

**Г.П. Коханенко, Г.Г. Матвиенко, В.С. Шаманаев,
Ю.Н. Грачев, И.В. Знаменский**

ЗОНДИРОВАНИЕ ОБЛАЧНОСТИ ОРБИТАЛЬНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ДАЛЬНОМЕРОМ

Анализируются возможности зондирования облачности орбитальными лидарами на примере интерпретации сигналов, полученных геодезическими лазерными дальномерами. Описана методика восстановления оптических характеристик облачности по измеренной длительности эхосигнала на нескольких уровнях. Вероятности наблюдения различных значений коэффициента ослабления и лидарного отношения, полученные по нашим оценкам, сравниваются с литературными данными. Результаты анализа облачных сигналов дальномера подтверждают возможность получения космическими лидарами достоверной информации об облачных слоях и позволяют уточнить требования к техническим характеристикам аппаратуры.

Новые возможности изучения атмосферы и подстилающей поверхности, связанные с использованием лидаров на космических аппаратах, обусловили интенсивную разработку в последние годы ряда проектов космических лидаров, некоторые из них находятся в стадии завершения. В частности, российский лидар <Балкан-1> [1] подготовлен к запуску на модуле <Спектр> орбитальной космической станции <Мир>, российско-французский лидар <Алиса> планируется к установке на модуль <Природа> этой же станции [2]. Готовится к запуску лидар для эксперимента NASA <LITE> на корабле серии Shuttle [3,4]. Задачи, стоящие перед первыми лидарными измерениями, несмотря на проведение обширных модельных оценок [например, 5, 6], предполагают в большей степени технологический (испытательный), чем наблюдательный характер исследований. Это вызвано необходимостью получения фактических данных для отработки методик лидарных наблюдений и их валидации. Особые трудности могут возникнуть при интерпретации сигналов лидара, отраженных облаками, имеющими существенную пространственную неоднородность.

Некоторые проблемы лазерного зондирования облачности из космоса могут уже сейчас решаться на основе анализа сигналов геодезических лазерных дальномеров, которые в отличие от лидаров неоднократно использовались в космосе (например, [7]). Орбитальные лазерные дальномеры рассчитаны на детектирование отраженных от земной поверхности импульсов с орбиты высотой несколько сотен километров и в случае попадания лазерного пучка в облако могут регистрировать соответствующие эхосигналы. Их можно рассматривать в качестве прототипов лидарных сигналов. В данной статье обсуждаются результаты анализа облачных эхосигналов, полученных лазерными дальномерами, установленными на геодезических спутниках в России в период 1982 – 1983 гг.

Лазерные дальномеры имели приемопередающие узлы со следующими параметрами:

длина волны излучения	532 нм
энергия в импульсе	0,15 Дж
длительность импульса излучения	10 нс
диаметр приемного телескопа	0,27 м
расходимость луча ω_s	30 угл. с
угол поля зрения ω_d	60 угл. с
частота повторения зондирующих импульсов	0,2 Гц

Система регистрации дальномера, исходя из решаемых им задач, была построена на пороговом принципе (рис. 1). Использовались четыре измерителя временных интервалов (ИВИ), срабатывавших при различных пороговых уровнях мощности $P_1 \dots P_4$. Нижний уровень соответствовал световой мощности $P_1 = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Вт, падающей на приемную апертуру дальномера, верхний $P_4 = 1,1 \cdot 10^{-7}$ Вт. Общий отсчет времени начинался с момента посылки импульса

излучения. Первый ИВИ включался в момент t_1 , когда величина принимаемой мощности $P(t)$ равнялась уровню P_1 , а выключался в момент t_2 , определяя таким образом пороговую длительность $\tau_1 = t_2 \leftrightarrow t_1$. Аналогично измерялись пороговые длительности $\tau_2 \dots \tau_4$. Для сигнала с мощностью в максимуме $P_{\max} > P_4$ регистрировались все четыре значения пороговых длительностей $\tau_1 \dots \tau_4$, при $P_1 < P_{\max} < P_2$ – только одно значение τ_1 . Расстояние до отражающего объекта определялось по времени T_0 , прошедшем от момента посылки зондирующего импульса до центра самого верхнего из зарегистрированных пороговых интервалов (т.е. до середины интервала τ_4 для случая, изображенного на рис. 1). Наличие облачности либо тип подстилающей поверхности контролировались фотосъемкой с борта спутника. Необходимо отметить, что специфика решаемых в то время задач не требовала проведения синхронных подспутниковых измерений, и сейчас это усложняет интерпретацию облачных сигналов.

