

В.Е. Зуев, Ю.С. Балин, Г.Г. Матвиенко, А.А. Тихомиров, В.С. Шаманаев

ЛИДАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЛАЧНЫХ ПОЛЕЙ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ИЗ КОСМОСА

Проведен анализ первых результатов лазерного зондирования облачности и подстилающей поверхности из космоса с помощью российских орбитальных квантовых дальномеров и лидара «Балкан» на борту модуля «Спектр» станции «Мир». Обоснована необходимость учета вклада многократного рассеяния при интерпретации облачных эхосигналов. На основе точных модельных оценок, выполненных методом Монте-Карло, определена роль различных порядков рассеяния в эхосигналы лидара «Балкан». Показано, что уравнение лазерной локации в однократном приближении справедливо только до оптических толщ 0,5. Натурные эксперименты подтвердили высокую точность измерения расстояний (0,7 м) до облаков и подстилающей поверхности и эффективность определения оптических характеристик верхней границы облачности и подстилающей поверхности.

Широкие возможности изучения атмосферы и подстилающей поверхности, связанные с использованием лидаров на космических аппаратах, обусловили интенсивную разработку проектов космических лидаров (см., например, [1–5]), а в последние годы их практическую реализацию [6–8]. Так, в период с 10 по 19 сентября 1994 г. проведен орбитальный лидарный эксперимент NASA «LITE» на корабле серии «Shuttle» [1, 6]. С 20 мая 1995 г. российский лидар «Балкан-1» находится на орбите в составе научного модуля «Спектр» космической станции «Мир». Российско-французский лидар «ALISSA» в составе модуля «Природа» этой же станции выведен на орбиту в мае 1996 г. Задача первых космических лидарных измерений, несмотря на проведение обширных модельных оценок, имела в большей степени технологический (испытательный), чем наблюдательный характер. Говоря о российском лидарном космическом опыте, необходимо отметить, что история лидарных исследований Земли из космоса началась в 1982 г. с выводом на орбиту квантовых дальномеров [7]. Как оказалось, дальномеры могли исследовать не только поверхность, но и облачность, обеспечив тем самым апробацию лидарных алгоритмов обработки сигналов от объемно распределенных объектов (облаков).

Данная статья посвящена анализу результатов лазерного зондирования облачности и подстилающей поверхности, полученных российскими орбитальными дальномерами и лидаром «Балкан-1».

Лазерное зондирование Земли орбитальными дальномерами

Орбитальный дальномер имеет назначение — определение точной (с погрешностью доли метра) дальности между геодезическим спутником и зондируемой поверхностью. Его функционирование основано на излучении коротких световых импульсов, детектировании отраженного импульса и определении временной задержки между излучением и приходом отраженного импульса. Однако стремление расширить возможность дальномеров и повысить надежность систем регистрации заставило использовать не однопороговые, а многопороговые принципы измерения временных интервалов, которые позволяют, используя аппроксимации, реконструировать форму отраженного сигнала, что представляет особый интерес для зондирования объемно распределенных сред — атмосферы и океана [7, 9, 10]. В случае зондирования поверхности многопороговые системы регистрации обеспечивают получение информации о наклоне поверхности по уширению отраженного импульса [11].

Российские орбитальные квантовые дальномеры типа «Лора» используются в космосе с 1982 г. по настоящее время [7] и имеют приемопередающие узлы со следующими параметрами:

длина волны излучения, нм	532
энергия в импульсе, Дж	0,20
длительность импульса излучения, нс	10
диаметр приемного телескопа, м	0,27
расходимость луча, угл.с	30
угол поля зрения, угл.с	60
частота повторения зондирующих импульсов, Гц	0,18

Система регистрации дальномера была построена на пороговом принципе. Использовались четыре измерителя временных интервалов, срабатывавших при различных пороговых уровнях мощности $P_1 \dots P_4$. Выбор этих уровней поясняется рис. 1, где приведены оценки профилей мощности эхосигналов в ваттах (нижняя горизонтальная ось) и фотоотсчетах за микросекунду (верхняя горизонтальная ось). Как видно из рисунка, система пороговых уровней дальномера выбрана из условия, чтобы все виды поверхностей давали сигналы на всех четырех уровнях, а фоны были меньше нижнего порогового уровня. Из рисунка также видно, что облака средней плотности (коэффициент рассеяния около 10 км^{-1}), а тем более аэрозольная атмосфера дают сигналы ниже минимального порога детектирования длительностей эхосигналов. Следовательно, орбитальный дальномер может кроме поверхностных сигналов детектировать сигналы только от плотных облаков.

