

УДК 551.501

Г.М. Креков, М.М. Крекова

СТРУКТУРА СИГНАЛА ОРБИТАЛЬНОГО ЛИДАРА, ОТРАЖЕННОГО ВЕРХНЕЙ КРОМКОЙ ОБЛАКОВ. Ч. 2. ОПТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНЫЕ ОБЛАКА

Расчет сигналов орбитального лидара выполнен методом Монте-Карло. Анализ результатов показал, что при определенных оптических условиях возможна идентификация неоднородности верхней кромки облаков. Оптическая толщина облачного слоя не превышала $\tau \approx 2,5 \div 3$. Оценки получены для лидара, работающего на длине волны $\lambda = 0,532$ нм и удаленного от облака на расстояние $H \sim 400$ км.

Введение

Возможность обнаружения облаков различной оптической плотности с помощью лидара космического базирования ограничивается чувствительностью регистрирующей системы. В части 1 [1] было показано, что динамический диапазон амплитуды сигнала $P(h)$, приходящего из глубины облачного слоя толщиной $\Delta H = 100$ м, составляет 1 – 2 порядка и изменение амплитуды сигналов $P(h)$ в зависимости от величины σ_{ext} находится в тех же самых пределах [1, рис. 1]. В связи с этим, по-видимому, возможна селекция неоднородной структуры хотя бы верхней части облачного слоя. Однако это противоречит результатам, представленным нами в более ранней работе [2]. Дело в том, что возможности вычислительной техники того времени не позволяли проводить расчеты с достаточным уровнем статистической выборки, необходимой при малых временных интервалах стробирования. Расчеты в [2] выполнялись с разрешением по глубине в облаке $\Delta h = c\tau/2$ порядка 20 – 50 м, что не позволило выявить тонкую временную структуру сигнала. В данном сообщении мы представляем результаты расчетов, выполненных с объемом статистической выборки порядка 10 млн. фотонных историй, с разрешением по глубине облака $\Delta h \leq c\tau_i$, где τ_i – длительность импульса.

Начальные и граничные условия задачи соответствовали данным, описанным в части 1 [1]. Расчеты выполнены для длины волны $\lambda = 0,532$ нм, угла расходимости источника $\varphi_i = 0,2$ мрад и угла приема $\varphi_d = 0,4$ мрад. При задании профиля коэффициента ослабления облако разбивалось на n слоев. Коэффициент ослабления $\sigma_{\text{ext}}(h)$ изменялся от слоя к слою, а внутри каждого из них оставался постоянным. Индикатриса рассеяния облака соответствовала типу С1 [3], оптическая модель атмосферного аэрозоля в 30-км надоблачном слое задана согласно [4]. При задании профилей $\sigma_{\text{ext}}(h)$ мы руководствовались тем, что в условиях реальной атмосферы под действием раз-

личных динамических процессов происходят образование и трансформация облаков с их многообразием форм и типов. Мы рассмотрели наряду с типичными усредненными профилями $\sigma_{\text{ext}}(h)$, нарастающим или спадающим от верхней кромки облака [5], и более сложные.

Результаты расчетов

Расчеты выполнены для верхней части облачного слоя толщиной $\Delta H = 80 \div 120$ м и суммарной оптической толщиной $\tau \sim 3$. На большей части рисунков слева показан вид профиля коэффициента ослабления, изменяющегося по глубине облака. Рис. 1 и 2 иллюстрируют изменение полной мощности отраженного сигнала $P(h)$ в зависимости от глубины лоцируемого слоя. На рис. 1 показан характер изменения сигнала для двух примеров профилей $\sigma_{\text{ext}}(h)$, монотонно (рис. 1,а) и резко спадающего, а затем стабильно по глубине (рис. 1,б). При этом в обоих случаях среднее значение σ_{ext} в слое не превышало 20 км^{-1} , а $\tau \sim 2,2$.

