

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 535.2: 551.501

Матрица обратного рассеяния света зеркально отражающих слоев облаков верхнего яруса, образованных кристаллическими частицами, преимущественно ориентированными в горизонтальной плоскости

**И.В. Самохвалов,¹ Б.В. Кауль,² С.В. Насонов,¹
И.В. Животенюк,¹ И.Д. Брюханов^{1*}**

¹*Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

²*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 5.10.2011 г.

Анализируются результаты наблюдений кристаллических облаков верхнего яруса в сопоставлении с метеорологической ситуацией на высотах их существования. Отмечена корреляция между образованием слоев с выраженной ориентацией частиц, дающих зеркальное отражение излучения в направлении назад, и насыщением паров воды надо льдом. Сильная ориентация наблюдается преимущественно в верхней части облачного слоя. По мере осаждения частиц ориентация ослабевает.

Ключевые слова: кристаллические облака, лазерное зондирование, зеркальное отражение; crystal clouds; laser sounding; mirror reflection.

Введение

Облака верхнего яруса (ОВЯ), или перистые облака, являются важным климатообразующим фактором. Они формируются на высотах 8–12 км, состоят из кристаллических частиц различных размеров и форм, при этом имеют горизонтальную протяженность тысячи километров [1,2]. На пропускание и рассеяние солнечной радиации в атмосфере оказывает существенное влияние пространственная ориентация кристаллов в облаках. Основным ориентирующим фактором является действие аэродинамических сил, которые ориентируют частицы большими диаметрами поперек направления встречного потока воздуха [3, 4]. Теория рассеяния света на пространственно ориентированных кристаллах находится в настоящее время в стадии интенсивной разработки [5–7]. В то же время дистанционное обнаружение ориентации частиц в облаках возможно с помощью метода лазерного поляризационного зондирования [8]. В основу метода положено измерение матриц обратного рассеяния света (МОРС) с дальнейшим анализом свойств их симметрии.

В экспериментах по исследованию оптических характеристик ОВЯ с использованием поляризационного лидара Томского государственного университета (ТГУ) в апреле–июне 2011 г. наблюдались горизонтальные слои с аномально высоким отражением на высотах 9–11 км. Данные слои имели вертикальную протяженность несколько сотен метров. При этом помимо сильного обратного рассеяния одновременно наблюдалось минимальная деполяризация зондирующего излучения, что характерно при зеркальном отражении от граней кристаллов. Эффект зеркального отражения при лазерном зондировании кристаллических облаков был впервые описан в работе [9]. Зеркально отражающие слои в перистых облаках недавно наблюдали в Томске авторы работы [10]. Но их методика не предусматривала измерений полной МОРС. Кроме того, наблюдения ограничивались констатацией присутствия подобных слоев без рассмотрения условий их возникновения.

В настоящей статье для изучения условий формирования в атмосфере облаков с зеркальным отражением дан анализ имеющейся в свободном доступе информации о метеорологических параметрах вблизи точки наблюдения. На сайте Вайомингского университета (США) можно получить информацию о давлении, температуре, направлении и скорости ветра и т.д. с изменением по высоте [11]. Эта база данных ценна тем, что в ней представлены результаты,

* Игнатий Викторович Самохвалов (sam@elefot.tsu.ru); Бруно Валентинович Кауль (kaul@iao.ru); Сергей Владимирович Насонов; Иван Владимирович Животенюк; Илья Дмитриевич Брюханов.

полученные в ходе измерений, проводимых ежедневно (начиная с 1973 г.) в местах, распределенных по всему земному шару. Для анализа ситуации в Томске выбраны наиболее близко расположенные станции измерения, находящиеся в Новосибирске (~250 км на юго-запад от места наблюдений) и Колпашеве (~240 км на север от места наблюдений). Следует отметить, что, несмотря на расстояние между станциями около 500 км, на высотах вблизи тропопаузы метеорологическая ситуация на них обычно примерно одинакова.

1. Аппаратура и методика измерений

Для получения экспериментальных данных использовались технические возможности лидара Томского государственного университета (рис. 1).

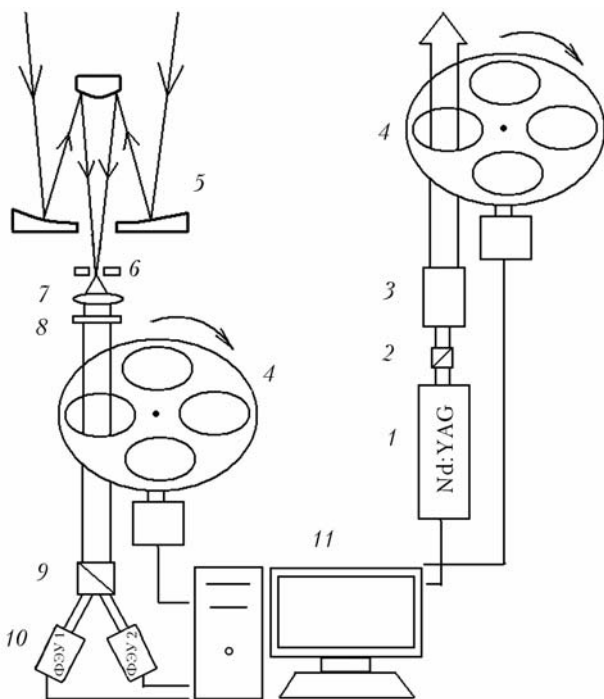


Рис. 1. Блок-схема поляризационного лидара ТГУ: 1 – Nd:YAG-лазер $\lambda = 532$ нм, энергия импульса 40 мДж, частота следования импульсов 10 Гц; 2 – призма Глана; 3 – коллиматор; 4 – узел трансформации состояния поляризации; 5 – зеркальный объектив Кассегрена; 6 – диафрагма; 7 – линза; 8 – интерференционный фильтр; 9 – призма Волластона; 10 – фотоэлектронные умножители; 11 – аппаратура регистрации и отображения данных на основе компьютера

