

УДК 551.521.3

Статистическое моделирование распространения импульсов космических лидаров в перистых облаках с учетом многократного рассеяния

Т.В. Русскова[✉], В.А. Шишко*

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

Поступила в редакцию 09.11.2023;
после доработки 15.12.2023;
принята к печати 07.06.2024

При лазерном дистанционном зондировании кристаллических облаков возникает проблема учета многократного рассеяния излучения, влияющего на достоверность интерпретации результатов измерений. Представлены оценки вклада многократного рассеяния излучения в эхосигнал космического лидара. Решение нестационарной задачи распространения лазерного излучения в сплошной перистой облачности с разделением по кратностям взаимодействия получено методом Монте-Карло при разных значениях оптико-микроструктурных характеристик облаков (оптическая толщина, форма и размер ледяных частиц) и параметров лидара (удаленность от объекта зондирования, расходимость излучения, угол поля зрения приемника). Численные эксперименты проведены с учетом допустимого диапазона значений параметров эксплуатируемых либо перспективных космических лидарных систем. Обсуждаются особенности формирования обратного сигнала при вводе в модель атмосферы аэрозольных и рэлеевских частиц, а также нижележащего облачного слоя. Результаты моделирования свидетельствуют о высокой чувствительности части эхосигнала, обусловленной многократно рассеянным излучением, к варьируемым параметрам, что необходимо учитывать при постановке и решении обратных задач.

Ключевые слова: космический лидар, дистанционное зондирование, многократное рассеяние, перистые облака, численное моделирование, метод Монте-Карло; space-borne lidar, remote sensing, multiple scattering, cirrus cloud, numerical simulation, Monte Carlo method.

Введение

Современные средства дистанционного зондирования Земли из космоса позволяют оперативно и в глобальном масштабе наблюдать за состоянием атмосферы для решения различных задач мониторинга, метеорологии и климатологии. Измерения на основе лазерных источников позволяют получать более детальную информацию о характеристиках атмосферы по сравнению с пассивными радиолокационными системами. Для исследования облачного покрова Земли и обнаружения различных атмосферных частиц в 1994 г. NASA был выведен на орбиту лидар LITE [1]. За ним последовал первый советский лидар БАЛКАН [2], затем ALISSA [3], CATS [4] и др. С помощью действующего до недавнего времени поляризационного лидара CALIOP, размещенного на борту спутника CALIPSO, накоплен значительный объем данных об облачности, кристаллах льда, жидких и твердых частицах атмосферных аэрозолей в толще облаков [5].

Перистые облака являются в настоящее время наименее изученной и в то же время одной из наиболее часто встречающихся форм облачности. Важность исследования перистых облаков, горизонтальная протяженность которых иногда достигает нескольких тысяч километров, обусловлена не только их вкладом в формирование радиационного баланса Земли, но и тем, что в верхней тропосфере происходят разнообразные физические и динамические процессы облакообразования [6]. Несмотря на большое количество инструментов, позволяющих проводить наблюдения за перистыми облаками как с Земли, так и из космоса, проблема интерпретации получаемых данных в полной мере не решена. В отличие от частиц жидкокапельных облаков у ледяных кристаллов гораздо больше неизвестных параметров, а широкий диапазон их размеров затрудняет применение традиционных вычислительных методов. Решением прямых задач светорассеяния на кристаллических частицах до сих пор заняты ведущие исследовательские коллективы [7, 8].

Для определения оптико-геометрических характеристик облаков используются различные алгоритмы обращения лидарных данных [9, 10]. В большинстве своем применяемые схемы опираются

* Татьяна Владимировна Русскова (btv@iao.ru); Виктор Андреевич Шишко (sva@iao.ru).

на решение уравнения лазерной локации в приближении однократного рассеяния. Однако если индикатриса рассеивающей среды сильно вытянута в направлении вперед, что характерно для перистых облаков, или оптическая плотность зондируемого объекта превышает некоторое пороговое значение, или наблюдения проводятся на значительном удалении от объекта (в сотнях километров), то пренебрежение многократным рассеянным излучением может привести к неверной интерпретации измерений [10, 11], в частности к недооценке коэффициента ослабления до 200% [10]. Пределы применимости приближенных методов учета высоких кратностей рассеяния при этом не всегда ясны. Ограниченность использования известного однопараметрического метода коррекции многократного рассеяния в перистых облаках продемонстрирована, например, в [12].

Исследования эффектов многократного рассеяния в лидарных измерениях ведутся на протяжении нескольких десятилетий [12–15]. Показано, что составляющие сигнал вклады разных порядков рассеяния зависят от расстояния до рассеивающей среды, от глубины проникновения сигнала, параметров зондирования, свойств среды. Однако литературные источники, сообщающие о результатах комплексных исследований влияния кратностей рассеяния лазерного излучения на несферических частицах перистых облаков на принимаемый космическим лидаром эхосигнал, нам не известны. Большинство опубликованных статей посвящено тому или иному аспекту проблемы [14, 16].

Цель настоящей работы, направленной на продолжение изучения закономерностей формирования лидарного сигнала в перистых облаках [17], состояла в вычислении и анализе вклада излучения с разной кратностью рассеяния в суммарный эхосигнал космического лидара в зависимости от оптико-геометрических условий численного эксперимента, имитирующего процесс лазерного зондирования перистой облачности. Расчеты проведены для длины волны $\lambda = 0,532$ мкм.

1. Постановка задачи

Рассматривается плоскопараллельная вертикально неоднородная модель атмосферы, в которой расположен слой сплошной перистой облачности толщиной d . Нижняя граница слоя находится на высоте h над поверхностью Земли. Оптические свойства рассеивающей среды описываются коэффициентами ослабления σ и рассеяния σ_s , а также индикатрисой рассеяния излучения $g(\theta)$, где θ – угол рассеяния.

