

В.А. Коршунов

УЧЕТ ЭФФЕКТОВ МНОГОКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ЛАЗЕРНОМ ЗОНДИРОВАНИИ ОБЛАЧНОЙ СРЕДЫ

В работе получены аппроксимационные соотношения для величины вклада многократного рассеяния (МР) в лидарные сигналы от облачной среды, учитывающие профиль коэффициента ослабления вдоль трассы зондирования. Предложен итерационный алгоритм внесения поправок на МР в известное решение уравнения лазерной локации, полученное в однократном приближении. Описывается алгоритм обработки лидарных сигналов, позволяющий при приеме набора сигналов, соответствующих различным угловым приемным апертурам, проводить определение оптической толщины τ и профиля коэффициента ослабления облачного слоя при $1,5 \leq \tau \leq 6$. Для той же схемы приема показана возможность определения профиля интегрального параметра спектра размеров частиц и водности облачной среды.

Сигналы обратного рассеяния, получаемые при лазерном зондировании облачной среды, в общем случае содержат значительную долю многократно рассеянного излучения.

Возможны, в принципе, два подхода к интерпретации сигналов, для которых велик вклад многократного рассеяния (МР). Первый — это учет эффектов МР с целью исключения вклада МР и использование для дальнейшей обработки сигналов известных методов [1, 2], разработанных в приближении однократного рассеяния. Данная задача весьма сложна, в частности, из-за того, что величина поправок зависит от оптических характеристик и параметров спектра размеров, которые априори неизвестны и в общем случае должны быть найдены по самим сигналам. До сих пор практически приемлемых методов учета МР не разработано.

Второй подход к интерпретации сигналов от облачной среды предполагает не просто исключение вклада МР, но и использование полезной информации, содержащейся в МР компоненте сигнала. Примером является предложенная в [3] методика определения оптической и геометрической толщины однородного облака. Попытки наметить пути использования эффектов МР делались еще в ряде работ (см., например, [4, 5]), однако существенного продвижения в этом направлении пока не достигнуто.

В данной работе на основе результатов, полученных в [6], предлагается алгоритм учета вклада МР при традиционной обработке сигналов в приближении однократного рассеяния, а также рассматриваются возможные варианты использования эффектов МР для определения профилей коэффициента ослабления и интегрального параметра спектра размеров облачных частиц.

Построение аппроксимационных соотношений для расчета вклада МР в лидарные сигналы

При разработке алгоритмов учета МР в лидарных сигналах прежде всего необходимо построить упрощенную процедуру расчета вклада МР $\lg P/P_1$, где P — мощность сигнала с учетом МР, P_1 — мощность компоненты сигнала, обусловленной только однократным рассеянием. Это связано с тем, что прямое применение известных методов Монте-Карло или малоуглового приближения [7] во вспомогательных текущих расчетах затруднено из-за больших затрат машинного времени. Для этой цели предлагается использование заранее заготовленных формул, аппроксимирующих результаты точных расчетов. Рассмотрим один из вариантов построения таких формул.

Предположим, например, что используемые углы приема являются достаточно большими, когда вклад МР слабо зависит от размеров частиц [6]. Ограничимся далее рассмотрением случая, когда расстояние от лидача до облака z_0 достаточно велико, так что приемник и источник можно считать точечным и совмещенным. Допустим также, что угол расхождения источника в несколько раз меньше угла приема $2\varphi_{\text{пр}}$, а коэффициент ослабления внутри облачного слоя $\sigma(z)$ зависит только от расстояния вдоль зондирующего луча z . В рамках этих предположений в [8] было показано, что вид функциональной зависимости $\lg P/P_1$ от угла приема практически одинаков как для однородного, так и для неоднородного слоев, и высказано предположение о том, что путем введения эффективного параметра $\tau_{0\text{эф}}$ можно общий случай произвольного $\sigma(z)$ свести к случаю однородного слоя с $\tau_0 = z_0\sigma = \tau_{0\text{эф}}$.

