

## ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.576.1: 551.508.856

# Множественное рассеяние в перистых облаках и его учет при интерпретации лидарных измерений в стратосфере

В.А. Коршунов\*

НПО «Тайфун»  
249038, г. Обнинск, Калужской обл., ул. Победы, 4

Поступила в редакцию 13.09.2021 г.

С использованием метода Монте-Карло исследовано множественное рассеяние в перистых облаках, возникающее при лидарном зондировании атмосферы. Расчеты выполнены для модельных индикатрис рассеяния, соответствующих кристаллическим частицам перистых облаков размерами от 20 до 100 мкм. Проведен критический анализ некоторых известных методов учета множественного рассеяния в перистых облаках. Выполнены численные эксперименты по зондированию перистых облаков и стратосферного аэрозоля с поверхности Земли с калибровкой сигналов на высоте 30 км. Показано, что без учета множественного рассеяния в этой схеме измерений возникает значительное искажение высотного профиля коэффициента обратного рассеяния в перистых облаках и над ними, и в то же время погрешности определения оптической толщины облаков остаются незначительными. Предложена и апробирована в численных экспериментах итерационная схема учета множественного рассеяния. Проведено сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными.

*Ключевые слова:* перистые облака, стратосфера, лидарное зондирование, множественное рассеяние; cirrus clouds, stratosphere, lidar sensing, multiple scattering.

### Введение

Актуальность исследования характеристик перистых облаков (ПО) связана с влиянием ПО на радиационные процессы в атмосфере и в конечном счете на климат Земли [1]. Один из инструментов определения параметров ПО — лидарные измерения, проводимые как с поверхности Земли, так и со спутников. Лидарные измерения в облачной среде подвержены влиянию множественного рассеяния (МР). Специфика эффектов МР в ПО заключается в том, что кристаллические частицы ПО значительно крупнее, чем капли жидкокапельных облаков [2]. Поэтому большая часть рассеянного вперед излучения сосредоточена в узком дифракционном конусе и остается в поле зрения приемника, в результате чего вклад МР в сигналы существенно возрастает. Разработка методов учета МР при зондировании ПО имеет достаточно долгую историю [3–6]. В простейшем случае учет МР сводится к коррекции непосредственно измеряемой оптической толщины облаков [7] либо к модификации лидарного отношения с помощью единственного характерного параметра (называемого обычно фактором МР и обозначаемого индексом  $\eta$ ) [5, 8]. В литературе встречаются противоречивые рекомендации по выбору этого параметра [9]. Не всегда ясны пределы применимости методик.

Цель настоящей работы — исследование влияния множественного рассеяния и его учета при зондировании перистых облаков и стратосферного аэрозоля. Рассматриваются только методы с использованием несмещенного по частоте рассеяния. Для моделирования сигналов МР используется метод Монте-Карло. В работе проводится критический анализ некоторых известных схем учета МР. Основное внимание уделяется эффектам МР при зондировании стратосферного аэрозоля с поверхности Земли с одновременным определением параметров перистых облаков верхнего яруса. Проводится сопоставление результатов моделирования с данными лидарного зондирования НПО «Тайфун» (г. Обнинск).

### 1. Моделирование эффектов множественного рассеяния в перистых облаках

Для моделирования МР в ПО использовался метод локальной оценки с расщеплением траекторий [10]. В основной части расчетов индикатрисы рассеяния брались из базы данных [11], описание которой дано в [12]. Расчеты проведены для длины волны 355 нм при характерных размерах частиц 20–100 мкм. Использовались различные типы частиц с шероховатой поверхностью (модели Solid Columns Severely Rough, Aggregate Solid Columns Severely Rough, General Habit Mixture Severely Rough —

\* Владимир Алексеевич Коршунов (korshunov@rpatyphoon.ru).

столбики, агрегированные столбики и смешанные формы). Согласно [12] под характерным размером частиц понимается величина  $D_{\text{eff}} = 3V_{\text{tot}}/2A_{\text{tot}}$ , где  $V_{\text{tot}}$  и  $A_{\text{tot}}$  — средний объем и площадь поверхности частиц. Эти индикатрисы не имеют особенностей в области рассеяния назад и применимы в определенном приближении для агломератов неправильной формы, нередко встречающихся в перистых облаках [2].

Для оценки МР введем в рассмотрение параметр  $q(z) = F(z)/F_1(z)$ , называемый далее «показатель МР» ( $F(z)$  и  $F_1(z)$  — лидарные сигналы многократного, включая однократное, и однократного рассеяния, соответствующие по временной задержке одному и тому же расстоянию зондирования  $z$ ).