Расчитанные сигналы $P(h)$ заметно различаются между собой. Фактически они повторяют характер изменения $\sigma_{\text{ext}}(h)$. Так, на рис. 1, б резкий спад сигнала $P(h)$ прекращается практически одновременно со спадом величины коэффициента ослабления, а далее изменения сигнала приобретают монотонный характер. На рис. 2 приведены результаты расчета $P(h)$ для нарастающих профилей $\sigma_{\text{ext}}(h)$, отличающихся друг от друга градиентами изменения по глубине в облаке.

На рис. 2,а показан ход $P(h)$ при относительно медленном нарастании величины коэффициента ослабления, его среднее значение в неоднородном слое $\sim 27 \text{ км}^{-1}$, а $\tau \sim 1,2$. На рис. 2,б приведена зависимость $P(h)$ при резко возрастающем профиле $\sigma_{\text{ext}}(h)$, со средним значением в неоднородном слое $\sigma_{\text{ext}} \sim 30 \text{ км}^{-1}$, а $\tau \sim 0,9$. И в данных примерах качественное поведение сигналов $P(h)$ соответствует ходу

$\sigma_{\text{ext}}(h)$. При этом положения максимумов $P(h)$ и $\sigma_{\text{ext}}(h)$ практически совпадают или находятся достаточно близко.

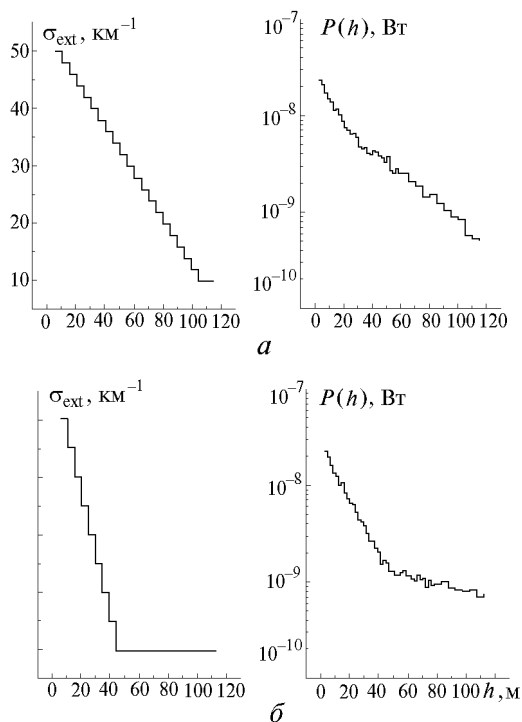


Рис. 1. Зависимость мощности отраженного сигнала $P(h)$ от вида профиля коэффициента ослабления $\sigma_{\text{ext}}(h)$

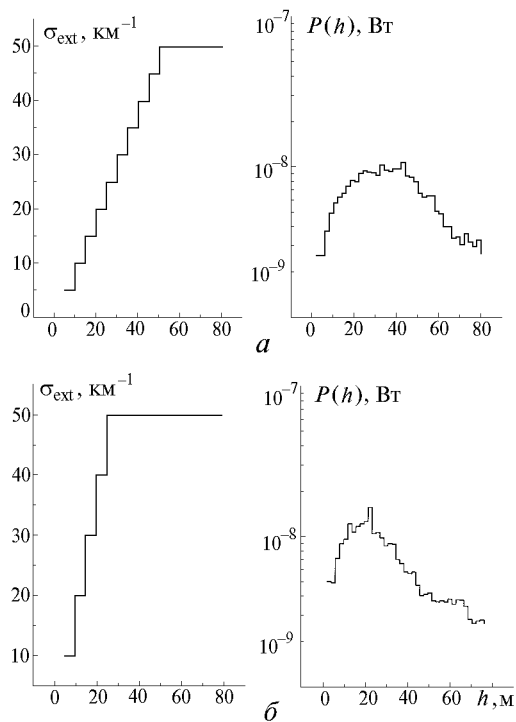


Рис. 2. Та же зависимость $P(h)$, что и на рис. 1, для двух возрастающих типов профилей $\sigma_{\text{ext}}(h)$

