

## ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.501;528.813

Г.М. Креков, М.М. Крекова

### СТРУКТУРА СИГНАЛА ОРБИТАЛЬНОГО ЛИДАРА, ОТРАЖЕННОГО ВЕРХНЕЙ КРОМКОЙ ОБЛАКОВ. Ч. 1. ОПТИЧЕСКИ ОДНОРОДНЫЕ ОБЛАКА

Методом Монте-Карло получены оценки сигналов орбитального лидара, предназначенного для зондирования облаков. Расчеты выполнены для длины волны  $\lambda = 0.532$  нм и конкретных параметров лидара. Рассматривались облака одно-родной оптической структуры. Показано изменение структуры сигнала в облачном слое  $\Delta H = 100$  м в зависимости от оптико-геометрических условий эксперимента. Из анализа результатов следует, что основным параметром, определяющим структуру сигнала орбитального лидара, является величина коэффициента ослабления. Вариации рассеивающих свойств среды не оказывают заметного влияния на характер его формирования.

#### Введение

Использование самолетных лидарных систем показало их высокую эффективность при решении множества задач в области экологии, геофизики, при изучении атмосферы и подстилающей поверхности и т.д. Размещение лидаров на орбитальных комплексах позволит выполнять глобальные измерения параметров, необходимых для решения конкретных задач. Перспективы использования орбитальных лидаров для изучения атмосферы сформулированы ранее, например [1], рабочей группой NASA. К основным они относят измерения, которые связаны с контролем за распределением и общим содержанием аэрозоля в атмосфере, и измерения параметров отдельных облаков и облачных полей.

В настоящее время уже выполнены первые циклы исследований Российским лидаром «БАЛКАН» на станции «Мир» [2] и лидаром NASA «LITE» [3]. Очевидно, что первые эксперименты будут носить в основном испытательный характер (отработка методики измерений, классификация сигналов, необходимая для автоматизации обработки измеренных данных). Усложнится интерпретация сигналов лидара из-за неизбежного присутствия в них высокого уровня фоновых помех различного происхождения.

Некоторые проблемы при лазерном зондировании облачности могут быть выявлены на основе анализа сигналов лазерных дальномеров, которые неоднократно использовались в космосе, например, [4]. В работе авторов [5] предпринята попытка интерпретации сигналов лазерных дальномеров, отраженных облаком. Прежде всего разработана методика реконструкции сигнала на базе пороговых значений энергии. Предложено несколько подходов к обращению таких сигналов. Полученные значения объемного коэффициента ослабления лежат в достаточно широких пределах  $\sigma_{ext} \approx 14 \div 500 \text{ км}^{-1}$ , что, по мнению

авторов, может быть связано не только с приближенной реконструкцией сигнала, но и с высоким уровнем фона многократного рассеяния.

В данном сообщении авторы представляют результаты расчетов сигналов орбитального лидара, выполненных методом Монте-Карло. Как известно, метод позволяет получать оценки сигналов с разделением по кратностям взаимодействия и углам прихода фотонов на детектор. Это дает основу для детального анализа структуры локационного сигнала в зависимости от оптико-геометрических условий эксперимента. В итоге можно получить информацию о чувствительности сигнала к вариациям тех или иных параметров как оптического состояния среды, так и условий эксперимента.

Сигнал лазерного локатора  $P(h)$ , отраженный рассеивающей средой, является функцией времени или расстояния до исследуемого объекта. В качестве носителя полезной информации, как правило, рассматривается сигнал однократного рассеяния  $P_1(h)$  в направлении оптического детектора. Принимаемый сигнал в этом случае описывается известным уравнением локации. В принципе, измеряя амплитуду сигнала и обращая уравнение локации, можно получить информацию об оптическом состоянии исследуемой среды. Вопрос усложняется присутствием фоновых шумов активного происхождения, т.е. помехи, создаваемой самим сигналом лидара. Он обусловлен явлениями вторичного рассеяния фотонов в пределах угловой апертуры приемного устройства.