Зондирование осуществляется в зенит. В качестве источника зондирующего излучения используется Nd:YAG-лазер. Приемной антенной служит зеркальный объектив Кассегрена с диаметром главного зеркала 0,5 м и фокусным расстоянием 5 м. На пути рассеянного излучения расположены диафрагма, определяющая поле зрения, линза и интерференционный фильтр. Далее призма Волластона формирует два пучка с взаимно ортогональными поляризациями. Их интенсивности регистрируются

фотоэлектронными умножителями, работающими в режиме счета фотонов. Первым каналом регистрации считается тот, который регистрирует излучение, линейно поляризованное в плоскости референции. За плоскость референции принимается плоскость, в которой происходят колебания электрического вектора исходного линейно поляризованного излучения лазера. Отличительной особенностью поляризационного лидара ТГУ является наличие в нем идентичных узлов трансформации состояния поляризации рассеянного и лазерного излучения, что делает возможным измерения матриц обратного рассеяния [12]. Для автоматизации измерения МОРС в каналах передатчика и приемника на роторы шаговых двигателей насажены диски 4 с четырьмя отверстиями, в которые закрепляются соответствующие оптические элементы. Первое отверстие – пустое. В этом положении лазерное излучение характеризуется нормированным на интенсивность вектором Стокса $\mathbf{S}_1 = (1 \ 1 \ 0 \ 0)^T$, а первый приемный канал описывается приборным вектором-строкой $\mathbf{G}_1 = \frac{1}{2}(1 \ 1 \ 0 \ 0)$.

Под приборным вектором подразумевается первая строка матрицы, являющаяся произведением матриц Мюллера устройства для вращения фазы (или фазовой пластинки) и призмы Волластона. Во втором отверстии установлен вращатель плоскости поляризации на 90° относительно плоскости референции (вектор Стокса и приборный вектор соответственно $\mathbf{S}_2 = (1 \ -1 \ 0 \ 0)^T$ и $\mathbf{G}_2 = \frac{1}{2}(1 \ -1 \ 0 \ 0)$). В третьем отверстии вставлена четвертьволновая фазовая пластинка, ориентированная оптической осью под углом 45° к плоскости референции $\mathbf{S}_3 = (1 \ 0 \ 0 \ 1)^T$ и $\mathbf{G}_3 = \frac{1}{2}(1 \ 0 \ 0 \ -1)$. В четвертом отверстии помещается вращатель плоскости поляризации на 45° относительно плоскости референции и соответственно $\mathbf{S}_4 = (1 \ 0 \ 1 \ 0)^T$, $\mathbf{G}_4 = \frac{1}{2}(1 \ 0 \ 1 \ 0)$. В приборных векторах второго канала нужно поменять на противоположные знаки вторых не нулевых элементов. В принятых обозначениях регистрируемые интенсивности описываются уравнением лазерного зондирования

$$N_{i,j}(h_k) = n\Delta h_k N_0 A h_k^{-2} k T^2(h_k) \mathbf{G}_j \mathbf{M}(h_k) \mathbf{S}_i, \quad i = 1, \dots, 4; j = 1, \dots, 4, \quad (1)$$

где $N_{i,j}(h_k)$ – число фотонов, зарегистрированных в стробе, соответствующем высоте h_k при i -м состоянии поляризации лазерного излучения и j -м приборном векторе; n – число лазерных импульсов, испущенных с целью накопления сигнала; Δh_k – пространственная протяженность строба накопления, соответствующего высоте h_k ; k – квантовая эффективность приемника, включая пропускание оптических элементов; N_0 – энергия лазерного импульса, выраженная в количестве излученных кван-

тов; A – площадь приемной антенны; $T(h_k)$ – прозрачность участка трассы от лидара до высоты h_k . Элементы матрицы \mathbf{M} имеют размерность $\text{м}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$.

Процедура измерений заключается в следующем: при определенном состоянии поляризации лазерного излучения, например $\mathbf{S}_1 = (1 \ 1 \ 0 \ 0)^T$, происходит полный оборот диска поляризационной приставки приемного канала и реализуются все 4 пары приборных векторов. Затем поворотом диска поляризационной приставки лазера устанавливается следующая поляризация лазерного излучения и снова производится полный оборот диска приставки приемника. После реализации всех четырех состояний поляризации лазерного излучения весь цикл повторяется. Продолжительность измерения 16 профилей интенсивности рассеянного назад излучения, необходимых для расчета МОРС, составляет 6–14 мин (соответствует накоплению 200–500 импульсов лазера при частоте следования импульсов 10 Гц). Управление лидаром осуществляется в полуавтоматическом режиме оператором с помощью компьютера.

