

М.М. Крекова

РАСЧЕТ СТРУКТУРЫ СИГНАЛА ОРБИТАЛЬНОГО ЛИДАРА, ОТРАЖЕННОГО ОБЛАКАМИ
ВЕРХНЕГО ЯРУСА*Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск*

Поступила в редакцию 18.12.98 г.

Принята к печати 4.02.99 г.

Представлены результаты расчетов сигнала орбитального лидара при зондировании облаков верхнего яруса и двухъярусной облачности на длине волны $\lambda = 0,532$ нм, выполненных методом Монте-Карло. Оценки получены для геометрических условий, соответствующих параметрам лидаров «БАЛКАН» и «LITE». Исследован характер формирования сигнала и фона многократного рассеяния, присутствующего в нем в зависимости от оптико-геометрических условий численного эксперимента.

Данное сообщение является продолжением цикла работ, связанных с исследованием особенностей формирования сигнала орбитального лидара при зондировании облаков различных форм и стратификации. В работах [1–4] представлены оценки сигналов с анализом структуры для жидкокапельных облаков нижнего яруса кучевых и слоистых форм. Предлагаемые ниже результаты расчетов сигнала орбитального лидара выполнены для облаков верхнего яруса.

К облакам верхнего яруса относятся перистые облака с кристаллическим фазовым составом, отличающиеся между собой структурой, стратификацией, температурным режимом, а также микроструктурой и преимущественной формой кристаллов [5]. Перистые облака до сих пор являются наименее изученными в аэрологии. Тщательное наблюдение перистых облаков имеет большое значение, поскольку в верхней тропосфере происходят довольно разнообразные физические и динамические процессы облакообразования [6] (конвекция, турбулентность, волновые движения и т.д.). Не случаен в этой связи, возникший особенно в последнем десятилетии, большой интерес специалистов различных областей знаний, направленный на изучение оптических свойств, температуры и динамики облаков верхнего яруса. Стратификация перистых облаков затрудняет их систематические исследования, например, с помощью наземной лидарной техники из-за присутствия подоблачного аэрозольного, относительно более плотного, слоя атмосферы или наличия облаков в более низком ярусе.

При наличии активных фронтов часто возникает сплошная облачная система $Ns-A_s-C_s$, в такой ситуации систематические наземные и авиационные методы наблюдения и исследования облаков становятся особенно проблематичными. С учетом данных обстоятельств оптические измерения с помощью космической лидарной техники представляются достаточно перспективными, об этом свидетельствуют и результаты, опубликованные, например, в [7, 8].

Возможный круг решаемых задач при использовании лидарных систем космического базирования может быть определен с помощью модельного численного эксперимента. Расчет структуры отраженного облаками сигнала выполнен методом Монте-Карло для граничных условий, соответствующих работе лидара «БАЛКАН» [9]. Основные принципы построения алгоритма изложены в [10].

Предполагается, что моностатический лазерный локализатор удален от поверхности Земли на расстояние $z_0 = 400$ км. Источник излучает изотропно дельта-импульс по времени в конусе с углом расходимости $\varphi_i = 0,22$ мрад. Сигнал регистрируется детектором с набором углов приема φ_d , в диапазоне от 0,22 до 1,7 мрад. Оптические свойства рассеивающей среды заданы коэффициентом ослабления $\sigma_{ext}(z)$, вероятностью выживания кванта $\Lambda(z)$ и индикатрисой рассеяния $g(\vartheta)$, где ϑ – угол рассеяния. В расчетах учтено ослабление излучения аэрозолем в 30-км слое надземной атмосферы. Высотные профили $\sigma_{ext}(z)$ и $\Lambda(z)$ атмосферного аэрозоля заданы в соответствии с [11]. Выбор оптических характеристик для перистых облаков основывался на известных литературных данных.

Согласно [5, 6] среднее значение коэффициента ослабления для различных типов перистых облаков $\sigma_{ext} \approx 2,5$ км⁻¹, а их геометрическая толщина может достигать 1,5–4 км. Высота их нижней границы над поверхностью Земли находится в пределах 6–13 км в зависимости от географической широты. В расчетах полагалось, что положение нижней границы облаков верхнего яруса находится в пределах указанного интервала на высоте 8,5 км, а их толщина $\Delta z = 1,5$ км. При задании индикатрисы рассеяния использовались результаты расчетов, представленные в работе [12]. Расчеты выполнены в приближении геометрической оптики для полидисперсной смеси кристаллов гексагональной формы при хаотической ориентации их в пространстве. В [12] учтено распределение частиц по размерам, свойственное облакам типа C_i и C_s согласно [13]. Результаты приведены в табличной форме, что делает их удобными для использования в качестве исходных данных.