Моностатическая система оптического излучения, установленная на спутниковом носителе и направленная в нади́р, посылает из точки $r_0(x_0, y_0, z_0 = H)$ в момент времени t_0 импульс пиковой мощностью P_0 и длительностью Δt в телесном угле 2ψ . В момент времени $t > t_0$ в приемный телескоп с апертурой радиусом R_ϕ и углом поля зрения (УПЗ) 2ϕ поступает сигнал от объема рассеивающей среды. Мощность однократно рассеянного назад излучения $P_1(z)$, по-

ступающего на вход приемной системы лидара с расстояния z , может быть рассчитана аналитическим путем с помощью уравнения лазерной локации [18]:

$$P_1(z) = P_0 \frac{\pi R_\phi^2}{(H-z)^2} \frac{c \Delta t}{2} \frac{\sigma_s(z) g_z(\pi)}{4\pi} e^{\left\{ -2 \int_z^H \sigma(x) dx \right\}}, \quad 0 < z \leq H, \quad (1)$$

где c – скорость света в среде; $g_z(\pi)$ – индикатриса рассеяния в направлении назад. Уравнение (1) справедливо только для оптически тонких сред. В облаках, туманах, плотных дымаках лазерное излучение, прежде чем попасть на приемник, рассеивается не единожды, что приводит к необходимости учитывать при интерпретации мощности полного эхосигнала $P(z)$ потоки энергии более высоких кратностей рассеяния. В таких случаях $P(z)$ определяется аддитивными составляющими $P(z) = P_1(z) + P_N(z)$, $0 < z \leq H$, где $P_N(z)$ – добавка, обусловленная многократно рассеянным излучением. В настоящей работе для расчета временной структуры лидарного сигнала с учетом распределения по кратностям рассеяния излучения использована модель MSLRS, представленная в [17] и модифицированная для вертикально неоднородной атмосферы. Модель создана на основе алгоритмов метода Монте-Карло [19].

Предполагается, что атмосфера вертикальной протяженностью 100 км состоит из аэрозольных и рэлеевских частиц. Оптические свойства аэрозоля определяются тремя типами смесей частиц модели ОПАС [20] – continental average (0–2 км), continental (2–12 км) и stratospheric (12–100 км). При расчете коэффициентов рассеяния излучения рэлеевскими частицами использована метеомодель лета средних широт AFGL [21]. Аэрозольная и рэлеевская оптические толщ равны 0,155 и 0,1116 соответственно ($\lambda = 0,532$ мкм). Для упрощения интерпретации результатов моделирования альbedo поверхности полагалось равным нулю.

Высота нижней границы перистых облаков толщиной 2 км равна 9 км [22]. В расчетах использованы оптические характеристики, полученные методами как геометрической (ГОМ), так и физической (ПОМ) оптики для монодисперсных и полидисперсных смесей хаотически ориентированных частиц разных форм. Рассмотрены различные модели непоглощающих ледяных частиц с эффективным диаметром $D_e = 10$ и 60 мкм (табл. 1): частицы произвольной формы [23], сплошные и полые столбики, пластинки, розетки полые, дроксталлы [24], а также смесь частиц разных форм (пластинки, дроксталлы, сплошные и полые столбики и др.) с сильно шероховатой поверхностью, построенная с учетом экспериментальных данных о распределении частиц по размерам, ледности облаков и диаметре средней массы [25].

На рис. 1 представлены индикатрисы рассеяния для всех форм кристаллов из табл. 1 с $D_e = 10$ мкм. Показанные угловые зависимости интенсивности рассеянного света позволяют заключить, что объединение ледяных частиц в ансамбли,

Таблица 1

Данные об используемых в расчетах моделях микроструктуры ледяных частиц

Модель микроструктуры	Обозначение	Вычислительный метод	Учет распределения по размерам	Учет шероховатости поверхности
Частицы произвольной формы	ARB	POM [23]	Нет	Нет
Столбики сплошные	SCOL	FDTD, TM, IGOM, LMT [24]	Нет	Нет
Столбики полые	HCOL			
Пластинки	PLT			
Дроксталлы	DRX			
Розетки полые	HROS			
Смесь частиц разных форм	GHM	ADDA, TM, IGOM [25]	Да	Да

учет шероховатости их поверхности и распределения по размерам позволяют получить более сглаженные индикатрисы без явных особенностей рассеяния, что согласуется с наблюдениями. Для хаотически ориентированной частицы произвольной формы индикатриса рассеяния также представляет собой сравнительно гладкую угловую функцию. В иных случаях наблюдаются характерные угловые особенности, в частности для дроксталлов, пластинок и полых столбиков.

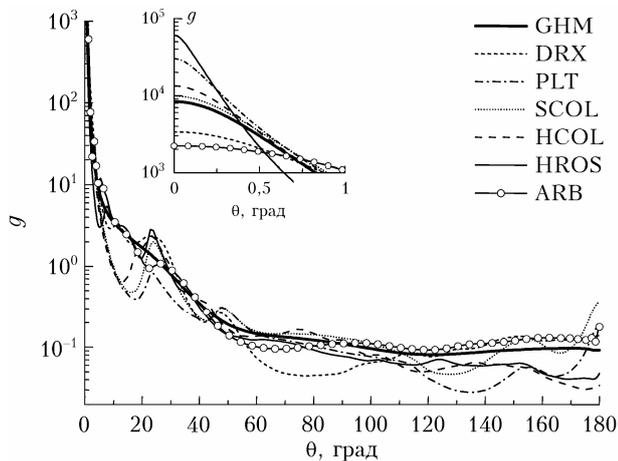


Рис. 1. Индикатрисы рассеяния ледяных частиц разных форм

К наиболее вытянутым в направлении вперед индикатрисам из рассмотренного спектра относятся индикатрисы для пластинок и полых розеток. Наименее вытянуты индикатрисы дроксталлов и частиц произвольной формы. GHM-индикатриса занимает «промежуточное» положение, поэтому была выбрана в качестве базовой для всех расчетов.

Для моделей микроструктуры кристаллов SCOL и GHM построены статистические распределения, иллюстрирующие количество попаданий угла рассеяния в тот или иной угловой интервал при моделировании переноса лазерного излучения. Вычисления проведены для лидара с $2\psi = 0,1$ мрад и $2\phi = 0,5$ мрад. На рис. 2 представлены примеры распределений случайной выборки углов рассеяния, возникающих при порядках рассеяния $n = 2$ и $n > 2$. Как видно, в формировании лидарного сигнала многократного рассеяния участвуют фотоны, рассеянные ледяными частицами в диапазоне углов преимущественно передней полусферы, а именно в мало-

угловой области от 0 до $\sim 5^\circ$, где индикатриса крупных частиц характеризуется значительным перепадом значений. Это объясняет появление всплесков эхосигнала от облаков с крупными ($D_e = 60$ мкм) кристаллами в процессе вычислений. В этих случаях сглаживание осцилляций достигалось за счет существенного увеличения количества моделируемых траекторий (с 100 до 500 млн). Относительная погрешность расчета интенсивности эхосигнала составила порядка 1,5–3% в случае мелких частиц и до $\sim 5\%$ в случае крупных.