2. Результаты экспериментов

Всего за 3 мес зарегистрировано 5 случаев, когда наблюдались зеркально отражающие слои перистых облаков: 12, 19 апреля, 19, 30 мая и 18 июня 2011 г. Измерения проводились в условиях отсутствия закрывающей облачности нижних ярусов.

По характеру динамики наблюдавшихся слоев в качестве первой группы выделим наблюдения 12 и 19 апреля 2011 г. Они характерны тем, что начало наблюдений происходило в условиях безоблачного неба при полном отсутствии достаточно выраженных аэрозольных слоев на всех высотах вплоть до 13–15 км. Затем на высотах 10–11 км начинал образовываться аэрозольный слой, который по мере развития приобретал признаки зеркально отражающего и далее до конца наблюдений сохранял это свойство. Так, 12 апреля 2011 г. с 20:27 до 22:50 по местному времени проведено 9 полных циклов измерений МОРС. Примерно в 21:10 на высоте ~11 км сформировался слой с признаками зеркального отражения.

На рис. 2 приведен пример высотных профилей интенсивности обратного рассеяния излучения, полученных в серии № 5 (местное время 21:32–21:46).

Продолжительность серии составляет ~14 мин, что соответствует накоплению по 500 импульсов лазера, приходящих с соответствующей высоты и накопленных системой регистрации. Справа даны пояснения к каждому профилю: \mathbf{S}_i – состояние поляризации зондирующего излучения, которое характеризуется нормированным вектором Стокса; \mathbf{G}_j – приборный вектор приемной системы лидара, определяющий совокупное действие поляризационных приборов в приемном канале.

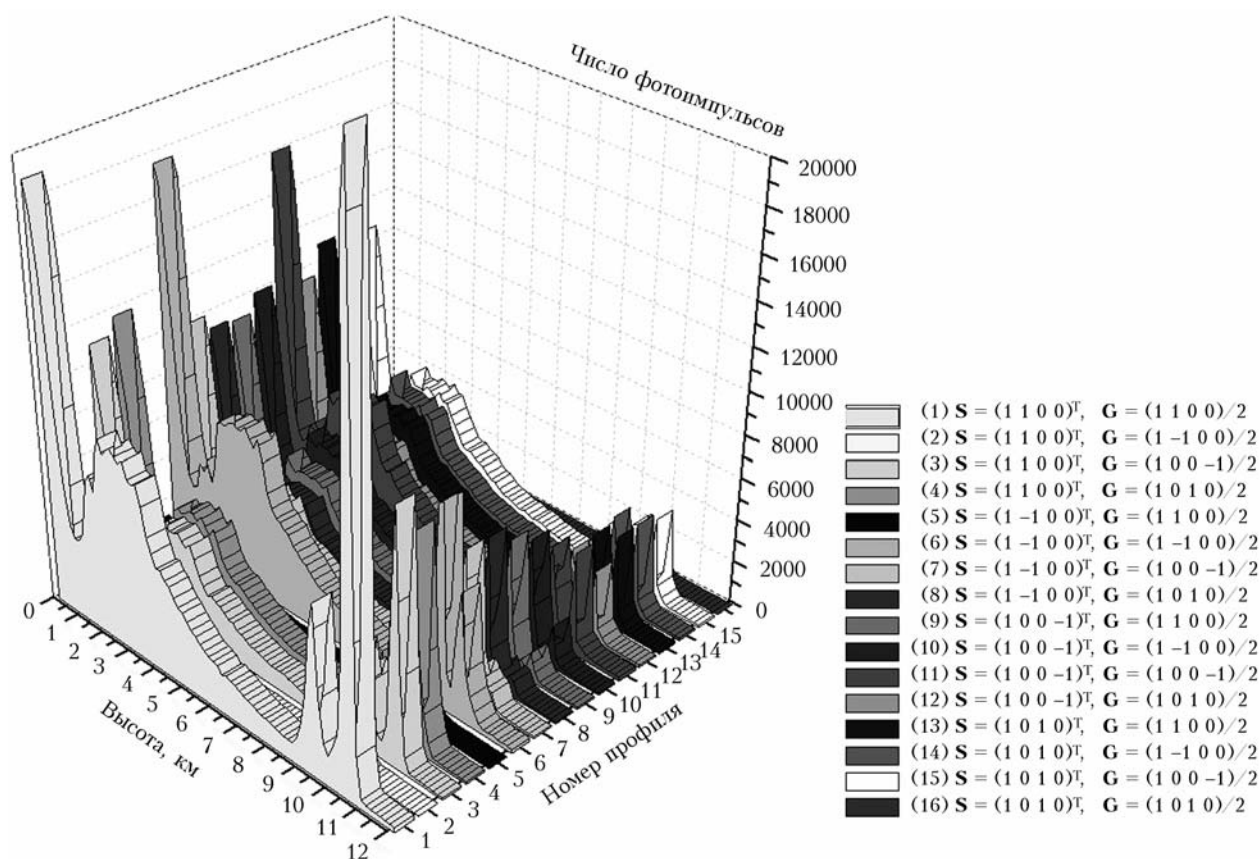


Рис. 2. Вертикальные профили интенсивности обратного рассеянного излучения (12 апреля 2011 г.)