Расчет структуры сигнала лидара с учетом распределения по кратностям взаимодействия выполнен методом Монте-Карло со статистикой 10 млн. фотонных историй при задании оптической толщины облачного слоя $\tau \geq 2,5$. С уменьшением оптической толщины количество фотонных историй пропорционально увеличивалось. Это необходимо для поддержания уровня дисперсии рассчитываемых функционалов, которые будут указаны ниже в пределах 10–15% к концу трассы зондирования. На рис. 1–5 представлены зависимости функционалов от параметра h , который эквивалентен величине накопленного в рассеивающей среде пробе-

га фотона и сопоставлен с положением зондируемого слоя относительно верхней границы облака. Основная часть результатов приведена для угла приема $\varphi_d = 0,22$ мрад.

На рис. 1 представлены результаты расчетов мощности сигнала лидара $P(h)$ с разделением по кратностям взаимодействия для облаков различной оптической плотности, изменяющейся от 0,1 до $2,5 \text{ км}^{-1}$. Номера у кривых соответствуют порядку кратностей рассеяния, а символ Σ указывает на мощность суммарного сигнала $P(h)$, приходящего на приемное устройство. Для среды с оптической плотностью $\sigma_{\text{ext}} \leq 0,5 \text{ км}^{-1}$ мощности сигналов $P^{(k>1)} \ll P^{(1)}(h)$, т.е. полный сигнал $P(h)$ формируется практически за счет однократно рассеянного излучения до конца заданной трассы зондирования (см. рис. 1, а, б). Результаты, пред-

ставленные на рис. 1, б, в, показывают, что при значениях $0,5 \leq \sigma_{\text{ext}} \leq 1 \text{ км}^{-1}$ уровни мощностей $P^{(k>2)} \ll P^{(1)}(h)$ и сигнал $P(h)$ на заданной трассе зондирования достаточно полно определяется двумя кратностями рассеяния. Для оптически более плотных сред, когда $\sigma_{\text{ext}} \approx 2,5 \text{ км}^{-1}$, необходим учет кратностей более высокого порядка. Так, при $\sigma_{\text{ext}} \approx 2,5 \text{ км}^{-1}$ (рис. 1, з) для удовлетворительного описания отраженного сигнала по всей трассе зондирования необходим учет уже пяти кратностей взаимодействия. Следует отметить, что резкий спад сигнала по времени совпадает с положением нижней границы облачного слоя, т.е. качественный характер поведения $P(h)$ позволяет достаточно точно, в пределах величины интервала стробирования, определять его геометрическую толщину.