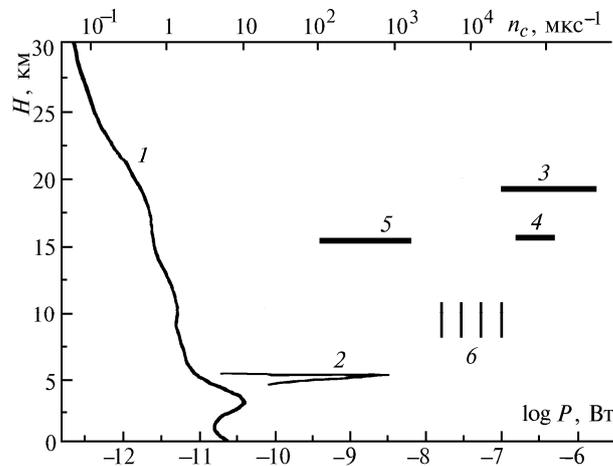


Рис. 1. Модельные оценки мощности, регистрируемой квантовым дальномером (высота орбиты 300 км): 1 – безоблачная атмосфера, модель [12]; 2 – однородное облако с коэффициентом рассеяния 10 км^{-1} на высоте 5 км; 3 – диапазон сигналов, отраженных от поверхности; 4 – изменение сигналов от взволнованной морской поверхности; 5 – диапазон фоновых засветок в полосе фильтра дальномера при зенитном угле Солнца 60° (максимальный уровень); 6 – система пороговых уровней измерения временных интервалов

Общий отсчет времени в системе регистрации начинался с момента посылки импульса излучения. Первый измеритель временных интервалов 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 $\tau_1 = t_2 - t_1$. 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.

Многочисленные эксперименты по лазерной дальнометрии земной поверхности показали высокую эффективность орбитальных дальномеров в безоблачной атмосфере. Погрешность измерения дальности составила 0,7 м. В облачной атмосфере в случае плотных облаков появляется сигнал от верхней границы облаков, а в случае неплотной облачности сигнал от облаков не появляется и может даже исчезнуть сигнал от земной поверхности из-за ослабления в облачности.

Поверхностные одномерные сигналы уже неоднократно анализировались (см., например, [11]), поэтому представляется более интересным рассмотрение облачных дальномерных сигналов. Нами рассмотрены серии измерений (несколько последовательных зондирований с интервалом 5,5 с между импульсами), но во время которых наблюдался переход либо от зондирования подстилающей поверхности (суша, море) к зондированию облачности, либо наоборот.

рот. В этом случае по изменению времени прихода следующего отраженного импульса возможны уверенная 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 сигналов. За основу модели принимался сигнал, рассчитанный для горизонтального однородного облака в приближении однократного рассеяния. Для облачности использовались наиболее простые модели типа однородного по трассе облака с заданным или неизвестным значением лидарного отношения, а также степенным распределением коэффициента ослабления σ . Подбор значений параметров осуществлялся на основе минимизации квадратичной невязки подбираемых и реальных длительностей эхосигналов.

Как показали оценки, восстановленные значения σ находятся в пределах от 14 до 500 км⁻¹. Это очень большой диапазон. На рис. 2 приведена накопленная вероятность $f(\sigma)$ появления значений σ по нашим расчетам в сравнении с данными [13] для облаков различной формы. Удовлетворительное согласие наших и независимых результатов для плотных облаков типа *Cu* подтверждает реалистичность полученных оценок σ .

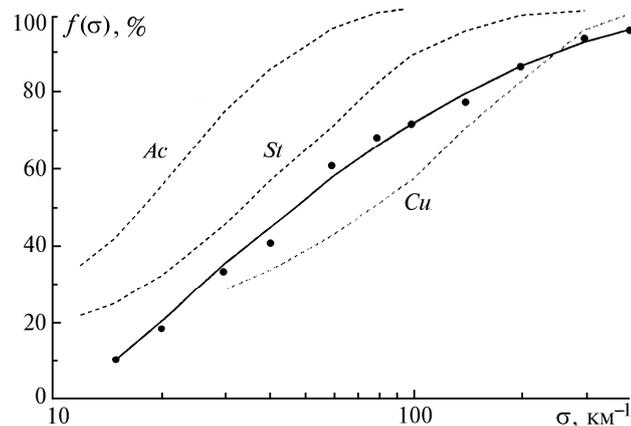


Рис. 2. Накопленная вероятность $f(\sigma)$ появления различных значений коэффициента ослабления по результатам обработки всех случаев зондирования (сплошная кривая). Штриховые кривые взяты из [13], — экспериментальные данные для различных типов облачности

Несколько заметнее отличаются от предлагавшихся в моделях результаты оценки лидарного отношения b . Так, среднее значение b равно 0,07. В то же время в 25% случаев $b > 0,1$, что существенно выше физически обоснованных значений b для капельных облаков [14]. 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), сравнимого 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_{opt} , во многом определяющий уровень многократного рассеяния в сигнале, достигает значения $R_{opt} = 1$ при $\sigma = 30$ км⁻¹. Из результатов [15] следует, что уже при $R_{opt} = 1,5$ 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 σ и завышению b .

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 физическим характеристикам аппаратуры. Несомненно также необходимость дальнейшего усовершенствования математических методов обработки лидарных сигналов, учитывающих реальные характеристики разорванной кучевой облачности и вклад многократного рассеяния. Учитывая важность определения роли многократного рассеяния в формировании эхо-сигнала из космоса, проанализируем влияние этого фактора на основе точных численных оценок.

Оценка вклада многократного рассеяния в сигнал орбитального лидара

Основные вопросы роли многократного рассеяния могут быть сняты с помощью математического моделирования. Интересной при этом является возможность широко варьировать параметры задачи, что недоступно натурному эксперименту.