На рис. 2 видно, что после окончания процесса полного покрытия диаграмм направленности приемной и передающей антенн с высоты 2,5–3 км идет монотонный спад сигнала, обусловленный его затуханием обратно пропорционально квадрату расстояния и ослаблением вследствие рассеяния безоблачными слоями атмосферы. Далее на высотах 9–11 км наблюдается всплеск интенсивности сигнала в виде двух пиков, обусловленный наличием облачных слоев.

Для наглядности на рис. 3 приведены два сигнала, измеренные одним из каналов приемника. При этом нормированный вектор Стокса лазерного излучения имел значение $\mathbf{S}_1 = (1 \ 1 \ 0 \ 0)^T$, а приборные векторы – $\mathbf{G}_1 = \frac{1}{2}(1 \ 1 \ 0 \ 0)$ (сплошная кривая) и $\mathbf{G}_2 = \frac{1}{2}(1 \ -1 \ 0 \ 0)$ (штриховая). Иными словами, при линейной поляризации лазерного излучения приведены параллельный и кроссполяризованный компоненты рассеянного назад излучения.

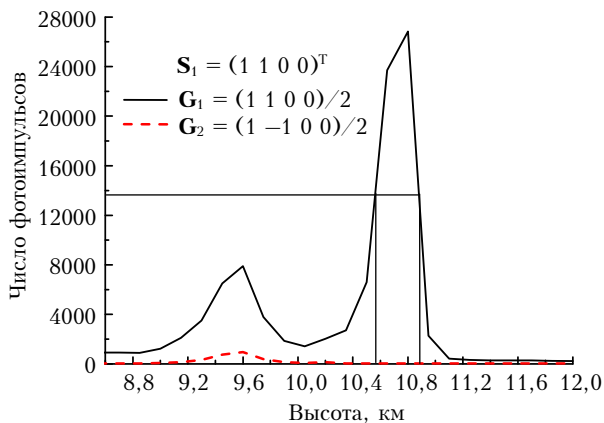


Рис. 3. Сигналы, полученные 12.04.2011 при нормированном векторе Стокса лазерного излучения \mathbf{S}_1 и приборных векторах \mathbf{G}_1 и \mathbf{G}_2

Представление о величине коэффициента обратного рассеяния дает так называемое «отношение рассеяния» $R(h) = (\beta_\pi^m + \beta_\pi^a) / \beta_\pi^m$, т.е. отношение суммы коэффициентов обратного аэрозольного и молекулярного рассеяния к коэффициенту обратного молекулярного рассеяния [13, 14]. Для слоя 9,6 км эта величина составила 18. Слой на высоте 10,65 км характеризуется отношением рассеяния 73, что соответствует коэффициенту обратного рассеяния около $0,04 \text{ км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$. Матрица обратного рассеяния в обоих слоях близка к диагональной. В этом случае формула для деполяризации излучения δ , выраженная через параллельный I_{\parallel} и кроссполяризованный I_{\perp} компоненты

$$\delta = 2I_{\perp} / (I_{\parallel} + I_{\perp}), \quad (2)$$

является точной [15].

Для слоя 9,6 км нормированная МОРС имеет следующий вид:

$$M(9,6 \text{ км}) = \begin{bmatrix} 1 & -0,02 & 0,06 & -0,05 \\ -0,02 & 0,56 & 0,09 & 0,00 \\ -0,06 & 0,09 & -0,46 & -0,04 \\ -0,05 & 0,04 & 0,11 & -0,07 \end{bmatrix}.$$

Степень поляризации в этом слое составляет 0,61, и соответственно деполяризация равна 0,39. Элемент матрицы m_{44} близок к нулю, что соответствует практически полному отсутствию ориентации большими диаметрами в горизонтальное положение [4].

Рассчитанная по формуле (2) деполяризация в слое на 10,65 км составляла менее 1%. Более точную оценку привести невозможно, так как сигнал I_{\perp} был близок к уровню шумов. Столь высокая степень поляризации позволяет предположить, что аэрозольный слой представлен сильно ориентированными частицами, имеющими совершенные геометрические грани. Согласно работам [4, 16] условия для ориентации с углом флаттера менее 4° могут сложиться для достаточно крупных (порядка 150–200 мкм) частиц при относительно слабой турбулентности воздуха. Если принять эти условия, то приведенный выше коэффициент обратного рассеяния можно трактовать как площадь частиц, находящихся в единице объема, и оценить их концентрацию [17]. Оценка дает величину $0,3\text{--}0,5 \text{ л}^{-1}$. 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 Вайомингского университета США [11]. Наиболее близко к месту наблюдений расположены станции в г. Колпашеве (~240 км от Томска) и г. Новосибирске (~250 км от Томска). 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. Колпашева – 29231, г. Новосибирска – 29634.

Ниже в табл. 1 и 2 представлены метеорологические данные на высотах существования отмеченных выше слоев. Табл. 1 относится к дате, предшествовавшей эксперименту, а именно к 18:00 11 апреля 2011 г., а табл. 2 к дате 12.04.2011 и времени 18:00, что близко ко времени проведения лазерного зондирования.

