

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ
ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 551.521:629.78

Ю.С. Балин, С.И. Кавкянов, С.В. Стрепетова

**СОВМЕСТНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЛИДАРНЫХ И ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ
ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ОБЛАЧНЫХ ПОЛЕЙ ИЗ КОСМОСА**

В статье обсуждается одна из возможных реализаций комплексного оптического эксперимента с помощью лидара и радиометра космического базирования. Связь лидарных и фотометрических измерений осуществлялась на основе модельных представлений о вертикальной стратификации слоистообразных облаков.

Проведен замкнутый численный эксперимент, имитирующий случайное поле облачности на фоне подстилающей поверхности с различными альбедо. Полученные результаты иллюстрируют информационные возможности совместных измерений.

После проведения 15-й Международной конференции по лазерному зондированию (Томск, 1990 г.) стало ясно, что уже в ближайшие годы будет возможным дистанционное зондирование атмосферы и подстилающей поверхности (ПП) с помощью нового класса космических приборов — орбитальных лидаров. При этом наибольшего эффекта от первых экспериментов можно ожидать при решении таких атмосферно-оптических задач, как определение вертикальной структуры и оптико-физических параметров облаков, селекции облачности на фоне ПП, исследование статистической структуры и оптических параметров ПП, в частности, поверхности океана и т.д., т.е. при исследовании объектов, основанных на интерпретации процессов упругого рассеяния излучения на аэрозолях и отражения от ПП.

Используемая в настоящее время на спутниках телевизионная аппаратура не позволяет измерить высоту облаков и различить плотную облачность на фоне ПП, если их альбедо близки, а также идентифицировать перистые облака. Спутниковая ИК-аппаратура дает возможность по измерению уходящей радиации в окнах прозрачности атмосферы 3,5 ... 4,2 и 8 ... 12 мкм определить высоту верхней границы облаков (при известной температурной стратификации атмосферы), но из-за большой погрешности эти измерения носят скорее качественный характер. Поэтому использование лидаров является оптимальным для названного круга задач.

В работе [1] рассмотрены информационные возможности и алгоритмы интерпретации данных одночастотного бортового лидара, работающего в аналоговом режиме, при зондировании облаков и ПП из космоса. Показано, что рассматриваемый лидар позволяет получать информацию о вертикальной структуре облачности и характеристиках рассеяния ПП с гораздо большей точностью, чем пассивные методы. В то же время ограниченность энергетических ресурсов бортового лидара не позволяет обеспечить достаточную плотность наблюдений при исследовании пространственной структуры облачности в горизонтальных направлениях. В этом отношении несомненным преимуществом обладают пассивные методы, лидарные же измерения целесообразно проводить комплексно с ними в некоторых реперных точках. В данной статье рассматривается одна из возможных методик комплексного получения данных бортового лидара и фотометра в задаче исследования пространственной структуры облачных полей, проводится замкнутый численный эксперимент с целью исследования эффективности совместной обработки.

Методика обработки

При совместной обработке лидарных и фотометрических данных используются алгоритмы интерпретации данных бортового лидара, изложенные в [1] и позволяющие производить классификацию (распознавание типов зондируемых объектов) с оценкой их оптических и геометрических параметров, в частности, определение дальности и коэффициента отражения ПП, верхней границы и градиента коэффициента ослабления в верхней кромке облачности.

Связь лидарных и фотометрических измерений при совместной интерпретации осуществлялась на основе модельных представлений о вертикальной стратификации слоистообразных облаков [2]. При этом вертикальный профиль коэффициента ослабления в облаке описывается эмпирической зависимостью

$$\alpha_{\text{мод}}(z) = 2,8 \frac{\tau}{H} \left[\left(\frac{z - z_0}{H} \right)^{1/4} - \left(\frac{z - z_0}{H} \right)^{5/4} \right], \quad (1)$$

где τ и соответственно H — оптическая и геометрическая толщины облака; z_0 — верхняя граница облака. Альбеда облака (которое мы считаем определенным с помощью фотометра) выражается через H зависимостью [2]

$$A = 1 - \exp[-(4,7 - 3,2 H)H]. \quad (2)$$

Таким образом, лидарные и фотометрические измерения оказываются связанными посредством общего параметра H в (1), (2), который в силу этого удобно считать неизвестным при совместной интерпретации.