Сигнал лазерного локатора $P(h)$, отраженный рассеивающей средой, является функцией времени или расстояния до исследуемого объекта. В качестве носителя информации, как правило, рассматривается сигнал однократного рассеяния $P_0(h)$ в направлении оптического детектора. Принимаемый сигнал в этом случае описывается известным уравнением локации

$$P(h) = W_0 A b \sigma(h) h^{-2} \exp \left\{ -2 \int_0^h \sigma(h') dh' \right\}, \quad (1)$$

где $P(h)$ — регистрируемый сигнал; W_0 — энергия, заключенная в зондирующем импульсе; A — аппаратная функция; $\sigma(h)$ — объемный коэффициент ослабления, являющийся функцией высоты h . В принципе, определяя в эксперименте $P(h)$ и используя (1), можно получить информацию об оптических свойствах исследуемой среды. Вопрос осложняется присутствием фоновых шумов, сопровождающих работу любых приемопередающих устройств. Природа фоновых шумов разнообразна. В данном случае нас интересуют фоны активного происхождения, т. е. помехи, создаваемые самим сигналом и обусловленные явлениями вторичного рассеяния в пределах угловой апертуры приемного устройства. В общем случае мощность сигнала обратного рассеяния определяется следующими аддитивными составляющими:

$$P(h) = P_0(h) + P_\Phi(h),$$

где $P_0(h)$ — сигнал однократного рассеяния; $P_\Phi(h)$ — добавка многократного рассеяния. Оценкой $P_0(h)$ является уравнение (1), а $P_\Phi(h)$ может быть найдено из решения нестационарного уравнения переноса. Его решение с учетом начальных и граничных условий с возможным разделением по кратностям взаимодействия наиболее целесообразно находить методом Монте-Карло [16, 17]. В данном случае подобное решение реализовано для схемы моностатического лазерного локатора, удаленного от поверхности Земли на расстоянии $H = 400$ км (эта высота соответствует орбите космической станции «Мир»). Предполагается, что источник излучает изотропно в конусе направлений $2\pi(1 - \cos\varphi_u)$, где $\varphi_u = 0,2$ мрад. Эхо-сигнал регистрируется приемником в конусе направлений $2\pi(1 - \cos\varphi_d)$, где $\varphi_d = 0,44$ мрад. Расчеты выполнены для импульса прямоугольной формы длительностью 10 нс с энергией $W = 1$ Дж. Коэффициент передачи приемопередающей системы $k_n = 1$. Облачный слой, находящийся в интервале высот от 1,5 до 2 км над поверхностью Земли, имеет рассеивающие свойства, соответствующие типам C_1 и C_2 по классификации [14]. Рассматривались облака слоистых форм без разрывов. Учтено ослабление излучения аэрозолем в 30-км слое надоблачной атмосферы, прилегающей к поверхности Земли. Его высотная оптическая модель задавалась в соответствии с фоновой моделью, предложенной в [18]. Рассеивающие свойства аэрозоля заданы дымкой Н [14]. При задании оптически неоднородного облака оно разбивалось по глубине на n слоев толщиной Δh . Величина $\sigma(h_i)$ изменялась от слоя к слою, а внутри Δh_i оставалась постоянной.

Ниже представлены результаты расчетов мощности локационного сигнала $P(h)$, рассчитанные для облаков, имеющих различные конфигурации профилей коэффициента ослабления $\sigma(h)$ по его глубине. На рис. 3, 4 в качестве оси абсцисс принята величина h , эквивалентная накопленному пробегу или времени пребывания фотона в облаке, т.е. $h = ct/2$. Результаты приведены для одного угла приема, т. е. его вариации при космической схеме зондирования слабо влияют

на характер поведения и уровень сигнала $P(h)$, ранее это было показано нами в работе [15]. Результаты расчетов получены для верхней кромки облака до оптических глубин $\tau \sim 2-3$.