Особенностям формирования фонового компонента сигнала в последние годы уделяется достаточно много внимания. Например, в работах [6–8] представлены результаты как статистических, так и аналитических методов расчетов локационного сигнала для лидаров наземного, авиа или космического базирования. Работы дополняют друг друга, так как в них, как правило, варьируется один из параметров задачи.

В данном сообщении предлагаются результаты моделирования сигнала орбитального лидара, отраженного верхней кромкой облаков, полученные для конкретных начальных и граничных условий. Анализ результатов показал, что при космической схеме базирования лидара во многих случаях результаты могут иметь достаточно общий характер.

### Постановка задачи

Решение уравнения переноса находится методом Монте-Карло для начальных и граничных условий, соответствующих работе моностатического лазерного локатора. Лидар удален от поверхности Земли на расстояние  $H_0 = 400$  км. Предполагается, что источник излучает изотропно в конусе направлений  $2\pi(1 - \cos\varphi_i)$ , где  $\varphi_i = 0,2$  мрад – угол расходимости источника. Эхосигнал регистрируется приемником в угловом конусе  $2\pi(1 - \cos\varphi_d)$ , где  $\varphi_d = 0,4$  мрад – угловая апертура детектора. Расчеты выполнены для импульса прямоугольной формы, длительностью  $\tau_i = 10$  нс с энергией  $W_0 = 1$  Дж. Коэффициент передачи приемопередающей системы  $k_p = 1$ . Оптические свойства рассеивающих сред заданы коэффициентом ослабления  $\sigma_{ext}(h)$ , вероятностью выживания кванта  $\Lambda(h)$  и индикатрисой рассеяния  $g(\vartheta)$ , где  $\vartheta$  – угол рассеяния. Облачный слой, находящийся в интервале высот от 1,5 до 2 км над поверхностью Земли, имеет рассеивающие свойства, соответствующие типам С1 и С2 по классификации [9]. Рассматривались облака слоистых форм без разрывов. Учтено ослабление излучения аэрозолями в 30-км слое надоблачной атмосферы. Высотная модель  $\sigma_{ext}(h)$  и  $\Lambda(h)$  атмосферного аэрозоля заданы согласно фоновой модели, предложенной в [10], а его индикатриса рассеяния соответствовала дымке  $H$  [9]. Расчеты выполнены для лидара с длиной волны  $\lambda = 0,532$  нм с представительным объемом статистики от 5 до 10 млн фотонных историй в каждом расчетном варианте. Объем статистической выборки увеличивался с уменьшением оптической плотности среды. Следует отметить, что расчеты выполнены для верхней кромки облачного слоя толщиной  $\Delta H = 100$  м. На рисунках представлены зависимости различных функционалов от величины  $h$ , которая эквивалентна накопленному пробегу или времени  $t$  пребывания фотона в среде, т.е.  $h = ct/2$ , где  $c$  – скорость света. Гистограммы функционалов построены с интервалами стробирования  $\Delta h \leq c\tau_i$ , т.е. не превышали пространственной длины импульса.

### Результаты расчетов

Расчет мощности сигналов лидара  $P(h)$ , отраженных однородными облаками типа С1, отличающихся оптической плотностью, представлен на рис. 1. Существенные различия в абсолютных уровнях амплитуды  $P(h)$  наблюдаются до глубин в облаке