Если для фотометрических измерений определение геометрической толщины облака с учетом (2) не составляет труда, то оценка H из (1) по лидарным измерениям требует использования специальных устойчивых методов, что обусловлено, с одной стороны, неустойчивостью решения лидарного уравнения при значительных оптических толщах [3], и, с другой стороны, погрешностями экстраполяции лидарных данных в верхней кромке облака на всю его толщ. Итоговое выражение для H , полученное с использованием статистически регуляризованного решения лидарного уравнения совместно с (1), имеет вид

$$H = \left\{ \sum_{i=1}^{N-1} D(\bar{H}, z_i) [F(\bar{H}, z_i) + D(\bar{H}, z_i) \bar{H}] + \alpha \right\} \left\{ \sum_{i=1}^{N-1} D^2(\bar{H}, z_i) + \alpha \right\}^{-1}, \quad (3)$$

где

$$D(\bar{H}, z_i) = \left. \frac{\partial f(\bar{H}, z_i)}{\partial H} \right|_{H=\bar{H}},$$

$$f(H, z_i) = \ln \left[\frac{P(z_i) z_i^2}{P(z^*) z^{*2}} \right] = \ln \left[\frac{\alpha_{\text{мод}}(z_i)}{\alpha_{\text{мод}}(z^*)} \right] - 2 \int_{z^*}^{z_i} \alpha_{\text{мод}}(z') dz',$$

$$F(\bar{H}, z_i) = f(H, z_i) - f(\bar{H}, z_i) - D(\bar{H}, z_i) \bar{H}, \quad \alpha = \sigma_e^2 / \sigma_H^2,$$

где $P(z)$ — мощность лидарного сигнала.

При решении использовались эмпирическое соотношение между оптической и геометрической толщинами слоистообразного облака $\tau = 40H$ [2], а также априорная информация о средней геометрической толщине облака H , ее дисперсии σ_H^2 и мощности помехи при измерении лидарного сигнала σ_e^2 .

Погрешности восстановления толщины облака по лидарным данным

H	$\delta=0,2$			$\varepsilon=0,1$		
	$\varepsilon=0,01$	$\varepsilon=0,1$	$\varepsilon=0,3$	$\delta=0,1$	$\delta=0,2$	$\delta=0,5$
0,11	0,03	0,03	0,05	0,01	0,03	0,09
0,6	0,02	0,26	0,87	0,26	0,26	0,31
1,1	0,02	0,21	0,81	0,16	0,21	0,26
1,6	0,02	0,29	0,65	0,18	0,29	0,32
2,1	0,01	0,18	0,29	0,11	0,18	0,24
2,6	0,03	0,26	0,87	0,11	0,26	0,28
3,1	0,02	0,13	0,42	0,11	0,13	0,32
3,6	0,03	0,17	0,19	0,15	0,17	0,23
4,1	0,02	0,1	0,16	0,09	0,1	0,15
4,6	0,02	0,03	0,03	0,002	0,03	0,05

Устойчивость алгоритма (3) к погрешности измерения лидарного сигнала исследована методом статистических испытаний. Для однослойного слоистообразного облака рассчитывался лидарный сигнал, на который накладывался аддитивный равномерно распределенный шум с дисперсией σ_e^2 . Относительный порог регистрации сигнала задавался параметром δ . В таблице приведены относительные погрешности восстановления H при $\varepsilon = 0,01; 0,1; 0,3$ (фиксированное $\delta = 0,2$) и при $\delta = 0,1; 0,2; 0,5$ (фиксированное $\varepsilon = 0,1$). В левой колонке приводятся точные значения H .

Совместная интерпретация лидарных и фотометрических данных производилась следующим образом. В тех точках, где лидар идентифицирует облако, производилось восстановление H согласно

(3) с линейной интерполяцией на промежуточные точки, затем полученные результаты уточнялись с более высоким пространственным разрешением по фотометрическим данным с использованием соотношения (2).