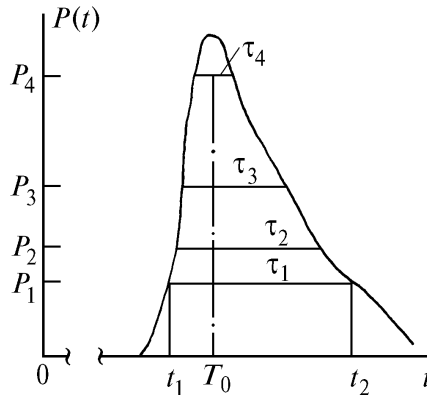


Рис. 1. Схема регистрации эхосигнала дальномером с четырьмя пороговыми уровнями

Следует подчеркнуть, что довольно высокое значение пороговой мощности P_1 не препятствовало уверенному приему сигнала от подстилающей поверхности. Однако при высоте орбиты порядка 200 км сигнал от облаков с коэффициентом ослабления $\epsilon < 10 \text{ км}^{-1}$ (значение, часто встречающееся в облаках верхнего яруса) вообще не мог быть зарегистрирован дальномером. Это привело к тому, что при попадании луча в облака сигнал от них регистрировался только в 5% случаев.

Нами рассмотрены серии измерений (несколько последовательных зондирований с интервалом 5 с между импульсами), во время которых наблюдался либо переход от зондирования подстилающей поверхности (море, суша) к зондированию облачности, либо наоборот. В этом случае по изменению времени прихода следующего отраженного импульса возможна более уверенная, чем по фотоснимку, идентификация облачности и определение высоты верхней границы (ВВГ) облака. Всего рассмотрено 56 случаев зондирования облаков с ВВГ от 0,6 до 5 км. В 28 случаях сигнал регистрировался только на первом пороговом уровне и только в 5 случаях – на всех четырех. При этом длительность на первом пороговом уровне τ_1 наблюдалась в пределах от 22 до 200 нс, что соответствовало глубине зондирования облака $r_1 \approx c\tau_1/2$, равной 3 – 30 м.

Отличие принятого в дальнометрии порогового принципа регистрации сигналов от типичного для лидаров амплитудно-временного потребовало разработки специальной методики конверсии сигналов. Был применен метод моделирования лидарного сигнала на базе совокупности дискретных пороговых отсчетов. За основу модели принимался сигнал, рассчитанный для горизонтально однородного облака в приближении однократного рассеяния. Световую мощность, падающую на приемную апертуру дальномера, можно описать уравнением лазерного зондирования (УЛЗ) [8]

$$P(r) = E_0 \frac{c S b(r) \epsilon(r)}{2 (R + r)^2} \exp \left(-2 \int_0^r \epsilon(r) dr \right), \quad (1)$$

где E_0 – энергия зондирующего импульса; S – площадь приемника; R – расстояние до верхней границы облака; r – расстояние от верхней границы облака по направлению вниз; ε – коэффициент ослабления; b – индикатриса обратного рассеяния; c – скорость света. Для УЛЗ (1) прозрачность атмосферы до облака принята равной 1, а коэффициент рассеяния облака – равным коэффициенту ослабления. Последствия того, что в (1) не учитывается многократное рассеяние излучения, будут рассмотрены ниже.

Проведем дальнейшие упрощения УЛЗ. Поскольку глубина проникновения излучения в облако r_1 значительно меньше R , то расстояние до зондируемого объема в (1) примем постоянным и будем определять по времени прихода импульса T_0 (см. рис. 1): $(R + r) \approx R_0 = c T_0/2$. Предположим также, что индикатриса обратного рассеяния постоянна в пределах облака: $b(r) \equiv b$. Тогда УЛЗ (1) примет вид

$$P(r) = Ab\varepsilon(r) \exp\left(-2 \int_0^r \varepsilon(r) dr\right), \quad A = \frac{E_0 c S}{2 R^2}. \quad (2)$$

Традиционные методы решения УЛЗ, позволяющие восстанавливать пространственное распределение $\varepsilon(r)$ при фиксированном $b(r)$, в нашем случае неприменимы, поскольку объем информации ограничен: нам известна не форма отраженного сигнала, а только значения пороговых длительностей. Это вынуждает ограничиться заданием простых моделей облачности.