На рис. 1, а представлены расчетные зависимости  $\ln q(\tau)$ , где  $\tau$  — текущая оптическая толщина облака вдоль зондирующего луча. Для однородного облака  $\tau(z) = (\sigma_a + \sigma_m)(z - z_1)$ ,  $\sigma_a$  и  $\sigma_m$  — коэффициенты аэрозольного и молекулярного ослабления в облаке;  $z_1$  — расстояние от лидара до нижней границы облака. Расчеты выполнены для углов приема  $2\phi = 3', 5'$  и  $10'$  и однородного облачного слоя, расположенного на высоте 8–10 км. Использо-

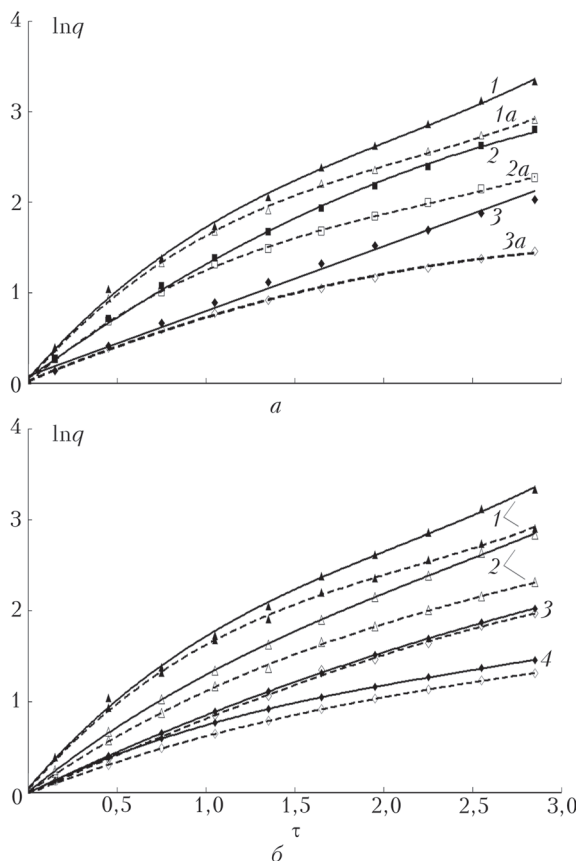


Рис. 1. Показатель МР в зависимости от оптической толщины зондирования: а — для индикатрис без пика обратного рассеяния при углах приема  $10'$  (1, 1а),  $5'$  (2, 2а) и  $3'$  (3, 3а) и характерных размерах частиц 50 (1–3) и 30 мкм (1а–3а); б — для индикатрис без пика (сплошные линии) и с пиком (штриховые линии) обратного рассеяния при углах приема  $10'$  (треугольники) и  $3'$  (ромбы) и размерах частиц 50 (1, 3) и 30 мкм (2, 4)

вались индикатрисы рассеяния типа General Habit Mixture Severely Rough для частиц размерами 30 и 50 мкм. Из рис. 1, а видно, что показатель МР растет с увеличением угла приема и размера частиц. Аппроксимация зависимости  $\ln q(\tau)$  полиномами степени не выше трех (линии на рис. 1, а) достаточно хорошо представляет результаты моделирования. При этом линейная аппроксимация работает приближенно и лишь для минимального угла приема  $3'$  при размерах частиц 50 мкм.

В базе данных [11] индикатрисы ПО рассчитаны в приближении геометрической оптики и для многих типов частиц ПО не описывают особенности рассеяния вблизи направления назад. Расчеты, выполненные методом физической оптики, показывают, что вблизи направления назад может существовать пик обратного рассеяния, обусловленный дифракционными или когерентными эффектами [13]. В частности, увеличение обратного рассеяния наблюдается для ансамбля хаотически ориентированных идеальных гексагональных кристаллов [14]. Для частиц более сложных форм, в частности неидеальных гексагональных кристаллов [13, 15] или шероховатых частиц [16], вблизи направления назад существует когерентный пик обратного рассеяния. Для неидеальных частиц характерная угловая ширина пика когерентного обратного рассеяния  $\theta_c \sim \lambda/D$  ( $D$  — диаметр частиц;  $\lambda$  — длина волны). Амплитуда когерентного пика обратного рассеяния по отношению к некогерентному фону характеризуется коэффициентом усиления  $\zeta$  [15]. Согласно [13, 16] экспериментальным данным лучше всего соответствует  $\zeta = 1,7$ . Для целей моделирования МР пик обратного рассеяния был встроено в индикатрисы типа General Habit Mixture Severely Rough для частиц размерами 30 и 50 мкм. Для приближенного описания пика обратного рассеяния  $G_p(\theta)$  в области углов рассеяния  $\theta > \theta_0$  была выбрана функция [16]:

$$G_p(\theta) = G(\theta_0) [1 + (\zeta - 1) \sin \delta / \delta], \quad (1)$$

где  $\delta = 2D(\pi - \theta)/\lambda$ ;  $G(\theta)$  — исходная индикатриса рассеяния без пика. Угол  $\theta_0$  полагался равным  $179^\circ$ , при этом  $G_p(\theta_0) \approx G(\theta_0)$ .

Результаты расчетов МР для индикатрис с пиком обратного рассеяния (штриховые линии) и без пика (сплошные линии) приведены на рис. 1, б. Так же, как и в предыдущем случае, рассматривалось однородное облако с нижней границей на высоте 8 км и толщиной 2 км. Расчеты проведены для углов приема  $3'$  и  $10'$ . Из рис. 1, б следует, что показатель МР при введении пика МР уменьшается. Разница минимальная при угле приема  $3'$  для частиц размером 30 мкм и увеличивается с ростом угла приема и размера частиц. Причина уменьшения  $q(\tau)$  заключается в том, что в результате усреднения по углам рассеяния назад сигнал МР  $F(\tau)$  возрастает в меньшей степени, чем сигнал однократного рассеяния  $F_1(\tau)$ , и их отношение падает.

