

М.М. Крекова, Г.А. Титов

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ КУЧЕВЫХ ОБЛАКОВ НА СРЕДНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИДАРНЫХ СИГНАЛОВ

Рассматриваются особенности формирования эхо-сигнала при кучевой облачности. Исследуется зависимость средней мощности от геометрической формы отдельных облаков и вариаций вертикального профиля коэффициента ослабления. Приведены оценки влияния многократного рассеяния между облаками на временную структуру обратно рассеянного сигнала. Показана возможность оценки альbedo подстилающей поверхности при наличии одноярусной облачности.

Прямая задача теории лазерного зондирования облачных полей со стохастической геометрией состоит в определении статистики излучения, регистрируемого приемником, по известному излучаемому сигналу и заданным параметрам облачности, в том числе и статистическим. Решение задачи целесообразно начать с исследования влияния эффектов, связанных с конечными размерами отдельных облаков, на среднюю энергию и мощность эхо-сигнала.

В [1] рассмотрены математические модели статистически однородных облачных полей, приведены уравнения для средней интенсивности нестационарного излучения и метод их решения в предположении о постоянстве оптических параметров облаков. На примере модельной задачи проиллюстрировано влияние на формирование лидарного сигнала эффектов, связанных с конечными горизонтальными размерами кучевых облаков. В [2] исследована изменчивость средних энергии и мощности сигналов орбитальных лидаров при вариациях типа облаков (слоистые или кучевые), оптико-геометрических параметров облачности и условий приема. Коэффициенты ослабления и рассеяния реальных облаков имеют ярко выраженную вертикальную зависимость, а облачное поле может быть статистически неоднородным. Целью настоящей работы является исследование зависимости средних характеристик эхо-сигнала от указанных факторов.

Постановка задачи

Моностатистический лидар, оптическая ось которого ориентирована в надир, находится в точке $(0, 0, H_0)$ и излучает δ -импульс единичной интенсивности в телесном угле $2\pi(1 - \cos\varphi_n)$, а детектор принимает излучение в телесном угле $2\pi(1 - \cos\varphi_d)$. Рассеяние и поглощение света аэрозольно-молекулярной атмосферой не учитывается. Подстилающая поверхность горизонтально однородна, имеет альbedo A_s и отражает излучение по закону Ламберта. Предположим, что спектр размеров водяных капель постоянен, а концентрация капель зависит только от высоты z . Оптическая модель облачности задается в слое $h \leq z \leq H$ в виде случайных скалярных полей коэффициента ослабления $\sigma(z)\kappa(\mathbf{r})$, альbedo однократного рассеяния $\lambda\kappa(\mathbf{r})$ и индикатрисы рассеяния $g(\omega, \omega')\kappa(\mathbf{r})$, где $\kappa(\mathbf{r})$ — случайная индикаторная функция наличия облаков; ω — единичный вектор направления. Коэффициент ослабления считается постоянным $\sigma(z) = \sigma_0$ или имеет такую параболическую зависимость от z , при которой $\sigma(h) = \sigma(H) = 0$ и $\tau = \int_h^H \sigma(z) dz = \sigma_0(H - h)$. Оптические параметры облаков рассчитаны для облака С1 [3] и длины волны 0,53 мкм.

Статистически неоднородное поле $\kappa(\mathbf{r})$ моделируется на основе пуассоновских потоков точек в пространстве [4]. Отдельные кучевые облака аппроксимируются опрокинутыми усеченными параболоидами вращения диаметром D и высотой $\Delta H = H - h$, т.е. облака имеют одинаковые размеры и их центры (геометрический центр основания) расположены в одной плоскости $z = h$. Вероятность наличия облаков $p(z) = \overline{\kappa(\mathbf{r})}$ определяется при $\Delta H = D$ формулой

$$p(t) = 1 - |(1 - N)^{1-t}|, \quad 0 \leq t \leq 1,$$

где N — балл облачности; $t = (z - H)/D$; $p(0) = N$, $p(1) = 0$; черта сверху означает среднее по ансамблю $\kappa(\mathbf{r})$. Вероятность наличия облаков является одним из основных параметров, определяющих перенос радиации в облачных полях.