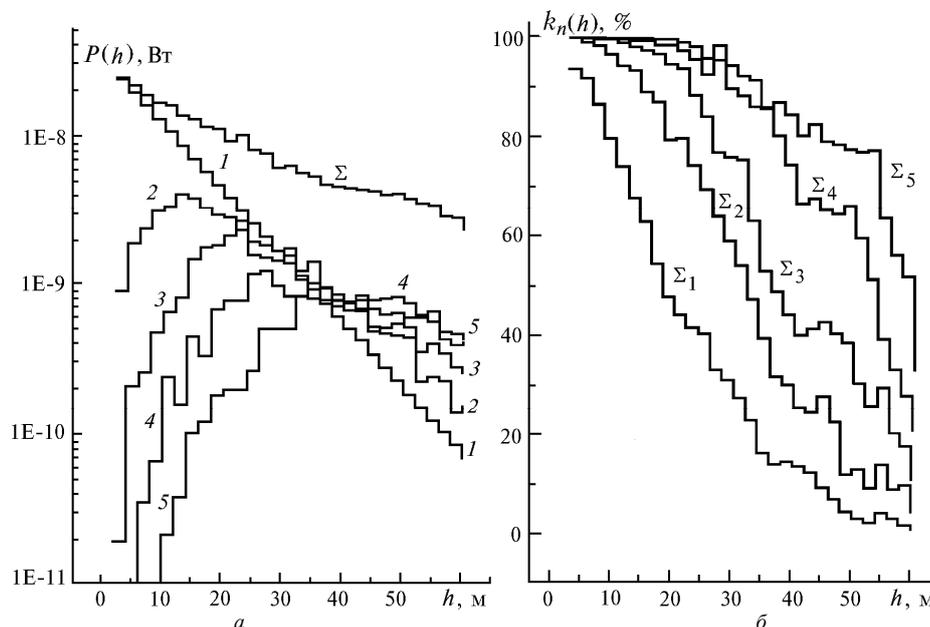


Рис. 3. Результаты оценки вклада многократного рассеяния при зондировании однородного облака C_1 : a – абсолютные значения мощности общего сигнала Σ и сигналов, обусловленных отдельными кратностями (указаны у кривых); b – процентное соотношение мощностей сигналов, получаемых за счет различных кратностей рассеяния к полному сигналу

Рис. 3 иллюстрирует результаты расчетов для однородного оптически плотного облака с $\sigma(h) = \text{const} = 50 \text{ км}^{-1}$. Несмотря на высокую оптическую плотность облака, сигнал имеет монотонно спадающий характер, изменяясь в пределах одного порядка. Причиной медленного спада сигнала является присутствие высокого уровня фона многократного рассеяния, который обеспечивается большим рассеивающим объемом в конусе визирования. Доминирующая роль сигнала первой кратности сохраняется до $\tau \leq 0,8$, затем поднимается уровень последующих кратностей, и при $\tau \sim 1,2 \div 1,6$ их вклад в суммарный сигнал становится сопоставимым. На оптической глубине $\tau \sim 2,5 \div 3$ начинает возрастать роль кратностей $n > 4$. Рис. 3, b показывает процентное соотношение сигналов: первой кратности рассеяния к полному сигналу (кривая Σ_1), далее сумма первых двух кратностей, отнесенная к полному сигналу (кривая помечена символом Σ_2), и т.д. До $\tau \sim 1,5$ более 60% мощности составляет излучение первых двух кратностей рассеяния. И только сумма пяти кратностей рассеяния позволяет учесть большую часть мощности, приходящей на детектор с глубины $\tau \sim 2,5-3$.

Расчет для облака типа C_2 , характеризующегося значительно меньшей асимметрией индикатрисы рассеяния, показал аналогичную картину формирования сигнала. Некоторые отличия имели место в абсолютных значениях интенсивностей кратностей $n > 3$. Это связано прежде всего с тем, что поперечные размеры пучка на верхней границе облака ($R_{\text{п}} \sim 100 \text{ м}$) оказываются сопоставимыми с толщиной облачного слоя. Как следствие, излучение, рассеянное в боковые направления, практически не выходит за пределы конуса визирования, участвуя в дальнейшем формировании диффузно-отраженного потока излучения.

Рис. 4 представляет результаты расчетов $P(h)$ для неоднородного типа облака. Нами выбран наиболее типичный профиль коэффициента ослабления $\sigma(h)$ для слоистых облаков – параболический, быстро нарастающий от верхней границы, а затем медленно спадающий к нижней [19]. Для обнаружения тонкой структуры профиля коэффициента ослабления необходимо при проведении расчетов или измерений иметь небольшие временные интервалы интегрирования сигнала. Расчеты выполнены в большей части случаев с шагом $\Delta h = \Delta t \cdot c/2 = 2-3 \text{ м}$.

Как видно из рис. 4, максимум сигнала $P(h)$ сдвинут в сторону меньших глубин и практически совпадает с положением максимума сигнала первой кратности рассеяния. Как и для

однородного облака, формирование сигнала завершается на глубине $\tau \sim 1,5$, когда значимую роль в сигнале начинают играть кратности высоких порядков. Анализ результатов расчетов показал, что, независимо от вида профиля коэффициента ослабления, передний фронт импульса до $\tau \sim 0,8 \div 1$ формируется за счет кратностей низкого порядка. При этом чем выше кратность рассеяния, тем ниже ее вклад в абсолютный уровень сигнала. В интервале оптических толщин $\tau \sim 0,8 \div 1,5$ происходит перестройка роли кратностей различных порядков, т. е. нарастает интенсивность кратностей высокого порядка. В области $\sim 1,5 \div 1,8$ вклады в сигнал $P(h)$ первых пяти кратностей рассеяния сопоставимы по абсолютной величине. Задний фронт импульса (после $\tau > 2$) формируется в основном за счет излучения высоких кратностей рассеяния. Расчет для облака типа C_2 с профилем $\sigma(h)$, аналогичным описанному выше на рис. 4, показал, что количественные и качественные характеристики сигналов $P(h)$ для двух типов облаков, отличающихся спектром распределения частиц по размерам, практически совпадают. Это обеспечивается еще и тем, что в области локационных углов индикатрисы рассеяния этих типов облаков имеют почти одинаковые значения.