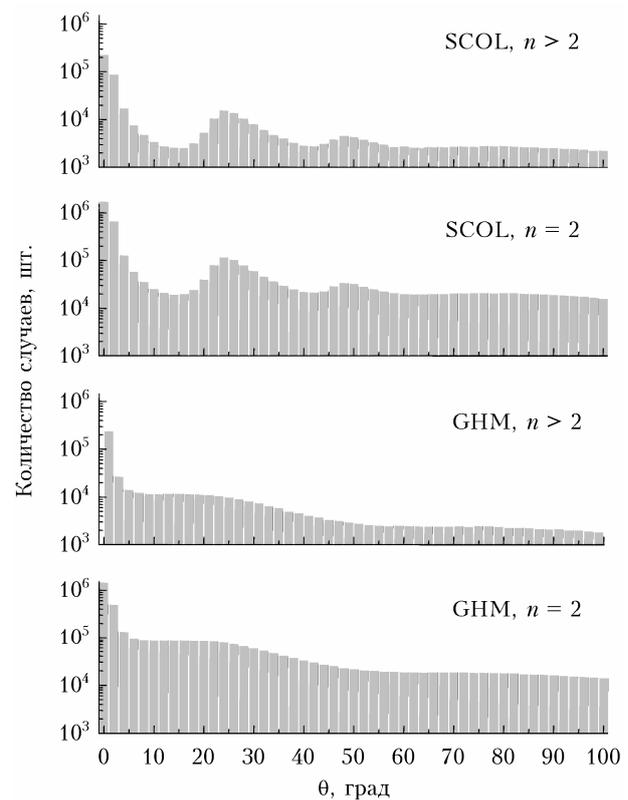


Рис. 2. Статистическое распределение случайной выборки углов рассеяния

Имитационное моделирование переноса лазерного излучения в настоящем исследовании выполнено для широкого спектра лидаров так, чтобы охватить различные оптико-геометрические схемы зондирования, ведь каждая из эксплуатируемых систем обладает уникальным диапазоном значений своих параметров; также проектируются и вводятся в эксплуатацию новые космические лидары. В табл. 2

Сравнительные параметры лидаров космического базирования

Лидар	Космическая платформа/миссия	Период функционирования, г.	H , км	λ , мкм	Δt , нс	δ , Гц	2ψ , мрад	d_r , см	2ϕ , мрад	d_e , м
ACDL	Daqi-2/AEMS	2025–2033	705	0,532	15	40	–	100	0,2	140
	Daqi-1/AEMS	2022–2030		1,064						
CALIOP	CALIPSO	2006–2023	705*	0,532 1,064	20	20	0,1	100	0,13	90
GLAS	ICESat -1	2003–2010	600	0,532 1,064	5	40	0,11	100	0,11	70
ATLID	EarthCare	2024–2017	393	0,355	–	25,5	0,045	60	0,064	29
MOLI	MKC	2022–2027	407	1,064	7	150	0,625	65	0,6	25
ATLAS	ICESat -2	1918 – н.в.	500	0,532	1–2	10000	0,026	79	0,1	45
CATS	MKC	2015–2017	405	0,532	45	4000–5000	0,05	60	0,11	45
				1,064	9					
LITE	Челнок Discovery	1994 (9 сут)	240	0,355	31	10	0,6	985	1,1	288
				0,532	27	10	0,6			
				1,064	27	10	1,0			
БАЛКАН	ОС «Мир»	1995–1997	400	0,532	12	0,18	0,15	275	0,44	175
ALISSA	ОС «Мир»	1996–1998	400	0,532	15	50	0,5	400	0,5	195

Примечание. ОС – орбитальная станция; * 688 км с 2018 г.

приведены примеры лидаров космического базирования, задействованных в разное время для получения тех или иных характеристик облачности (ACDL [26], CALIOP, GLAS [27], ATLID [28], MOLI [29], ATLAS [30], CATS, LITE, БАЛКАН, ALISSA). Для всех инструментов представлены их базовые рабочие характеристики: центр спектрального канала λ (мкм), длительность Δt (нс) и частота δ (Гц) посылки импульса, расходимость излучения 2ψ (мрад), угол поля зрения 2ϕ (мрад), световой диаметр приемного телескопа d_r (см), диаметр зоны охвата на поверхности Земли d_e (м). По высоте расположения в космическом пространстве H разделим эти лидары на две группы: низкоорбитальные (240–500 км) и среднеорбитальные (600–700 км).

На основе данных табл. 2 были сформированы диапазоны значений параметров лидаров, охватывающие большинство конфигураций зондирования (табл. 3). Поскольку отношение обратного сигнала i -й кратности рассеяния к полному эхосигналу слабо зависит от длительности импульса и диаметра приемного телескопа, то далее зафиксируем значения этих параметров, положив их равными 20 нс и 100 см соответственно.

Таблица 3

Параметры лидаров, используемые при имитационном моделировании

Параметр	Тип лидара	
	Низкоорбитальный	Среднеорбитальный
H , км	400	700
Δt , нс	5; 20; 30	5; 20
2ψ , мрад	0,05; 0,1; 0,5; 1; 1,5	0,1
2ϕ , мрад	0,05; 0,1; 0,5; 1; 1,5	0,1; 0,2; 0,5
d_r , см	60; 100; 300; 900	100

2. Результаты моделирования

Исследуем, как влияют изменяющиеся условия численных экспериментов на мощность лидарного сигнала с разделением по кратностям рассеяния излучения. В качестве анализируемого параметра будем рассматривать вклад излучения i -й кратности рассеяния в суммарный эхосигнал в пределах высот от z_1 до z_2 (выбираются в окрестности нижней и верхней границ облачного слоя соответственно)

$$q_i(z_1, z_2) = 100\% \cdot \int_{z_1}^{z_2} I_i(z) dz / \int_{z_1}^{z_2} I(z) dz. \quad (2)$$

Здесь $I_i(z)$ и $I(z)$ – рассчитанные методом Монте-Карло гистограммы интенсивности части эхосигнала с порядком рассеяния $i \geq 1$ и полного эхосигнала соответственно (далее с целью упрощения записи параметры z_1 и z_2 опущены).

Проанализируем чувствительность q_i к параметрам лидара (расходимость излучения, УПЗ приемника, удаленность от облаков) и характеристикам рассеивающей среды (оптическая толщина, размер и форма ледяных частиц). Последовательно рассмотрим следующие модельные ситуации: в атмосфере присутствует слой перистой облачности, при этом аэрозольно-молекулярное взаимодействие отсутствует либо присутствует и имеется нижележащий слой перистой облачности. Расчеты выполнены для импульса прямоугольной формы с энергией 1 Дж.