Численный эксперимент

В целях исследования качества совместной интерпретации проводился замкнутый численный эксперимент, в котором имитировалось случайное поле облачности, по которому рассчитывались соответствующие поля H , τ и z_0 . Альbedo ПП задавалось 0,2 левая часть (рис. 1, б) и 0,7 правая. Рис. 1, б представляет собой модельное поле альbedo, представленное в дискретном виде 128×128 отсчетов при 5-балльной облачности и масштабе неоднородностей 25 км по обеим координатам (размеры представленного поля 250×250 км). Очевидно, при близких значениях альbedo облачности и ПП структура облачного поля не прослеживается. На рис. 1, а изображено модельное поле H , а на рис. 2 — результаты его восстановления по лидарным данным (без учета фотометрических) для двух случаев: когда лидарные измерения проводятся в 32×32 реперных точках (рис. 2, а) и в 8×8 реперных точках (рис. 2, б) с линейной интерполяцией результатов восстановления в них на промежуточные. На рис. 3 представлены результаты восстановления поля H при совместной интерпретации лидарных и фотометрических измерений (рис. 3, а — лидарные измерения имеются для 32×32 реперных точек аналогично рис. 2, а, рис. 3, б — то же для 8×8 реперных точек).

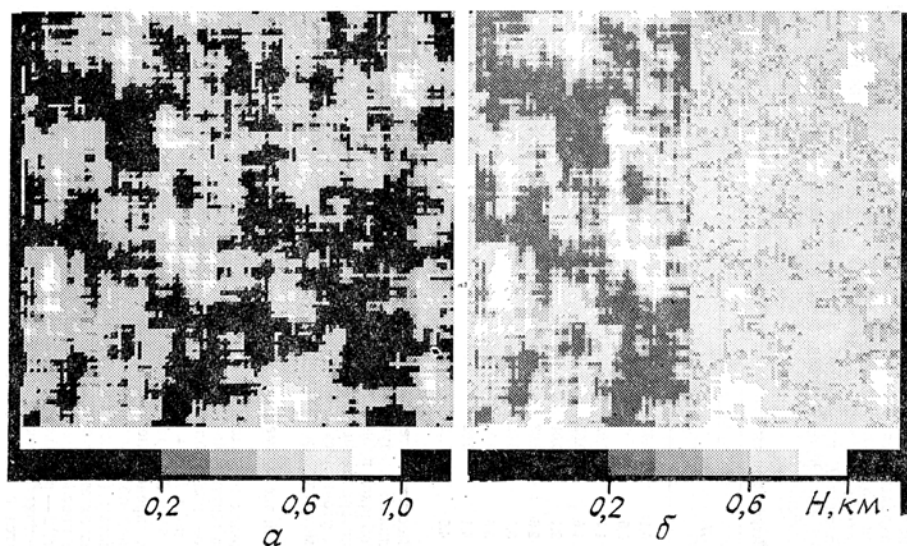


Рис. 1. Модельное поле геометрической толщины облаков (а) и рассчитанное по нему поле альbedo (б)

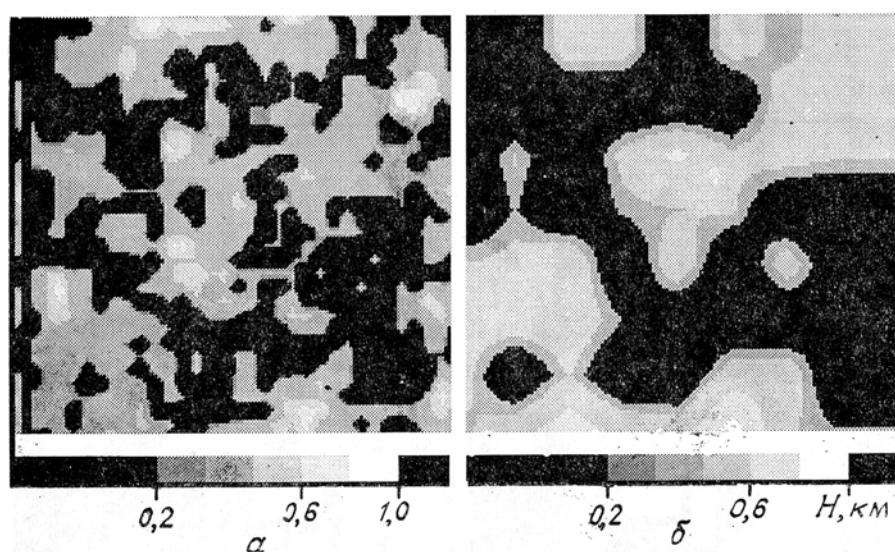


Рис. 2. Восстановление поля геометрической толщины облаков по лидарным измерениям: а — измерения в 32×32 реперных точках, б — в 8×8 реперных точках