Представленные в дальнейшем расчеты проведены с индикатрисами [11] для угла приема  $3'$ , при котором разница результатов с присутствием пика обратного рассеяния и без него невелика.

## 2. Учет многократного рассеяния при определении характеристик перистых облаков

### 2.1. Определение оптической толщины перистых облаков по ослаблению сигнала облаком

В простейшем варианте оптическая толщина облака определяется непосредственно по ослаблению лидарного сигнала в нем [7]. Для определения  $\tau$  берется отношение сигнала, полученного за облаком, к сигналу до облака. При этом обычно предполагается, что вне облака рассеяние является чисто молекулярным. Тогда оптическая толщина облака определяется по формуле

$$\tau = -\frac{1}{2} \ln \left[ \frac{F(z_E)q(z_0)\beta_m(z_0)}{F(z_0)q(z_E)\beta_m(z_E)} \right], \quad (2)$$

где точки  $z_E$  и  $z_0$  находятся «за» и «перед» облаком;  $\beta_m(z)$  – коэффициент обратного молекулярного рассеяния. Обычно можно считать, что  $q(z_0) = 1$ . Если МР не учитывается, то измеряемая оптическая толщина  $\tau_E$  связана с истинной соотношением  $\tau_E = \tau - \ln[q(z_E)]/2$ .

Как правило, при использовании этого метода явно или неявно предполагается, что при выходе из облака показатель МР остается таким же, как и на верхней границе облака:  $q(z_E) = q(\tau)$  [7]. Допустим, что это условие выполняется, и представим зависимость  $\ln q$  от  $\tau$  в виде  $\ln q = k(\tau)\tau$ . Тогда  $\tau_E = [1 - k(\tau)/2]\tau = \eta(\tau)\tau$ . Параметр  $\eta(\tau) = 1 - k(\tau)/2$  используется в этом случае как поправочный коэффициент для определения  $\tau$ . Выбор параметра  $\eta$  обсуждался во многих работах. Его предлагалось задавать в зависимости от  $\tau$  [8], геометрической толщины облаков [9], температуры атмосферы [7]. В случае линейной связи  $\ln q = k\tau$  величина  $\eta$  не зависит от  $\tau$ . По результатам моделирования (см. рис. 1, а) линейная связь наблюдается до  $\tau = 3$  для частиц размером 50 мкм при поле зрения приемника  $2\varphi = 3'$ . Аналогичные результаты получены в расчетах с размерами частиц 100 мкм. При этом параметр  $\eta$  меняется в пределах  $0,60 \pm 0,05$  для разных индикатрис и размеров частиц. В иных случаях следует учитывать зависимость  $\eta$  от  $\tau$  и размеров частиц облака.

Для выполнения условия  $q(z_E) = q(\tau)$  сдвиг  $\Delta z$  точки  $z_E$  за границу облака должен быть достаточно малым.

На рис. 2 показан пример изменения показателя МР в молекулярной атмосфере при выходе

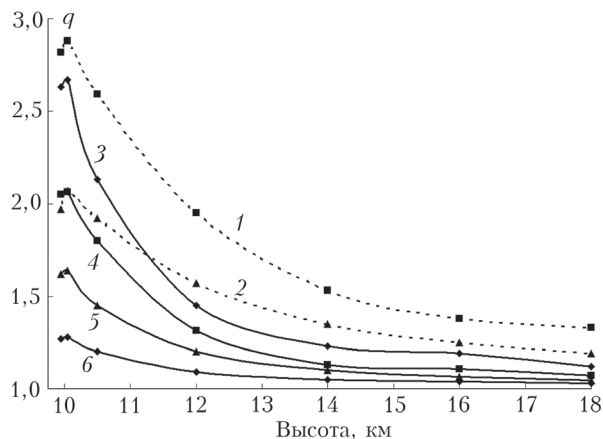


Рис. 2. Показатель МР на верхней границе облака (10 км) и выше, первые две точки слева относятся к высотам 9,95 и 10,05 км;  $\tau_0 = 2$  (3); 1,5 (1, 4); 1,0 (2, 5) и 0,5 (6); характерный размер облачных частиц 30 (сплошные кривые) и 50 мкм (штриховые кривые)

из облака. Видно, что ход показателя МР за облаком зависит от  $\tau$  облака и размеров частиц в нем. Небольшой первоначальный подъем показателя МР объясняется разницей индикатрис рассеяния вблизи направления назад в облаке и чистой атмосфере. Последующее падение показателя МР связано с тем, что многократно рассеянное излучение, покидающее облако, постепенно выходит из поля зрения лидара.

Если не учитывать изменение показателя МР, то возникает завышение  $\tau$  на величину  $\delta\tau = \delta\tau_E/\eta(\tau) = \ln[q(\tau)/q(\tau, \Delta z)]/\eta(\tau)$ . Из рисунка следует, что величина  $\delta\tau$  может быть значительной. Чтобы исключить эту погрешность, для определения  $\tau$  можно использовать заранее рассчитанные зависимости  $\tau_E(\tau) = \tau + q(\tau, \Delta z)$  при априори заданной индикатрисе облака и выбранного для эксперимента смещения  $\Delta z$ . Из изложенного выше следует, что параметр отстройки  $\Delta z$  играет важную роль при интерпретации измерений. Однако в литературе его влияние зачастую не учитывается [7, 17].