Возникает вопрос: возможно ли воспроизведение пространственной разверткой $P(h)$ профиля $\sigma_{\text{ext}}(h)$ при наличии нескольких экстремальных значений в глубине облачного слоя, или картина «заместя» за счет фона многократного рассеяния. Расчет зависимости мощности сигнала $P(h)$ для облаков с более сложными профилями коэффициента ослабления представлен на рис. 3. Средние значения σ_{ext} для расчетных слоев облака в данных примерах не превышали $24 \div 30 \text{ км}^{-1}$, а $\tau \sim 2,5 \div 3$.

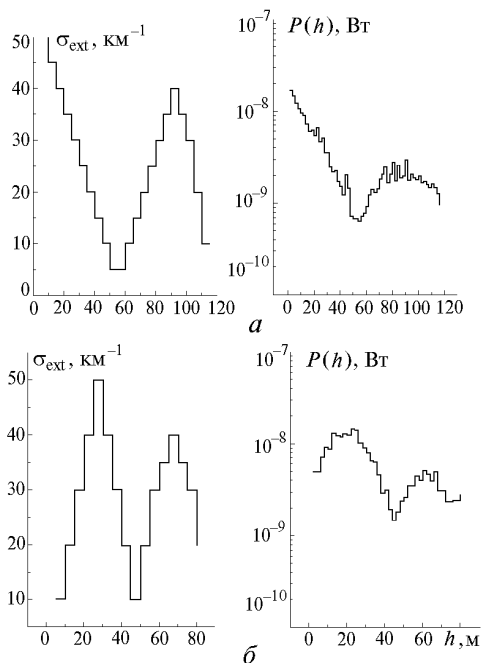


Рис. 3. Изменение мощности сигнала $P(h)$ в условиях полиэкстремального вида характеристики $\sigma_{\text{ext}}(h)$

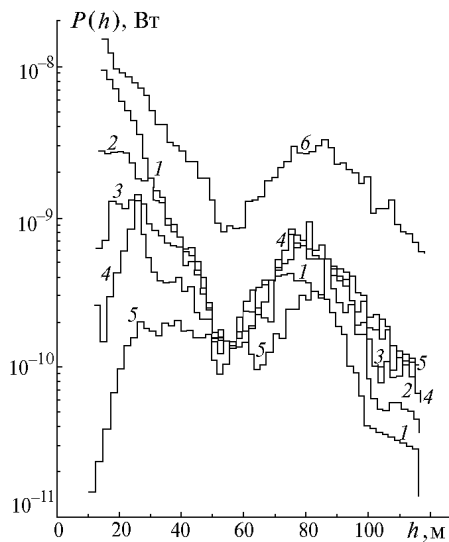
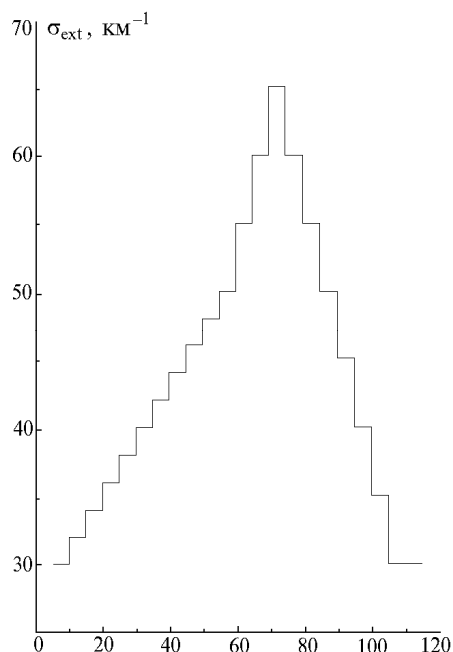


