

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 535.36; 551.501.706

Влияние зеркальных облаков верхнего яруса на потоки рассеянной солнечной радиации в зените

И.Д. Брюханов^{1, 2}, С.В. Зуев³, И.В. Самохвалов^{1*}

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

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

³Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

Поступила в редакцию 2.02.2021 г.

Описываются методика и результаты комплексного эксперимента по исследованию влияния облаков верхнего яруса (ОВЯ) на поток рассеянной солнечной радиации. Оптические характеристики облаков (матрица обратного рассеяния света, оптическая толщина, отношение рассеяния) и их геометрические характеристики (высоты нижней и верхней границ, вертикальная мощность) определялись на основе лидарных данных, а поток рассеянной солнечной радиации над точкой стояния лидара измерялся зенитным пиранометром. Показано, что зеркальные ОВЯ, т.е. состоящие из преимущественно горизонтально ориентированных ледяных кристаллов, существенно уменьшают поток рассеянной солнечной радиации, приходящей к земной поверхности из призенитной области небосвода, по сравнению с ОВЯ с такой же оптической толщиной, но с хаотической ориентацией частиц.

Ключевые слова: облака верхнего яруса, аномальное обратное рассеяние, ориентированные ледяные кристаллы, поляризационный лидар, матрица обратного рассеяния света, зенитный пиранометр, рассеянная солнечная радиация; high-level clouds, anomalous backscattering, oriented ice crystals, polarization lidar, backscattering phase matrix, zenith pyranometer, diffuse solar radiation.

Введение

Одним из источников неопределенностей в расчетах радиационного баланса Земли является несовершенство оптических моделей облаков верхнего яруса (ОВЯ) в силу недостаточных знаний об их микрофизических характеристиках. Такие облака в основном состоят из несферических ледяных частиц [1, 2] размерами от десятков микрон до единиц миллиметров [3–5]. Малоизученным свойством ансамблей этих частиц является их способность принимать преимущественно горизонтальную пространственную ориентацию при определенных метеоусловиях. В климатических моделях атмосферы ориентация ледяных кристаллических частиц в перистых облаках и пространственно-временная изменчивость других характеристик ОВЯ не учитываются, потому что до сих пор не существует сертифицированных инструментальных методов их определения, особенно ориентации несферических частиц в атмосфере на высотах образования таких облаков.

Важная роль ОВЯ в формировании погоды в отдельных регионах и климата на Земле обще-

признана [6–8]. Прежде всего, это обусловлено их большой горизонтальной протяженностью, до тысячи километров [2], из-за чего они могут покрывать до 50% земной поверхности [9]. Несмотря на малую оптическую толщину, вклад перистой облачности в парниковый эффект наиболее значим на фоне остальных видов облаков [10, 11]. Степень ослабления приходящей солнечной радиации ОВЯ определяется параметрами их микроструктуры, а именно размерами, формой и пространственной ориентацией несферических ледяных частиц в них. Поэтому при решении задач переноса радиации в атмосфере задание микрофизической модели облаков, состоящих из преимущественно горизонтально ориентированных ледяных кристаллов, которая бы адекватно отражала их оптические характеристики, вызывает определенные трудности. Например, таким облакам, даже при малой оптической толщине, свойственны аномально высокие значения коэффициентов обратного рассеяния при перпендикулярном падении излучения на облачный слой, из-за чего они получили название зеркальных [12–15].

В существующих моделях атмосферы, в том числе в глобальной прогностической модели атмосферы Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), особенности микроструктуры ОВЯ не учитываются [8]. Вместо этого для расчета

* Илья Дмитриевич Брюханов (plyton@mail.tsu.ru); Сергей Викторович Зуев (zuev@imces.ru); Игнатий Викторович Самохвалов (lidar@mail.tsu.ru).

коэффициентов ослабления и оптической толщи облаков, содержащих ледяные частицы, используется теория Ми и вводится понятие «эффективного радиуса» частиц, основанное на равенстве какого-либо из параметров разнообразных по форме частиц и некоторой ледяной сферы. Такое упрощение является вероятной причиной значимых погрешностей в расчетах синооптических и климатических прогнозов.

Механизм образования зеркальных облаков и само явление исследуются рядом отечественных и зарубежных ученых. В условиях Западной Сибири примерно 30% всех наблюдаемых ОВЯ – зеркальные [15, 16]. Тем не менее влияние зеркальных облаков на потоки солнечной радиации и, как следствие, на радиационный баланс Земли до сих пор часто недооценивается и считается несущественным. Настоящая работа направлена на экспериментальное исследование закономерностей изменения потока рассеянной солнечной радиации, поступающей на земную поверхность от зенитной области небосвода, в зависимости от микроструктуры перистых облаков, что также позволяет косвенно оценивать изменение величины потока прямой солнечной радиации, проходящей сквозь зеркальные и незеркальные перистые облака.