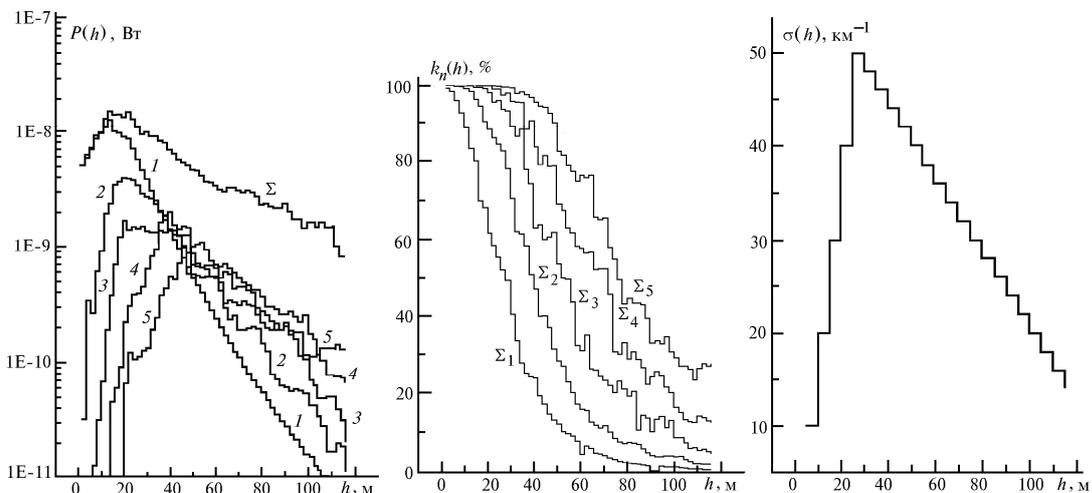


Рис. 4. То же, что и рис. 3, но для неоднородного по глубине облака, в – профиль $\sigma(h)$

На основании проведенных оценок можно отметить следующее. При извлечении количественной информации из сигнала лидара нужно учитывать, что первая кратность рассеяния играет в сигнале доминирующую роль до $\tau \sim 0,4 \div 0,5$ (геометрическая толщина несколько десятков метров), следовательно, в этих пределах оправдано применение уравнения локации (1). Учет в нем второй кратности рассеяния [20] может увеличить оптическую глубину до $\tau \sim 0,8 \div 1$.

Расширить указанные границы применимости уравнения (1) можно, например, при зондировании поляризованным излучением с последующей фильтрацией фоновой компоненты сигнала. Ограничением в данном случае является сам уровень однократного сигнала: пока он высок, примерно до $\tau \sim 2$, фильтрация целесообразна.

Космические эксперименты по зондированию облачных полей и подстилающей поверхности с использованием лидара «Балкан»

Космический лидар «Балкан» предназначен для зондирования подстилающей поверхности и верхней границы облачности [8]. При его создании использован имеющийся опыт в наземном, самолетном и космическом лидаростроении. В конструкции лидара использованы элементы и узлы, отработанные в орбитальных дальномерах. Приемопередатчик лидара имеет те же параметры, что и орбитальный дальномер. Создана цифровая система регистрации сигналов на основе 6-разрядного аналого-цифрового преобразователя с тактовой частотой 50 МГц (пространственный период оцифровки 3 м). В лидаре сохранен дальномерный канал. Данные зондирования передаются по телеметрическим каналам на наземные пункты, где осуществляется полная обработка информации. Лидар имеет сравнительно небольшое энергопотребление (200 Вт), что позволяет его использовать вместе с другими системами и приборами станции «Мир».

Мощности сигналов, детектируемых дальномерным каналом, показаны на рис. 1. Лидарный канал имеет начальный уровень сигнала около $4 \cdot 10^{-9}$ Вт, т.е. цифровой канал более чувствителен. Однако более заметным будет и вклад фоновых засветок.

К настоящему времени проведены два космических эксперимента: в августе—сентябре 1995 г. и феврале—апреле 1996 г. Параметры орбиты в этот момент были следующие: высота в перигее 393 км, а в апогее 413 км, средний период обращения вокруг Земли 92,41 мин, угол наклона орбиты к плоскости экватора $51,74^\circ$, средняя скорость движения по орбите 7,7 км/с. Такая орбита обеспечила диаметр пятна излучения лазера на поверхности Земли не более 100 м. При этом расстояние между центрами отдельных зондируемых точек составляло 42,58 км. Экспериментальные данные в большей части получены для территорий Северной Атлантики, Тихого и Индийского океанов и Австралии.

Обработка результатов зондирования по дальномерному каналу включает сопоставление полученных значений дальности $D_{изм}$ с расчетными значениями наклонной дальности $D_{расч}(t)$ для соответствующих моментов времени и исключает из них сигналы ложного срабатывания от фоновых засветок. Ложное срабатывание пороговой системы дальномерного канала лидара происходит тогда, когда импульс помехи по амплитуде превышает уровень первого порога и попадает во временные ворота преобразователя время—код. Оно определяется по двум критериям: либо $D_{изм}$ полученного сигнала превышает $D_{расч}$ более чем на величину систематической ошибки измерений, либо $D_{изм}$ меньше, чем $(D_{расч} - 12 \text{ км})$, что может соответствовать сигналу от объектов, расположенных на высотах более 12 км от поверхности Земли.