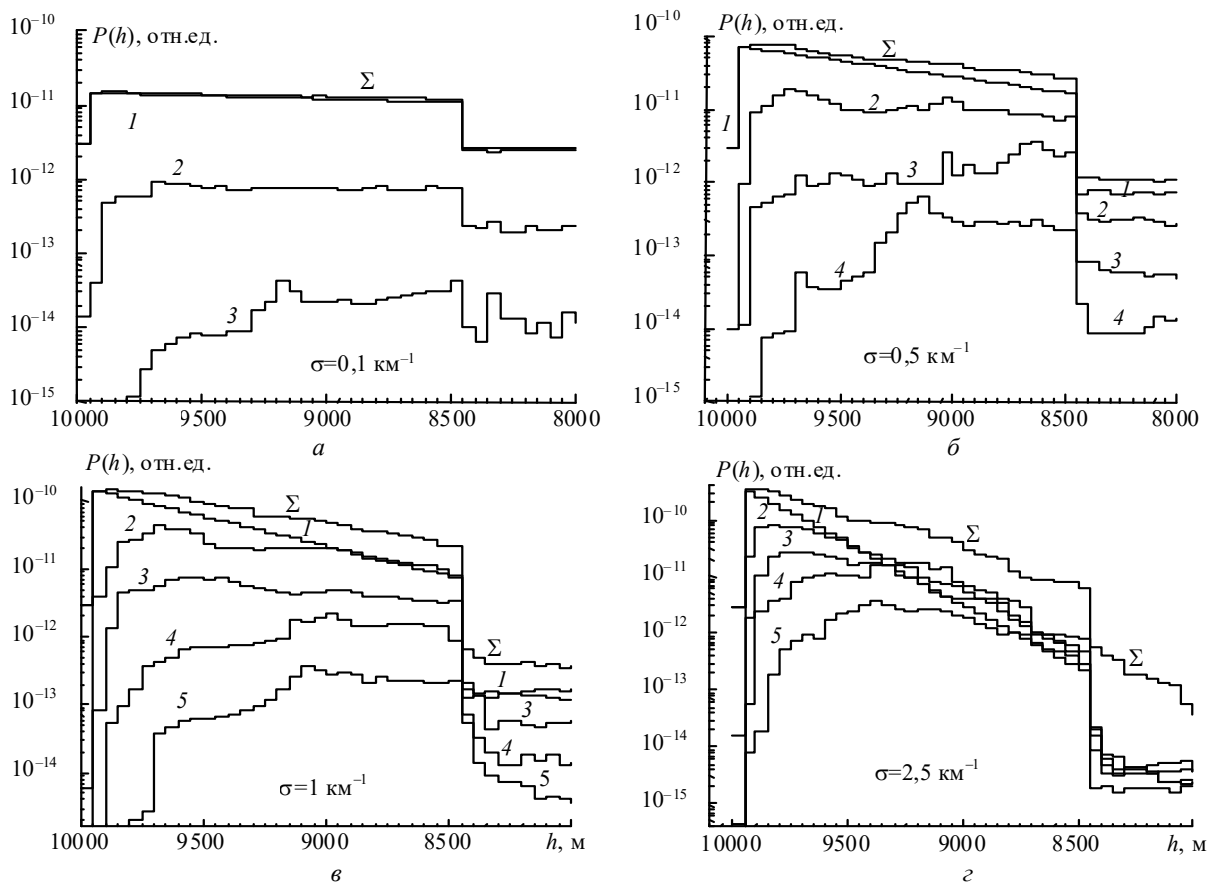


Рис. 1. Зависимость мощности сигнала $P(h)$ от глубины проникновения в облако и оптической плотности среды. Номера кривых 1–5 соответствуют порядкам кратностей рассеяния, знак Σ соответствует полному сигналу

Результаты, представленные на рис. 2, иллюстрируют изменение относительного вклада фона многократного рассеяния $k(h) = P_F(h)/P(h)$ в локационный сигнал по трассе зондирования для облаков различной оптической плотности. Уровень фона в сигнале $P(h)$ к концу трассы зондирования составляет $\sim 5\%$ при $\sigma_{\text{ext}} \approx 0,1 \text{ км}^{-1}$ и возрастает до $\sim 90\%$ и более при $\sigma_{\text{ext}} \approx 2,5 \text{ км}^{-1}$. Быстрое накопление фонового компонента в сигнале обеспечивается не только наличием больших рассеивающих объемов в конусе приема, но и высокой вытянутостью индикатрисы рассеяния для кристаллических облаков [12]. Последнее обстоятельство способствует тому, что излучение высоких кратностей рассеяния не покидает

пределов узкого конуса приема до значительных оптических глубин. Зависимость мощности сигнала $P(h)$ от угловых размеров апертуры приемного устройства представлена на рис. 3 для относительно прозрачных облаков с $\sigma_{\text{ext}}(h) = 0,5 \text{ км}^{-1}$ и для видимых с $\sigma_{\text{ext}} \approx 2,5 \text{ км}^{-1}$. С увеличением угла приема растет абсолютный уровень отраженного сигнала по всей трассе зондирования за счет многократно рассеянного излучения. Результаты показывают, что расширение угла приема φ_d примерно до 1 мрад приводит к потере возможности определения геометрической толщины облачного слоя, если его оптическая толщина $\tau \geq 2,5$. Из расчетов, приведенных на рис. 3, а, следует, что для прозрачных облаков указанная

граница для угла приема значительно шире и достигает порядка 5 мрад, но с увеличением геометрической толщины облаков она пропорционально сужается.

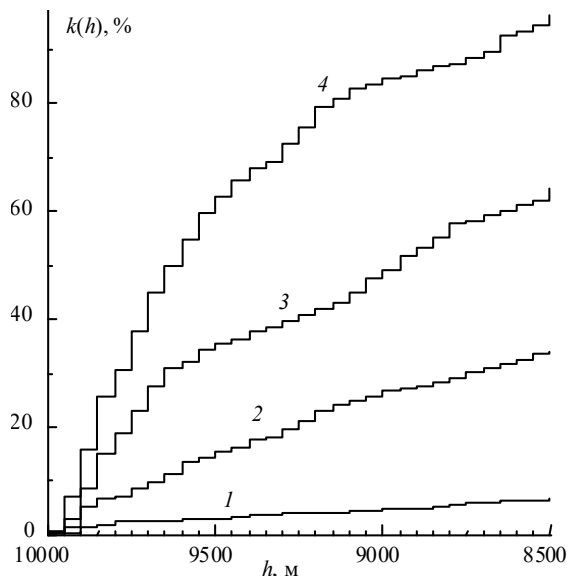


Рис. 2. Относительное содержание фона многократного рассеяния $k(h)$ в локационном сигнале в зависимости от глубины лоцируемого слоя в облаке и его оптической плотности. Кривые 1–4 соответствуют $\sigma = 0,1; 0,5; 1; 2,5 \text{ км}^{-1}$

Расчеты для перистых облаков оптически неоднородной вертикальной структуры представлены на рис. 4. Вид зависимостей $\sigma_{\text{ext}}(h)$ выбран в соответствии с данными [6] о распределении водности в облаках.