При сравнении табл. 1 и 2 можно заметить существенную разницу в значениях относительной влажности на высотах 9–12 км. В табл. 1 она около 24%, а в табл. 2 – 58–60%. Разница между температурой и точкой росы в табл. 1 около $9\text{--}10^\circ$, а в табл. 2 около $4\text{--}5^\circ$. Но, что наиболее существенно, в табл. 1 ситуация по температуре и влажности далека от насыщения по отношению ко льду. В табл. 2 преобладание надо льдом оценивается как 108–110%.

Таблица 1

29231 Kolpasevo Observations at 12Z 11 Apr 2011 (Местное время 18:00) [11]

PRES, hPa	HGHT, m	TEMP, °C	DWPT, °C	RELH, %	MIXR, g/kg	DRCT, deg	SKNT, khot	THATA, K	THTE, K	THTV, K
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

Примечание. Здесь и в табл. 2 и 3 введены следующие обозначения: PRES – атмосферное давление (гПа); HGHT – высота (м); TEMP – температура (°C); DWPT – температура конденсации, или точка росы (°C); RELH – относительная влажность (%); MIXR – коэффициент смешивания (г/кг); DRCT – направление ветра (град); SKNT – скорость ветра (кнот) (1 кнот = 0,514444 м/с = 1,852 км/ч); THATA – потенциальная температура (K); THTE – эквивалентная потенциальная температура (K); THTV – виртуальная потенциальная температура (K).

Таблица 2

29231 Kolpasevo Observations at 12Z 12 Apr 2011 (Местное время 18:00) [11]

PRES, hPa	HGHT, m	TEMP, °C	DWPT, °C	RELH, %	MIXR, g/kg	DRCT, deg	SKNT, khot	THATA, K	THTE, K	THTV, K
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

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 слоев 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 6°.

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. Для сравнения в табл. 3 приводится ситуация над Новосибирском.

Скорее всего, 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.

Таблица 3

29634 UNNN Novosibirsk Observations at 12Z 12 Apr 2011 (Местное время 18:00) [11]

PRES, hPa	HGHT, m	TEMP, °C	DWPT, °C	RELH, %	MIXR, g/kg	DRCT, deg	SKNT, khot	THATA, K	THTE, K	THTV, K
332,0	8534	-43,7	-49,7	51	0,12	287	27	314,4	314,9	314,4
300,0	9210	-48,3	-53,3	56	0,09	285	29	317,2	317,5	317,2
290,0	9428	-49,9	-54,8	56	0,08	285	33	317,9	318,2	317,9
250,0	10380	-57,1	-61,6	56	0,04	280	35	321,1	321,2	321,1
227,0	10992	-59,9	-63,9	59	0,03	280	41	325,8	325,9	325,8
219,0	11220	-60,9	-64,8	60	0,03	280	41	327,6	327,7	327,6
200,0	11790	-61,1	-65,0	60	0,03	275	41	335,9	336,0	335,9
182,0	12374	-61,9	-65,9	59	0,03	272	39	343,7	343,9	343,7

В эксперименте 19 апреля 2011 г. было проведено 5 серий с 20:47 до 22:02. Примерно в 20:51 начал формироваться слой на высоте 10,5 км.

В серии № 2 (местное время измерений 21:32–21:46) геометрическая толщина облачного слоя на уровне половины от максимального значения интенсивности составляла 170 м, а отношение рассеяния $R(h)$ равнялось 18. Слой определялся как один пик сигнала без какой-либо структуры с диагональной матрицей обратного рассеяния. Деполяризация рассеянного излучения составляла около 1%, что и позволило определить слой как зеркально отражающий. Как отмечалось ранее, эксперименты 19.04 и 12.04.2011 объединены по метеорологической ситуации в одну группу. Так же как перед 12 апреля, накануне 19 апреля на высотах 9–12 км наблюдались влажность и температура, далекие от насыщения над льдом. К моменту перед началом эксперимента в 18:30 влажность достигла 40%, а температура -63°C , но уже 20 апреля утром в 6:00 относительная влажность достигала -70% . Очевидно, что эксперимент проходил в условиях возрастающей влажности и к моменту измерений уже создались условия для образования кристаллов льда. Но процесс находился на этапе зарождения, поэтому слой был достаточно тонкий и слабо выраженный по величине отношения обратного рассеяния.

Эксперимент 19 мая 2011 г. проводился в условиях постоянного присутствия кристаллической облачности на высотах 10–11 км. С 16:40 до 22:09 проведены 22 серии измерений. К концу измерений наблюдалось некоторое уменьшение интенсивности облачных слоев. На рис. 4 представлены сигналы, полученные в серии № 1 (местное время 16:40–16:53).

Геометрическая толщина на половине максимума верхнего облачного слоя Δh равна 270 м. Отношение рассеяния $R(h)$ составляет 130. В табл. 4 приведены более подробные данные о поляризационных характеристиках излучения, рассеянного этим слоем.