### 2.2. Определение характеристики облаков путем решения лидарного уравнения

Обработка лидарных сигналов от ПО может также проводиться путем решения лидарного уравнения. Наиболее общая форма решения лидарного уравнения в приближении однократного рассеяния – интегральные соотношения типа Фернальда–Клетта [18], учитывающие как молекулярное, так и аэрозольное рассеяние. Запишем лидарное уравнение в виде, формально учитывающем МР:

$$\frac{F(z)q(z_c)}{q(z)} = \beta(z) \exp[2\tau(z, z_c)], \quad (3)$$

где  $F(z) = P(z)z^2\beta(z_c)/P(z_c)$ ,  $z_c^2$  – лидарный сигнал, нормированный на коэффициент обратного

рассеяния  $\beta(z)$ ,  $P(z)$  – сигнал обратного рассеяния в произвольных единицах;  $z_c$  – точка калибровки сигнала;  $\beta(z) = \beta_a(z) + \beta_m(z)$ ;  $\tau(z, z_c) = \int_z^{z_c} [\chi_a(z')\beta_a(z') + \chi_m\beta_m(z')]dz'$ ,  $\chi_{m, a}$  – лидарные отношения для молекулярного и аэрозольного рассеяния.

Пусть на трассе зондирования в интервале  $[z_1; z_2]$  находится ПО. Будем для простоты полагать, что лидарное отношение внутри облака постоянно и равно  $\chi_a$ . Введем также предположение о постоянстве параметра  $\eta$ , что, как показано выше, эквивалентно экспоненциальной зависимости показателя МР от  $\tau$  внутри облака:  $q(z) = \exp[k\tau_a(z_1, z)]$ .

Вид решения зависит от того, где находится точка калибровки  $z_c$ . Рассмотрим сначала случай, когда  $z_c$  выбирается перед облаком ( $z_c < z_1$ ). Для такого выбора  $q(z_c) = 1$ . После несложных преобразований уравнение (3) приводится к виду

$$F(z) = \beta(z) \exp\left(2 \int_z^{z_1} \eta \chi_a \beta_a(z') dz'\right) \times \exp[2(\tau_a(z_1, z_c) + \tau_m(z, z_c))]. \quad (4)$$

Уравнение (4) – частный случай (3), в котором лидарное отношение в облаке  $\chi_a$  заменено на  $\eta\chi_a$ . Решение (4) дает  $\beta(z)$ , а оптическая толщина облака  $\tau$  находится из соотношения  $\tau = \tau_a(z_1, z_2) = \int_{z_1}^{z_2} \chi_a \beta(z') dz'$ . Недостаток этого подхода – потеря устойчивости решений при  $\tau > 1$  и появление решений  $\beta(z) \rightarrow \infty$  при  $z \rightarrow z_2$ . В [9, 19] для  $\tau > 1$  предлагается рассмотреть совокупность решений (4), получающихся при постепенном уменьшении параметра  $\eta\chi_a$ . Из них выбирается решение при максимальном  $\eta\chi_a$ , которое обеспечивает нерасходящийся профиль  $\beta(z)$ . При этом остается вопрос, насколько обоснован такой выбор  $\eta\chi_a$  с физической точки зрения.

Устойчивые решения получаются, если точка калибровки берется за облаком. Можно показать, что в предположении  $q(z) = \exp[k\tau_a(z_1, z)]$  решение (3) приводится теперь к виду

$$F(z) = \exp(k\tau_a(z_1, z_2)) q(z_c)^{-1} \beta(z) \times \exp\left(2 \int_z^{z_2} \eta \chi_a \beta_a(z') dz'\right) \exp[2(\tau_a(z_2, z_c) + \tau_m(z_2, z_c))]. \quad (5)$$

Аналогично предыдущему случаю в уравнении (5) присутствует модифицированное лидарное отношение  $\eta\chi_a$ . Но теперь в уравнении появляются дополнительные множители  $\exp(k\tau_a(z_1, z_2))$  и  $q(z_c)^{-1}$ . Если точка калибровки выбирается непосредственно за облаком, то в некотором при-

ближении (см. рис. 2, а) можно положить  $q(z_2) = \exp(k\tau_a(z_1, z_2)) \approx q(z_c)$ , при этом уравнение (5) приобретает вид, аналогичный (4). Сложность заключается в выборе точки  $z_c$  «достаточно близко» к границе облака в случае реальных сигналов, когда может возникать размытость границы из-за обычно проводимого пространственного или временного усреднения сигналов.

Если зависимость  $q(z)$  произвольная, то параметр  $\eta$  в уравнении (5) становится функцией  $z$  и проще использовать исходное уравнение (3). Его решение проводится итерационным методом, при этом на каждой итерации множитель  $q(z) \cdot q(z_c)^{-1}$  находится путем моделирования сигналов МР с учетом  $\beta(z)$ , найденного на предыдущей итерации. В этом случае  $q[\tau(z)]$  может иметь произвольный (не обязательно экспоненциальный) вид, что снимает, например, ограничения на размер частиц облака. Подобная схема решения с прямым расчетом показателя МР применяется в настоящее время во многих работах (например, [6, 20, 21]).