Для нахождения способа введения $\tau_{0\text{эф}}$ целесообразно рассмотреть сначала частный случай предельно больших углов приема, поскольку в малоугловом приближении [7] для него можно получить простые аналитические соотношения. (Применимость методики [7] для расчета P/P_1 в случае достаточно больших углов приема установлена в [9]).

Исходя из соотношений для P/P_1 , полученных в [7], при дополнительном предположении о том, что толщина зондируемого слоя $z - z_0$ мала по сравнению с z , можно получить, что для больших $\varphi_{\text{пр}}$

$$\frac{P}{P_1} = \frac{1}{g_\pi} \int_0^\infty dp q_\pi(p) p \exp[4\pi\tau q(p)] \cdot \left\{ 1 - \exp \left[\varphi_{\text{пр}}^2 \left(8\pi \frac{dq}{dp} p^{-1} \int_{z_0}^z \sigma(\eta) \left(1 - \frac{\eta}{z} \right)^2 d\eta \right)^{-1} \right] \right\}, \quad (1)$$

где $q(p)$, $q_\pi(p)$ – преобразование Ганкеля от малоугловых индикатрис рассеяния [7] вблизи направлений вперед $g(\gamma)$ и назад $g_\pi(\gamma)$, $g_\pi \equiv g_\pi(0)$, $\tau = \int_{z_0}^z \sigma(\eta) d\eta$.

Из (1) видно, что при больших $\varphi_{\text{пр}}$ функциональная связь P/P_1 с $\sigma(z)$ проявляется в явном виде через интегральный член $\int_{z_0}^z \sigma(\eta) \left(1 - \frac{\eta}{z} \right)^2 d\eta$. Взяв за основу этот тип функциональной связи, введем эффективный параметр

$$\tau_{0\text{эф}} = \frac{z_0 (z - z_0) \tau (z)^2}{3z^2 \int_{z_0}^z \sigma(\eta) \left(1 - \frac{\eta}{z} \right)^2 d\eta}. \quad (2)$$

При $\sigma(z) = \sigma \equiv \text{const}$, как нетрудно убедиться из (2), $\tau_{0\text{эф}}$ дает требуемую величину $\tau_0 = z_0\sigma$.

Сопоставление с данными численных расчетов по формулам [7] показывает, что область применимости (1) по $\varphi_{\text{пр}}$ является весьма ограниченной. Так, для однородного слоя с $\tau_0 = 10$ и $\tau = 4$ соотношение (1) применимо с точностью не менее 20% лишь при $\varphi_{\text{пр}} > 10^\circ$. Поэтому непосредственное использование (1) для расчетов P/P_1 нецелесообразно. В то же время численный анализ показал, что соотношением (2) для $\tau_{0\text{эф}}$, полученным на основе (1), можно пользоваться и за пределами применимости (1) при значительно меньших $\varphi_{\text{пр}}$, если расчет P/P_1 для однородного слоя проводить по точным формулам. В частности, было найдено, что для профилей $\sigma(z)$ линейного и экспоненциального вида разница в величине вклада МР согласно расчетам с учетом $\sigma(z)$ и расчетам для однородного слоя с соответствующим $\tau_{0\text{эф}}$ не превышает 7% для $\varphi_{\text{пр}} = 12'$ и 15% для $\varphi_{\text{пр}} = 2'$ при $\tau_0 = 10$ и $\tau \leq 4$.

После введения $\tau_{0\text{эф}}$ задача заключается в построении формул, аппроксимирующих вклад МР для случая однородного слоя как функцию параметров τ_0 , τ , которые для однородного случая при заданном $\varphi_{\text{пр}}$ определяют вклад МР. Оказалось, что вполне удовлетворительная аппроксимация дается соотношением

$$\lg P/P_1 = (a_1 + a_2 y + a_3 y^2) \tau + (a_4 + a_5 y + a_6 y^2) \tau^2, \quad (3)$$

где $y = \lg \tau_0$.