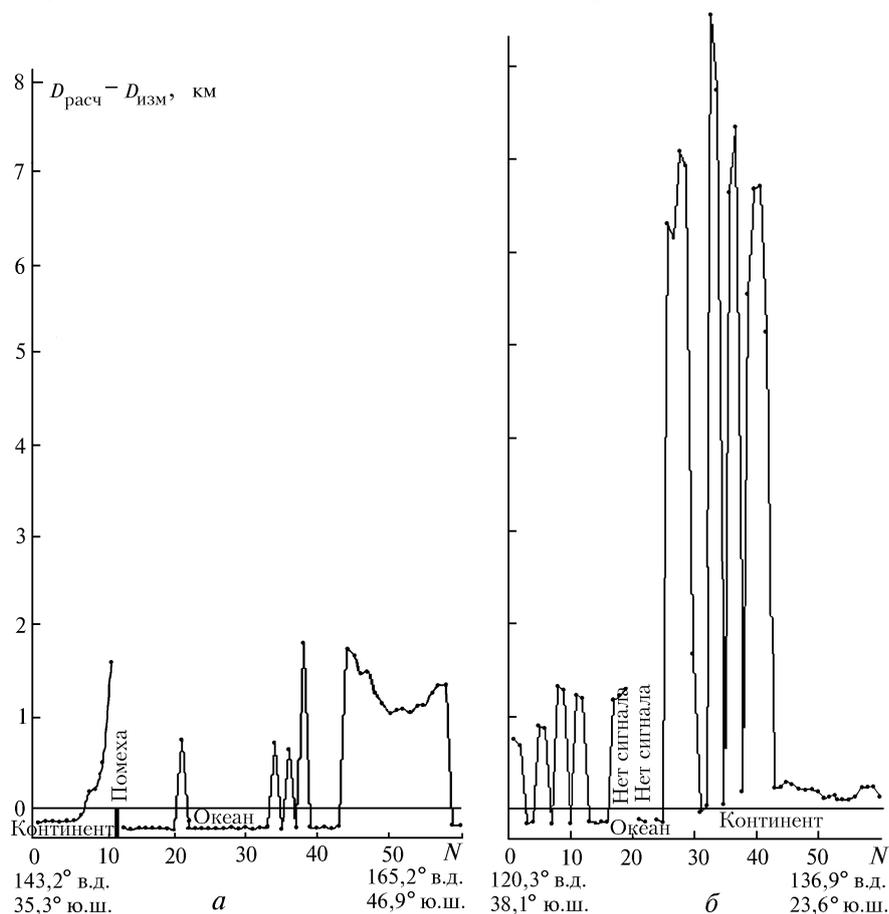


Рис. 5. Профили высоты верхней границы облачности и подстилающей поверхности, измеренные при ориентации оси лидара в надир: *a* – 05.03.96; *б* – 31.03.96

Результаты выполненных космических экспериментов показывают, что помеховые срабатывания наиболее часты при работе лидара на освещенной стороне Земли (до 50% в сеансе измерений). Наблюдались они также на теневой стороне при фазах Луны более 0,9 (не более 3%). От облаков с малой оптической плотностью и малым градиентом коэффициента рассея-

ния амплитуда эхосигнала обычно не превышает первого порогового уровня, что фиксируется как отсутствие сигнала. В этом случае не регистрируется эхосигнал от поверхности Земли.

На рис. 5 представлены измеренные дальномерным каналом лидара «Балкан» профили высоты верхней границы облачных полей и подстилающей поверхности Земли в полете на теневой стороне при ориентации оси лидара в надир (режим ориентации станции в полете – ОСКр). По оси ординат отложена разница между расчетными (по баллистическим данным ЦУП) и измеренными значениями дальности, по оси абсцисс – номер цикла измерения в сеансе (одновременно на оси абсцисс указаны географические координаты начальной и конечной точек зондирования). Общая протяженность контролируемой трассы составляет более 2500 км. В сеансе 5 марта 1996 г., выполняемом с 15:42:02 по 15:47:28 декретного московского времени (ДМВ) (рис. 5, а), первые 12 циклов зондирования пришлись на юго-восточную территорию Австралии. Зафиксирован профиль Большого Водораздельного хребта (с высотой гор до 2000 м), расположенного у морского побережья континента. Зондирование проводилось в полнолуние при угле места Луны над местным горизонтом, изменяющемся за время сеанса от 43,1 до 40,3°.

Как отмечено в [21], для сеансов зондирования, проводимых при фазах Луны более 0,9, является характерным фиксирование помехового сигнала над прибрежной морской поверхностью (в этом случае амплитуда фоновой помехи превышает первый пороговый уровень дальномерного канала лидара и, если она попадает во временные ворота преобразователя времякод, то фиксируется как сигнал). Критерием исключения подобных случаев является само значение регистрируемой дальности $D_{изм}$, которое в существенной степени выпадает из общей закономерности изменения измеряемого ряда величин $D_{изм}$ [21]. Далее при полете станции над Тасмановым морем фиксировались сначала редкие облака, а затем поле сплошной облачности с высотой 1,1 ÷ 1,8 км. Перед южной оконечностью Новой Зеландии облачное поле заканчивалось.

