозначена высота в км, по оси y – суммарное количество одноэлектронных импульсов, приходящих с соответствующей высоты и накопленных системой регистрации. В таблице справа приведено пояснение к каждому профилю: S_n - нормированный вектор Стокса зондирующего излучения (буква t – знак транспонирования матрицы-строки), G_m - приборный вектор приёмной системы лидара, характеризующий совокупное действие поляризационных приборов в приёмном канале.

В таблице 3 представлены поляризационные характеристики лидарного сигнала от облака и рассчитанная по экспериментальным данным МОРС. Оптическая толщина всего облака $\tau=0,38$.

Таблица 3. Результаты лидарного эксперимента 30.05.2011

H, км	Вектор-параметр Стокса		Степень поляри- зации	МОРС
	зондирующего излучения $S_0(1, Q_0, U_0, V_0)^t$	рассеянного назад излучения $S(1, Q, U, V)^t$		
11,1	(1 1 0 0)	(1 0,99 0,08 0,01)	0,99	$\begin{bmatrix} 1 & 0.00 & -0.01 & -0.03 \\ 0.00 & 0.99 & 0.11 & 0.02 \\ 0.01 & 0.07 & -0.95 & 0.05 \\ -0.03 & 0.04 & 0.10 & -0.91 \end{bmatrix}$
	(1 -1 0 0)	(1 -0,99 -0,06 -0,07)	0,99	
	(1 0 0 -1)	(1 -0,02 -0,04 0,89)	0,89	
	(1 0 1 0)	(1 0,11 -0,95 0,07)	0,95	

Из таблицы видно, что зондирующее излучение практически не деполаризуется при отражении от «зеркального» слоя и МОРС для такого случая имеет диагональный вид. Данное облако вероятнее всего состоит из кристаллических частиц, преимущественно ориентированных большими диаметрами в горизонтальной плоскости.

Полученные в результате анализа данные, позволяют сделать следующие выводы. Использование спутниковых радиометрических измерений, в каналах видимого и инфракрасного диапазонов спектра, позволяет детектировать наличие перистых облаков, как при дневных, так и при ночных условиях наблюдений. Наряду с детектированием перистого облака существует возможность оценки его оптической толщины, высоты расположения в атмосфере, фазового состава (водные капли, ледяные кристаллы). Наличие кристаллических частиц в ОВЯ, по данным радиометра MODIS, подтверждается результатами измерений МОРС поляризационным лидаром. Однако оптической толща облаков, измеренная радиометром и лидаром существенно отличается. Здесь уместно отметить, что оптическая толща тонких ОВЯ лидарным методом определяется с высокой точностью.

Можно предполагать, что перистые облака с аномально высокой степенью ориентации частиц будут иметь более высокий коэффициент отражения на длине волны $\lambda=1.38$ мкм. Этот факт может послужить критерием для оценки степени ориентации ледяных частиц в облаке. Если увязать величину $R_{1,38}$ с особенностями МОРС таких облаков, то можно разработать правило, по которому удастся распознавать степень ориентации кристаллических частиц в ОВЯ. Для успешного решения этой задачи требуется проведение серии комплексных экспериментов с использованием наземного поляризационного лидара, способного определять полную матрицу обратного рассеяния света.

Литература

1. Кауль Б.В., Волков С.Н., Самохвалов И.В. Результаты исследований кристаллических облаков посредством лидарных измерений матриц обратного рассеяния света // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16. № 4. С. 354-361.]
2. Кауль Б.В. Симметрия матриц обратного рассеяния света в связи с ориентацией несферических аэрозольных частиц.// Оптикаатмосферыиокеана. 2000. Т. 13, № 10, С. 895-900.
3. Ackerman S., Strabala K., Menzel P., Frey R., Moeller C., Gumley L., Baum B., Seemann S., Zhang H. Discriminating clear-sky from cloud with MODIS. Algorithm Theoretical Basis Document (MOD35). Santa Barbara: ICESS, University of California, 2006. 124 p.
4. King M.D., Tsay S.C., Platnick S.E., Wang M., Liou K.N. Cloud Retrieval Algorithms for MODIS: Optical Thickness, Effective Particle Radius, and Thermodynamic Phase. MODIS Algorithm Theoretical Basis Document (MOD06). 1997. 78 pp.
5. Choi Y.-S., Ho C.-H., Ahn M.-H., Kim Y.-S. Enhancement of the consistency of MODIS thin cirrus with cloud phase by adding 1.6- μm reflectance // Int. J. Remote Sens. 2005. V.26. P. 4669–4680.
6. Афонин С.В. Многофакторный физический подход к атмосферной коррекции спутниковых инфракрасных изображений земной поверхности // Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора физико-математических наук. ИОА СО РАН, г. Томск. 2011 г. С. 39.
7. 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 кристаллическими частицами преимущественно ориентированными в горизонтальной плоскости.// Оптикаатмосферыиокеана. 2012. Т. 25, № 5. С. 403-411.
8. 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 – Vol. 55, № 8, p. 925-929.
9. 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).