1. Аппаратура, используемая в эксперименте

В настоящей работе использовались высотный поляризационный лидар НИ ТГУ и зенитный пиранометр ИМКЭС СО РАН. Преимуществом такого комплекса аппаратуры является предоставляемый им широкий набор характеристик атмосферы в целом и облаков верхнего яруса в частности. Совокупности данных в рамках этого набора не пересекаются: каждая из характеристик определяется с использованием либо лидара, либо пиранометра. Совместный анализ данных, получаемых обоими приборами, позволил оценить влияние ориентации кристаллических ледяных частиц в ОВЯ (определяемой лидаром) на поток рассеянной солнечной радиации из околозенитной области небосвода (оцениваемой по сигналам пиранометра). Кратко охарактеризуем каждый прибор.

Высотный матричный поляризационный лидар НИ ТГУ используется с 2008 г. для систематических измерений вертикальных профилей параметров атмосферы. Зондирование ОВЯ выполняется на нем регулярно в любое время суток при условии отсутствия осадков, порывистого ветра и низкой облачности.

Отличительной особенностью лидара является возможность экспериментального определения вертикального профиля полной матрицы обратного рассеяния света (МОРС) ОВЯ [17]. Для этого в атмосферу последовательно направляются импульсы излучения с четырьмя различными состояниями поляризации (три линейных и одно циркулярное), для каждого из них измеряется состояние поляри-

зации рассеянного назад излучения (вектор-параметр Стокса). Таким образом, в каждом цикле зондирования измеряется 16 профилей интенсивности, по которым рассчитываются 16 элементов МОРС. Измеряются также и другие важные характеристики облаков: оптические – отношение рассеяния и оптическая толщина, и геометрические – высоты нижней и верхней границ, вертикальная мощность [18].

Лидар ориентирован вертикально, в зенитном направлении. В качестве источника оптического излучения используется Nd:YAG-лазер с рабочей длиной волны 532 нм, энергией импульса до 300 мДж и частотой следования импульсов 10 Гц. На выходе приемного оптического канала лидара установлена призма Волластона, которая разделяет принимаемое рассеянное назад излучение на два взаимно ортогонально поляризованных пучка. Эти потоки излучения регистрируются двумя фотоэлектронными умножителями, работающими в режиме счета фотонов с временным стробированием сигнала, что дает возможность задавать высотное разрешение лидара от 37,5 до 150 м. Для подавления активной помехи обратного рассеяния из ближней зоны лидара (до 3 км) перед фотоумножителями установлены электрооптические затворы [19], которые позволяют сохранять линейность их характеристик даже при работе лидара в дневное время при максимальной энергии зондирующего импульса (300 мДж). Другие методические особенности оценки мощности лидарного сигнала от облаков в условиях влияния фоновой помехи дневного неба описаны в работах [16, 20].

Регистрация лидарных сигналов, необходимых для определения МОРС, ведется в режиме «параллельного» накопления 16 массивов одноэлектронных импульсов. Он выгодно отличается от «последовательного», при котором поочередно накапливаются лидарные сигналы для определения каждой из четырех компонент вектора Стокса обратного рассеянного излучения при зондировании сначала излучением с первым из используемых состояний поляризации, затем со вторым и т.д. В результате разные элементы МОРС определяются для разных участков облака. «Параллельный» режим позволяет накапливать массивы одноэлектронных импульсов от одного и того же участка облака для всех 16 элементов МОРС. Благодаря этому уменьшается ошибка определения элементов МОРС, вызванная изменением исследуемого облака в течение серии лидарных измерений. Отметим также, что параллельное накопление сигналов позволяет провести продолжительный непрерывный сеанс зондирования ОВЯ, а затем выбрать для обработки наиболее интересные интервалы времени. Применение такой процедуры позволило установить, что одно и то же протяженное облако может содержать как зеркальные, так и незеркальные области [21].

Для оценки метеорологической обстановки на высотах исследуемых ОВЯ использовались данные измерений ближайших к Томску аэрологических станций, расположенных в Колпашево (WMO 29231) и Новосибирске (WMO 29634). Несмотря на удаленность

аэрологических станций друг от друга и от Томска, метеорологическая обстановка на высотах формирования ОВЯ по данным обеих станций обычно отличается незначительно. Метеоданные находятся в свободном доступе на сайте Вайомингского университета (США), который содержит результаты измерений, выполняемых по всему земному шару с 1973 г. [17, 22]. Процесс поиска и загрузки метеоданных автоматизирован.

Зенитный пиранометр ИМКЭС СО РАН.

Измеряемый у поверхности Земли поток солнечной радиации является суммой прямой и рассеянной компонент. Рассеянная радиация формируется в результате рассеяния прямой радиации атмосферными газами, водяными каплями облаков и туманов, ледяными кристаллами облаков и твердыми частицами аэрозолей. Более 99% всей входящей прямой и рассеянной солнечной радиации сосредоточено в коротковолновой области спектра от 300 до 4000 нм [23].