### 3. Численные эксперименты

При зондировании стратосферного аэрозоля с поверхности Земли точка калибровки выбирается на большой высоте. Если приемная система работает в достаточно широком диапазоне сигналов, одновременно можно проводить и определение параметров ПО верхней тропосферы. Для такой схемы, используемой, в частности, в НПО «Тайфун» [22], были проведены численные эксперименты. В численном эксперименте задавалось облако на высоте 8–10 км с определенной оптической толщиной. Поле зрения приемного телескопа задавалось равным  $3'$ , размер частиц – 30 мкм. Учитывались молекулярное и аэрозольное рассеяния с постоянным отношением обратного рассеяния  $R = 1,05$ . Лидарные отношения для облачных частиц и аэрозоля задавались равными 25 и 15. Калибровка сигнала проводилась на высоте 30 км. Показатель МР в точке калибровки  $q(z_c)$  в зависимости от  $\tau$  представлен на рис. 3 для частиц размерами 30 и 50 мкм.

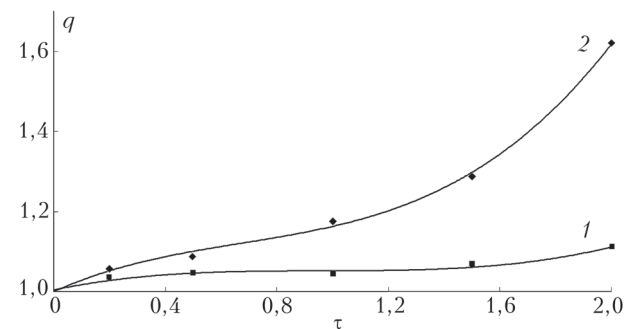


Рис. 3. Показатель МР над перистыми облаками в точке калибровки на высоте 30 км в зависимости от оптической толщины облака с частицами размером 30 (1) и 50 мкм (2)



Полиномиальная аппроксимация  $q(z_c, \tau)$  имеет вид

$$q(z_c, \tau) = 0,1492\tau^3 - 0,3012\tau^2 + 0,3151\tau + 1,0 \text{ (50 мкм)}$$

и

$$q(z_c, \tau) = 0,0522\tau^3 - 0,1509\tau^2 + 0,1468\tau + 1,0 \text{ (30 мкм)}.$$

Для  $q(\tau)$  использовались аппроксимации

$$q(\tau) = \exp(0,8\tau) \text{ (50 мкм)}$$

и

$$q(\tau) = \exp[2,303(-0,048584\tau^2 + 0,35413\tau)] \text{ (30 мкм)}.$$

На первом этапе численного эксперимента формировался сигнал однократного рассеяния от нижней границы облака до точки калибровки. Затем выполнялось контрольное обращение сигнала с помощью интегрального решения Фернальда–Клетта [18] относительно  $\beta(z)$ , которое естественным образом совпадало с заданным профилем  $\beta_0(z)$ . Определялась оптическая толщина облака, которая также совпадала с заданной величиной  $\tau$ . Затем сигнал преобразовывался в сигнал многократного рассеяния с помощью  $q(z)$ . После этого проводилось решение лидарного уравнения без учета МР. Полученные результаты обозначим как  $\beta_M(z)$  и  $\tau_M$ . На следующем этапе включался итерационный алгоритм учета МР. Поскольку ни в сигналах, ни в априорных значениях  $q(z)$  не вносились возмущения, восстановленные в этом случае профили  $\beta(z)$  и оптическая толщина практически совпадали с исходными  $\beta_0(z)$  и  $\tau$ . Это подтверждало работоспособность итерационной схемы решения лидарного уравнения с учетом МР.

Рассмотрим, насколько искажаются результаты, если не учитывается МР. На рис. 4, а представлены профили  $\beta_M(z)$  в сравнении с исходным профилем  $\beta_0(z)$  при  $\tau = 0,5$  и  $1,0$  для случая однородного облака. Видно, что в нижней части облака происходит занижение, а в верхней – завышение  $\beta_0(z)$ . С увеличением  $\tau$  усиливаются и искажения.

Результаты численного эксперимента с исходной трапецидальной зависимостью  $\beta_0(z)$  в облаке показаны на рис. 4, б. В этом случае восстановление  $\beta(z)$  происходило с факторами  $q(\tau)$  и  $q(z_c, \tau)$ , рассчитанными для модельного однородного облака. Видно, что исходный профиль восстанавливается с некоторой погрешностью, связанной с отличием профиля облака от модельного. В то же время без учета МР вид профиля значительно искажается.

Что касается определения  $\tau$ , то в результате компенсации искажений  $\beta(z)$  на нижней и верхней границах облака отличие восстановленной без учета МР оптической толщины  $\tau_M$  от  $\tau$  не столь велико. Относительная разница  $\delta_\tau = (\tau_M - \tau)/\tau$  зависит от размеров частиц и вида профиля. Для однород-