порядка 20 м. Градиент ее изменения в этой области зависит от величины  $\sigma_{ext}$ , при ее увеличении он растет. На глубинах 20 – 40 м происходит качественная перестройка поведения характеристики  $P(h)$ . Абсолютные уровни сигналов сближаются, при этом более низкие значения принимает сигнал, отраженный более плотной средой. Результаты, представленные на рис. 1, показывают, что в этой области возникают ситуации, когда на детектор приходят сигналы  $P(h)$  одинаковой мощности от облаков, характеризующихся различными значениями  $\sigma_{ext}$ . Подобное поведение амплитудно-временной характеристики сигнала объясняется следующим образом. При низких значениях коэффициента ослабления  $\sigma_{ext} \leq 20$  км<sup>-1</sup> количество кратностей взаимодействия, участвующих в формировании сигнала от облачного слоя толщиной  $\Delta H \approx 100$  м, невелико, но уровень их вклада высок за счет меньшего ослабления средой. При высоких значениях  $\sigma_{ext}$  увеличивается количество кратностей, но значимость их вклада падает. Результирующий эффект формирования сигналов в обоих случаях оказывается почти одинаковым. Следует отметить, что при значениях  $\sigma_{ext} \geq 70$  км<sup>-1</sup> механизм компенсации нарушается и наблюдается более резкий спад импульса. Так, при значениях  $\sigma_{ext} = 70$  и  $100$  км<sup>-1</sup> это происходит на глубинах примерно 80 и 60 м соответственно. Анализ результатов, представленных на рис. 1, позволяет отметить следующее. При восстановлении оптических характеристик важен выбор участка импульса. Для получения информации об оптических свойствах однородного облака более целесообразно использование переднего фронта импульса, так как использование части сигнала, приходящего с глубин 20 – 40 м, может привести к неоднозначности результатов обращения.

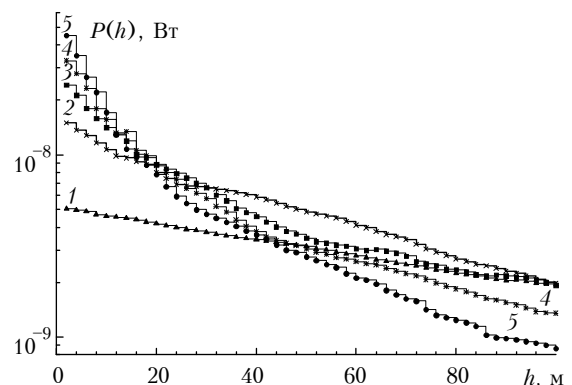


Рис. 1. Зависимость мощности локационного сигнала  $P(h)$  от глубины проникновения в облако. Кривые 1 – 5 рассчитаны при значениях  $\sigma_{ext} = 10, 30, 50, 70, 100$  км<sup>-1</sup>

Расчеты, подобные тем, что приведены на рис. 1, выполнены и с индикатрисой рассеяния, характерной для облака типа С2. Результаты не нуждаются в иллюстрации, так как они практически идентичны. Зависимость уровня мощности сигнала  $P(h)$  от угловых размеров детектора оказалась также

слабо выражена. Ни увеличение угла приема на порядок, т.е. до значения  $\varphi_d = 4,4$  мрад, ни уменьшение до значения  $\varphi_d = \varphi$ , не привело к заметному изменению характеристики  $P(h)$ . Слабо выраженная зависимость от угловых размеров детектора, очевидно, связана с наличием больших рассеивающих объемов в конусе визирования, поскольку поперечные размеры пучка на верхней границе облака оказываются сопоставимыми с толщиной облачного слоя. Как следствие, излучение, рассеянное в боковые направления, не выходит за пределы конуса визирования, участвуя в дальнейшем формировании диффузно отраженного потока.

При значительном уменьшении угла расходимости источника, сравнительно с принятым ранее, происходят более существенные изменения характеристики  $P(h)$ . Так, сужение угла  $\varphi_i$  до значения  $\varphi_i = 0,01$  мрад и  $\varphi_d = \varphi_i$  привело к более резкому спаду заднего фронта импульса. Это иллюстрируют результаты расчетов, представленные на рис. 2, для двух углов расходимости источника и двух значений коэффициентов ослабления  $\sigma_{\text{ext}}$ .