В зависимости от того, какое количество пороговых уровней имеется в сигнале, нами использованы модели облака с количеством параметров от 1 до 3. Модели различаются по характеру зависимости $\varepsilon(r)$ на верхней границе облака и по параметру b , который либо включается в число определяемых параметров, либо задается.

Модель 1. задается монотонный рост ε по закону $\varepsilon(r) = ar^k$, где a и k – параметры (подобное распределение ε характерно для верхней границы слоистых облаков [9]). УЛЗ (1) приводится к виду

$$P^{(1)}(r) = Aba r^k \exp(-2 ar^{k+1}/(k+1)), \quad (3)$$

содержащему три неизвестных параметра (b , a и k). Обработка по этой модели проводится для сигналов, имеющих не менее трех пороговых уровней. Схема подбора параметров проиллюстрирована на рис. 2. Реальный эхосигнал известен нам по значениям пороговых длительностей τ_1, τ_2, τ_3 . В координатах рис. 2 (по оси абсцисс отложено расстояние r от предполагаемой границы облака) эхосигнал $P(r) = P(ct/2 - R)$ задается пороговыми интервалами $\rho_i = c \tau_i/2$. Рассчитываемая при заданных значениях параметров модельная функция $P^{(1)}(r)$ имеет интервалы $\rho'_1, \rho'_2, \rho'_3$ на уровнях P_1, P_2, P_3 соответственно. Отметим, что положение начала интервалов $\rho_1 \dots \rho_3$ эхосигнала относительно границы облака ($r=0$) нам известно с погрешностью. Задача состоит в том, чтобы подбором параметров b, a, k добиться наилучшего соответствия рассчитанных ρ'_i и измеренных дальномером интервалов ρ_i .

Напомним, что модельная функция $P^{(1)}(r)$ учитывает только однократное рассеяние излучения в облаке. Есть вероятность того, что на спаде импульса (при больших глубинах проникновения излучения в облако) значительна доля многократного рассеяния. В этом случае его влияние сильнее сказывается на длительности сигнала на нижних уровнях регистрации, когда мала принимаемая мощность. Поэтому мы всегда подбираем $P^{(1)}(r)$ так, чтобы совпали рассчитанный ρ'_3 и измеренный ρ_3 интервалы на верхнем пороговом уровне P_3 . Задавая ряд значений b , подбираем параметры a и k так, чтобы величина невязки $N^{(1)}(b, a, k) = \sqrt{(\rho'_2 - \rho_2)^2 + (\rho'_1 - \rho_1)^2}$ достигала минимума при условии $\rho'_3 = \rho_3$. Нужно отметить, что минимальное значение $N^{(1)}(b, a, k)$ может отличаться от нуля и значительно превосходить погрешность измерения расстояния дальномером (0,375 м), что должно свидетельствовать о плохом соответствии выбранной модели реальной ситуации. После выбора оптимальных параметров можно построить модельный профиль коэффициента рассеяния $\varepsilon(r) = ar^k$. Если по модели 1 обрабатывались сигналы с четырьмя пороговыми уровнями, то использовались три верхних – P_2, P_3 и P_4 .

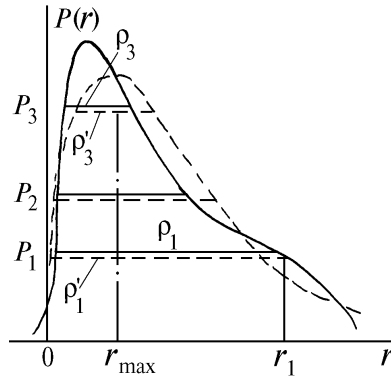


Рис. 2. Схема подбора модельной функции к эхо-сигналу. Сплошная кривая – предполагаемая форма эхо-сигнала $P(r)$ с измеренными пороговыми интервалами $\rho_1 \dots \rho_3$. Штриховая – модельная функция $P^{(1)}(r)$ с рассчитанными пороговыми интервалами $\rho'_1 \dots \rho'_3$. Соблюдается условие $\rho'_3 = \rho_3$

Модель 2. Та же, что и в предыдущей модели, зависимость $\varepsilon(r)$, но предполагается известным значение $b = 0,05$ (как в модели облака C1 Дейрменджана [10]). В этом случае для оценки $\varepsilon(r)$ достаточно двух уровней P_1 и P_2 . Подбором параметров a и k минимизируется невязка $N^{(2)}(a, k) = \sqrt{(\rho'_1 - \rho_1)^2}$ при условии $\rho'_2 = \rho_2$. Для сигналов, имеющих три и четыре уровня, при обработке по этой модели брались верхние два уровня.