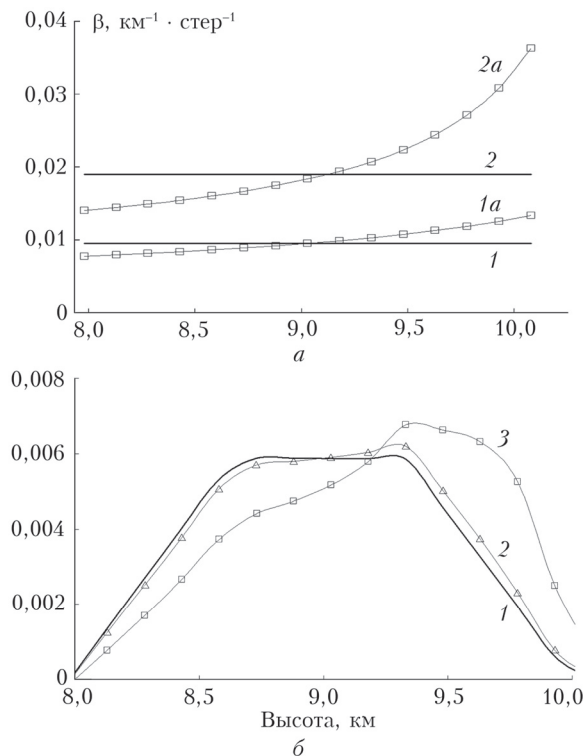


Рис. 4. Восстановленный в результате численного эксперимента высотный профиль коэффициента обратного рассеяния: а – для  $\beta_0(z)$  прямоугольного типа (1, 2) без учета МР  $\beta_M(z)$  (1', 2a) с  $\tau = 0,5$  (1, 1a) и  $1,0$  (2, 2a); б – для  $\beta_0(z)$  (1) трапецидального типа с учетом (2) и без учета МР  $\beta_M(z)$  (3)

ного облака с  $\tau < 2$  величина  $\delta_\tau$  лежит в пределах нескольких процентов. При  $\tau \geq 2$  величина  $\delta_\tau$  меняет знак и начинает расти.

#### 4. Влияние многократного рассеяния в перистых облаках на аэрозольные измерения в стратосфере

Рассмотрим влияние МР в ПО на аэрозольные измерения над облаком. Предположим, что рассеяние над ПО является чисто молекулярным. Из рис. 2 следует, что в результате МР возникает кажущееся увеличение отношения обратного рассеяния  $R(z)$ . Для количественной оценки эффекта надо учесть показатель МР  $q(z_c, \tau)$  в точке калибровки. Результаты расчета фиктивного  $R(z)$  с учетом произведения  $q(z) \cdot q(z_c, \tau)^{-1}$  представлены на рис. 5, а. Из сравнения с рис. 2 видно, что в результате МР в точке калибровки возникает некоторая компенсация искажения исходного профиля  $R(z) = 1,0$  за облаком. Тем не менее в зависимости от  $\tau$  может наблюдаться уровень фиктивного  $R(z)$  порядка фонового  $R(z)$  для аэрозольного рассеяния.

Проведем сопоставление расчетных значений МР над ПО с экспериментальными данными, полученными в НПО «Тайфун» лидаром АК-3 [22]. С использованием рассмотренной выше методики на основе измерений, выполненных с 2012 по 2020 г.,

было проведено определение параметров ПО. Полученные результаты будут представлены в отдельной работе. Здесь рассмотрим только вопросы, касающиеся влияния МР на аэрозольные измерения над ПО. Из всех наблюдавшихся ПО были выбраны ПО с  $\tau > 0,3$ , относящиеся, согласно классификации [23], к классу непрозрачных. Для ПО этого типа были рассчитаны средние экспериментальные значения отношения обратного рассеяния  $\langle R_E \rangle$  по слою, расположенному на высоте  $2 \pm 0,5$  км над облаком. Из  $\langle R_E \rangle$  вычитались среднесезонные фоновые значения  $\langle R_{bg} \rangle$  на близлежащей высоте  $13 \pm 1$  км, наблюдавшиеся для того же года и сезона измерений, но при отсутствии ПО. Полученная разница  $R_M = \langle R_E \rangle - \langle R_{bg} \rangle$  приписывалась влиянию МР.

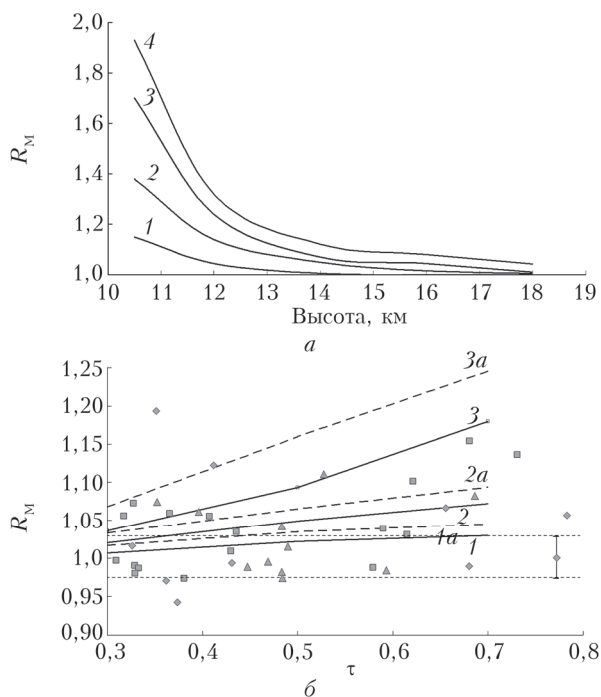


Рис. 5. Расчетные и экспериментальные значения фиктивного отношения обратного рассеяния над ПО, возникающего в результате МР: *a* – расчетные величины  $R_M(z)$  над ПО с верхней границей на высоте 10 км в зависимости от высоты,  $\tau = 0,5$  (1); 1 (2); 1,5 (3) и 2 (4); *б* – расчетные (линии) и экспериментальные (точки) значения  $R_M$  на высоте  $2 \pm 0,5$  км над ПО для профиля  $\beta(z)$  прямоугольного (штриховые линии) и треугольного (сплошные линии) типов с частицами размером ПО 20 (1, 1а), 30 (2, 2а) и 50 мкм (3, 3а);  $\Delta h = 1-2$  (ромбы), 2–4 (квадраты) и  $> 4$  км (треугольники)