Качественное поведение сигналов $P(h)$ во всех трех случаях свидетельствует о неоднородной структуре облака, но максимумы сигналов размыты. Это происходит из-за несовпадения положения максимума мощности од-

нократного сигнала $P^{(1)}(h)$, приходящегося на область $\tau \approx 0,5 \div 0,7$, с положением максимума на профиле $\sigma_{\text{ext}}(h)$, к тому же и максимальные уровни $P^{(k)}(h)$ кратностей более высокого порядка последовательно смещаются в сторону больших оптических толщин. Так, на рис. 4, а расчет выполнен для облака, суммарная оптическая толщина которого $\tau_{\Sigma} \approx 1,7$, а наибольшее значение коэффициента ослабления $\sigma_{\text{ext}}^{\text{max}}(h)$ приходится на область $\tau \approx 1,05$, в окрестности которой последовательно достигают максимальных уровней сигналы кратностей 2–4-го порядков. В итоге – максимум сигнала $P(h)$ хотя и совпадает с положением $\sigma_{\text{ext}}^{\text{max}}(h)$, но слабо выражен и размыт.

На рис. 4, б приведены результаты расчетов для облака с $\tau_{\Sigma} \approx 2,2$, а значение $\sigma_{\text{ext}}^{\text{max}}(h)$ приходится на глубину $\tau_{\Sigma} \approx 1,3$. В данном случае максимум сигнала $P(h)$ не только размыт, но и сдвинут относительно $\sigma_{\text{ext}}^{\text{max}}(h)$ в сторону меньшей оптической глубины. Следовательно, при вертикально неоднородной оптической структуре облака качественный вид отраженного сигнала зависит не только от типа профиля коэффициента ослабления, но и от закономерностей формирования сигналов низких кратностей рассеяния. Это подтверждают и результаты расчетов (рис. 4, в) для полиэкстремального профиля $\sigma_{\text{ext}}(h)$.

Характер временного изменения отраженного сигнала согласуется с видом $\sigma_{\text{ext}}(h)$. В данном примере $\tau_{\Sigma} \approx 2$ первый максимум на профиле коэффициента ослабления находится на глубине $\tau \approx 0,45$, на такой же оптической глубине, относительно минимума, расположен и второй максимум на $\sigma_{\text{ext}}(h)$. В заданной оптической ситуации экстремумы характеристик $\sigma_{\text{ext}}(h)$ и $P(h)$ практически совпадают. Расчеты показали, что увеличение апертуры приема в два-три раза, относительно заданной, приводит к нарушению согласованности в качественном поведении указанных характеристик. Это связано с возрастанием роли кратностей высокого порядка в отраженном сигнале.

