

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 528.813;551.501

Г.М. Креков, М.М. Крекова, Г.Г. Матвиенко

Моделирование работы многочастотного орбитального лидара «Тектоника-А»

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 6.12.99 г.

Методом Монте-Карло выполнены расчеты сигналов многочастотного орбитального лидара «Тектоника-А», предназначенного для обнаружения аэрозольных инверсий в пограничном слое атмосферы. Оценки получены для длин волн $\lambda = 1,06; 0,53$ и $0,35$ мкм (для трех гармоник лазера на гранате) и граничных условий, отражающих реальные особенности приемопередающей системы лидара. Базовая оптическая модель соответствовала условиям фонового состояния в допущенной стратифицированной неоднородности. Модель допускает включение аэрозольных инверсий любой природы, естественной и антропогенной. Полученные результаты позволяют судить о динамическом диапазоне сигнала в заданном спектральном интервале для различных оптических ситуаций. Кроме того, установлены предельные уровни помех как активного происхождения, так и за счет уходящей радиации в различных оптико-геометрических условиях работы лидарной системы.

Введение

Самолетные системы лазерного зондирования показали достаточно высокую эффективность при решении ряда задач метеорологии, экологии, физики атмосферы и океана [1, 2]. Развертывание подобных систем на орбитальных станциях и спутниках позволяет значительно расширить возможности мониторинга, придавая ему глобальный и систематический характер. Речь идет об оперативном контроле пространственного поля основных параметров атмосферы, включая, в первую очередь, облачные поля, высотную структуру аэрозольного и газового состава тропосферы, экологически опасные выбросы локального масштаба и пр. При этом сохраняется роль лидаров самолетного базирования как важного инструмента подспутникового контроля.

Методологические аспекты проблемы лазерного зондирования атмосферы из космоса были проанализированы еще в ранних работах [3, 4]. В настоящее время уже осуществлена техническая реализация ряда ранее проработанных проектов [5, 6]. Выполнены первые циклы исследований Российским космическим лидаром «БАЛКАН». Лидар установлен на орбитальной станции «Мир» и с августа 1995 г. работал в стационарном режиме [7]. Российско-французский лидар «ALISSA» в составе модуля «Природа» этой же станции выведен на орбиту в мае 1996 г. В сентябре 1994 г. проведен первый достаточно успешный эксперимент по многочастотному лазерному зондированию всей толщи земной атмосферы с борта космического корабля серии «Shuttle» [8]. Этот орбитальный эксперимент сопровождался синхронными сеансами наземного и самолетного лидарного зондирования.

Обнадеживающая результативность первых лидарных космических экспериментов по изучению облачных полей, профилей аэрозольных характеристик и некоторых параметров подстилающей поверхности ставит на следующем этапе задачу введения этого класса космических лидаров в систему мониторинговых наблюдений Земли. Так, в рамках программы РКА «Эталон» реализуются проекты создания сети малых специализированных спутников, оборудованных детекторами различных типов (электрических,

магнитных, оптических и т.д.), для предсказания и обнаружения регионов проявления земных катаклизмов, в первую очередь землетрясений. Поскольку одним из предикторов землетрясения является повышение концентрации крупнодисперсной минеральной фракции аэрозоля в пограничном слое атмосферы [9], то один из спутников указанной сети, а именно «Тектоника-А», предполагается оснастить многочастотным лидаром, работающим в долговременном автоматическом режиме [10].

Как известно, работа любой лидарной системы сопровождается присутствием шумов, в том числе и активного происхождения. Последние создаются самим сигналом лидара при многократном взаимодействии с частицами в рассеивающей среде. Далее будут приведены результаты численного эксперимента, предназначенного исследовать особенности формирования активных оптических помех в приемном канале данного лидара. Расчеты выполнены методом Монте-Карло, который 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. Подобный анализ был выполнен нами для лидара «БАЛКАН», использовавшегося при зондировании облачных полей. Результаты представлены в [11–14]. Данное сообщение является продолжением указанного цикла исследований.

Постановка задачи

Решение уравнения переноса находится для начальных и граничных условий, соответствующих работе моностатического лазерного локатора. Предполагается, что лидар удален от поверхности Земли на расстояние H_0 , а источник излучает изотропно в конусе $2\pi(1 - \cos\varphi_i)$, где φ_i – угол расходимости. Отраженный сигнал регистрируется приемником в угловом конусе $2\pi(1 - \cos\varphi_d)$, ограниченном апертурой детектора φ_d . Основные технические характеристики лидара, необходимые для выполнения расчетных оценок, приведены ниже.

Высота орбиты H_0 , км	400–600		
Рабочие длины волн λ_i , мкм	1,064	0,532	0,355
Расходимость луча φ_i , мрад	1	0,4	0,4
Длительность импульса τ_i , нс	27	27	30
Угол поля зрения φ_d , мрад	1–20		
Пространственное разрешение Δh , км	0,1–1		

Значительный диапазон угла поля зрения (до 20 мрад) обусловлен предполагаемым использованием многосекционного разворачиваемого в космосе приемного зеркала невысокого оптического качества.