Рис. 4. Распределение мощности отраженного излучения по кратностям рассеяния. Номера у кривых 1 – 5 соответствуют порядку кратностей рассеяния, 6 – полный сигнал $P(h)$

Результаты, представленные на данном рисунке, иллюстрируют также наличие корреляции между характером изменения сигнала и видом профиля коэффициента ослабления. Положения максимумов $P(h)$ и $\sigma_{\text{ext}}(h)$ практически совпадают, хотя максимум $P(h)$ более размыт и может быть несколько смещен в сторону меньших или больших оптических толщин. При этом характер смещения положения максимумов сигнала, а также степень их размытости определяются только поведением фонового компонента сигнала. Это подтверждается данными рис. 4, где показано распределение излучения $P(h)$ по кратностям рассеяния для профиля коэффициента ослабления, приведенного на рис. 3,а.

Как и для однородного облака, до оптических толщин $\tau \leq 2,5 \div 3$ определяющую роль в формировании сигнала играет излучение низких кратностей рассеяния. Перераспределение их мощности происходит на оптических глубинах $\tau \approx 1 \div 1,5$. Если положение максимума $\sigma_{\text{ext}}(h)$ соответствует значениям оптической толщины $\tau > 1,2$ или $\tau < 1,2$, то максимум сигнала $P(h)$ в первом случае смещается в сторону меньшей оптической толщины, во втором – в сторону большей. Результаты, иллюстрируемые рис. 4, позволяют отметить достаточно важный момент: кратности низких порядков рассеяния могут сохранять информацию о профиле коэффициента ослабления и при космической схеме базирования лидара.



Расчет сигнала лидара для неоднородного облака высокой оптической плотности представлен на рис. 5. Профиль коэффициента ослабления имеет параболическую форму, среднее значение коэффициента ослабления в заданном слое $\sigma_{\text{ext}} \approx 43 \text{ км}^{-1}$, его максимальное значение приходится на глубину $\tau \sim 3,5$. Сигнал $P(h)$ имеет монотонно спадающий характер, отсутствует корреляция с видом профиля коэффициента ослабления.

Это объясняется следующим образом. В заданной оптической ситуации сигнал однократного рассеяния $P_1(h)$ не имеет максимума в связи с тем, что ослабление излучения не компенсируется ростом коэффициента обратного рассеяния согласно профилю $\sigma_{\text{ext}}(h)$.

Кроме того, формирование кратностей низкого порядка рассеяния завершается на глубинах $\tau \sim 1,5 \div 2$ (см. [1]), и поэтому положение их максимумов не совпадает с положением максимума профиля коэффициента ослабления. Основная роль низких кратностей в формировании отраженного сигнала сохраняется до $\tau \sim 2 \div 2,5$. В итоге, на глубине в облаке, соответствующей максимальному значению $\sigma_{\text{ext}}(h)$, структура сигнала $P(h)$ практически полностью определяется кратностями рассеяния высокого порядка. Они не имеют четко выраженных максимумов, так как их формирование начинается в более высоких слоях облака, и за счет накопленного пробега налагаются на сигнал, формирующийся на больших глубинах.