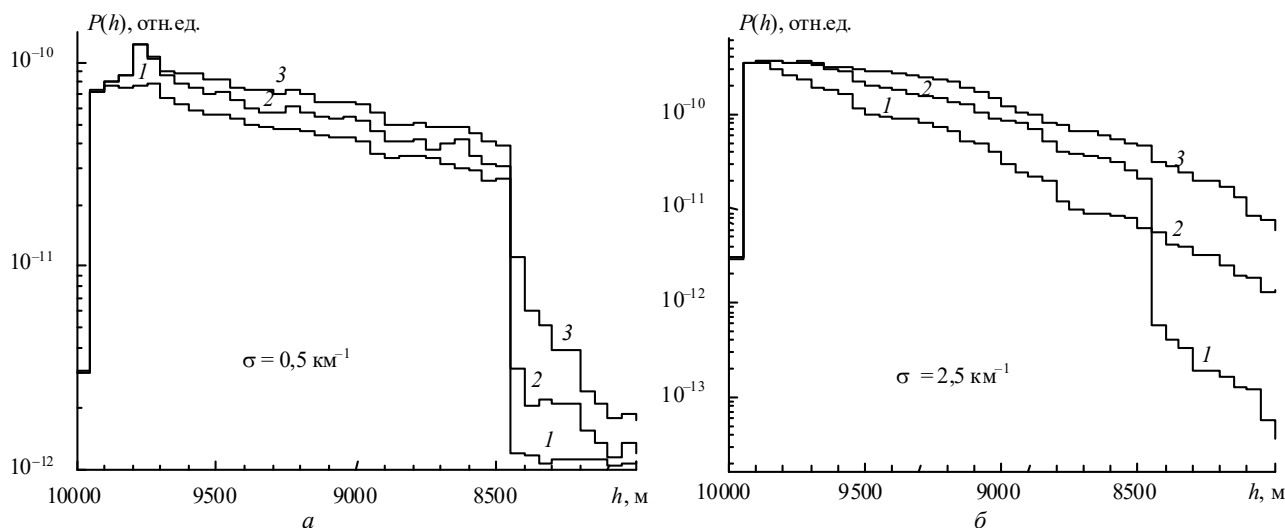


Рис. 3. Зависимость структуры сигнала $P(h)$ от угловых размеров детектора φ_d , рассчитанных для облаков с $\sigma_{\text{ext}} = 0,5 \text{ км}^{-1}$ (а) и $2,5 \text{ км}^{-1}$ (б). Кривые 1, 2, 3 соответствуют углам приема $\varphi_d = 0,22; 0,88; 1,7$ мрад

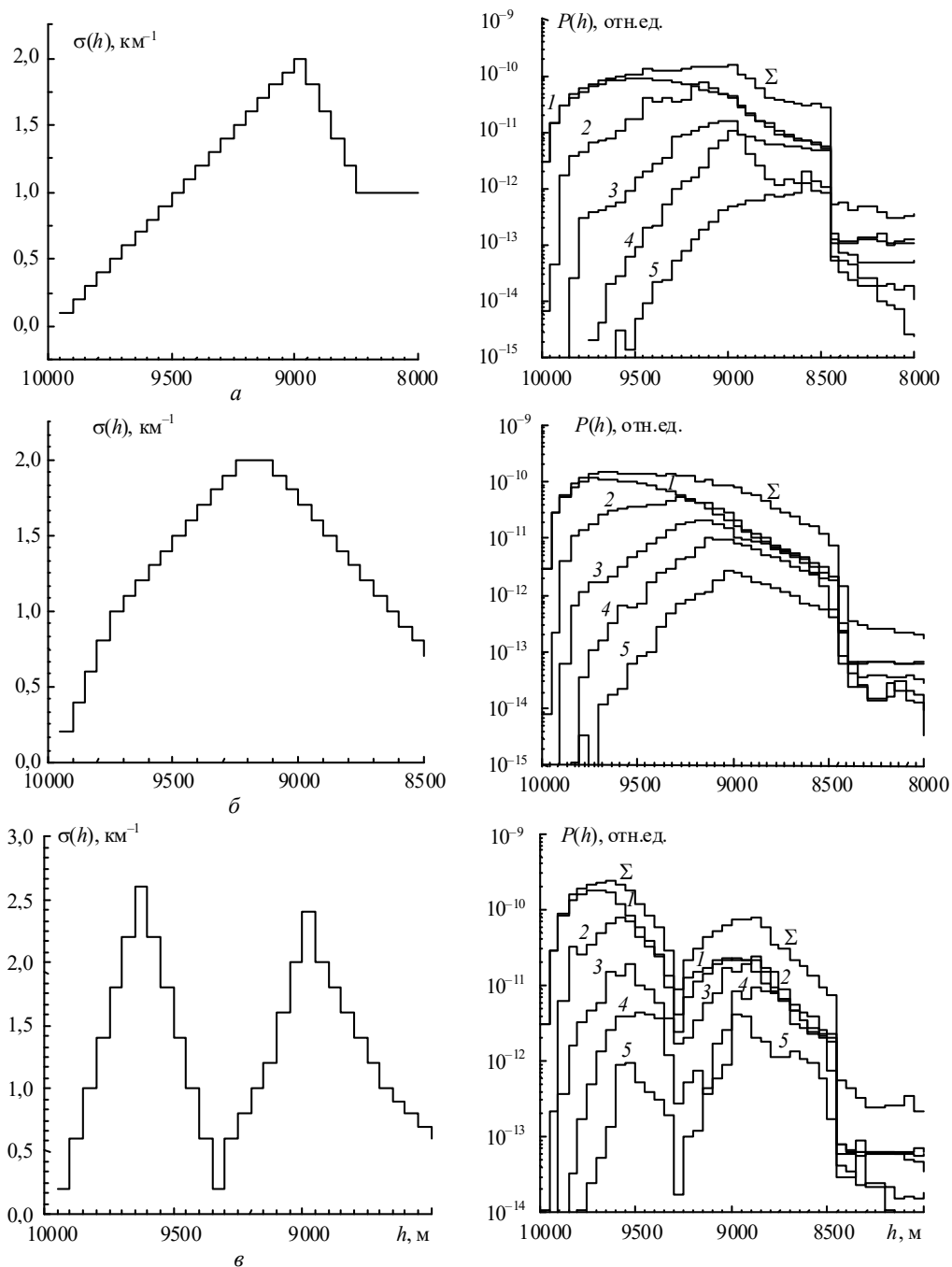


Рис. 4. Результаты расчетов сигнала $P(h)$ для облаков оптически неоднородной структуры. Слева приведены профили коэффициента ослабления $\sigma_{\text{ext}}(h)$, справа – зависимости $P(h)$, рассчитанные с разделением по кратностям взаимодействия