В настоящее время из стохастического уравнения переноса не получены уравнения для средней интенсивности излучения, модулируемого статистически неоднородным облачным полем. По этой причине для оценки средних характеристик эхо-сигнала будем использовать численный метод [4],

основанный на моделировании выборочных реализаций поля $\kappa(\mathbf{r})$, на решении методом Монте-Карло уравнения переноса в каждой реализации облачности как трехмерной рассеивающей среде с весьма сложной геометрией и на последующей статистической обработке полученных решений. Расчеты энергии \bar{E} и мощности $\bar{P}(L)$ лидарного сигнала выполнены при $\varphi_{\text{н}} = 10^{-4}$ рад, $10^{-4} \leq \varphi_d \leq 10^{-3}$ рад, $H_0 = 300$ км, $\Delta H = 0,5$ км, $h = 0,5$ км, $\tau = 10$, $A_s = 0,2$, где $L = [l - 2(H_0 - H)]/2$, l — длина пробега. Среднюю мощность эхо-сигнала от подстилающей поверхности можно считать линейно зависящей от A_s , поэтому приводимые ниже результаты можно легко пересчитать на другие значения A_s .

Статистически однородное поле кучевых облаков, рассматриваемое в [1, 2], является совокупностью облаков в виде параллелепипедов одинаковой высоты ΔH и случайного горизонтального размера. Функция распределения таких облаков экспоненциальна и их средний размер приблизительно равен D , а $p = N$. Для удобства средние характеристики эхо-сигнала в этой модели будем обозначать индексом 1, в модели из параболических облаков и при $\sigma = \text{const}$ — индексом 2, а при $\sigma = \sigma(z)$ — индексом 3.

Результаты расчетов

При одинаковых N , D , ΔH и $\sigma = \text{const}$ в статистически неоднородном облачном поле из параболических облаков в среднем содержится гораздо меньше (в 1,5–2 раза при $N \leq 0,9$) облачного вещества, чем в статистически однородном. Это является основной причиной уменьшения средней энергии эхо-сигнала при таких изменениях конфигурации отдельного облака (рис. 1, кривые 1, 2). С увеличением угловой апертуры φ_d величина рассеивающего объема, попадающего в поле зрения приемника, в среднем возрастает быстрее для облаков в виде параллелепипедов, чем для параболических, а потому неравенство $\bar{E}_2 < \bar{E}_1$ усиливается.

На рис. 1 представлена также зависимость средней энергии от вертикального профиля коэффициента ослабления в облаке. При всех φ_d и $N < 1$ средняя энергия от оптически неоднородного облака ($\sigma = \sigma(z)$) существенно меньше, чем от однородного ($\sigma = \text{const}$) и это различие увеличивается с возрастанием N до некоторого $N_{\text{max}} \leq 1$. Неравенство $\bar{E}_3 < \bar{E}_2$ объясняется тем, что при $\sigma = \sigma(z)$ существует большая (по геометрическим размерам), чем при $\sigma = \text{const}$, область оптически тонких краев, локализованная вблизи основания облака и способная пропускать значительную часть падающего оптического излучения. Усиление данного неравенства с ростом N связано, по-видимому, с различными условиями формирования многократно рассеянного между облаками излучения (радиационное взаимодействие облаков), относительный вклад которого увеличивается с возрастанием N и для $N = 0,5$ составляет 20–25% (рис. 1, кривые 3, 4 и 3', 5). В интервале $0 < \varphi_d < \varphi_{\text{н}}$ средняя энергия линейно зависит от φ_d .