Величина рассеянной радиации зависит от прозрачности (мутности) атмосферы при ясном небе и от оптических свойств и количества облаков при облачной атмосфере (в первую очередь в околозенитной зоне). Ее доля в суммарной радиации при ясном небе составляет в среднем примерно 15–20% как для теплого, так и для холодного периодов года [24]. Рассеянная радиация минимальна при наличии низких и плотных слоисто-дождевых облаков *Ns* и при сплошном покрове кучево-дождевых облаков *Cb*. Большая доля рассеянной радиации (до 50% от суммарной) поступает при сплошной высокослоистой туманообразной просвечивающей облачности *As neb. trans.*, а также при 7–9 баллах кучевой плоской *Cu hum.* и средней *Cu med.* облачности [25–27]. Перистые облака, ввиду их значительной высоты над точкой измерения, в меньшей степени влияют на поток рассеянной радиации, чем другие. Исключение может составлять перистослоистая облачность *Cs*, при которой почти вся измеряемая стандартным способом рассеянная радиация поступает со стороны солнечного диска, вокруг которого создается ореол большого размера.

При стандартном способе измерения рассеянной радиации используется пиранометр с защитным солнечным экраном, который нацеливается на Солнце с помощью специальных следящих устройств (трекеров) или вручную, что значительно усложняет задачу непрерывного мониторинга рассеянной радиации. В настоящей работе для исследования влияния структуры перистой облачности в околозенитной зоне на поток рассеянной радиации использовался оригинальный способ относительной оценки потоков рассеянного излучения, описанный в работе [28]. Конструктивно зенитный пиранометр (Z-пиранометр) представлял собой стандартный прибор М-115М, помещенный в трубу диаметром 110 мм, высота которой обеспечивала поле зрения в околозенитном направлении в пределах $\pm 30^\circ$. Такая конструкция позволяет полностью исключить влияние прямой радиации и большей части рассеянной, по-

ступающей из околосолнечного ореола (для рассмотренного далее дня 28 мая 2017 г. зенитный угол Солнца в полдень для широты Томска составляет около $37,7^\circ$). Отметим, что в рамках решаемой задачи не преследовалась цель определения абсолютного значения потока рассеянного излучения. Важно было знать относительное изменение потока рассеянной радиации в случаях, когда над лидаром наблюдается зеркальное облако и незеркальное.

2. Методика приведения лидарных и актинометрических данных к единой временной шкале

Используемые в работе лидар и Z-пиранометр располагались в пределах Томска, расстояние между ними составляло около 6 км. Перенос обоих приборов на одну площадку был невозможен по следующим причинам: лидар является уникальной научной установкой и не может быть перемещен в какое-либо другое место; пиранометр размещен на площадке ИМКЭС СО РАН и был задействован в других проектах, выполняемых одновременно.

Поскольку и лидар, и пиранометр направлены в зенит и регистрируют соседние участки облачного поля, для сопоставления результатов измерений необходимо учитывать время и направление дрейфа облаков. Другими словами, данные обоих приборов необходимо привести к единой временной шкале. Методика такой коррекции была разработана и апробирована ранее [29]. Она основана на предположении, что свойство зеркальности облачного слоя может сохраняться достаточно долго. В нашем эксперименте [30] зеркальный слой перистого облака наблюдался более двух часов. Высоты границ исследуемых облаков оцениваются на основе анализа лидарных данных. Скорость и направление движения облачного поля определяются по данным измерений аэрологических станций, расположенных в Колпашево и Новосибирске. Вертикальные профили метеорологических величин измеряются на обеих станциях дважды в сутки (00:00 и 12:00 UTC).

В случаях, когда направление ветра не совпадает с направлением «пиранометр–лидар» (или обратным ему), траектория дрейфа облака под действием ветра на карте раскладывается на две составляющие. Одна из них имеет направление, совпадающее с направлением ветра, и проходит через точку расположения пиранометра, а вторая направлена перпендикулярно первой и проходит через точку расположения лидара. Для такого разложения рассчитываются координаты точки пересечения этих компонент с использованием известных формул вычисления дистанции и азимута между двумя точками на основе их координат [31]:

$$d_{AB} = R_3 \arccos(\sin(\text{Lat}_A) \sin(\text{Lat}_B) + \cos(\text{Lat}_A) \cos(\text{Lat}_B) \cos(\text{Lng}_A - \text{Lng}_B)),$$

$$\theta_{AB} = \arctg\left(\frac{\sin(\text{Lng}_B - \text{Lng}_A)\cos(\text{Lat}_B)}{\cos(\text{Lat}_A)\sin(\text{Lat}_B) - \sin(\text{Lat}_A)\cos(\text{Lat}_B)\cos(\text{Lng}_B - \text{Lng}_A)}\right),$$

где d_{AB} – расстояние между точками A и B ; R_3 – средний радиус Земли (6371 км); Lat_A и Lng_A , Lat_B и Lng_B – широта и долгота точек A и B соответственно; θ_{AB} – азимут от точки A на точку B .