Расчетные и экспериментальные значения фиктивного  $R_M$ , связанного с МР, приведены на рис. 5, б. Экспериментальные величины  $R_M$  для облаков с геометрической толщиной  $\Delta h$  в интервалах 1–2, 2–4 и более 4 км обозначены разными значками. Оптическая толщина облаков с  $\Delta h < 1$  км не превышала 0,2, и такие облака на рис. 5, б не представлены. Среднеквадратическое отклонение (СКО)  $R_M$  составляет  $\pm 0,5$ . Штриховыми горизонтальными ли-

ниями выделена область, для которой величины  $R_M$  в пределах СКО не отличаются от 1. Линии на рис. 5, б представляют расчетные значения  $R_M$  над высоте 2 км над облаком для частиц размерами 20, 30 и 50 мкм. Расчеты МР проведены для облака толщиной 3 км с учетом МР в точке калибровки.

Как видно из рис. 5, б, значительная часть экспериментальных точек с учетом СКО попадает в область, выделяемую расчетными кривыми. При этом большинство из них близки к расчетным кривым, соответствующим частицам размерами 20–30 мкм. В то же время есть группа точек, расположенных ниже расчетных зависимостей, что, по-видимому, указывает на существование отдельных ПО с более мелкими частицами.

На основе полученных данных можно оценить влияние МР в ПО на аэрозольные измерения в стратосфере при усреднении по длительным периодам. По данным лидарного зондирования среднесезонные фоновые уровни  $\langle R_{bg} \rangle$  на  $\lambda = 355$  нм в нижней стратосфере меняются в пределах 1,05–1,1. Как следует из рис. 5, б, в результате МР в ПО в лидарных сигналах на высоте 2 км над облаком может возникать добавка  $R_M$  того же порядка, что и величина  $\langle R_{bg} \rangle$  в аэрозоле. Однако, по данным измерений лидаром АК-3, вероятность наблюдений облаков с  $\tau > 0,3$  в общем числе измерений оценивается как  $\sim 0,06$ . Поэтому при усреднении по длительному периоду измерений добавка МР в наблюдаемые значения отношения обратного рассеяния на 355 нм на высоте  $\geq 2$  км над ПО можно считать незначительной.

## Заключение

С использованием метода Монте-Карло проведено исследование МР при лидарном зондировании ПО и стратосферного аэрозоля. Расчеты выполнены для модельных индикатрис рассеяния, соответствующих кристаллическим частицам ПО размерами от 20 до 100 мкм. Проанализированы некоторые известные методы определения оптической толщины и высотного профиля коэффициента обратного рассеяния в ПО. Показана ограниченность использования известного однопараметрического метода коррекции МР в ПО. В общем случае определение их параметров с учетом МР может проводиться на основе решений лидарного уравнения в приближении однократного рассеяния с использованием итераций и предварительной параметризации вклада МР в наблюдаемые сигналы. При этом необходимо учитывать МР в точке калибровки (привязки) лидарных сигналов. Проведены численные эксперименты по определению оптической толщины и высотного профиля коэффициента обратного рассеяния в ПО для обычной схемы зондирования стратосферы с калибровкой лидарного сигнала на высоте 30 км и решением лидарного уравнения методом Фернальда–Клетта. Подтверждена работоспособность указанного итерационного метода учета МР. Показано, что в этой схеме

измерений возникает значительное искажение высотного профиля коэффициента обратного рассеяния без учета МР, но в результате компенсации искажений в нижней и верхней частях облака влияние МР на определяемую оптическую толщину оказывается незначительным.

Проведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных по увеличению отношения обратного рассеяния на длине волны 355 нм над ПО в результате МР. Показано, что на высоте 2 км над ПО с оптической толщиной, превышающей 0,3, может возникать мнимое увеличение отношения обратного рассеяния порядка фоновых значений для аэрозольного рассеяния. Но поскольку доля таких облаков в общем числе наблюдений невелика, то при усреднении по длительному периоду добавка МР в наблюдаемые величины отношения обратного рассеяния на высотах более 2 км над облаком незначительна.

Автор выражает благодарность Д.С. Зубачеву за подготовку экспериментальных данных лидарного зондирования.