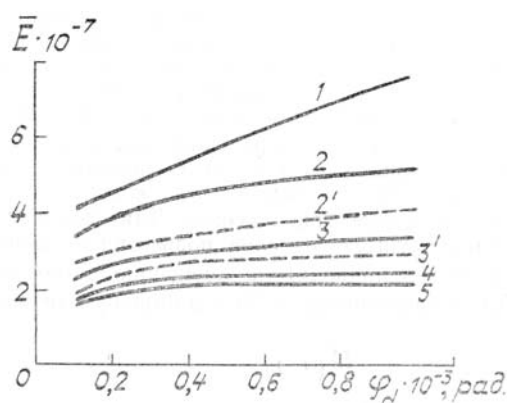


Рис. 1. Влияние угловой апертуры детектора φ_d на среднюю энергию сигнала лидара \bar{E} в зависимости от балла облачности N и модели облаков при $D = 0,25$ км: 1 — \bar{E}_1 , 2 — \bar{E}_2 , 2' — \bar{E}_3 , при $N = 0,7$; 3 — \bar{E}_2 , 3' — \bar{E}_3 при $N = 0,5$; 4 — \bar{E}_2 , 5 — \bar{E}_3 без учета радиационного взаимодействия при $N = 0,5$. Расчет \bar{E}_1 и \bar{E}_2 был проведен при $\sigma = 20 \text{ км}^{-1}$

На рис. 2 представлена зависимость средней мощности от балла облачности и геометрической формы облаков. Из простых геометрических соображений следует, что в случае параболических облаков вблизи негоризонтальной ограничивающей поверхности существует область, простирающаяся от основания до вершины и дающая основной, приблизительно одинаковый вклад в среднюю мощность $\bar{P}^0(L)$ однократно рассеянного назад излучения. Поэтому величина $\bar{P}^0(L)$ слабо зависит от $L < \Delta H$ и ее достаточно высокий уровень сохраняется до нижней границы облаков. При заданных

параметрах задачи на величину средней мощности $\overline{P^m(L)}$ многократно рассеянного света существенное влияние оказывает взаимодействие радиационных полей отдельных кучевых облаков. Характерной особенностью поведения $\overline{P^m(L)}$ является наличие двух максимумов, существование которых можно объяснить значительным сдвигом во времени максимумов одно- и двукратно рассеянного между облаками излучения, регистрируемого приемником. Суммарная средняя мощность эхо-сигнала сохраняет указанные особенности $\overline{P^0(L)}$ и $\overline{P^m(L)}$, а вклад $\overline{P^0(L)}$ в $\overline{P(L)}$ — не менее 40–50%.

С понижением N в среднем уменьшается величина рассеивающего объема, попадающего в поле зрения приемника, и $\overline{P(L)}$ уменьшается почти при всех L (рис. 2, кривые 1, 4). За счет увеличения в среднем расстояния между отдельными кучевыми облаками второй максимум $\overline{P(L)}$ смещается в сторону больших значений L .

При вариациях конфигурации облаков происходит существенная трансформация временной структуры лидарного сигнала (рис. 2, кривые 1, 5), обусловленная изменчивостью вероятности $p(z)$ наличия облаков. С ростом L от 20 до 500 м средняя мощность эхо-сигнала от статистически однородного поля кучевых облаков уменьшается примерно в 800 раз, тогда как в случае параболических облаков изменения $\overline{P(L)}$ лежат в пределах одного порядка, и достаточно высокий по энергетике сигнал приходит с любых рассеивающих объемов внутри облачного слоя. Последнее обстоятельство представляется весьма важным с точки зрения создания методов лазерного зондирования кучевой облачности. Следует также отметить, что статистическая неоднородность облачного поля приводит к более сложному характеру радиационного взаимодействия облаков.