2.1. Слой сплошной перистой облачности

В данном численном эксперименте кристаллические частицы являются единственной причиной трансформации структуры лазерного импульса. В табл. 4 представлены вклады q_1 , q_2 и $q_{>2}$ (%) в суммарный эхосигнал при разных углах поля

Вклад q_i , %, в зависимости от оптической толщины облаков и УПЗ приемника; $2\psi = 0,1$ мрад, $H = 400$ км

2ψ , мрад	$D_e = 10$ мкм									$D_e = 60$ мкм								
	$\tau = 0,25$			$\tau = 0,5$			$\tau = 1$			$\tau = 0,25$			$\tau = 0,5$			$\tau = 1$		
	q_1	q_2	$q_{>2}$	q_1	q_2	$q_{>2}$	q_1	q_2	$q_{>2}$	q_1	q_2	$q_{>2}$	q_1	q_2	$q_{>2}$	q_1	q_2	$q_{>2}$
0,05	91,1	8,1	0,8	83,4	14,9	1,7	72,1	22,3	5,6	92,1	7,6	0,3	86,4	12,6	1,0	76,2	18,4	5,4
0,1	91,8	7,6	0,6	84,6	13,8	1,6	73,9	20,9	5,2	90,7	8,6	0,7	84,6	14,1	1,3	67,4	19,6	13,0
0,5	86,9	12,0	1,1	76,6	19,9	3,5	61,4	27,5	11,1	87,8	11,0	1,2	80,0	17,5	2,5	61,1	23,5	15,4
1	85,0	13,5	1,5	73,5	21,9	4,6	56,8	29,0	14,2	86,2	12,4	1,4	76,7	19,5	3,8	57,2	25,4	17,4
1,5	83,7	14,4	1,9	71,5	23,1	5,4	54,0	30,0	16,0	85,0	13,3	1,7	74,8	20,7	4,5	54,8	26,4	18,8

зрения приемника, оптической толщине облачного слоя $\tau = 0,25$; 0,5 и 1 [22] и $D_e = 10$ и 60 мкм для случая низкоорбитального лидара. Выбранный диапазон изменения оптической толщины перистых облаков согласуется, в частности, с результатами поляризационного лазерного зондирования с 2009 по 2013 г. в Томске [22], свидетельствующими о том, что наиболее вероятные значения τ варьируются от 0,1 до 1, а в большинстве случаев $\tau \approx 0,3$.

С увеличением оптической плотности происходит рост доли многократного рассеяния, при этом даже в оптически тонких облаках ($\tau = 0,25$) эта доля достигает $\sim 9\%$ при узком поле зрения приемника и увеличивается до 15% при УПЗ $2\psi = 1$ мрад. При $\tau = 0,5$ вклад многократного рассеяния в суммарный эхосигнал варьируется от ~ 15 до 30% в зависимости от УПЗ приемника. При фиксированной расходимости лазерного излучения имеется выраженная зависимость q_i от угла поля зрения приемника — тем сильнее, чем выше оптическая плотность облаков. Для мелких частиц эта зависимость не монотонна. Значения q_1 оказываются ниже для мелких ($D_e = 10$ мкм) ледяных частиц, чем для крупных ($D_e = 60$ мкм). Ранее для случая наземного зондирования было выявлено, что мелкие ледяные частицы обеспечивают больший вклад q_1 по сравнению с крупными кристаллами [17]. Однако, как будет показано далее, влияние размера на оценки q_1 зависит от модели микроструктуры частиц. Например, доля многократного рассеяния излучения на крупных сплошных столбиках выше, чем на мелких, как при наземном зондировании, так и из космоса.

При фиксированном УПЗ приемника зависимость q_i от расходимости излучения выражена слабо для любых размеров частиц. Наиболее сильно эта зависимость проявляется при $\tau = 0,25$ и $2\psi \leq 0,5$ мрад, обеспечивая разницу в значениях q_i

до 5% при изменении расходимости излучения от 0,1 до 1,5 мрад. Если источник и приемник излучения имеют равные значения углов ϕ и ψ , вклад многократного рассеяния в суммарный эхосигнал становится наименьшим. Наблюдается этот эффект при рассеянии на мелких кристаллах.

Аналогичные выводы в качественном отношении справедливы и для случая зондирования облачности среднеорбитальным лидаром. При этом ожидается увеличение доли многократного рассеяния, поскольку при отведении инструмента от объекта зондирования поперечный размер объема облачного слоя, попадающего в поле зрения приемника, может оказаться сопоставимым или превышать длину свободного пробега фотона, что обуславливает усиление фона многократного рассеяния. Действительно, для среднеорбитального лидара наблюдается снижение доли однократного рассеяния примерно на 2% и более при увеличении оптической плотности облаков (табл. 5). При $\tau < 0,25$ вклад многократного рассеяния в суммарный эхосигнал несущественный.

При расширении поля зрения приемника, сопровождающемся ростом вклада многократного рассеяния в отраженный сигнал, все более отчетливо проявляются верхняя и нижняя границы облачности, которые и могут быть определены по форме эхосигнала. При этом с увеличением τ и 2ψ наблюдается, с одной стороны, занижение высоты нижней границы облачности за счет эффектов многократного рассеяния, с другой — дальняя граница облачности становится более различимой.

Несмотря на то что интервал изменения угловых характеристик среднеорбитального лазерного локатора более узкий, чем низкоорбитального, численные эксперименты были проведены для более широкого диапазона значений 2ψ (от 0,05 до 1) и УПЗ 0,1 и 1 мрад (табл. 6). Анализ результатов для частиц с $D_e = 10$ мкм показывает, что пиковые

Вклад q_i , %, в зависимости от оптической толщины облаков и УПЗ приемника; $2\psi = 0,1$ мрад, $H = 700$ км