Модель 3. Предполагается постоянный по высоте коэффициент ослабления ε . В этом случае УЛЗ (1) упрощается до вида

$$P^{(3)}(r) = Ab \varepsilon \exp(-2 \varepsilon r) \quad (4)$$

и мы для определения ε можем применить метод, аналогичный методу логарифмической производной, используя значения длительностей для двух пороговых уровней P_1 и P_2 :

$$\varepsilon = \frac{\ln P_2 - \ln P_1}{2(\rho_1 - \rho_2)},$$

после чего определяем из (3) значение b .

Модель 4. Если в модели 3 ($\varepsilon = \text{const}$) предположить $b = 0,05$, то можно рассчитать зависимость $\tau_i(\varepsilon)$ длительности сигнала на верхнем пороговом уровне P_i от коэффициента рассеяния ε и попытаться оценить значение ε , используя только один пороговый уровень. Зависимость $\tau_i(\varepsilon)$ немонотонна, и оказалось, что почти половина сигналов имеет длительность, превышающую максимально возможную для этой модели при заданном значении индикатрисы b . Поэтому сигналы, имеющие только один уровень P_1 , обрабатывались следующим способом.

Предположим, что амплитуда сигнала известна и равна значению мощности сигнала, соответствующей второму пороговому уровню P_2 . В этом случае $\varepsilon = \ln(P_2/P_1)/2\rho_1$, а затем из (4) определяется значение b . Легко видеть, что этот метод обработки дает оценку сверху для ε и снизу для b . Мы применили этот метод и для сигналов с двумя и тремя уровнями, используя для обработки самый верхний уровень из зарегистрированных.

Результаты обработки сигналов от плотных облаков по двум моделям

N п/п	$\rho_1, \text{ м}$	$\rho_2, \text{ м}$	$\rho_3, \text{ м}$	Модель 1					Модель 2	
				$\varepsilon(r_{\text{max}}), \text{ км}^{-1}$	b	k	$N^{(1)}, \text{ м}$	T_{opt}	$\varepsilon(r_{\text{max}}), \text{ км}^{-1}$	k
1	7,5	5,6	4,1	154	0,045	0,01	0,6	1,2	178	0,01
2	4,5	3,8	3,0	230	0,028	0,2	0,1	1,5	360	0,01
3	28,5	21,4	6,4	28	0,1	0,46	0,5	0,99	73	0,7
4	10,8	9,4	1,1	72	0,039	0,5	3,0	0,93	48	0,2
5	28,8	13,1	3,0	32	0,087	0,44	17,7	1,2	66	0,85

В качестве примера в таблице приведено несколько сигналов, имеющих три зарегистрированных пороговых уровня, и результаты их обработки по моделям 1 и 2. Значение коэффициента ослабления $\varepsilon(r)$ приведено для точки $r = r_{\max}$, в которой модельные функции $P^{(i)}(r)$, ($i = 1, 2$) принимают максимальное значение (см. рис. 2). Кроме восстановленных значений ε , b , k и величины невязки $N^{(1)}$ в таблицу включено значение оптической толщины $T_{\text{opt}} = \int_0^{r_1} \varepsilon(r) dr$ (r_1 – точка, в которой модельная функция спадает ниже уровня P_1 , см. рис. 2). Величина $T_{\text{opt}} \approx 1$ говорит о возможности заметного вклада многократно рассеяного излучения на достигнутых глубинах зондирования.