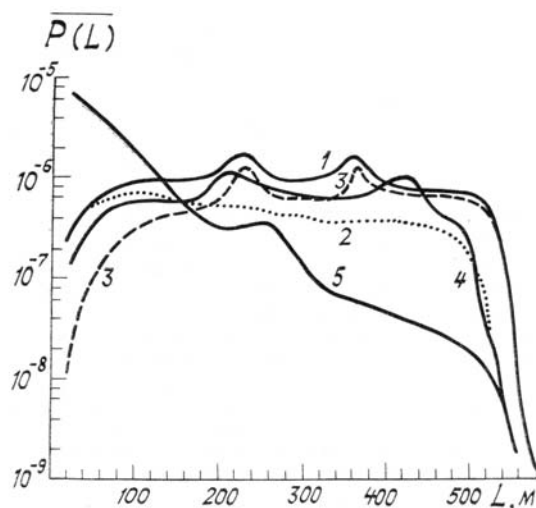


Рис. 2. Зависимость средней мощности обратного рассеянного сигнала $\overline{P(L)}$ от балла облачности N и модели облаков при $D = 0,25$ км, $\sigma = 20$ км⁻¹, $\phi_d = 3 \cdot 10^{-4}$ рад: 1 — $\overline{P_1(L)}$, 5 — $\overline{P_2(L)}$ при $N = 0,7$; 4 — $\overline{P_2(L)}$ при $N = 0,5$; 2 — $\overline{P_2^0(L)}$, 3 — $\overline{P_2^m(L)}$ при $N = 0,7$

Приведенные выше оценки $\overline{P(L)}$ получены в предположении, что коэффициент ослабления постоянен внутри облака. Рассмотрим случай, когда отдельное облако аппроксимируется параболомом и имеет параболическую зависимость коэффициента ослабления от высоты. На рис. 3 приведены средние мощности, рассчитанные для различных вертикальных профилей $\sigma(z)$ и одинаковых других параметрах облачного поля. Исключая область $120 < L < 200$ м, выполняется неравенство $\overline{P_2(L)} > \overline{P_3(L)}$, справедливость которого объясняется тем, что при фиксированном $p(z)$ и параболическом профиле $\sigma(z)$ вблизи вершины и основания кучевого облака содержится гораздо меньше облачного вещества, чем при $\sigma = \text{const}$. Для заданного профиля $\sigma(z)$ в середине облака существует слой повышенной оптической толщины, наличие которого приводит к смещению относительно $\overline{P_2(L)}$ максимумов $\overline{P_3(L)}$ на величину ~ 50 м в сторону меньших L .

Расчеты показали, что при $\sigma(z) = \text{const}$ снижается относительная роль однократно рассеянного света в формировании суммарной мощности эхо-сигнала: начиная с $L \sim 100–150$ м вклад $\overline{P^0(L)}$ в $\overline{P(L)}$ не превосходит $\sim 20\%$. Из рис. 3 видно, что локальные максимумы $\overline{P(L)}$ обязаны своим происхождением радиационному взаимодействию облаков (разность между кривыми 2 и 3), вклад кото-

рого при $l > 150$ м сравним с вкладом в $\overline{P(L)}$ мощности излучения от отдельных кучевых облаков, как независимых рассеивателей. Эта мощность формируется за счет излучения, траектория которого от источника до приемника целиком принадлежит одному из облаков.

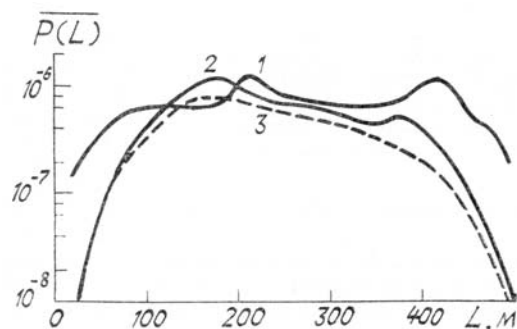


Рис. 3. Влияние модели облаков на формирование средней мощности эхо-сигнала $\overline{P(L)}$ при $N = 0,5$, $D = 0,25$ км и $\varphi_d = 3 \cdot 10^{-4}$ рад: 1 — $\overline{P_2(L)}$, 2 — $\overline{P_3(L)}$; 3 — $\overline{P_3(L)}$ без учета радиационного взаимодействия между облаками

На рис. 4 приведена зависимость средней мощности от горизонтального размера облаков D . При заданных N и ΔH с ростом D в интервале $0 < z < H$ увеличивается вероятность наличия облаков, поэтому в среднем возрастает величина рассеивающего оптического объема, попадающего в поле зрения приемника, и средняя мощность эхо-сигнала увеличивается. Однако при таких вариациях D увеличивается в среднем расстояние между облаками, что приводит к уменьшению средней мощности за счет радиационного взаимодействия облаков. Первый из указанных эффектов доминирует, поэтому $\overline{P(L)}$ увеличивается, а локальные максимумы становятся нечетко выраженными.