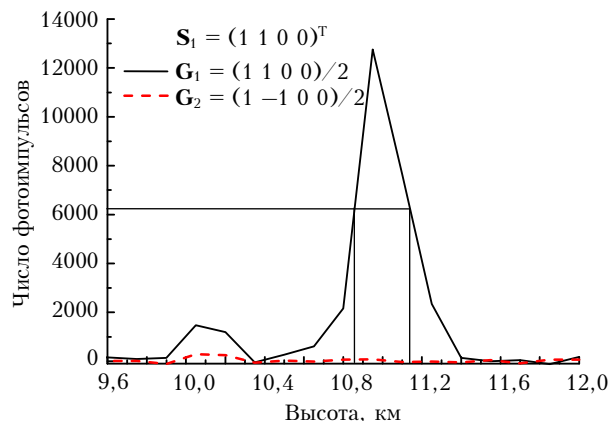


Рис. 4. Сигналы, полученные 19.05.2011 при нормированном векторе Стокса лазерного излучения \mathbf{S}_1 и приборных векторах \mathbf{G}_1 и \mathbf{G}_2

Из приведенных в табл. 4 данных видно, что степень поляризации близка к единице. Значение 0,95, по-видимому, – следствие ошибки при усреднении, о чем свидетельствуют значительные отличия от нуля элементов m_{23} и m_{43} , существенно превышающие среднестатистическую ошибку определения элементов МОРС. Очевидно, что слой на 10,8 км представлен хорошо ориентированными частицами с отражающими гранями. Коэффициент обратного рассеяния оценивается как $0,075 \text{ км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$, а оптическая толщина равна 0,05. Слой на высоте 10,1 км характеризуется деполяризацией излучения, равной 0,4, что свидетельствует о слабой ориентации частиц.

В отличие от двух рассмотренных выше ситуаций в данном случае метеорологическая обстановка на высотах 9–12 км была неблагоприятна для образования кристаллических частиц. Относительная влажность по данным станций Колпашева и Новосибирска составляла 30–40% при температуре от -57 до -60°C при северо-западном ветре 300–315%. Этого явно недостаточно для достижения необходимого уровня насыщения по отношению ко льду.

Таблица 4

Поляризационные характеристики слоя на высоте 10,8 км (19.05.2011)

Вектор Стокса лазерного излучения \mathbf{S}_i , приборный вектор \mathbf{G}_j	Нормированный на интенсивность вектор Стокса рассеянного излучения $\mathbf{S}_{i,j}(I, Q, U, V)^T$	Степень поляризации	Нормированная на элемент M_{11} матрица обратного рассеяния
$\mathbf{S}_1 = (1 \ 1 \ 0 \ 0)^T$ $\mathbf{G}_1 = (1 \ 1 \ 0 \ 0)/2$	(1 0,98 0,10 0,05)	0,99	$M = \begin{bmatrix} 1 & 0,00 & -0,04 & 0,05 \\ 0,00 & 0,99 & 0,16 & -0,06 \\ 0,04 & 0,06 & -0,96 & -0,02 \\ 0,05 & 0,01 & 0,14 & -0,94 \end{bmatrix}$
$\mathbf{S}_2 = (1 \ -1 \ 0 \ 0)^T$ $\mathbf{G}_2 = (1 \ -1 \ 0 \ 0)/2$	(1 -0,99 -0,03 0,04)	0,99	
$\mathbf{S}_3 = (1 \ 0 \ 0 \ 1)^T$ $\mathbf{G}_3 = (1 \ 0 \ 0 \ -1)/2$	(1 0,06 0,05 0,99)	0,99	
$\mathbf{S}_4 = (1 \ 0 \ 1 \ 0)^T$ $\mathbf{G}_4 = (1 \ 0 \ 1 \ 0)/2$	(1 0,16 -0,92 0,19)	0,95	

Поляризационные характеристики слоя на высоте 11,1 км (30–31.05.2011)

Вектор Стокса лазерного излучения S_i , приборный вектор G_j	Нормированный на интенсивность вектор Стокса рассеянного излучения $S_{i,j}(I, Q, U, V)^T$	Степень поляризации	Нормированная на элемент M_{11} матрица обратного рассеяния
$S_1 = (1 \ 1 \ 0 \ 0)^T$ $G_1 = (1 \ 1 \ 0 \ 0)/2$	(1 0,99 0,08 0,01)	0,99	$M = \begin{bmatrix} 1 & 0,00 & -0,01 & -0,03 \\ 0,00 & 0,99 & 0,11 & 0,02 \\ 0,01 & 0,07 & -0,95 & 0,05 \\ -0,03 & 0,04 & 0,10 & -0,91 \end{bmatrix}$
$S_2 = (1 \ -1 \ 0 \ 0)^T$ $G_2 = (1 \ -1 \ 0 \ 0)/2$	(1 -0,99 -0,06 -0,07)	0,99	
$S_3 = (1 \ 0 \ 0 \ 1)^T$ $G_3 = (1 \ 0 \ 0 \ -1)/2$	(1 -0,02 -0,04 0,89)	0,89	
$S_4 = (1 \ 0 \ 1 \ 0)^T$ $G_4 = (1 \ 0 \ 1 \ 0)/2$	(1 0,11 -0,95 0,07)	0,95	