Следующая серия расчетных оценок выполнена для параметров лидара «ЛИТЕ» при двухъярусной облачности. Целесообразность модельного эксперимента продиктована наличием значительного массива измеренных этим лидаром данных [14, 15], а также данных синхронных измерений авиалидаром. В ряде случаев геометрическая толщина облаков, зафиксированная орбитальным лидаром, была заметно больше аналогичной величины, измеренной авиалидаром. Предполагается, что одной из причин уширения сигнала может являться высокий уровень фона многократного рассеяния. При обращении некоторых экспериментальных измерений оптическая толщина облаков, полу-

ченная авиалидаром, превосходила такую для орбитального лидара, хотя, по сути, должна бы наблюдаться противоположная картина. Это следует из того, что рассеивающий объем в конусе визирования орбитального лидара и соответственно фоновая компонента сигнала существенно больше, нежели для авиалидара. Для отработки методик обращения измеренных данных численный эксперимент является необходимой составляющей.

В качестве исходных данных для расчетов полагалось, что лидар удален от поверхности Земли на расстояние $H = 250$ км, угол расходимости источника $\varphi_s = 0,6$ мрад, а угловые размеры приемника $\varphi_d = 1,1$ мрад.

Предполагается, что в верхнем ярусе на высоте $h_1 = 10$ км относительно поверхности Земли расположено перистое облако (Ci), его толщина $\Delta h = 1,5$ км. В нижнем ярусе на высоте $h_2 = 2$ км расположено жидкокапельное облако слоистой формы (St) толщиной $\Delta h = 0,2$ км с рассеивающими свойствами, соответствующими типу $C1$ по классификации [16].

На рис. 5, *a* представлены результаты расчета сигнала $P(h)$, отраженного двухъярусными облаками с коэффициентами ослабления $\sigma_{ext} = 1,5 \text{ км}^{-1}$ у облака Ci и $\sigma_{ext} = 10 \text{ км}^{-1}$ у облака St . Разница в максимальных уровнях сигналов, приходящих от верхних кромок облаков, находится в пределах одного порядка. Расчеты показывают, что сигнал, отраженный нижним ярусом облаков, формируется в основном за счет излучения многократно рассеянного в облаках верхнего яруса, если их оптическая плотность превышает $\tau \approx 1$.

При меньших значениях τ у облака Ci повышается роль первой кратности рассеяния в сигнале, отраженном облаком St . Резкий спад импульса, приходящего от облака St , наблюдается на высотах на 40–60 м, превышающих ис-

тинное положение его нижней границы, после чего идет более плавное изменение зависимости $P(h)$. Следует отметить, что поток рассеянного в облаках излучения налагается на сигнал, рассеянный подоблачным аэрозольным слоем на протяжении нескольких сот метров по глубине атмосферы.

Увеличение оптической плотности облака верхнего яруса до значения $\sigma_{ext} = 2,5 \text{ км}^{-1}$ приводит к резкому снижению уровня сигнала $P(h)$ (рис. 5, *б*), отраженного нижним ярусом облаков. Кроме того, изменяется и его временная структура. В данном случае достаточно резкий спад заднего фронта импульса от облака St сдвинут относительно его нижней кромки на 80–100 м. Видимо, с такой же точностью может быть определена и геометрическая толщина облака нижнего яруса. Доверительный интервал, в данном случае это 20 м, связан с длиной интервала стробирования. Аналогичные расчеты выполнены для случая более высокой оптической плотности облака нижнего яруса, значение его коэффициента ослабления $\sigma_{ext} = 20 \text{ км}^{-1}$. Результаты расчетов представлены на рис. 5, *в*, *г*.