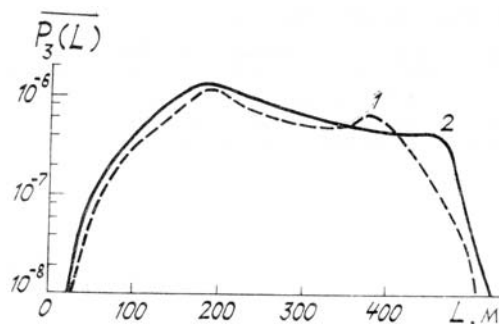


Рис. 4. Зависимость средней мощности сигнала лидара $\overline{P_3(L)}$ от диаметра облаков D при $N = 0,5$ и $\varphi_d = 3 \cdot 10^{-4}$ рад: 1 — $D = 0,25$ км; 2 — $D = 0,5$ км

Т а б л и ц а

φ_d	$N=0,5$		$N=0,7$	
	$\sigma = \text{const}$	$\sigma = \sigma(z)$	$\sigma = \text{const}$	$\sigma = \sigma(z)$
20	3,82-07	7,62-08	2,46-07	5,52-08
30	3,84-07	7,82-08	2,49-07	5,69-08
40	3,86-07	7,88-08	2,50-07	5,79-08
50	3,87-07	7,93-08	2,52-07	5,91-08
1	3,88-07	8,02-08	2,53-07	6,12-08
3	4,05-07	8,58-08	2,71-07	6,87-08
Нерассеянное излучение	3,93-07	4,09-07	2,70-07	2,88-07

Средняя энергия $\overline{E_s}$ эхо-сигнала, отраженного от ламбертовской подстилающей поверхности, приведена в таблице. Вклад в $\overline{E_s}$ нерассеянной радиации, дважды прошедшей через статистически

неоднородную кучевую облачность, приведен отдельно в нижней строке таблицы. С ростом N увеличивается среднее количество облачного вещества в слое, поэтому возрастает средняя кратность рассеяния пропущенного облачным полем излучения и импульс сильнее «расплывается» в горизонтальной плоскости, что вызывает уменьшение рассеянной компоненты \bar{E}_s . Кроме того, с возрастанием N увеличивается вероятность закрытости поля зрения приемника облаками, а средняя энергия нерассеянного излучения уменьшается. В случае $\sigma = \sigma(z)$ основной вклад в \bar{E}_s вносит нерассеянное излучение, а вклад рассеянной радиации в 4–5 раз меньше, чем при $\sigma = \text{const}$.

В целом полученные результаты свидетельствуют о высокой чувствительности средних характеристик лидарных сигналов к вариациям статистических и оптических параметров поля кучевых облаков. Это необходимо учитывать при постановке и решении обратных задач. Величина \bar{E}_s одного порядка с E , что открывает принципиальную возможность оценки в условиях одноярусной кучевой облачности альbedo подстилающей поверхности с помощью орбитальных лидаров.

1. Зуев В.Е., Креков Г.М., Крекова М.М., Титов Г.А. //Исследования Земли из космоса. 1987. № 5. С. 35.
2. Зуев В.Е., Креков Г.М., Крекова М.М., Титов Г.А. //Исследования Земли из космоса. 1988. № 1. С. 89.
3. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир. 1971. 290 с.
4. Титов Г.А. //Оптика атмосферы. 1988. № 4. С. 3.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию
3 июня 1988 г.

M. M. Krekova, G. A. Titov. The Effect of the Spatial Cumuli Field Inhomogeneity on the Mean Lidar Signal Characteristics.

Specific features inherent in the echo-signal formation within cumuli fields are discussed. The mean lidar return power as a function of the individual cloud geometry and the vertical profile of the extinction coefficient is examined. The effect of the multiple cross-scattering by clouds on the temporal variations of the back-scattered signal is estimated. The evaluation of the underlying surface albedo in the presence of a single-layered cloudiness is shown to be feasible.