Время дрейфа исследуемого участка облачного поля по направлению «лидар–пиранометр» оценивается на основе вычисления проекции вектора скорости ветра, определенного по данным аэрологических станций на высоте исследуемого облака, на направление «лидар–пиранометр» и известного расстояния между точками расположения лидара и Z-пиранометра. При этом предполагается, что в заданный момент времени микрофизические свойства исследуемого облака в рассчитанной условной точке и в местах расположения лидара и Z-пиранометра одинаковые. Это предположение вполне оправдано, так как расстояние между лидаром и Z-пиранометром не превышает 6 км, а время перемещения облачного поля при средних значениях скорости ветра 20 м/с на высотах образования ОВЯ составляет не более 5 мин. Кроме того, принимается, что характеристики ветра на высотах формирования ОВЯ за время дрейфа аэрозольного образования от одного прибора к другому постоянны. На рис. 1 приведен пример условной точки, координаты которой рассчитаны для лидарно-пиранометрического эксперимента 28.05.2017 г.

пользовались средние значения направления и скорости ветра по результатам утренних и вечерних измерений станции в Новосибирске.

Средняя высота ОВЯ, зарегистрированных в лидарных измерениях около полудня, составила 6,6 км – это значение использовалось для оценки характеристик ветра. Средние направление (метеорологическое, т.е. указывающее, откуда дует ветер) и скорость ветра равны 232 и 15 м/с. Оценка условной дистанции дрейфа (расстояние от рассчитанной условной точки до точки расположения Z-пиранометра) составила 5,8 км, длительность – 6 мин. Эта величина прибавлялась ко времени лидарных измерений для приведения их к единой временной шкале с данными Z-пиранометра.

3. Результаты и их обсуждение

Рассмотрим результаты упомянутого лидарно-пиранометрического эксперимента, выполненного 28.05.2017 г. Для удобства будем использовать единую временную шкалу – Z-пиранометра. Лидарные измерения выполнялись в течение нескольких интервалов времени в разные часы. На рис. 2 представлен поток рассеянной солнечной радиации по данным Z-пиранометра (выходное напряжение, мВ).



Рис. 1. Расположение лидара, Z-пиранометра и условной точки, рассчитанной для эксперимента 28.05.2017 г. (изображение получено в геоинформационной системе Google Earth)

Лидарные измерения выполнялись в светлое время суток, а потому для оценки параметров ветра использовались аэрологические данные, полученные на упомянутых станциях утром и вечером в день эксперимента. Данные вечерних измерений шарзондом, запущенным со станции в Колпашево 28.05.2017 г., доступны только для высот 0–2 км, поэтому для оценки параметров дрейфа ОВЯ ис-

Моменты начала и завершения интервалов регистрации лидаром зеркальных и незеркальных областей перистого облака обозначены вертикальными линиями (с учетом временной коррекции). Для различия этих интервалов введено их буквенное обозначение.

Зеркальность исследуемого облака и его отдельных участков оценивалась согласно следующим критериям: отношение рассеяния $R \geq 10$, оптическая