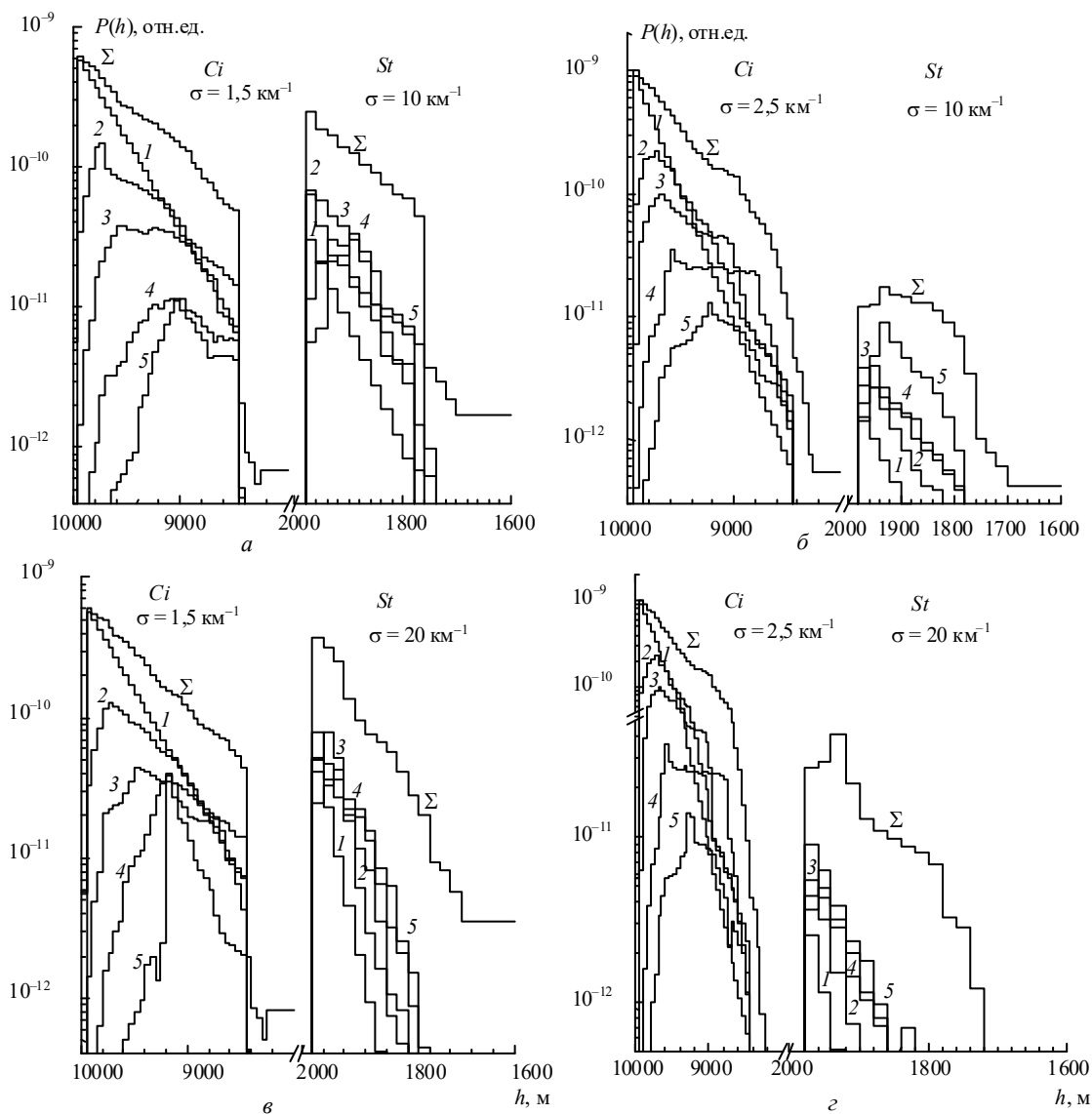


Рис. 5. Зондирование двухъярусной облачности. Отраженный сигнал $P(h)$, рассчитанный с разделением по кратностям взаимодействия, приведен в зависимости от изменений оптической плотности верхнего и нижнего ярусов облаков

Наблюдается некоторый рост абсолютного уровня сигнала от облака St , отраженного оптически более плотной средой. Качественное поведение сигнала $P(h)$ от нижнего яруса облаков, приведенного на рис. 5, в, согласуется с поведением указанного сигнала, представленного на рис. 5, б. Причина, очевидно, в том, что суммарные оптические толщины двух ярусов облаков (на рис. 5, б $\tau_{\Sigma} \approx 5,75$, а на рис. 5, в $\tau_{\Sigma} \approx 6,25$) в рассматриваемых расчетных примерах близки. Действительно, это подтверждают результаты, показанные на рис. 5, г, где расчет выполнен при $\tau_{\Sigma} \approx 7,75$. В данном случае увеличилось временное расплывание импульса $P(h)$ от облака St . Относительно резкий спад заднего фронта импульса сместился на расстояние 120–140 м от нижней кромки облака. На рис. 5, в более крупным планом показано формирование сигнала, отраженного нижним ярусом облаков. Вклад в сигнал $P(h)$ увеличивается с ростом порядка кратностей рассеяния. Следовательно, извлечение информации об оптических свойствах облаков нижнего яруса должно основываться на методиках, использующих фоновый компонент в качестве полезной составляющей сигнала.