Коэффициенты $a_1 \div a_6$, зависящие от $\varphi_{\text{пр}}$, находятся методом наименьших квадратов. Значение этих коэффициентов для индикатрисы облака С1 на $\lambda = 0,532$ мкм для ряда углов приема приведены в табл. 1. Среднеквадратическая погрешность аппроксимации по формуле (3) при $\tau = 0 \div 6$ составляет $0,02 \div 0,03$ для $\varphi_{\text{пр}} \leq 60'$ при $\tau_0 = 1 \div 100$ и $0,02 \div 0,04$ для $\varphi_{\text{пр}} > 60'$ при $\tau_0 = 1 \div 20$.

Таблица 1

Коэффициенты аппроксимации

$\varphi_{\text{пр}}$ угл. мин	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
4	2,111—02	6,593—02	5,425—02	4,821—03	—1,432—02	4,502—03
6	2,827—02	1,284—01	2,687—02	7,654—03	—2,065—02	8,100—03
12	6,922—02	1,971—01	—9,732—03	1,099—02	—2,583—02	1,165—02
20	1,286—01	1,841—01	—1,037—02	1,074—02	—2,162—02	1,053—02
30	1,854—01	1,436—01	3,294—03	9,725—03	—1,518—02	8,124—03
60	2,680—01	9,258—02	1,842—02	1,057—02	—9,344—03	6,524—03
150	3,367—01	4,054—02	6,114—02	1,656—02	—3,278—03	1,086—03
300	3,760—01	9,465—02	1,565—02	2,251—02	—1,161—02	8,486—03
600	4,332—01	1,382—01	—6,107—02	2,591—02	—1,497—02	1,603—02

Учет вклада МР при определении профиля коэффициента ослабления облачной среды

С помощью полученных в предыдущем разделе аппроксимационных соотношений можно проводить учет вклада МР при использовании методов определения $\sigma(z)$, разработанных в приближении однократного рассеяния. Рассмотрим в качестве примера процедуру учета вклада МР для известного решения уравнения лазерной локации, полученного в предположении постоянства лидарного отношения вдоль трассы зондирования с заданием в качестве граничного условия величины $\sigma(z^*)$ в некоторой точке z^* в конце трассы. При этом считается, что точка z^* заведомо находится внутри облака, и поэтому $\sigma(z^*)$ априори полагается равным некоторому характерному для облачной среды значению σ^* [2].

Соотношение для $\sigma(z)$ в этом случае может быть записано в виде

$$\sigma(z) = \hat{P}(z) R(z)^{-1} \left[\hat{P}(z^*) R(z^*)^{-1} \sigma^* + 2 \int_z^{z^*} \hat{P}(z') R(z')^{-1} dz' \right], \quad (4)$$

где $\hat{P}(z)$ — это лидарный сигнал, умноженный на z^2 , $R(z) = P(z)/P_1(z)$.

Определение $\sigma(z)$ из (4) с учетом вклада МР проводится по следующей итерационной схеме. На 1-й итерации полагается $R^{(1)}(z) \equiv 1$ и из (4) находится $\sigma^{(1)}(z)$. Затем на 2-й итерации с помощью (2), (3) для $\sigma^{(1)}(z)$ находится $R^{(2)}(z)$, которое подставляется в (4), далее находится $\sigma^{(2)}(z)$ и т. д. до тех пор, пока $\sigma^{(k)}(z)$, получаемые на последовательных итерациях, будут мало отличаться друг от друга. Численные эксперименты, проведенные для некоторых типичных профилей $\sigma(z)$, встречающихся в нижней части облаков, подтвердили сходимость данной итерационной процедуры.