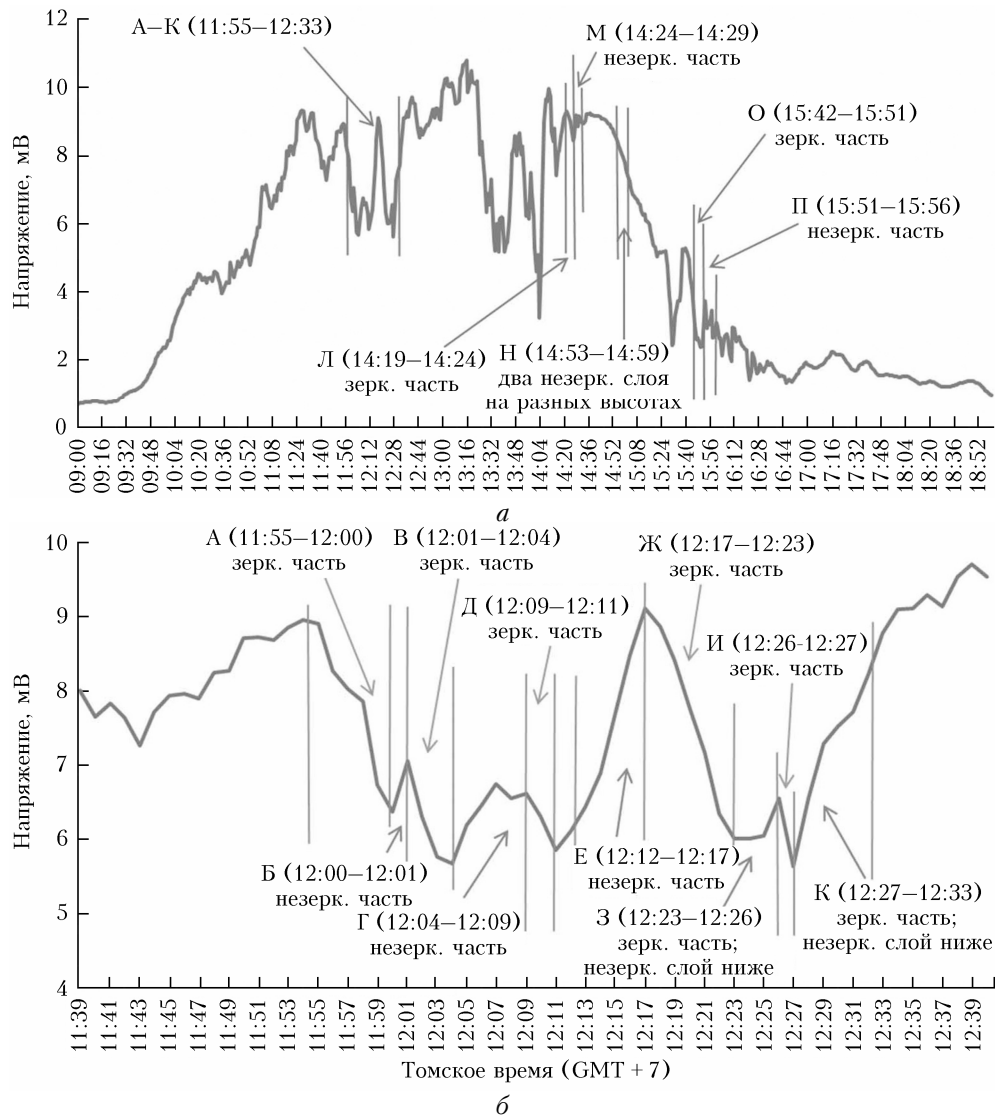


Рис. 2. Поток рассеянной солнечной радиации в течение дня 28.05.2017 г. по данным Z-пиранометра: а – в светлое время суток, б – в интервалы времени А–К (см. таблицу)

Оптические характеристики локальных областей исследуемых ОВЯ (28.05.2017 г.)

Временной интервал	Отношение рассеяния	Оптическая толщина	Элемент m_{44} МОРС	Описание
А (11:55–12:00)	13,32	0,01	-0,81	Зеркальная часть
Б (12:00–12:01)	7,60	0,58	-0,44	Незеркальная часть
В (12:01–12:04)	22,40	0,25	-0,98	Зеркальная часть
Г (12:04–12:09)	6,75	0,36	-0,38	Незеркальная часть
Д (12:09–12:11)	17,91	0,32	-0,48	Зеркальная часть
Е (12:12–12:17)	4,36	0,62	-0,37	Незеркальная часть
Ж (12:17–12:23)	25,70	0,02	-0,61	Зеркальная часть
З (12:23–12:26)	102,79	0,05	-0,64	Зеркальная часть; незеркальный слой ($A_c \sim 3$ км)
И (12:26–12:27)	110,98	0,11	-0,69	Зеркальная часть
К (12:27–12:33)	85,05	0,48	-0,94	Зеркальная часть; незеркальный слой (12:27–12:29: A_c 2,5–3,9 км; 12:29–12:33: $A_c \sim 2,7$ км)
Л (14:19–14:24)	62,82	0,05	-0,91	Зеркальная часть
М (14:24–14:29)	4,93	0,19	-0,35	Незеркальная часть
Н (14:53–14:59)	9,70	0,36	-0,83	Два незеркальных слоя (~7,5 и ~11 км)
О (15:42–15:51)	45,54	0,41	-0,84	Зеркальная часть
П (15:51–15:56)	8,89	1,61	-0,43	Незеркальная часть

толща $\tau \leq 1$ и элемент МОРС $m_{44} \leq -0,4$ [17, 18]. Время, когда лидар не регистрировал ОВЯ, исключено из рассмотрения. Оптические характеристики локальных частей облаков, измеренные в каждый из интервалов, приведены в таблице. Для оценки оптических характеристик локальных частей исследуемых облаков лидарные сигналы суммировались по указанным интервалам и анализировались как полученные в течение отдельных серий измерений.

Две серии лидарных измерений, каждая по 16 мин 40 с, были выполнены с 11:55 по 12:33 (см. рис. 2 и 3, а также таблицу, интервалы А–Д и Е–К). Как следует из анализа данных таблицы, исследуемое облако состояло из чередующихся зеркальных и незеркальных областей. Этот интервал более подробно показан на рис. 2, б. На рис. 3 представлена временная динамика вертикального профиля интенсивности лидарного сигнала в каждой серии. Вертикальными линиями обозначены границы интервалов. Интенсивность лидарного сигнала, зарегистрированного на соответствующей высоте в соответствующее время, показана цветом: черный соответствует минимальной интенсивности, а чем ближе к белому, тем ближе интенсивность к максимальной, зарегистрированной в течение рассматриваемой серии лидарных измерений.

На высотах наблюдавшихся около полудня облаков (7–10 км) метеопараметры менялись в течение дня в следующих диапазонах: температура – от -56 до -27 °С, точка росы – от -66 до -33 °С, относительная влажность воздуха – от 22 до 62%. На высотах ОВЯ, зарегистрированных в послеобеденное время (5–7 км), температура менялась от -31 до -15 °С, точка росы – от -46 до -16 °С, относительная влажность воздуха – от 11 до 67%. Геометрические характеристики зарегистрированных обла-

ков принимали следующие значения: высота нижней границы – $5,2 \div 7,9$ км; высота верхней границы – $7,1 \div 10,4$ км; вертикальная мощность – $0,9 \div 2,4$ км.