Конечно, степень достоверности информации об оптических параметрах облаков, полученных при использовании разных моделей, различна, поскольку различен объем используемой экспериментальной информации и предполагаемые а priori условия. Это может проявиться в расхождении оценок параметров облака, когда мы используем при восстановлении разное число пороговых уровней одного и того же сигнала. На рис. 3 приведен пример (случай 5 из таблицы, характеризующийся большим значением невязки $N^{(1)}$), когда для обработки сигнала, в котором зарегистрированы три пороговых уровня, использовались все предложенные модели. Номера кривых соответствуют номерам моделей, по которым восстанавливалась форма сигнала. Отрезки прямых на уровне порогов $P_1 \dots P_3$, совмещенные с кривой I , представляют измеренные значения пороговых интервалов. На рис. 3, б показаны восстановленные по каждой модели профили $\varepsilon(r)$ (напомним, что модель 4 – это оценка ε сверху). Значение индикатрисы рассеяния b получилось равным 0,09 для модели 1 и 0,083 для модели 3. Пример выбран из числа тех, в которых наблюдается значительное расхождение в оценке значений ε по разным моделям.

Несомненно, модель 1 имеет преимущества перед остальными, поскольку в ней учитывается больший объем данных (три измеренных длительности) и отсутствует произвол в задании b . К сожалению, большая часть экспериментальных сигналов имеет только один или два уровня. Применение разных моделей для обработки сигналов (даже для соседних сигналов в одной серии измерений) не дает возможности проследить изменение параметров облака между отдельными измерениями. Поэтому мы рассмотрим всю совокупность значений оптических параметров, полученных различными методами обработки. С целью изучения вероятности появления определенных значений коэффициента ослабления случаи, подобные приведенному на рис. 3, мы рассматривали как четыре независимых измерения оптических параметров.

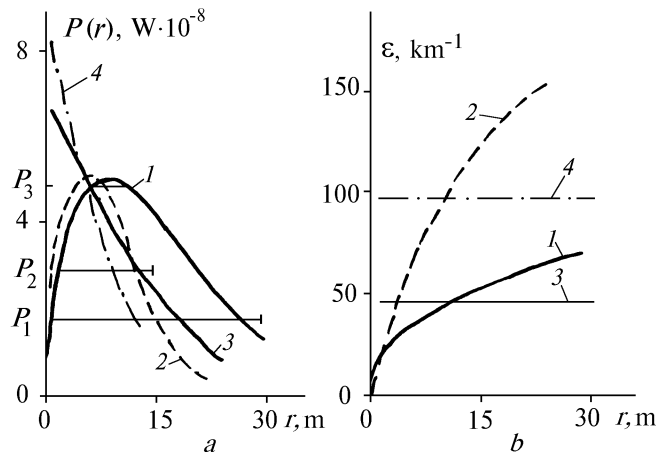


Рис. 3. Пример подбора модельных функций $P^{(i)}(r)$ (i – номер используемой модели – указан цифрами возле кривых) для одного из реальных эхосигналов (а) и восстановленные профили $\varepsilon(r)$ на верхней границе облака для соответствующих моделей (б)

Как показала оценка, восстановленное значение ε находится в пределах от 14 до 500 km^{-1} . Это очень большой диапазон. (Напомним, что 95% облаков, очевидно, наименее плотных, не

регистировались дальномером). На рис. 4 приведена накопленная вероятность $f(\epsilon)$ появления значений ϵ по нашим расчетам [для моделей 1 и 2 взяты значения $\epsilon(r_{\max})$ в максимуме сигнала] в сравнении с данными [9] для облаков различных форм. Удовлетворительное согласие наших и независимых результатов для плотных облаков типа Cu подтверждает реалистичность полученных оценок ϵ .

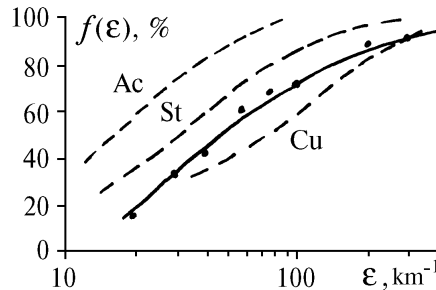


Рис. 4. Накопленная вероятность $f(\epsilon)$ появления различных значений коэффициента ослабления ϵ по результатам обработки всех случаев зондирования (сплошная кривая). Штриховые кривые – взятые из [9] экспериментальные данные для различных типов облачности