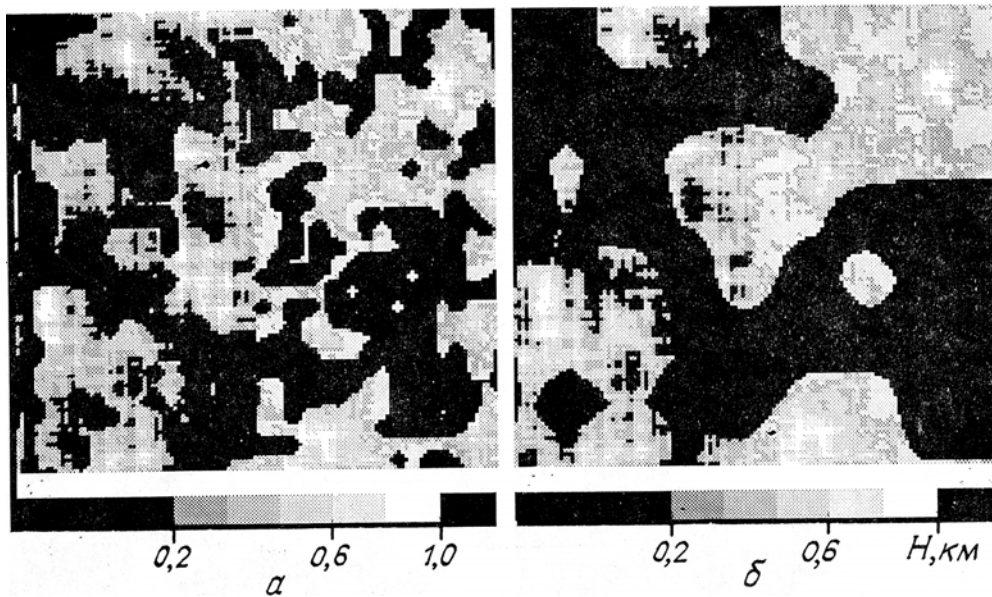


Рис. 3. Восстановление поля H при совместном использовании лидарных и фотометрических данных: a – восстановленное при лидарных измерениях в 32×32 реперных точках, b – в 8×8 точках

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы:

- 1) фотометрические измерения не всегда обеспечивают достоверное описание облачных полей (рис. 1);
- 2) лидарные измерения существенно увеличивают достоверность интерпретации, но лишь при условии достаточно высокой пространственной плотности измерений (рис. 2);
- 3) совместное использование лидарных и фотометрических измерений позволяет найти приемлемый компромисс между необходимой достоверностью интерпретации и возможностями реальных лидарных систем.

1. Балин Ю.С., Кавкьянов С.И., Креков Г.М., Самохвалов И.В., Стрепетова С.В. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 1. С. 93–99.
2. Радиация в облачной атмосфере / Под ред. Е.М. Фейгельсон. Л.: Гидрометеопиздат, 1981. 280 с.
3. Зуев В.Е., Кавкьянов С.И., Креков Г.М. // Изв. АН СССР. ФАО. 1983. Т. 19. № 3. С. 255.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,
Томск

Поступила в редакцию
5 июля 1991 г.

Yu. S. Balin, S. I. Kavkyanov, S. V. Strepetova. **Joint Interpretation of Lidar and Photometric Data on Cloud Fields Obtained from Space.**

A possibility of conducting a complex optical experiments using spaceborne lidar and radiometer is discussed. Interrelation of the lidar and photometric measurements is performed using models of the stratiformis vertical structure. A cloud numerical experiment simulating a random cloud field against the background of the underlying surfaces with different albedo has been carried out. The results of this numerical simulation illustrate the information capabilities of this approach.