Поэтому следует предположить, что облачность сформировалась в другом месте и была перенесена ветром. Для подтверждения этого предположения были рассмотрены метеорологические условия на станциях, расположенных западнее и северо-западнее Томска. В направлении на запад на станциях Актюбинск (50° с.ш., 57° в.д.) и Казань (55° с.ш., 49° в.д.) в течение ближайших к эксперименту дат 17 и 18 мая также наблюдалась низкая влажность. Но 16 мая над Казанью складывалась очень благоприятная ситуация для образования кристаллических облаков. На высотах 9–12 км влажность составляла 69–75% при температуре –55 ... –59 °С, направление ветра 270° и скорость около 50 км/ч. Учитывая небольшую разницу в широте (около 2°) и расстояние между Казанью и Томском (около 2000 км), можно допустить, что облака над Томском были результатом западного переноса. Но в день наблюдений ветер на высотах 9–12 км был северо-западный, поэтому рассматривали ситуацию над Тобольском (58° с.ш., 68° в.д., станция № 28275). Накануне измерений 18.05.2011 над Тобольском на высотах 9–12 км влажность составляла 55%, а температура –58 ... –60 °С. При таких условиях могла образоваться кристаллическая облачность и в течение суток она могла быть перенесена к Томску. Расстояние между городами около 1000 км. По мере переноса происходила конденсация паров воды на кристаллы льда, так что к моменту появления облачности над Томском уже сложилась ситуация с недостатком относительной влажности для пресыщения надо льдом.

В ночь с 30 на 31 мая 2011 г. при безоблачном небе примерно в 2:43 на высоте около 11 км появился слой с признаками зеркального отражения, но в 3:24 он исчез и больше не появился. Его геометрическая толщина составляла около 380 м, а отношение рассеяния $R(h)$ равнялось 22. Метеорологическая ситуация на высоте вблизи 11 км в это время была критической – температура –56 °С, а относительная влажность 50%, т.е. вблизи точки насыщения надо льдом. Судя по тому, что слой по концентрации частиц был довольно слабый, можно

предположить, что он был обусловлен какой-то локальной флуктуацией температуры или влажности или того и другого. Но тем не менее поляризационные характеристики рассеянного излучения ясно показывают присутствие зеркального отражения, о чем свидетельствует табл. 5.

Из-за быстрого изменения оптических характеристик облака и сильного фона дневного неба 18 июня 2011 г. корректно определить МОРС для данного случая не удалось. Однако факт отсутствия деполаризации при отражении от слоя на высоте 10 км был зафиксирован. Во время измерений на этой высоте была очень малая (35%) влажность. Условия для образования кристаллов отсутствовали. Очевидно, что данная облачность являлась продуктом западного переноса. Метеорологические данные по Казани и Актюбинску за период с 15 по 16.06.2011 подтверждают такую возможность.

Заключение

Лидарными измерениями поляризационных характеристик облаков верхнего яруса были обнаружены горизонтальные слои с небольшой оптической толщиной, но высоким коэффициентом обратного рассеяния и минимальной деполаризацией зондирующего излучения. Вертикальная протяженность данных слоев составляла 200–300 м, время существования – от нескольких десятков минут до нескольких часов. В некоторых случаях облако имело двухъярусную структуру (как 12 апреля и 19 мая), состоящую из двух горизонтальных слоев, расположенных друг над другом. Следует особо отметить, что наиболее выраженные признаки зеркального отражения наблюдались всегда в верхней части облака на высотах вблизи 11 км.

Наблюдения 12 и 19 апреля удачно совпали по времени с периодом начала формирования облачного слоя. Это позволило связать зарождение зеркального отражающего слоя с метеорологическими характеристиками воздуха на высотах его образования. Как и следовало ожидать, важнейшим условием является достижение определенного уровня пресыщения паров воды по отношению ко льду.

Кроме того, можно предположить, что пресыщение не должно быть слишком большим с тем, чтобы рост кристаллов происходил достаточно медленно. Это способствует образованию кристаллов с совершенными гранями. Матрицы обратного рассеяния от таких кристаллов в пределах экспериментальных ошибок имеют диагональный вид с диагональными элементами по модулю, близкими к единице. Это является признаком зеркального отражения и свидетельствует о том, что кристаллические частицы облаков имеют высокую степень ориентации плоских граней в горизонтальное положение. Такая ориентация характерна при гравитационном осаждении достаточно крупных (более 50 мкм) частиц при минимальном влиянии турбулентности как дезориентирующего фактора. Признаком отсутствия азимутальной ориентации являются равенство модулей элементов МОРС m_{22} и m_{33} , а также равенство нулю элементов m_{12} и m_{21} [15]. Такой ориентации способствует почти ламинарное движение воздушных потоков без существенных вертикальных градиентов и сдвигов направления ветра, что, собственно, и имело место во всех случаях наблюдений зеркально отражающих слоев.

По мере гравитационного осаждения частиц они попадают в нижерасположенные слои атмосферы, где, как правило, происходит повышение коэффициента смешивания (г/кг), т.е. увеличивается абсолютное содержание воды. В результате скорость роста частиц возрастает и при этом теряется совершенство формы кристаллов. Это само по себе способствует деполаризации рассеянного излучения. Кроме того, из-за потери симметрии может нарушаться аэродинамическое качество частиц, которое способствует ориентированию, вследствие чего происходит их дезориентация. Это может служить объяснением существенной деполаризации излучения при его рассеянии в нижерасположенном слое облачности, когда он примыкает к верхнему зеркально отражающему слою.