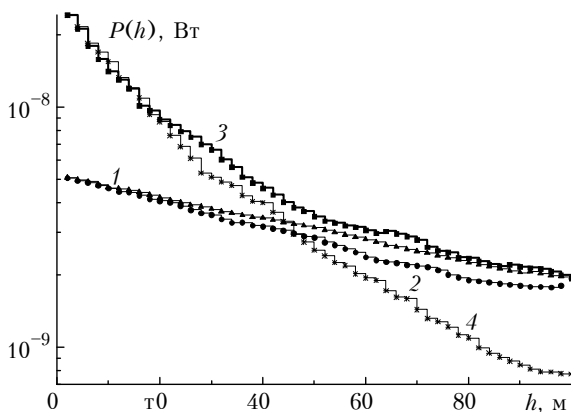


Рис. 2. Изменение характеристики  $P(h)$  в зависимости от угловых размеров апертуры источника и приемника. Кривые 1, 3 и 2, 4 рассчитаны при  $\varphi_i = 0,2$  и  $0,02$  мрад соответственно; 1, 2 и 3, 4 – соответствуют значениям  $\sigma_{\text{ext}} = 10$  и  $50 \text{ км}^{-1}$ , а  $\varphi_d = \varphi_i$ .

Абсолютный уровень сигнала  $P(h)$  переднего фронта импульса, формирующегося за счет излучения низких кратностей рассеяния, не зависит от величины  $\varphi_i$  и определяется только оптической плотностью среды. Резкий спад заднего фронта импульса наблюдается для облаков с высокой оптической плотностью за счет снижения вклада кратностей высокого порядка. Распределение отраженного излучения по кратностям взаимодействия представлено на рис. 3,а для ранее указанного значения  $\varphi_d = 0,44$  мрад.

Расчет выполнен для облака с коэффициентом ослабления  $\sigma_{\text{ext}} = 50 \text{ км}^{-1}$ . Номера кривых 1 – 5 соответствуют порядку кратностей рассеяния  $P_i(h)$ , а б – это полный сигнал  $P(h)$ . Доминирующая роль первой кратности рассеяния сохраняется до  $\tau \approx 0,8$ , затем последовательно возрастают абсолютные уровни сигналов последующих кратностей и при

$\tau \approx 1,2 \div 2,5$  их вклад в суммарный сигнал становится сопоставимым. На глубине  $\tau \geq 2$  происходит основное перераспределение роли кратностей в суммарном сигнале, т.е. кратности высоких порядков начинают превалировать и давать определяющий вклад в отраженный сигнал. На рис. 3,б показано процентное соотношение сигналов первой кратности рассеяния к полному сигналу  $K_1(h) = P_1(h)/P(h)$ , кривая помечена символом  $\Sigma_1$ , далее суммы первых двух кратностей  $K_2(h) = (P_1(h) + P_2(h))/P(h)$  и т.д.

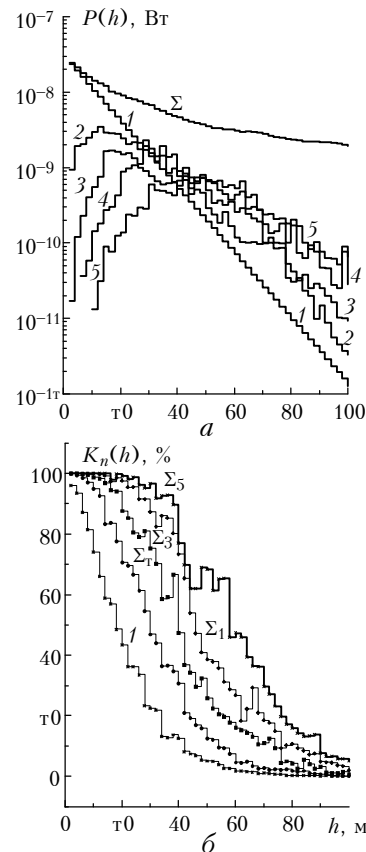


Рис. 3. Распределение отраженного излучения  $P(h)$  по кратностям рассеяния (а) и процентное соотношение  $K_n(h)$  вклада кратностей первого, суммы первых двух и т.д. порядков в полный сигнал (б). Коэффициент рассеяния облака  $\sigma_{\text{ext}} = 50 \text{ км}^{-1}$ .