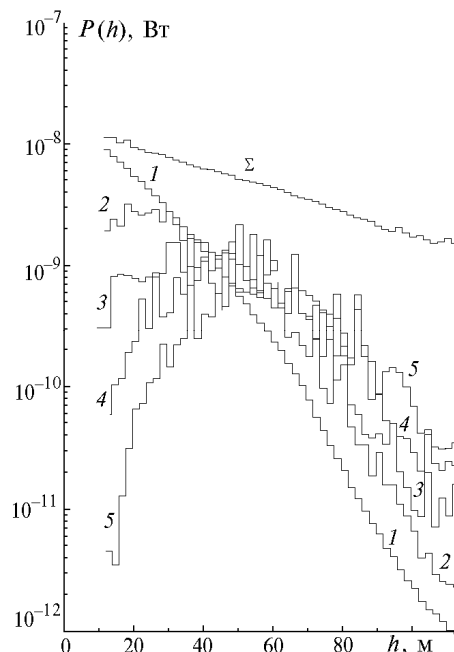


Рис. 5. Зависимость $P(h)$ с распределением по кратностям рассеяния, рассчитанная для облака высокой оптической плотности с параболическим видом профиля коэффициента ослабления. Кривые 1 – 5 – порядок кратностей, 6 – $P(h)$

Заключение

Серия выполненных расчетов локационного сигнала с различными видами профилей коэффициента

ослабления, значениями оптической толщины слоя τ и среднего значения σ_{ext} показала следующее. Качественное поведение отраженного неоднородным обла-

ком сигнала совпадает с видом профиля $\sigma_{\text{ext}}(h)$, если оптическая толщина исследуемого слоя не выше $\tau \sim 2,5 \div 3$, а среднее значение $\sigma_{\text{ext}} < 30 \text{ км}^{-1}$. При зондировании облаков, когда качественное поведение отраженного сигнала указывает на неоднородность облака, по-видимому, для извлечения информации целесообразно применение методов, основанных на более общем подходе [6,7]. Эти методы позволяют использовать для обработки полный сигнал лидара, так как фоновый компонент считается носителем полезной информации, что подтверждается результатами расчетов распределения сигнала $P(h)$ по кратностям рассеяния, приведенным на рис. 4. Необходимо заметить, однако, что информацию о $\sigma_{\text{ext}}(h)$ сохраняют только кратности низкого порядка. Это обстоятельство, вероятно, может предполагать существование ограничения на эффективность применимости методов обращения локационного сигнала, предлагаемых автором [6, 7]. Целесообразна проверка их устойчивости в замкнутом численном эксперименте, как это выполнялось, например, в [8].

Сибирский государственный медицинский университет, Томск,
Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ
N 98-05-64066.

1. Крекова М.М., Креков Г.М., // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. N 1. С. 46 – 50.
2. Креков Г.М., Крекова М.М., Самохвалов И.В. // Исследование Земли из космоса. 1986. N 6. С. 77 – 83.
3. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 165 с.
4. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л: Гидрометеоздат, 1986. 255 с.
5. Боровиков А.М., Гайворонский И.И. и др. Физика облаков / Под ред. А.Х. Хригана. Л: Гидрометеоздат, 1961. 459 с.
6. Веретенников В.В. Асимптотические уравнения лазерного зондирования с учетом многократного рассеяния в малоугловом приближении // 3-й Межреспубликанский симпозиум «Оптика атмосферы и океана» (Тезисы докл.) Томск, 1996. С. 25.
7. Веретенников В.В. Алгоритмы решения лидарного уравнения при больших углах приема с учетом многократного рассеяния // 3-й Межреспубликанский симпозиум «Оптика атмосферы и океана» (Тезисы докл.) Томск, 1996. С. 19.
8. Зуев В.Е., Креков Г.М., Крекова М.М., Наац И.Э. // Вопросы лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1976. С. 3–33.

Поступила в редакцию
6 июня 1997 г.

G.M. Krekov, M.M. Krekova. Structure of Spaceborne Lidar Signal Reflected by Upper Level of Clouds. Part II. Optically Inhomogeneous Clouds.

Computation of spaceborne lidar signals is performed by the Monte-Carlo method. The analysis of the results has shown the identification of inhomogeneities of the clouds' upper layer to be possible under particular optical conditions. The optical thickness of the cloud layer is $\tau \approx 2,5 \div 3$. The lidar operates at the distance from the cloud $H \sim 400 \text{ km}$ at $\lambda = 0,532 \text{ }\mu\text{m}$.