Эффект зеркального отражения, как предельный случай рассеяния ориентированными частицами, существенно отличается от рассеяния на случайно ориентированных ледяных частицах [6, 8, 15, 16]. Неучет этого обстоятельства может привести к серьезным ошибкам. Так, например, если в случае, представленном на рис. 2 и 3, взять отношение коэффициентов рассеяния и обратного рассеяния $\beta/\beta_\pi = 15$, найденное авторами работы [18] как среднее для рассеяния на случайно ориентированных частицах, то для слоя 10,65 км оптическую толщину следовало бы принять равной примерно 0,25, в то время как она на порядок меньше. Сказанное означает, что при мониторинге кристаллической облачности для оценки ее влияния на перенос солнечной радиации желательнее располагать теоретическими данными о рассеивающих свойствах ансамблей ориентированных частиц и иметь экспериментальную возможность для оценки состояния их ориентации. Последнее оказывается возможным при поляризационных измерениях полной матрицы

обратного рассеяния или наиболее информативных ее элементов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ: АВИЦП (проект № 2.1.1/13333), 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 гг. (ГК № 14.740.11) и РФФИ (грант № 11-05-01200а).

1. Мазина И.П., Шметер С.М. Облака, строение и физика образования. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 280 с.
2. Маховер З.М., Нудельман Л.А. Климатология облаков верхнего яруса. Обзор их микрофизических и оптических свойств // Радиационные свойства перистых облаков: Сб. статей. АН СССР, Институт физики атмосфер / Под ред. Е.М. Фейгельсон. М.: Наука, 1989. С. 6–31.
3. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: Изд. АН СССР, 1955. 450 с.
4. Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Ориентация частиц кристаллических облаков Ci : Ч. 1. Ориентация при падении // Оптика атмосф. и океана 2005. Т. 18, № 11. С. 963–967.
5. Borovoi A.G., Burnashov A.V., Cheng A.Y.S. Light scattering by horizontally oriented ice crystal plates // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 2007. V. 106, N 1–3. P. 11–20.
6. Бурнашов А.В., Боровой А.Г. Рассеяние света горизонтально ориентированными столбиками // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 11. С. 922–930.
7. Бурнашов А.В., Кустова Н.В. Рассеяние света преимущественно ориентированными ледяными кристаллами. I. Гексагональные пластинки // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 3. С. 199–204.
8. Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Поляризационные лидарные измерения характеристик атмосферных аэрозолей // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2. Новые приборы и методики измерений / Под общ. ред. М.В. Кабанова. Томск: Изд-во СО РАН, 1997. С. 34–58.
9. Platt C.M.R. Some microphysical properties of an ice cloud from lidar observation of horizontally oriented crystals // J. Appl. Meteorol. 1978. V. 17. P. 1220–1224.
10. Балин Ю.С., Кауль Б.В., Коханенко Г.П. Наблюдения зеркально отражающих частиц и слоев в кристаллических облаках // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 4. С. 293–299.
11. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
12. Самохвалов И.В., Стыкон А.П., Кауль Б.В., Шелефонтьев Д.И. Автоматизация измерений матриц обратного рассеяния облаков верхнего яруса на высотном лидаре ТГУ // XVI Междунар. симпоз. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск: ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН, 2009. С. 394–396.
13. Rassel P.B., Swisler J.Y., McCormick P.M. Methodology of error analysis and simulation of lidar aerosol measurements // Appl. Opt. 1979. V. 18, N 22. P. 3783–3790.
14. Зуев В.В., Ельников А.В., Бурлаков В.Д. Лазерное зондирование средней атмосферы / Под общ. ред. В.В. Зуева. Томск: РАСКО, 2002. 352 с.
15. Кауль Б.В. Симметрия матриц обратного рассеяния света в связи с ориентацией несферических аэрозоль-

- ных частиц // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13, № 10. С. 895–900.
16. *Кауль Б.В., Самохвалов И.В.* Трансформация матриц обратного рассеяния света кристаллических облаков при изменении зенитного угла зондирования // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 5. С. 405–411.
17. *Галлейский В.П., Кауль Б.В., Матвиенко Г.Г., Морозов А.М.* Угловая структура интенсивности света вблизи углов зеркального отражения от граней кристаллических частиц льда // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 2, № 7. С. 643–649.
18. *Wandinger U., Ansmann A., Reichardt J., Deshler T.* Determination of stratospheric aerosol microphysical properties from extinction and backscattering measurements with a Raman lidar // Appl. Opt. 1995. V. 34, N 36. P. 8315–8329.

I.V. Samokhvalov, B.V. Kaul', S.V. Nasonov, I.V. Zvyotenuk, I.D. Bryukhanov. **Backscattering matrix of the mirror-reflecting upper-level cloud layers formed by horizontally oriented crystal particles.**

The results of observations of upper-layer crystal clouds are analyzed in relation with meteorological situation at the heights of their location. Correlation is revealed between formation of layers with dominant orientation of particles, which provide for mirror reflection of radiation in the backward direction and saturation of water vapor over ice. Strong orientation is observed mainly in the upper part of the cloud layer. Orientation weakens with deposition of particles.