Сигнал однократного рассеяния составляет не менее 50 % от общей мощности сигнала до  $\tau \approx 1$ , учет второй кратности рассеяния позволяет сохранить этот уровень мощности до  $\tau \approx 1,5$ . И только сумма пяти кратностей позволяет учесть большую часть мощности излучения, приходящего на детектор с глубин  $\tau \approx 2,5 \div 3$ . Общий уровень фона многократного рассеяния в локационном сигнале иллюстрируют результаты, представленные на рис. 4. На нем приведено отношение мощностей фоновой компоненты сигнала к полному сигналу, рассчитанное для облаков с различной оптической плотностью. Для облаков с коэффициентом ослабления  $\sigma_{\text{ext}} \leq 10 \text{ км}^{-1}$  фоновый компонент в сигнале  $P(h)$  не играет определяющей роли для всей расчетной глубины  $\Delta H = 100 \text{ м}$ . При  $\sigma_{\text{ext}} \geq 50 \text{ км}^{-1}$  фон

многократного рассеяния становится основной частью сигнала, начиная уже с глубин 10–20 м от верхней кромки облака.

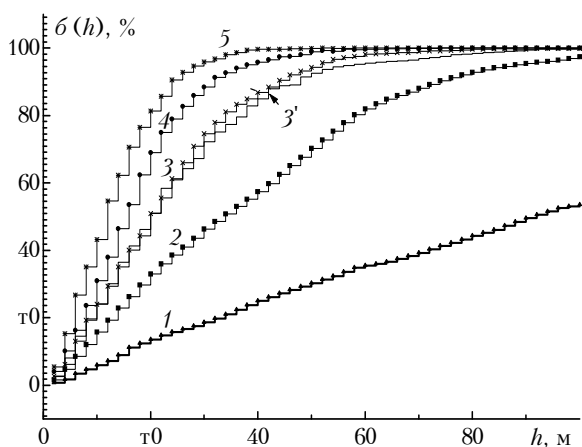


Рис. 4. Процентное содержание фона многократного рассеяния в отраженном сигнале в зависимости от глубины зондируемого слоя. Кривые 1 – 5 рассчитаны при значениях  $\sigma_{\text{ext}} = 10, 30, 50, 70$  и  $100 \text{ км}^{-1}$ ; 3' – расчет при  $\varphi_r = 0,02$  мрад и  $\sigma_{\text{ext}} = 50 \text{ км}^{-1}$

Представленные выше результаты могут служить основой при выборе методов обработки локационных сигналов от облаков. Они позволяют определять допустимые границы применимости уравнения локации, записанного как в однократном приближении, так и с учетом более высоких кратностей рассеяния, принимать решение о селекции фона многократного рассеяния, которая возможна до тех пор, пока доля однократно рассеянного излучения составляет заметную часть в общей мощности сигнала. Кроме того, они показывают целесообразность использования фоновой компоненты сигнала на определенных участках импульса в качестве носителя полезной информации.

### Заключение

Уверенная регистрация облачных образований различной оптической плотности зависит от чувствительности, которой располагает измерительный тракт лидара. Данные, представленные на рис. 5, иллюстрируют зависимость максимального уровня мощности сигнала лидара от оптической плотности облаков. Она имеет линейный характер и описывается простым регрессионным соотношением

$$P_{\text{max}} = A + B \sigma_{\text{ext}} [\text{км}^{-1}],$$

где  $A = 0,18 \cdot 10^{-8}$ , а  $B = 0,43 \cdot 10^{-9}$ .