2ψ , мрад	$D_e = 10$ мкм									$D_e = 60$ мкм								
	$\tau = 0,25$			$\tau = 0,5$			$\tau = 1$			$\tau = 0,25$			$\tau = 0,5$			$\tau = 1$		
	q_1	q_2	$q_{>2}$	q_1	q_2	$q_{>2}$	q_1	q_2	$q_{>2}$	q_1	q_2	$q_{>2}$	q_1	q_2	$q_{>2}$	q_1	q_2	$q_{>2}$
0,05	90,0	9,0	1,0	81,1	16,5	2,4	67,7	24,0	8,3	91,1	8,4	0,5	83,8	14,1	2,1	71,9	21,1	7,0
0,1	90,2	9,0	0,8	82,2	16,7	2,1	70,1	23,1	6,8	90,7	8,6	0,7	83,5	14,8	1,7	70,1	21,0	8,9
0,5	85,4	13,2	1,4	74,4	21,5	4,4	57,7	28,8	13,5	87,3	11,6	1,1	74,6	18,1	7,3	57,9	26,7	15,4
1	83,2	14,8	2,0	70,6	23,5	5,9	52,7	30,0	17,3	85,3	13,2	1,5	71,6	20,0	8,4	53,6	28,2	18,2

Таблица 6

Вклад q_i , %, в зависимости от оптической толщины облаков и угловой апертуры источника; $D_e = 10$ мкм, $H = 700$ км

2ψ , мрад	$2\varphi = 0,1$ мрад									$2\varphi = 1$ мрад								
	$\tau = 0,25$			$\tau = 0,5$			$\tau = 1$			$\tau = 0,25$			$\tau = 0,5$			$\tau = 1$		
	q_1	q_2	$q_{>2}$	q_1	q_2	$q_{>2}$	q_1	q_2	$q_{>2}$	q_1	q_2	$q_{>2}$	q_1	q_2	$q_{>2}$	q_1	q_2	$q_{>2}$
0,05	89,2	10,0	0,8	80,5	17,1	2,4	67,6	24,8	7,6	83,2	14,8	2,0	70,6	23,5	5,9	52,7	30,0	17,3
0,1	90,2	9,0	0,8	82,2	15,7	2,1	70,1	23,1	6,8	83,2	14,8	2,0	70,6	23,5	5,9	52,7	30,0	17,3
0,5	85,6	11,7	2,7	74,8	19,7	5,5	58,4	28,2	13,4	83,5	14,7	1,8	70,9	23,3	5,8	53,1	29,8	17,1
1	83,3	14,7	2,0	72,4	23,3	4,3	53,8	29,0	17,2	84,5	13,8	1,7	72,7	22,3	5,0	55,4	28,9	15,7

значения q_1 достигаются при совпадении φ и ψ . С увеличением расходимости излучения и оптической толщины вклад многократного рассеяния в суммарный эхосигнал стремительно растет, достигая 45% при $\tau = 1$.

С ростом УПЗ приемника до 1 мрад и τ от 0,5 наблюдается существенное повышение вклада многократного рассеяния ($q_{>1} > 30\%$).

Исследуем чувствительность q_i к используемой модели микроструктуры ледяных частиц. Табл. 7 демонстрирует, как форма и размер ледяных кристаллов влияют на величину вклада многократного рассеяния в обратный эхосигнал. Численные эксперименты проведены для низкоорбитального и среднеорбитального лидаров. В табл. 7 приведены значения $q_{>1}$ (%) при $\tau = 0,5$.

Очевидно, что влияние формы кристаллов на вклад $q_{>1}$ для разных случаев расположения космического лидара идентично в качественном отношении. Также можно видеть, что для одних форм частиц наблюдается более высокий фон многократного рассеяния, а для других — более низкий. Наименьшие значения $q_{>1}$ достигаются для частиц произвольной формы, а также крупных полых розеток. Наиболее слабая зависимость вклада многократного рассеяния от УПЗ приемника наблюдается для сплошных столбиков и крупных пластинок; локальный минимум $q_{>1}$ фиксируются при $\varphi = \psi$ для всех видов мелких частиц. Сравнительно низкий вклад в многократное рассеяние вносят мелкие дроботаллы, пластинки, а также ГНМ-смесь, если УПЗ приемника не превосходит 0,1 мрад. Мелкие частицы практически всех форм обеспечивают величину вклада многократного рассеяния более 20%, если УПЗ составляет 0,5 и 1 мрад. Лишь для сплошных столбиков вклад

многократного рассеяния на крупных частицах выше, чем на мелких, при всех значениях УПЗ приемника.

2.2. Аэрозольно-молекулярная атмосфера. Двухслойная облачность

Пусть облачный слой расположен в аэрозольно-молекулярной среде. Анализ результатов моделирования в этом случае показал, что появление дополнительных рассеивателей в виде аэрозольных и рэлеевских частиц приводит к незначительному увеличению вклада однократно рассеянного излучения в облаке (до 1%). Дело в том, что в формировании характеристик рассеяния в пределах облачного слоя участвуют индикатрисы и коэффициенты рассеяния всех рассеивателей среды в соответствии с известным правилом «смешивания». В таком случае новая индикатриса рассеяния будет чуть менее вытянутой, а значит внесет меньший вклад в многократное рассеяние излучения.

Примером двухслойной перистой облачности может служить перисто-слоистая облачность (Cirrostratus duplicatus). Такие облака расположены слоями друг над другом на разных уровнях. Пусть высота основания второго слоя облаков с аналогичными оптическими свойствами составляет 7 км, а его толщина — 1 км. Исследуем распределения q_i в обоих слоях. Поскольку в п. 2.1 установлено, что при космическом зондировании перистых облаков доля многократного рассеяния излучения на крупных кристаллах льда преимущественно меньше, чем на мелких, дальнейшие результаты будут представлены для случаев, когда облачность состоит из мелких ледяных частиц. В табл. 8 приведены вклады q_i в зависимости от оптической толщины облаков

Таблица 7

Вклад многократного рассеяния в суммарный эхосигнал ($q_{>1}$, %) в зависимости от микроструктуры ледяных частиц и УПЗ приемника; $2\psi = 0,1$ мрад (интенсивность цвета ячеек — величина вклада)

H , км	2φ , мрад	$D_e = 10$ мкм							$D_e = 60$ мкм						
		GHM	DRX	PLT	SCOL	HCOL	HROS	ARB	GHM	DRX	PLT	SCOL	HCOL	HROS	ARB
400	0,05	16,6	15,4	15,4	18,6	18,7	18,2	12,3	13,6	19,9	19,7	22,1	15,2	12,5	13,2
	0,10	15,4	13,3	13,3	16,3	18,1	18,6	10,7	15,4	21,4	22,9	23,3	19,4	15,8	13,8
	0,50	23,4	22,8	26,0	22,1	26,2	24,3	18,8	19,9	23,3	23,6	23,8	22,3	18,9	18,0
	1,00	26,5	25,6	26,3	22,8	29,8	27,6	21,3	23,3	25,2	23,7	24,0	24,5	21,0	20,1
700	0,05	18,9	18,3	25,3	20,6	21,3	19,8	15,0	14,9	22,7	20,1	21,4	17,6	13,6	13,5
	0,10	18,8	16,3	22,8	18,5	20,7	20,3	13,2	16,5	20,8	23,2	22,5	21,5	17,4	14,9
	0,50	25,9	25,1	26,3	22,7	29,7	27,0	20,8	22,4	24,8	23,7	23,8	25,4	21,5	19,5
	1,00	29,4	28,4	26,8	23,5	33,7	30,9	23,5	26,1	27,6	23,8	24,2	28,2	24,3	21,8