Определение оптической толщины и профиля коэффициента ослабления облачного слоя

В случае зондирования облачного слоя сравнительно небольшой оптической толщины ($\tau \lesssim 6$) точка z^* может оказаться в районе противоположной от лидара границы слоя. Априорное задание $\sigma(z)^*$ становится невозможным. В этом случае величину $\sigma(z^*)$ или другую эквивалентную ей константу, играющую роль граничного условия, предлагается рассматривать в качестве неизвестного параметра. Для его определения необходимо привлечь дополнительную экспериментальную информацию и с этой целью проводить одновременную регистрацию нескольких сигналов, соответствующих разным углам приема.

В качестве указанного неизвестного параметра целесообразно взять оптическую толщину слоя вдоль трассы зондирования $\tau = \int_{z_0}^{z^*} \sigma(z) dz$. В этом случае аналогичные (4) решения лидарного уравнения для $\sigma(z)$, соответствующие разным угловым приемным апертурам, записываются в виде:

$$\sigma(z) = 0,5 \hat{P}_i(z) R_i(z)^{-1} \left(T \int_{z_0}^z \hat{P}_i(z') R_i(z')^{-1} dz' + \int_z^{z^*} \hat{P}_i(z') R_i(z')^{-1} dz' \right)^{-1}, \quad (5)$$

где $T = \exp(-2\tau)[1 - \exp(-2\tau)]^{-1}$, $R_i(z) = P_i(z)/P_{1i}(z)$, $i = 1, 2 \dots N_p$ — число принимаемых сигналов.

Для определения τ и $\sigma(z)$ из (5) рассмотрим алгоритм, сочетающий итерационную процедуру определения $\sigma_i(z)$, описанную в предыдущем разделе, с процедурой минимизации по параметру τ .

Работа алгоритма начинается с задания некоторого начального значения $\tau = \tau_N$, которое, вообще говоря, не совпадает с неизвестной истинной величиной $\tau = \tau_{\text{н}}$. Для каждого сигнала $\hat{P}_i(z)$ из (5) при $\tau = \tau_N$ выполняется описанная выше итерационная процедура и находится профиль $\sigma_i(z)$. Полученные профили $\sigma_i(z)$ в общем случае будут различными. Введем функцию рассогласования профилей

$$\Phi(\tau) = \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{k=1}^{N_t} [\sigma_i(z_k) - \bar{\sigma}(z_k)]^2, \quad (6)$$

где z_k — некоторое множество из N_t узловых точек, выбранных на отрезке $[z_0, z^*]$, $\bar{\sigma}(z_k) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \sigma_i(z_k)$.

В отсутствие расчетных и экспериментальных погрешностей функция $\Phi(\tau)$ имеет локальный минимум при $\tau = \tau_{\text{н}}$. Поэтому минимизируя $\Phi(\tau)$ как функцию τ с помощью известных методов (в данной работе применялся метод «золотого сечения» [10]), получим искомую величину оптической толщины слоя. В качестве решения для профиля коэффициента ослабления можно принять $\sigma(z) = \bar{\sigma}(z)$.

Для исследования обусловленности этой задачи была выполнена серия численных экспериментов. Отдельно рассматривалось влияние экспериментальных и методических погрешностей. При изу-

чении влияния экспериментальных погрешностей вклад расчетных ошибок исключался за счет того, что расчет МР при моделировании экспериментальных сигналов проводился не по точным формулам, а с помощью приближенных соотношений (2), (3).

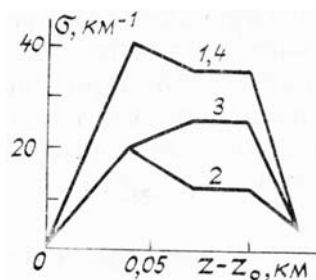


Рис. 1. Профили коэффициентов ослабления

В процессе проведения численных экспериментов варьировались вид профиля $\sigma(z)$, длина волны зондирования и углы приема. Число углов приема N_p бралось равным 2 или 3. Характерные примеры использовавшихся профилей показаны на рис. 1. Начальное расстояние z_0 составляло 2, 4, 3 и 0,4 км для профилей 1, 2, 3, 4 соответственно.