При совместном анализе рис. 2, б и данных таблицы обращает на себя внимание интересная закономерность: в течение интервалов, соответствующих регистрации лидаром зеркальных локальных областей ОВЯ (А, В, Д, Ж, И), поток рассеянной радиации в зените уменьшается и, напротив, возрастает при появлении (по лидарным данным) незеркальных частей облака в околосенитной зоне.

Исключением являются интервалы З и К, в течение которых околосенитная часть облака (слой на высоте 7,5 км) идентифицировалась как зеркальная (строго говоря, зеркальность наблюдалась в течение интервалов Ж–К), однако одновременно с этим наблюдался незеркальный слой на высотах 3–4 км. О его наличии свидетельствуют всплески интенсивности лидарного сигнала на соответствующих высотах (рис. 4). Они слабо заметны, так как интенсивность сигнала от рассматриваемого перистого облака на высоте $\sim 7,5$ км на графиках значительно больше, чем на высотах среднего яруса.

Поскольку интервал З был примерно в 2 раза короче интервала К (3 и 6 мин соответственно), второй из них разделен на рис. 4 на две части (рис. 4, б и в). Временная граница между этими частями соответствует времени увеличения угла наклона кривой потока рассеянной радиации (12:29 на рис. 2, б), вызванного, по всей видимости, уменьшением геометрической толщины (см. рис. 3 и 4) и оптической толщи нижнего слоя с одновременным усилением зеркальных свойств ОВЯ.

Выводы для интервалов А–К подтверждаются и данными, полученным в интервалы времени Л–П. Так, наличие локальной зеркальной области ОВЯ

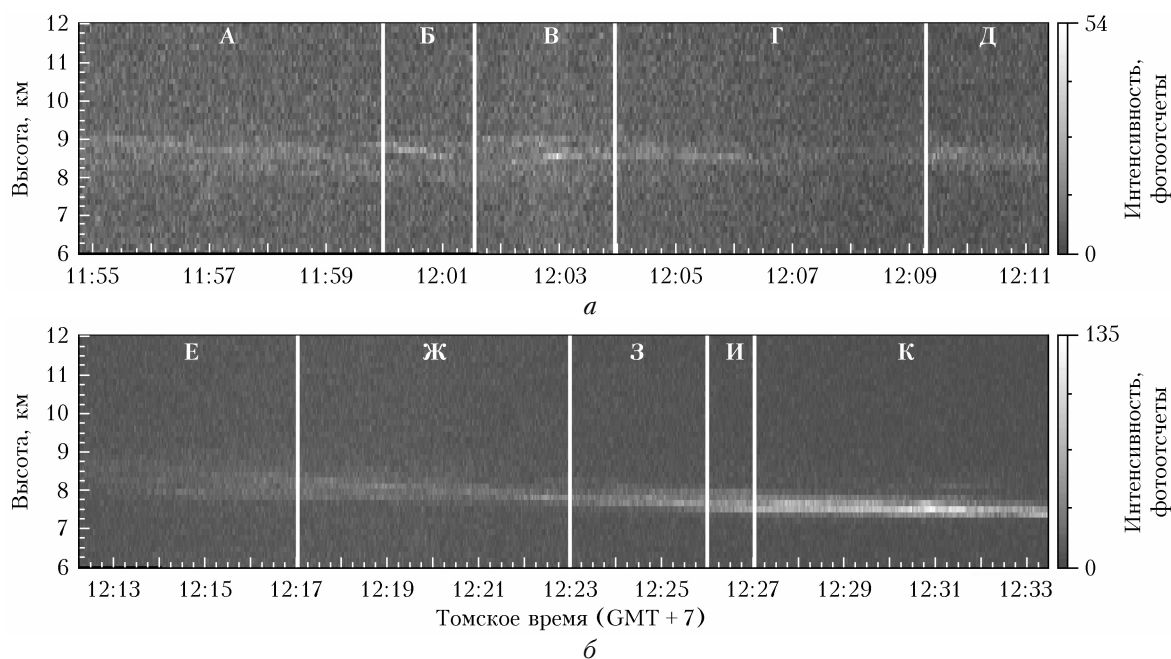


Рис 3. Временная динамика вертикального профиля интенсивности лидарного сигнала (28.05.2017 г.): интервалы А–Д (а) и Е–К (б)