Вклад q_i , %, в зависимости от оптической толщины облаков верхнего и нижнего ярусов; $2\psi = 2\phi = 0,1$ мрад, $D_c = 10$ мкм, $H = 700$ км, GNM-модель кристаллов

τ_n \ τ_b	0,25					0,5					1							
	$q_{1-в}$	$q_{1-н}$	$q_{2-в}$	$q_{2-н}$	$q_{>2-в}$	$q_{>2-н}$	$q_{1-в}$	$q_{1-н}$	$q_{2-в}$	$q_{2-н}$	$q_{>2-в}$	$q_{>2-н}$	$q_{1-в}$	$q_{1-н}$	$q_{2-в}$	$q_{2-н}$	$q_{>2-в}$	$q_{>2-н}$
0,25		80,5		16,6		2,9		70,9		22,0		7,1		55,0		27,9		17,1
0,5	91,0	72,4	8,3	21,5	0,7	6,1	83,5	63,5	14,0	25,4	2,5	11,1	71,5	48,7	20,6	28,9	7,5	22,5
1		60,1		26,4		13,5		52,6		28,5		18,9		41,3		30,6		28,1

верхнего (τ_b) и нижнего (τ_n) ярусов. Вклады рассчитывались для каждого облачного слоя отдельно ($q_{i-в}$ и $q_{i-н}$ — вклады для облаков верхнего и нижнего ярусов соответственно).

Результаты моделирования свидетельствуют о том, что наличие нижележащей облачности не влияет на величину $q_{i-в}$, однако само перистое облако верхнего яруса является причиной трансформации лидарного сигнала, отраженного от нижележащего облака. Облако верхнего яруса обуславливает более низкие значения $q_{1-н}$ и возрастание вклада излучения высоких кратностей рассеяния в отраженный сигнал. С увеличением τ_b от 0,5 до 1 вклад однократного рассеяния $q_{1-н}$ уменьшается от ~80 до 55% при $\tau_n = 0,25$ и от ~60 до 41% при $\tau_n = 1$.

На рис. 3 представлены результаты расчета интенсивности эхосигнала, отраженного двухъярусными кристаллическими облаками с различными оптическими толщинами при имитации зондирования атмосферы низкоорбитальным лидаром с $2\psi = 2\phi = 0,5$ мрад. Относительная погрешность результатов расчетов интенсивности, проинтегрированной по отрезкам гистограммы, составила ~3% (не более 10% к концу трассы зондирования). На рис. 3, а приведена временная развертка лидарного сигнала от перистого облака с $\tau = 0,5$ для случая, когда облако верхнего яруса отсутствует. Очевидно, что как только луч света входит в облачность, сигнал формируется преимущественно за счет однократно рассеянного излучения. По мере погружения излучения в облако происходит усиление

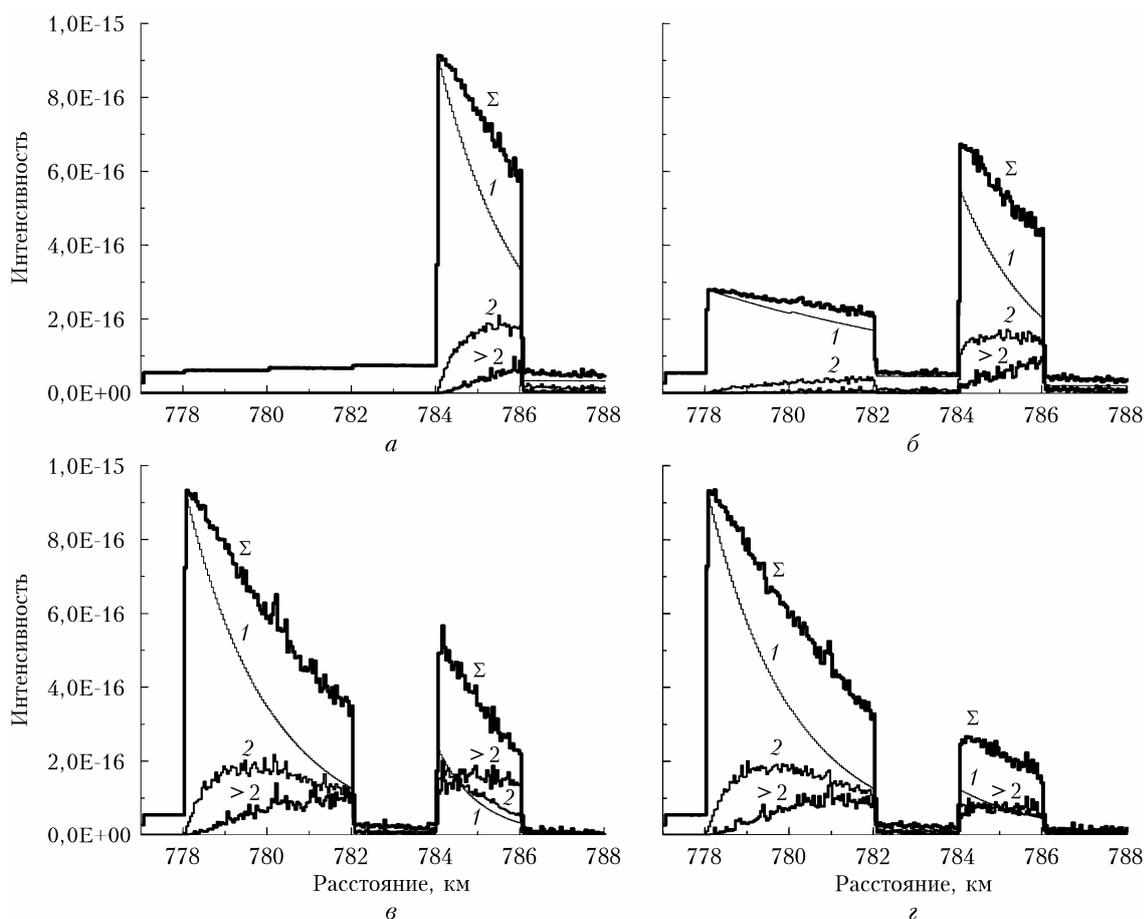


Рис. 3. Интенсивность обратного сигнала с разделением по кратностям рассеяния излучения: $\tau_n = 0,5$ (а); $\tau_n = 0,5$ (б); $\tau_b = 0,5$, $\tau_n = 1$ (в); $\tau_b = 1$, $\tau_n = 1$ (г). Номера кривых соответствуют кратностям рассеяния, Σ — мощность суммарного сигнала, приходящего на приемное устройство

эффектов многократного рассеяния. При этом выраженный спад заднего фронта импульса сдвинут относительно границы крайних кромок облаков нижнего яруса на несколько метров.