Несколько сильнее отличаются от предполагавшихся в моделях результаты оценки индикатрисы b . Так, среднее значение b равно 0,07 для модели 1 и 0,08 для модели 3. В то же время в 25% случаев (особенно в модели 3) $b > 0,1$, что существенно выше физически обоснованных значений b для капельных облаков [10]. Как правило, это характерно для сигналов с большими длительностями на нижних уровнях (100 нс и более). Эти же сигналы плохо поддаются процедуре минимизации невязки при подборе параметров по модели с заданным значением b . Мы полагаем, что объяснять такие завышенные оценки b следует значительным несоответствием характеристик реальных облаков и предложенных моделей. Наиболее вероятны следующие предположения. Первое – это возможное присутствие в сигналах бликов от ориентированных ледяных пластинок на вершине облака. Второе – наличие в пределах пятна лазерного излучения (диаметром около 50 м) на границе облака перепада высот (ступеньки), сравнимой по высоте с диаметром пятна. Наконец, и это самое существенное, – возможный значительный вклад многократного рассеяния в эхосигнал. Оптический радиус пятна излучения на границе облака $R_{\text{opt}} = \epsilon R_0 \omega_p$, во многом определяющий уровень многократного рассеяния в сигнале, достигает значения $R_{\text{opt}} = 1$ при $\epsilon = 30 \text{ км}^{-1}$. Из результатов [5] следует, что уже при $R_{\text{opt}} = 1,5$ декремент затухания сигнала уменьшается в 2,6 раза за счет возрастающего во времени вклада многократного рассеяния. При нашем методе обработки это приведет к занижению значения ϵ и завышению b .

В заключение отметим, что полученные результаты носят непротиворечивый по отношению к физике облаков характер. Это позволяет рассматривать приведенные данные как первый опыт лазерного зондирования атмосферы из космоса. Кроме того, наши оценки подтверждают возможность получения космическими лидарами физически достоверной информации об облачных слоях и позволяют уточнить требования к техническим характеристикам аппаратуры. Несомненна также необходимость дальнейшего усовершенствования математических методов обработки лидарных сигналов, учитывающих реальные характеристики разорванной кучевой облачности и вклад многократного рассеяния. Кроме того, можно ожидать, что в лидарах типа <Балкан> и <LITE>, имеющих более высокую чувствительность и амплитудно-временную, а не пороговую, систему регистрации сигналов, будут достигнуты необходимая глубина проникновения и наибольшая точность восстановления оптических параметров облачности.

1. Balin Yu.S., Burkov V.V., Znamenskii I.V. et al. // 15th Intern. Laser Radar Conf. Abstracts, Tomsk, 1990. V. 1. P. 12 – 14.
2. Международный целевой комплексный проект <Природа>. Научная программа экспериментов. М.: ИРЭ АН СССР 1991. 136 с.
3. Couch R.H., Rowland C.W., Ellis K.S. et al. // Optic. Eng. 1991. V. 30. N 1. P. 88 – 95.

4. McCormik M.P., Winter D.M., Browell E.V. et al. // Bulletin American Meteorol. Society. 1993. V. 74. N2. P. 205–214.
5. Креков Г.М., Крекова М.М., Самохвалов И.В. // Исследование Земли из космоса. 1988. N 2. С. 44–51.
6. Russel P.V., Morley B.M. et al. // Appl. Opt. 1982. V. 21 P. 1541.
7. Бафтон Дж.Л. // ТИИЭР. 1989. Т. 77. N 3. С. 71–88.
8. Northend C.A., Honey R.C., Evans W.E. // Rev. Sci. Instr. 1966. V. 37. N 4. P. 393–400.
9. Радиация в облачной атмосфере/ Под ред. Е.М. Фейгельсон. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 280 с.
10. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 209 с.

Институт оптики атмосферы Поступила в редакцию
СО РАН, Томск 16 апреля 1994 г.

G.P. Kokhanenko, G.G. Matvienko, V.S. Shamanaev, Yu.N. Grachev,
I.V. Znamenskii. **Sensing of Cloudiness with an Orbital Laser Range Finder.**

The possibilities of orbital lidars to sense cloudiness are analysed by the example of interpretation of the signals obtained with a geodesic laser range finders. A method is described of reconstructing the optical characteristics of cloudiness by the measured duration of signal returns at several levels. The probabilities of observing various magnitudes of attenuation coefficient and lidar relationship obtained by our assessments are compared with the literature data. Results of analysis of the cloud returns of the range finder confirm the possibility to obtain a reliable information by means of the space lidars and allow us to particularize the requirements to the instrumentaiton technical parameters.