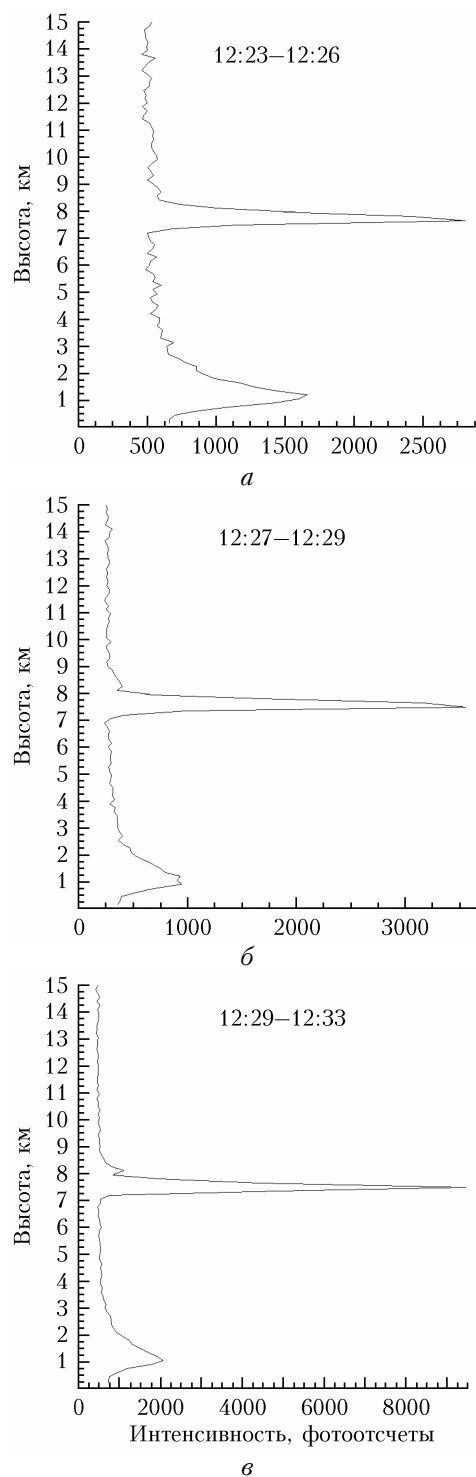


Рис. 4. Вертикальные профили лидарного сигнала (28.05.2017 г.): интервалы З (а) и К (б, в)

приводит к уменьшению потока рассеянной солнечной радиации в зените, тем более резко, чем ярче проявление зеркальных свойств. Этот эффект можно объяснить тем, что существенная доля падающей на зеркальную область облака прямой радиации отражается в космос. Незеркальные аэрозольные образования в поле зрения пиранометра обуславливают заметное увеличение потока рассеянной радиации.

Одновременная регистрация зеркальных частей ОВЯ и незеркальных облаков среднего яруса приводит к более резкому росту этого параметра, что можно объяснить преимущественным влиянием на него более низких облаков.

Заключение

В ходе комплексного лидарно-пиранометрического эксперимента зарегистрированы протяженные перистые *Ci* и перисто-слоистые *Cs* облака (с 11:55 до 15:56 по Томскому времени). Выполнен совместный анализ лидарных, метеорологических и пиранометрических данных. Выделены локальные зеркальные и незеркальные области наблюдавшихся облаков ОВЯ. Поперечные размеры зеркальных областей облака лежат в диапазоне 1÷6 км. Показано, что зеркальные области перистого облака, содержащие горизонтально ориентированные кристаллы льда, существенно уменьшают потоки рассеянной солнечной радиации в зените по сравнению с незеркальными участками этого же облака, даже в случае, когда оптическая толщина зеркальной области облака меньше, чем незеркальная.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-45-700008) и в рамках государственного задания Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН.

1. *International Cloud Atlas*. Vol. 1: Manual on the Observation of Clouds and Other Meteors. WMO, 1975. 155 p.
2. *Радиационные свойства перистых облаков* / под ред. Е.М. Фейгельсон. М.: Наука, 1989. 223 с.
3. *Волковицкий О.А., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г.* Оптические свойства кристаллических облаков. Л.: Гидрометеониздат, 1984. 198 с.
4. *Baran A.* A review of the light scattering properties of cirrus // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2009. V. 110. P. 1239–1260. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2009.02.026.
5. *Um J., McFarquhar G.M., Hong Y.P., Lee S.-S., Jung C.H., Lawson R.P., Mo Q.* Dimensions and aspect ratios of natural ice crystals // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15, N 7. P. 3933–3956. DOI: 10.5194/acp-15-3933-2015.
6. *Liou K.N.* Influence of cirrus clouds on weather and climate processes: A global perspective // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 103. P. 1799–1805.
7. *Ritchie G.D., Still K.R., Rossi J., III, Bekkedal M.Y.-V., Bobb A.J., Arfsten D.P.* Biological and health effects of exposure to kerosene-based jet fuels and performance additives // *J. Toxic. Environ. Health, Part B*. 2003. V. 6, N 4. P. 357–451. DOI: 10.1080/10937400390198655.
8. *Дмитриева-Араго Л.Р., Трубина М.А., Толстых М.А.* Роль фазового состава облаков в формировании потоков коротковолновой и длинноволновой радиации // *Тр. Гидрометцентра России*. 2017. Вып. 363. С. 19–34.
9. *Heymsfield A.J., Krämer M., Luebke A., Brown P., Cziczó D.J., Franklin C., Lawson P., Lohmann U., McFarquhar G., Ulanowski Z., Van Tricht K.* Cirrus clouds // *Meteor. Monogr.* 2017. V. 58. DOI: 10.1175/amsmonographs-d-16-0010.1.
10. *Wylie D.P., Menzel W.P., Woolf H.M., Strabala K.I.* Four years of global cirrus cloud statistics using HIRS // *J. Clim.* 1994. V. 7, N 12. P. 1972–1986.