Зондирование на теневой стороне Земли 31 марта с 14:03:56 по 14:09:02 ДМВ (рис. 5, б) проводилось при пролете станции в направлении с юго-запада на северо-восток (от восточной части Индийского океана на центральную часть Австралийского континента). Фаза Луны составляла 0,87, а ее угол места менялся от 33,7 до 54,4°. В этом случае дальномерным каналом лидара регистрировались поля редкой низкой облачности в Индийском океане и поля высокой облачности над континентом. В том случае, когда амплитуда эхосигнала от слабой облачности не превышала первого порогового уровня, это фиксировалось как отсутствие сигнала. Следует отметить, что такие облачные поля фиксировались над Австралийским континентом и в других сеансах зондирования [21].

Общая схема обработки лидарных сигналов включает в себя решения следующих задач: 1) фильтрация (выделение полезного сигнала); 2) классификация (распознавание типа зондируемых объектов); 3) оценка параметров объектов.

В качестве элементов классификации были выбраны существенные независимые признаки лидарного сигнала, достоверно характеризующие зондируемые объекты: длительность переднего фронта импульса, дальность до объекта, интегральное значение S -функции ($S = P \cdot h^2$) лидарного сигнала. Эти характеристики несут информацию о физическом состоянии исследуемого объекта, поскольку их значения представляют интерес для метеорологии, климатологии, а также для отработки методики расчетов параметров орбиты. Среди них можно отметить такие характеристики, как высота верхних границ облаков или дальность до поверхности Земли, оптические параметры облаков и подстилающей поверхности. Например, интеграл S -функции напрямую связан с отражающими свойствами облаков и подстилающей поверхности.

В предположении линейного нарастания коэффициента рассеяния $\sigma(h)$ имеем

$$\frac{d\sigma}{dh} = \frac{1}{2(h_m - h_0)^2} = \ln\left(\frac{h_2 - h_0}{h_1 - h_0}\right) [(h_2 - h_0)^2 - (h_1 - h_0)^2]^{-1},$$

что подразумевает связь функции $S(h)$ с градиентом $d\sigma/dh$. Устойчивая оценка последнего может быть получена по методу наименьших квадратов, т.е.

$$\frac{d\sigma}{dh} = \int_{h_1}^{h_2} \ln\left(\frac{(h - h_0)S(h_m)}{(h_m - h_0)S(h)}\right) [(h - h_0)^2 - (h_m - h_0)^2] dh \left\{ \int_{h_1}^{h_2} [(h - h_0)^2 - (h_m - h_0)^2]^2 \right\}^{-1}.$$

Здесь h_0 и h_m – дистанции, соответствующие началу и максимуму отраженного сигнала; h_1 и h_2 – дистанции, соответствующие уровню равных амплитуд сигнала на переднем и заднем фронтах ($h_1 < h_2$).

Как показывают модельные расчеты и подтверждают экспериментальные результаты, стабильность полученного решения ухудшается, если при обработке используется задний фронт лидарного сигнала. Если дополнительно принять во внимание тот факт, что эта часть лидарного сигнала содержит помехи, связанные с многократным рассеянием, то можно рекомендовать использовать только параметры переднего фронта для оценки среднего значения коэффициента рассеяния облака.