Подводя итог вышесказанному, можно отметить следующее: при зондировании двухъярусной облачности извлечение информации о геометрической толщине нижнего яруса облаков с приемлемой точностью возможно при $\tau_{\Sigma} \leq 5$, в противном случае погрешность растет от нескольких десятков до сотен метров. Кроме того, расчеты, выполненные для лидаров типа «LITE» или «БАЛКАН», легко обобщаются на какие-либо другие типы при условии согласования геометрических размеров освещенного пятна на верхней границе облачного слоя. Абсолютные уровни сигналов при этом будут отличаться в зависимости от положения лидара относительно облачного слоя, но в структуре сигнала и в его качественном поведении больших различий не будет.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (N98-05-64066).

1. Zuev V.E., Krekov G.M., Krekova M.M. Mean characteristics of lidar signals from broken clouds. // J. Appl. Optics. 1987. V. 26. N 15. P. 3018–3025.
2. Krekova M.M., Titov G.A. Влияние пространственной неоднородности поля кучевых облаков на средние характеристики

лидарных сигналов // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. N 9. С. 81–86.

3. Креков Г.М., Крекова М.М. Структура сигнала орбитального лидара, отраженного верхней кромкой облаков. Ч. 1. Оптически однородные облака // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. N 1. С. 46–50.
4. Креков Г.М., Крекова М.М. Там же. Ч. 2. 1998. Т. 11. N 1. С. 51–54.
5. Облака и облачная атмосфера: Справочник / Под ред. И.П. Мазина, А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 648 с.
6. Физика облаков / Под ред. А.Х. Хргиана. Л., 1961. 460 с.
7. Winker D.M., McCormick P.H. Aerosol and cloud sensing with the Lidar In-space Technology Experiment (LITE), in Lidar Techniques for Remote Sensing / Ch. Werner, ed. Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 2310. 1994. P. 98–105.
8. Spinhirne James D., Palm S. Space based atmospheric measurements by GLAS // Selected papers of the 18th International laser radar conference(ILRC) / Berlin, 22-26 July 1996. Springer Verlag ISBN 3-540-61887-2. P. 213–216.
9. Балин Ю.С., Тихомиров А.А., Самойлова С.С. Предварительные результаты зондирования облаков и подстилающей поверхности Земли лидаром «Балкан» // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. N 3. С. 71–88.
10. Krekov G.M., Krekova M.M., Shamaev V.S. Laser sensing of a subsurface oceanic layer. I. Effect of the atmosphere and wind-driven sea waves // J. Appl. Optics. 1998. V. 37. N 9. P. 1589–1595.
11. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 256 с.
12. Yoshihide Takano, Kuo-Nan Liou. Solar radiative transfer in cirrus clouds. Part I: Single-Scattering and optical properties of hexagonal ice crystals // American Meteorological Society. 1989. V. 46. N 1. P. 3–19.
13. Heunshfeld A.J., Platt C.M.R. A parametrization of the particle size spectrum of ice clouds in terms of the ambient temperature and the ice water content // J. Atmos. Sci. 1984. V. 41. P. 846–855.
14. Renger W., Kiemle C., Schreiber H.-G., Wirth M., Moerl P. Airborne backscatter LIDAR measurements at 3 wavelengths during ELITE. The European «LITE» correlative measurements campaign // Final results workshop proceedings. 9–10 November 1995, Iroee-CNR. Florence, Italy. P. 15–19.
15. Pelon J., Trouillet V., Flamant C., Flamant P.H., Valentin R. French contribution to E-LITE'94 : comparative measurements with the airborne backscatter lidar LEANDRE-1. The European «LITE» correlative measurements campaign // Final results workshop proceedings. 9–10 November 1995, Iroee-CNR. Florence, Itali. P. 31–36.
16. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М: Мир, 1971. 165 с.

M.M. Krekova. Calculation of Structure of Space-borne Lidar's Signal Reflected from Top Level Clouds.

The results obtained for space-borne lidar's signal used in sounding the top level clouds and two-level cloudiness at $\lambda = 0.532$ nm and calculated by Monte-Carlo method, are presented in the paper. The estimates have been obtained for geometrical conditions corresponding to the parameters of the lidars «Balkan» and «LITE». The character of the signal formation and the incorporated background of the multiple scattering are studied depending on optical-geometrical conditions of the numerical experiment.