Таблица 2

Результаты численных экспериментов

№ модели	τ	$\Phi_{пр}$ угл. мин	ϵ	ϵ_τ	ϵ_{σ^*}
1	3,52	6, 12, 60	0,15	0,11	0,29
1	3,52	6, 60	0,15	0,13	0,32
4	3,52	60, 600	0,15	0,14	0,32
3	2,24	6, 12, 60	0,10	0,15	0,28
2	1,49	6, 12, 60	0,10	0,25	0,43

Анализ полученных результатов показал, что величина среднеквадратических погрешностей $\epsilon_\tau = \sqrt{\Delta\tau^2}$ и $\epsilon_{\sigma_k} = \sqrt{\Delta\sigma_k^2}$ при заданном уровне экспериментальных погрешностей ϵ слабо зависит от длины волны зондирования и вида профиля при заданном τ . Определяющими параметрами являются τ и диапазон углов приема, характеризующийся отношением максимального и минимального углов приема T_ϕ . С увеличением T_ϕ погрешности ϵ_τ и ϵ_{σ_k} уменьшаются. Анализ, проведенный с учетом факторов, ограничивающих T_ϕ , показал, что при $\tau_0 \leq 10$ оптимальным является диапазон углов $\phi_{пр}$ 1–10°. Соответственно при $\tau_0 > 10$ оптимальные $\phi_{пр}$ уменьшаются обратно пропорционально τ_0 .

В табл. 2 приводятся результаты численных экспериментов для $\sigma(z)$, представленных на рис. 1, при оптимальном выборе углов приема. Погрешность ϵ_{σ_k} дана для конечной точки трассы z^* , где она максимальная.

Из табл. 2 видно, что погрешности ϵ_τ и ϵ_{σ^*} растут с уменьшением τ . Причина сильной зависимости погрешностей от параметров τ и T_ϕ заключается в том, что эти параметры определяют разницу во вкладах МР (и, соответственно, в сигналах) для разных углов приема, которая и является информативной относительно τ величиной. С уменьшением τ и T_ϕ эта разница уменьшается, что приводит к росту ϵ_τ и ϵ_{σ_k} . Проведенные численные эксперименты показали, что при $\tau \approx 1$ погрешности ϵ_τ и ϵ_{σ^*} при разумных величинах ϵ резко возрастают, причем в ряде случаев минимум $\Phi(\tau)$ в области физически приемлемых τ вообще отсутствует (срыв решения). Поэтому величина $\tau \approx 1 \div 1,5$ является предельно применимости данного метода по τ снизу.

Источником методических погрешностей являются приближения, заложенные в расчетную модель. Поэтому при их исследовании расчеты вклада МР в «экспериментальные» сигналы проводились по точным формулам [7], причем задавалось изменение спектра вдоль трассы зондирования. Проведенное исследование показало, что влияние методических погрешностей сопоставимо с влиянием экспериментальных при $\epsilon = 0,15$. При уровне экспериментальных погрешностей $\epsilon \leq 0,10$, который впрочем трудно обеспечить, если учесть большой диапазон изменения сигналов, имеет смысл провести уточнение методики приближенного расчета вклада МР.

Совместное определение профиля интегрального параметра спектра размеров и коэффициента ослабления

Условия постановки данной задачи обсуждены в [6]. Рассмотрим один из вариантов построения алгоритма обращения результатов зондирования, проведенного с набором различных угловых приемных апертур, относительно профилей интегрального параметра спектра размеров $r_n(z)$ и коэффициента ослабления $\sigma(z)$. Этот вариант имеет предварительный модельный характер и предполагает, что в пределах каждого отрезка $[z_{j-1}, z_j]$ разбиения трассы $\sigma(z)$ меняется от σ_{j-1} до σ_j по линейному закону, а параметр r_{nj} на $[z_{j-1}, z_j]$ остается постоянным.