11. Воробьева В.В., Володин Е.М. Численное моделирование воздействия на климат путем изменения свойств облаков верхнего яруса в климатической модели ИВМ РАН // Тр. Гидрометцентра России. 2017. Вып. 363. С. 5–18.
12. Shanks J.G., Lynch D.K. Specular scattering in cirrus clouds // Proc. SPIE. 1995. V. 2578. P. 227–238. DOI: 10.1117/12.228943.
13. Borovoi A., Kustova N. Specular scattering by preferentially oriented ice crystals // Appl. Opt. 2009. V. 48, N 19. P. 3878–3885.
14. Balin Yu.S., Kaul B.V., Kokhanenko G.P., Penner I.E. Observations of specular reflective particles and layers in crystal clouds // Opt. Express. 2011. V. 19, N 7. P. 6209–6214. DOI: 10.1364/OE.19.006209.
15. Noel V., Chepfer H. A global view of horizontally oriented crystals in ice clouds from Cloud – Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO) // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. P. D00H23. DOI: 10.1029/2009JD012365.
16. 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.
17. 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, № 5. С. 403–411.
18. Самохвалов И.В., Брюханов И.Д., Насонов С.В., Животенюк И.В., Стыкон А.П. Исследование оптических характеристик перистых облаков с аномальным обратным рассеянием // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 8. С. 63–67.
19. Kirillov N.S., Samokhvalov I.V. Application of an electro-optical shutter for strobing of lidar signals // Proc. SPIE. 2014. V. 9292, N 92922D. DOI: 10.1117/12.2074605.
20. Волков С.Н., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Методика обработки результатов лидарных измерений матриц обратного рассеяния света // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15, № 11. С. 982–986.
21. Samokhvalov I.V., Bryukhanov I.D., Ni E.V. Temporal variability of the specularly of high-level clouds according to the data on laser polarization sensing // Proc. SPIE. 2020. V. 11560, N 115604C. DOI: 10.1117/12.2575529.
22. University of Wyoming [Electronic resource]. URL: <http://weather.uwyo.edu> (last access: 20.01.2021).
23. Руководство гидрометеорологических станциям по актинометрическим наблюдениям. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 222 с.
24. Абакумова Г.М., Горбаренко Е.В. Прозрачность атмосферы в Москве за последние 50 лет и ее изменения на территории России. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 192 с.
25. Абакумова Г.М., Незваль Е.И., Шиловецова О.А. Влияние кучевой облачности на рассеянную и суммарную ультрафиолетовую, фотосинтетически активную и интегральную солнечную радиацию // Метеорол. и гидрол. 2002. № 7. С. 29–40.
26. Zuev S.V., Krasnenko N.P., Kartashova E.S. Cloud identification using actinometrical data // IOP Conf. Ser. Earth Environm. Sci. 2017. V. 96, N 1. P. 012013. DOI: 10.1088/1755-1315/96/1/012013.
27. Zuev S.V., Krasnenko N.P., Kartashova E.S. Using actinometric data for identification of cumulus clouds // Proc. SPIE. 2017. V. 10466, N 1046638. DOI: 10.1117/12.2286585.
28. Зуев С.В. Многоэлементный ориентированный измеритель характеристик солнечного излучения // Оптика атмосфер. и океана. 2019. Т. 32, № 6. С. 504–508.
29. Samokhvalov I.V., Bryukhanov I.D., Zuev S.V., Zhivotenyuk I.V. Effect of specular high-level clouds on solar radiation fluxes according to the data of the lidar-actinometric experiment // Proc. SPIE. 2020. V. 11560, N 115604D. DOI: 10.1117/12.2575530.
30. Samokhvalov I.V., Bryukhanova V.V., Bryukhanov I.D., Zhivotenyuk I.V., Ni E.V., Zuev S.V., Cheredko N.N. Optical and radiative characteristics of cirrus from the data of three-year lidar and actinometric research at Tomsk State University // Russ. Phys. J. 2020. V. 63, N 4. P. 616–624. DOI: 10.1007/s11182-020-02074-8.
31. Movable Type Ltd. URL: <http://www.movable-type.co.uk> (last access: 20.01.2021).

I.D. Bryukhanov, S.V. Zuev, I.V. Samokhvalov. Effect of specular high-level clouds on scattered solar radiation fluxes at the zenith.

The technique and results of a complex experiment on studying the effect of high-level clouds (HLCs) on the scattered solar radiation flux are described. The optical characteristics (scattering ratio, optical depth, and backscattering phase matrix) and geometric characteristics (the lower and upper boundary altitudes and vertical thickness) of clouds were estimated based on the lidar data, and the scattered solar radiation flux in the zenith direction was measured with a pyranometer. It is shown that specular HLCs, i.e., consisting of preferably horizontally oriented ice crystals, significantly reduce the fluxes of scattered solar radiation incident on the Earth's surface in comparison with HLCs with approximately the same optical depth, but with chaotically orientated particles.