Это соотношение позволяет оценить уровень мощности излучения, которое отражается верхними кромками облаков, с коэффициентами ослабления в диапазоне от 1 до  $100 \text{ км}^{-1}$ . Оно достаточно универсально ввиду слабой зависимости амплитуды переднего фронта импульса как от геометрических параметров приемопередающей системы, так и от типа индикатрисы рассеяния облаков. Для лидаров, параметры которых отличаются от расчетных высотой размещения на орбите или исходной мощностью в импульсе, оценка легко уточняется. Для этого значения  $P_{\text{max}}$ , приведенные на рис. 5, умножаются на соответствующие коэффициенты  $K_H = H^2 / (H \pm \Delta H)^2$  и  $K_W = (W \pm \Delta W) / W$ , где  $H = 400 \text{ км}$  и  $W = 1 \text{ Дж}$ , как было указано в начале статьи.

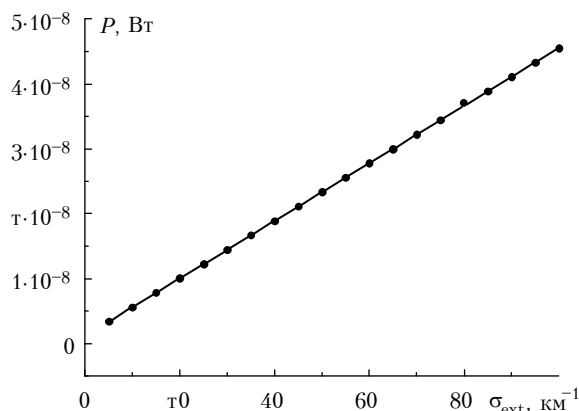


Рис. 5. Изменение максимального уровня мощности сигнала, отраженного от верхней границы облаков слоем  $\Delta h = \sigma_t$ , в зависимости от их оптической плотности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 98-05-64066.

1. Abreau V.J. // Optical Engineering. 1980. V.19. P. 489–493.
2. Балн Ю.С., Тихомиров А. А., Самойлова С.С. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. N 3.С. 333–353.
3. Couch R.H., Rowland C.W., Ellis K.S. et. al. // Optical Engineering. 1991. V. 30. P. 88–95.
4. Бафтон Дж.Л. // ТИИЭР. Т. 77. N 3. С. 71–88
5. Коханенко Г.П., Матвиенко Г.Г., Шаманаев В.С. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 7. С. 967–976.
6. Bissonette L.R. and Hutt D.L. // Proceedings of: 4<sup>th</sup> international workshop of multiple scattering lidar experiments. Italy. 1990. P. 10–21.
7. Okasaki Y., Noguchi K., Okumura H., Takeuchi N. // Abstracts of papers: 17<sup>th</sup> International laser radar conference. Sendai, Japan. 1994. P. 131–133.
8. Zege E.P., Kotaev I.L., Polonsky L.N., Kokhanovsky A.A. // Abstracts of papers: 17<sup>th</sup> International laser radar conference. Sendai, Japan. 1994. P. 133–134.
9. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 165 с.
10. Зув В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 255 с.

*G.M. Krekov, M.M. Krekova.* **Structure of Spaceborne Lidar Signal Reflected by Upper Level of Clouds. Part I. Optically Homogeneous Clouds.**

The signals of spaceborne lidar, intended for clouds sounding, are estimated by the Monte-Carlo method. The calculations are performed at  $\lambda = 0,532 \mu\text{m}$  and particular parameters of the lidar. The clouds of homogeneous optical structure are under treating. The signal structure is shown to vary within cloud layer  $\Delta H = 100 \text{ m}$  depending on optical-geometrical conditions of the experiment. It follows from the analysis of the results that the main parameter governing the spaceborne lidar signal structure is a magnitude of the extinction coefficient. Variations of the media scattering properties do not influence significantly the character of its formation.