Набор исходных данных составляет N_s лидарных сигналов $F(z, \varphi_l)$, отвечающих углам приема φ_l , выбранным в соответствии с рекомендациями [6]. Сигналы $F(z, \varphi_l)$ считаются некалиброванными по абсолютной величине, т. е. заданными с точностью до произвольной постоянной. Предлагаемый алгоритм осуществляет последовательное определение σ_j, r_{nj} , начиная с $j = 1$. Величина σ_0 считается известной (поскольку точка z_0 находится на границе слоя, то для определения σ_0 можно использовать методы, описанные в [1]).

Переход от одного отрезка разбиения трассы к другому происходит по следующей схеме. Пусть величины σ_k, r_{nk} для $k \leq L-1$ уже определены. Тогда величины σ_L, r_{nL} рассматриваются как неизвестные параметры, подлежащие определению из условия наилучшего соответствия на отрезке $[z_{L-1}, z_L]$ экспериментальных $F(z, \varphi_l)$ и расчетных $F_1(z, \varphi_l)$ сигналов. Введем функцию рассогласования сигналов $F(z, \varphi_l)$ и $F_1(z, \varphi_l)$:

$$\Phi(\sigma_L, r_{nL}) = \sum_{m,l} [C_l F_1(\sigma_L, r_{nL}, z_m, \varphi_l) - F(z_m, \varphi_l)]^2, \quad (7)$$

где $\{z_m\}$ — некоторая совокупность точек, взятых на отрезке $[z_{L-1}, z_L]$, C_l — неизвестные константы. Дальнейшая задача состоит, очевидно, в нахождении σ_L, r_{nL} и C_l , обеспечивающих минимум $\Phi(\sigma_L, r_{nL})$. Можно показать, что этот минимум по параметру C_l достигается при

$$C_l = \left(\sum_{m,l} F_t \cdot F \right) \left(\sum_{m,l} F_t^2 \right)^{-1}.$$

Поэтому задача сводится к минимизации $\Phi(\sigma_L, r_{nL})$ в пространстве σ_L, r_{nL}

при указанных значениях C_l . Поиск минимума проводился с помощью известных методов нелинейной оптимизации параметров [10].

В соответствии с тем, что при выбранных $\varphi_{пр}$ вклад МР зависит только от r_n , при проведении расчетов форма спектра задавалась фиксированной (гамма-распределение с $\mu = 6$). Свободным параметром являлся модальный радиус, однозначно связанный с r_n . Расчеты $F_t(z_m, \varphi_l)$ проводились по точным формулам, приведенным в [7]. В целях сокращения затрат машинного времени схема вычислений предполагала точный расчет $\lg P/P_1$ для некоторого набора узловых точек на плоскости σ, r_n и квадратичную интерполяцию в промежуточных точках. Набор узловых точек смещался по мере надобности при продвижении алгоритма оптимизации в точку минимума.

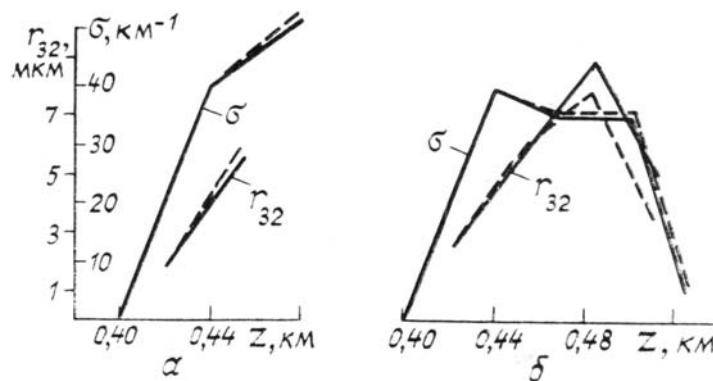


Рис. 2. Примеры восстановления профилей коэффициента ослабления $\sigma(z)$ и интегрального параметра спектра размеров $r_{32}(z)$ (численный эксперимент)