С появлением облака верхнего яруса ($\tau_v = 0,25$) (рис. 3, б) начинается перераспределение мощности излучения с разной кратностью взаимодействия — падение вклада однократно рассеянного излучения и рост вклада отраженного от облаков нижнего яруса многократно рассеянного излучения начиная с минимальных оптических глубин. При этом пиковая мощность, имевшая место в первом случае, снижается. При оптически плотной ($\tau > 0,5$) облачности верхнего яруса обратный сигнал от нижележащего облака формируется преимущественно за счет многократно рассеянного излучения (рис. 3, в, г).

Заключение

Для сплошного облачного слоя, состоящего из хаотически ориентированных кристаллов льда, получены оценки доли многократно рассеянного излучения в отраженном сигнале в зависимости от характеристик лазерного локатора (удаленность от объекта зондирования, расходимость излучения, угол поля зрения приемника) и оптико-геометрических условий эксперимента (оптическая толщина слоя, форма и размер ледяных частиц). Отмечается выраженная зависимость формирования фона многократно рассеянного излучения от угла поля зрения приемника и оптической плотности облаков. Установлено, что при совпадающих углах поля зрения приемника и расходимости излучения вклад многократного рассеяния на мелких частицах в суммарный эхосигнал оказывается наименьшим. Сравнительная оценка вкладов многократного рассеяния в отраженный сигнал от кристаллов разных форм показала, что разным формам частиц соответствует разный фон многократного рассеяния. Относительно низкий вклад вносят мелкие ($D_e = 10$ мкм) дроксталлы, пластинки, а также ГНМ-смесь при угле поля зрения приемника до 0,1 мрад. При углах поля зрения приемника 0,5 и 1 мрад мелкие частицы практически всех форм обеспечивают вклад многократного рассеяния более 20%. Вклад многократного рассеяния излучения на более мелких кристаллах оказывается выше, чем на более крупных ($D_e = 60$ мкм) для подавляющего большинства форм кристаллов из рассмотренного спектра. Проанализированы особенности трансформации временной структуры эхосигнала разной кратности рассеяния в пределах двухслойной перистой облачности в зависимости от их оптической толщины в рамках аэрозольно-молекулярной атмосферы. Отмечается резкий спад заднего фронта импульса по крайним кромок перистых облаков как нижнего, так и верхнего ярусов с погрешностью в несколько метров.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке РНФ (грант № 22-27-00719, <https://rscf.ru/project/22-27-00719/>).

Список литературы

1. *Winker D.M., Couch R.H., McCormick M.P.* An overview of LITE: NASA's Lidar In-space Technology Experiment // Proc. IEEE. 1996. V. 84, N 2. P. 164–180. DOI: 10.1109/5.482227.
2. *Зуев В.Е., Балин Ю.С., Тихомиров А.А., Знаменский И.В., Мельников В.Е.* Российский лидар космического базирования БАЛКАН // Космическая наука и технология. 1997. Т. 3, № 1. С. 16–25.
3. *Chanin M.A., Hauchecorne A., Malique C., Nedeljkovic D., Blamont J.-E., Desbois M., Tulinov G., Melnikov V.* First results of the ALISSA lidar on board the MIR platform // Comptes Rendus de l'Académie des Sciences – Series IIA – Earth and Planetary Science. 1999. V. 328, N 6. P. 359–366.
4. *Cloud-Aerosol Transport System (CATS).* URL: <https://cats.gsfc.nasa.gov/> (last access: 08.11.2023).
5. *Winker D.M., Vaughan M., Omar A., Hu Y., Powell K., Liu Z., Hunt W., Young S.* Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms // J. Atmos. Ocean. Technol. 2009. V. 26, N 11. P. 2310–2323.
6. *Физика облаков / под ред. А.Х. Хргиана.* Л.: Гидрометеоздат, 1961. 460 с.
7. *Bi L., Yang P., Kattawar G.W., Hu Y., Baum B.A.* Scattering and absorption of light by ice particles: Solution by a new physical-geometric optics hybrid method // J. Quant. Spectrosc. Radiant. Transfer. 2011. V. 112, N 9. P. 1492–1508. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2011.02.015.
8. *Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Borovoi A.G., Grynkova Y., Förstner J.* Light scattering by ice crystals of cirrus clouds: Comparison of the physical optics methods // J. Quant. Spectrosc. Radiant. Transfer. 2016. V. 182. P. 12–23. DOI: 10.1051/epjconf/202023708011.
9. *Balin Y.S., Samoilova S.V., Krekova M.M., Winker D.M.* Retrieval of cloud optical parameters from space-based backscatter lidar data // Appl. Opt. 1999. V. 38, N 30. P. 6365–6373. DOI: 10.1364/ao.38.006365.
10. *Wang X., Boselli A., D'Avino L., Velotta R., Spinelli N., Brusaglioni P., Ismaelli A., Zaccanti G.* An algorithm to determine cirrus properties from analysis of multiple-scattering influence on lidar signal // Appl. Phys. B. 2005. V. 80. P. 609–615. DOI: 10.1007/s00340-005-1765-x.
11. *Davis A.B., Marshak A.* Solar radiation transport in the cloudy atmosphere: A 3D perspective on observations and climate impacts // Rep. Prog. Phys. 2010. V. 73. P. 1–70. DOI: 10.1088/0034-4885/73/2/026801.
12. *Коршунов В.А.* Многократное рассеяние в перистых облаках и его учет при интерпретации лидарных измерений в стратосфере // Оптика атмосфер. и океана. 2021. Т. 34, № 12. С. 969–975. DOI: 10.15372/AOO20211207; *Korshunov V.A.* Multiple scattering in cirrus clouds and taking it into account when interpreting lidar measurements in the stratosphere // Atmos. Ocean. Opt. 2022. V. 35, N 2. P. 151–157.
13. *Bissonnette L.R., Hutt D.L.* Multiply scattered aerosol lidar returns: Inversion method and comparison with *in situ* measurements // Appl. Opt. 1995. V. 34, N 30. P. 6959–6975. DOI: 10.1364/AO.34.006959.
14. *Крекова М.М.* Расчет структуры сигнала орбитального лидара, отраженного облаками верхнего яруса // Оптика атмосфер. и океана. 1999. Т. 12, № 4. С. 376–381.
15. *Пригарин С.М.* Статистической моделирование эффектов, связанных с многократным рассеянием импульсов наземных и космических лидаров в облачной атмосфере

- // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 9. С. 747–751. DOI: 10.15372/АОО20160904; Prigarin S.M. Monte Carlo simulation of the effects caused by multiple scattering of ground-based and spaceborne lidar pulses in clouds // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 1. P. 79–83.
16. Oppel U. Hierarchy of models for lidar multiplier scattering and its applications for simulation and analysis of spaceborne lidar returns // Proc. SPIE. 2000. V. 4341. DOI: 10.1117/12.411949.
 17. Русскова Т.В., Шишко В.А. Статистическое моделирование переноса лазерного излучения в перистых облаках с учетом многократного рассеяния // Оптика атмосфер. и океана. 2023. Т. 36, № 3. С. 214–223. DOI: 10.15372/АОО20230308; Russkova T.V., Shishko V.A. Statistical simulation of laser pulse propagation in cirrus clouds accounting for multiple scattering // Atmos. Ocean. Opt. 2023. V. 36, N 4. P. 384–393.
 18. Elastic Lidar. Theory, Practice, and Analysis Methods / V.A. Kovalev, W.E. Eichinger (eds.). Hoboken: Wiley-Interscience, 2004. 640 p.
 19. Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А., Дарбинян Р.А., Каргин Б.А., Еленов Б.С. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1976. 280 с.
 20. Hess M., Koepke P., Schult I. Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC // Bull. Am. Meteorol. Soc. 1998. V. 79, N 5. P. 831–844. DOI: 10.1175/1520-0477(1998)079<0831:ОПОААС>2.0.CO;2.
 21. Anderson G.P., Clough S.A., Kneizys F.X., Chetwynd J.H., Shettle E.P. AFGL Atmospheric Constituent Profiles (0–120 km). Environmental Research Papers, No. 954 (Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, MA, 1986).
 22. Брюханов И.Д., Кучинская О.И., Ну Е.В., Пензин М.С., Животенюк И.В., Дорошкевич А.А., Куриллов Н.С., Стыкон А.П., Брюханова В.В., Самохвалов И.В. Оптические и геометрические характеристики облаков верхнего яруса по данным лазерного поляризационного зондирования 2009–2023 гг. в Томске // Оптика атмосфер. и океана. 2024. Т. 37, № 2. С. 105–113. DOI: 10.15372/АОО20240203.
 23. Shishko V., Konoshonkin A., Kustova N., Borovoi A., Timofeev D. Light scattering by particles with arbitrary shape in the vicinity of the backward scattering direction within geometrical optics approximation // EPJ Web Conference, 2020. V. 237. P. 08012. DOI: 10.1051/epjconf/202023708012.
 24. Yang P., Wei H., Huang H.-L., Baum B.A., Hu Y.X., Kattawar G.W., Mishchenko M.I., Fu Q. Scattering and absorption property database for nonspherical ice particles in the near-through far-infrared spectral region // Appl. Opt. 2005. V. 44, N 26. P. 5512–5523. DOI: 10.1364/AO.44.005512.
 25. Baum B.A., Yang P., Heymsfield A.J., Bansemir A., Merrelli A., Schmitt C., Wang C. Ice cloud single-scattering property models with the full phase matrix at wavelengths from 0.2 to 100 μm // J. Quant. Spectrosc. Radiant. Transfer. 2014. V. 146. P. 123–139. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2014.02.029.
 26. Dai G., Wu S., Long W., Liu J., Xie Y., Sun K., Meng F., Song X., Huang Z., Chen W. Aerosols and clouds data processing and optical properties retrieval algorithms for the spaceborne ACDL/DQ-1 // EGUsphere. Preprint under review for AMT, 2023. DOI: 10.5194/amt-17-1879-2024.
 27. Wang X., Cheng X., Gong P., Huang H., Li Z., Li X. Earth science applications of ICESat/GLAS: A review // Remote Sens. 2011. V. 32, N 23. P. 8837–8864. DOI: 10.1080/01431161.2010.547533.
 28. Hélière A., Gelsthorpe R., Le Hors L., Toulemont Y. ATLID, the atmospheric lidar on board the Earth-Care Satellite // Proc. SPIE. 2017. V. 10564. DOI: 10.1117/12.2309095.
 29. Daisuke S., Trung N.T., Rei M., Yoshito S., Tadashi I., Toshiyoshi K. Progress of the ISS Based Vegetation LiDAR Mission, Moli – Japan’s First Space-Based Lidar // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Waikoloa, HI, USA. 2020. P. 3467–3470.
 30. ATLAS/ICESat-2 L3A Calibrated Backscatter Profiles and Atmospheric Layer Characteristics, Version 6. URL: <https://nsidc.org/sites/default/files/documents/user-guide/at109-v006-userguide.pdf> (last access: 08.11.2023).

T.V. Russkova, V.A. Shishko. Statistical simulation of space-borne lidar pulse propagation in cirrus clouds taking into account multiple scattering.

Laser remote sensing of cirrus clouds is accompanied by the problem of taking into account the multiple scattering of radiation, which influences the reliability of measurement interpretation. The contribution of multiple scattering of radiation to echo signals of a space-borne lidar is estimated. The non-stationary problem of laser pulse propagation in continuous cirrus clouds with separation by scattering multiplicities is solved by the Monte Carlo method at different values of the optical-microstructural characteristics of clouds (optical thickness and shape and size of ice particles) and lidar parameters (distance from the sensing object, radiation divergence, and field of view of the receiver). Numerical experiments were carried out taking into account the permissible range of the parameters for operational or promising space-borne lidar systems. The features of the formation of the return signal when aerosol and Rayleigh particles, as well as the underlying cloud layer, are introduced into an atmospheric model are discussed. The simulation results indicate the high sensitivity of the part of an echo signal caused by multiply scattered radiation to the parameters under study, which should be taken into account when formulating and solving inverse problems.