1. Hong Yu., Liu G., Li J.-L.F. Assessing the radiative effects of global ice clouds based on CloudSat and CALIPSO measurements // J. Climate. 2016. V. 29. P. 7651–7674.
2. Baran A.J. A review of the light scattering properties of cirrus // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2009. V. 110. P. 1239–1260.
3. Platt C.M.R. Lidar and radiometric observations of cirrus clouds // J. Atmos. Sci. 1973. V. 30. P. 1191–1204.
4. Hogan R.J. Fast approximate calculation of multiply scattered lidar returns // Appl. Opt. 2006. V. 45, N 23. P. 5984–5992.
5. Hoareau C., Keckhut P., Noel V., Chepfer H., Baray J.-L. A decadal cirrus clouds climatology from ground-based and spaceborne lidars above the south of France (43.9° N–5.7° E) // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13. P. 6951–6963.
6. Thorsen T.J., Fu Q. Automated retrieval of cloud and aerosol properties from the ARM Raman lidar. Part II: Extinction // J. Atmos. Ocean. Technol. 2015. V. 32. P. 2000–2023.
7. Garnier A., Pelon J., Vaughan M.A., Winker D.M., Trepte C.R., Dubuisson P. Lidar multiple scattering factors inferred from CALIPSO lidar and IIR retrievals of semi-transparent cirrus cloud optical depths over oceans // Atmos. Meas. Tech. 2015. V. 8. P. 2759–2774. DOI: 10.5194/amt-8-2759-2015.
8. Sassen K., Comstock J.M. A midlatitude cirrus cloud climatology from the facility for atmospheric remote sensing. Part III: Radiative properties // J. Atmos. Sci. 2001. V. 58. P. 2123–2137.
9. Seifert P., Ansmann A., Müller D., Wandinger U., Althausen D., Heymsfield A.J., Massie S.T., Schmitt C.

Cirrus optical properties observed with lidar, radiosonde, and satellite over the tropical Indian Ocean during the aerosol-polluted northeast and clean maritime southwest monsoon // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. P. D17205. DOI: 10.1029/2006JD008352.

10. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике / под ред. Г.И. Марчука. Новосибирск: Наука, 1976. 100 с.
11. Ice cloud scattering models. URL: [http://stc-se.com/data/bbaum/Ice\\_Models/UV-FarIR\\_SpectralModels.html](http://stc-se.com/data/bbaum/Ice_Models/UV-FarIR_SpectralModels.html) (дата обращения: 17.03.2021).
12. Baum B.A., Yang P., Heymsfield A.J., Bansemmer A., Benjamin H., Cole B.H., 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. Radiat. Transfer. 2014. V. 146. P. 123–139.
13. Коношонкин А.В., Боровой А.Г., Кустова Н.В., Шишко В.А., Тимофеев Д.Н. Рассеяние света на атмосферных ледяных кристаллах в приближении физической оптики. Новосибирск: СО РАН, 2020. 219 с.
14. Borovoi A., Konoshonkin A., Kustova N. Backscattering by hexagonal ice crystals of cirrus clouds // Opt. Lett. 2013. V. 38, N 15. P. 2881–1884.
15. Shishko V.A., Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Timofeev D.N., Borovoi A.G. Coherent and incoherent backscattering by a single large particle of irregular shape // Opt. Express. 2019. V. 27. N 23. P. 32984–32993.
16. Zhou C., Yang P. Backscattering peak of ice cloud particles // Opt. Express. 2015. V. 23, N 9. P. 11995–12003.
17. Winker D. Accounting for multiple scattering in retrievals from space lidar // Proc. SPIE. 2003. V. 5059. P. 128–139.
18. Fernald F.G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments // Appl. Opt. 1984. V. 23, N 5. P. 652–653.
19. Platt C.M.R., Young S.A., Austin R.T., Patterson G.R., Mitchell D.L., Miller S.D. LIRAD observations of tropical cirrus clouds in MCTEX. Part I: Optical properties and detection of small particles in cold cirrus // J. Atmos. Sci. 2002. V. 59, N 22. P. 3145–3162.
20. Gouveia D.A., Barja B., Barbosa H.M.J., Seifert P., Baars H., Pauliquevis T., Artaxo P. Optical and geometrical properties of cirrus clouds in Amazonia derived from 1 year of ground-based lidar measurements // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17. P. 3619–3636.
21. Kienast-Sjogren E., Rolf C., Seifert P., Krieger U.K., Bei P., Luo B.P., Krömer M., Peter T. Climatological and radiative properties of midlatitude cirrus clouds derived by automatic evaluation of lidar measurements // Atmos. Chem. Phys. 2016. V. 16. P. 7605–7621.
22. Иванов В.Н., Зубачев Д.С., Коришнов В.А., Сахибгареев Д.Г. Сетевой лидар АК-3 для зондирования средней атмосферы: устройство, методы измерений, результаты исследований // Тр. ИГО. 2020. Вып. 598. С. 155–187.
23. Sassen K., Cho B.S. Subvisual – thin cirrus lidar dataset for satellite verification and climatological research // J. Appl. Meteorol. 1992. V. 31. P. 1275–1285.

#### V.A. Korshunov. Multiple scattering in cirrus clouds and its accounting in processing of stratospheric lidar measurements.

Multiple scattering in cirrus clouds occurring in lidar sensing of the atmosphere is studied in Monte-Carlo simulation with the use of model phase functions appropriate to crystal cloud particles of 20–100 μm in size. Critical analysis of some common methods for multiple scattering correction in cirrus clouds is presented. Sensing of cirrus clouds and stratosphere aerosol from the Earth surface with signal calibration at 30 km is numerically simulated. A significant deformation of the altitude profile of the backscattering coefficient at cirrus clouds and above without multiple scattering correction is shown, meanwhile the error in the optical depth of clouds is small. An iteration multiple scattering correction procedure is suggested and verified in numerical simulations. The comparison between the simulation and experimental data is performed.