Примеры применения описанного алгоритма приведены на рис. 2, где сплошные линии показывают задаваемые, а штриховые — восстановленные профили — $\sigma(z)$ и $r_{32}(z)$. Использовались 4 угла приема $\varphi_l = 2', 4', 6'$ и $8'$ (рис. 2, а) и 5 углов $\varphi_l = 2', 4', 6', 10'$ и $16'$ (рис. 2, б). Спектр на отдельных отрезках $[z_{j-1}, z_j]$ задавался в виде одно- и двухмодальных функций, составленных из логарифмически нормальных и гамма-распределений. Модальные радиусы отдельных мод заключались в

пределах 1–6 мкм (кроме 1-го отрезка (рис. 2, *a*), когда они равнялись 0,15 и 1,5 мкм).

Из рис. 2 видно вполне удовлетворительное совпадение восстановленных по лидарным сигналам и задаваемых изначально профилей. Имеющиеся расхождения обусловлены как погрешностями счета, так и влиянием исходных приближений (корреляция $\lg P/P_1$ с r_{32}), заложенных при постановке задачи [6].

Резюмируя результаты данной работы в совокупности с [6], отметим, что учет и использование эффектов МР позволяет существенно расширить возможности лазерного зондирования облачной среды, в частности, увеличить оптическую толщину зондирования при определении профиля коэффициента ослабления, по крайней мере, до $\tau \approx 6$, а также проводить сквозное зондирование облачного слоя с определением его оптической толщины (при $1,5 \leq \tau \leq 6$). В принципиальном плане показана также возможность определения профилей интегрального параметра спектра размеров и водности облачной среды.

1. Зуев В.Е., Креков Г.М., Крекова М.М. и др. // Вопросы лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1976. С. 3–33.
2. Зуев В.Е., Задде Г.О., Кавкьянов С.И. и др. // Дистанционное зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука, 1978. С. 60–68.
3. Белов В.В., Глазов Г.Н. Лазерное зондирование геометрической и оптической толщин облаков. Томск, 1976. 31 с. (Препринт/ИОА СО АН СССР, № 16).
4. Кауль Б.В., Креков Г.М., Крекова М.М. // Квантовая электроника. 1977. Т. 4. № 11. С. 2408–2413.
5. Шаманаев В.С. // VI Всесоюз. симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. (Тезисы докл.). Ч. 1. Томск, 1980. С. 292–295.
6. Коршунов В.А. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. № 1. С. 5–11.
7. Коршунов В.А. // Изв. вузов СССР. Сер. Радиофизика. 1980. Т. 24. № 9. С. 1099–1108.
8. Коршунов В.А. // Труды ИЭМ. Вып. 45 (135). М.: Гидрометеиздат, 1988. С. 87–95.
9. Коршунов В.А. // Изв. вузов СССР. Сер. Радиофизика. 1987. Т. 30 № 10. С. 1193–1200.
10. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. М.: Мир, 1985. 509 с.

Научно-производственное объединение «Тайфун»
Госкомгидромета СССР, Обнинск

Поступила в редакцию
21 апреля 1989 г.

V. A. Korshunov. The Account for Use of Multiple Scattering Effects in Laser Sounding of Cloud Media.

Approximation expressions for the value of the multiple scattering (MS) contribution to lidar signals from a cloud medium are obtained, which take into account the profile of the extinction coefficient along a lidar sensing path. An iterative algorithm is proposed for correcting the known single scattering solution of the lidar equation for MS effects. An algorithm of the lidar signals interpretation is described which permits one to determine the optical thickness τ and profile of the extinction coefficient of cloud layer with $1,5 \leq \tau \leq 6$ by using a number of lidar signals obtained at different receivers field of view angles. For the same receiver scheme it is shown the possibility of determining the size-spectrum integral parameter and liquid water content profiles in the cloud medium.