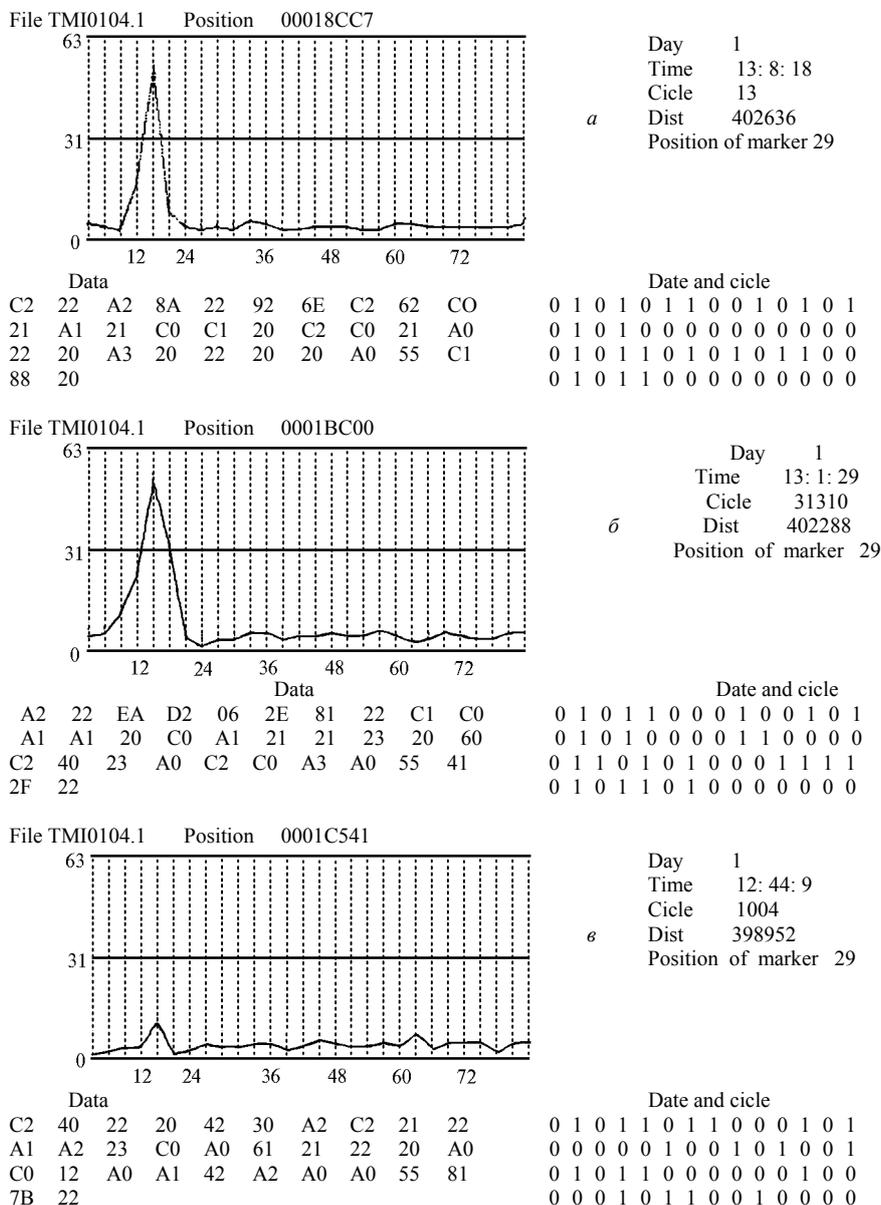


Рис. 6. Некоторые из лидарных сигналов, зарегистрированных в сеансе зондирования 01.04.96: а и б – подстилающая поверхность, в – облако

Характерные расшифрованные эхосигналы, зафиксированные в лидарном канале в сеансе зондирования 01.04.96, представлены на рис. 6. Расшифровка лидарных сигналов из всего большого цифрового массива телеметрической информации проводилась с помощью специально разработанной программы [21]. На графике, изображающем форму сигнала по оси ординат, отложены отсчеты АЦП, по оси абсцисс – расстояние в метрах (в пределах регистрируемого объекта). Дальность от лидара до зондируемого объекта (в метрах) приведена справа в расшифрованных паспортных данных сигнала (Dist). Как видно из рисунка, величина эхо-

10. Matvienko G., Kokhanenko G., Shamanaev V.S. et al. // Proc. SPIE. Lidar Techniques for Remote Sensing. 1994. V. 2310. P. 122–128.
11. Bufton J.L. // Proc. IEEE. 1989. V. 77. N 3. P. 463–477.
12. Сигналы и помехи в лазерной локации / В.М. Орлов, И.В. Самохвалов, Г.М. Креков и др.; под ред. В.Е. Зуева. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
13. Радиация в облачной атмосфере / Под ред. Е.М. Фейгельсон. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 280 с.
14. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 209 с.
15. Креков Г.М., Крекова М.М., Самохвалов И.В. // Исследование Земли из космоса. 1988. N 2. С. 44–51.
16. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике / Под ред. Г.А. Марчука и др. Новосибирск: Наука, 1976. 280 с.
17. Креков Г.М., Михайлов Г.А., Каргин Б.А. // Изв. вузов. Физика. 1968. N 5. С. 54–59.
18. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 256 с.
19. Дубровина Л.С. Облака и осадки по данным самолетного зондирования. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 216 с.
20. Кауль Б.В., Самохвалов И.В. // Изв. вузов. Физика. 1975. N 8. С. 95–100.
21. Балин Ю.С., Тихомиров А.А., Самойлова С.В. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. N 3. С. 332–351.
22. Зуев В.Е., Балин Ю.С., Матвиенко Г.Г. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 12. С. 1718–1752.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
20 января 1997 г.

V.E. Zuev, Yu.S. Balin, G.G. Matvienko, A.A. Tikhomirov, V.S. Shamanaev. **Investigation of Cloudiness Fields and Underlying Surface with Space Lidars.**

The first results of laser sounding of cloudiness and underlying surface from space by means of Russian orbital quantum range-finders and lidar «Balkan» mounted on the station «Mir» (modul «Spectr») have been analyzed. It is substantiated that the multiple scattering contribution should be taken into account when interpreting the responses from clouds. Based on sharp model estimates made by Monte-Carlo method, the contribution of the scattering of various orders into the lidar «Balkan» responses is estimated. The single approximation of the lidar equation is found to be valid only for optical thickness no more than 0.5. Field experiments have confirmed the high measuring accuracy (0.7 m) for the distances to clouds and underlying surface as well as the proficiency of optical characteristics determination for the clouds upper boundary and the underlying surface.