При построении алгоритма использовалась локальная оценка, основные принципы построения которой изложены в [15]. Проблем с ее расходимостью не возникает, так как источник и приемник находятся вне рассеивающей среды. Отметим только, что математическая модель космического лидара «Тектоника-А» (см. [1]) позволяет изучать пространственно-временную трансформацию оптического сигнала в условиях, максимально приближенных к реальным. Это подразумевает возможность учета многокомпонентного состава атмосферы до высот $h = 90$ км в приближении слоисто-неоднородной модели. Оптические свойства рассеивающей среды описываются индикатрисой рассеяния $g(\theta)$, коэффициентом ослабления $\sigma(h)$, вероятностью выживания кванта $\Lambda(h)$. В расчетах индикатрисы рассеяния заданы и представлены на рис. 1 для требуемого набора длин волн в соответствии с фоновой моделью, разработанной авторами [16]. Она основана на осреднении многочисленных статистических данных о концентрации и микрофизических свойствах атмосферного аэрозоля. Результаты расчетов различных функционалов приведены на рисунках в зависимости от величины h , которая эквивалентна накопленному пробегу или времени пребывания фотона в заданном угловом интервале рассеивающей среды. При этом $h = ct/2$, где c – скорость распространения света. Гистограммы функционалов построены при осреднении в интервале стробирования $\Delta h = 0,5$ км до высоты 3 км над поверхностью Земли и далее с интервалом $\Delta h = 0,1$ км.

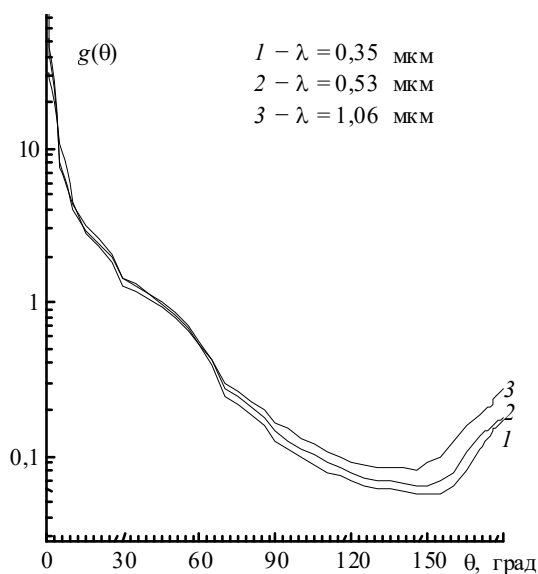


Рис. 1. Угловые зависимости функций рассеяния $g(\theta)$ для заданных длин волн

Результаты расчетов

При извлечении информации из результатов лазерного зондирования рассеивающей среды необходимо иметь достаточно полное представление прежде всего о структуре локационного сигнала, зависящего как от вариаций оптических свойств среды, так и от геометрических условий приемопередающей системы. Кроме того, необходима оценка ожидаемого уровня помехи многократно рассеянного излучения в различных экстремальных, с точки зрения оптической погоды, ситуациях. В данном сообщении представлены результаты расчетов, касающиеся этих основных, при лидарном зондировании, вопросов. Все нижеприведенные оценки выполнены для лидара, расположенного на высоте $H = 400$ км относительно поверхности Земли.

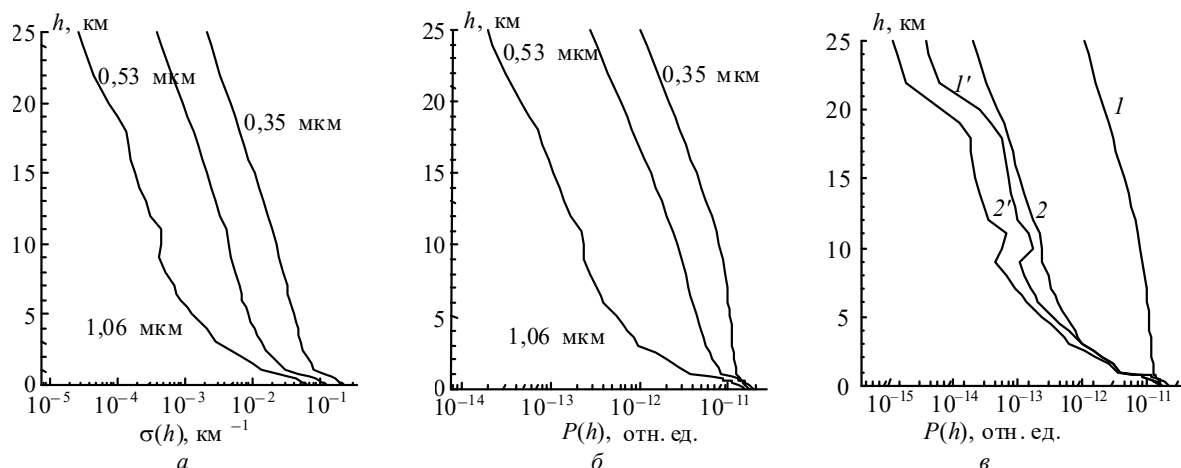


Рис. 2. Высотные профили коэффициента ослабления $\sigma(h)$ для используемых длин волн лазерного зондирования (а); оценки отраженного сигнала $P(h)$ для лидара с углом приема $\varphi_d = 10$ мрад (б, в). Кривые 1', 2' – аэрозольные составляющие $P_s(h)$ сигнала на длинах волн 0,35 и 1,06 мкм соответственно

Для удобства масштабирования временные развертки относительной скалярной интенсивности отраженного сигнала приведены на всех рисунках для ограничен-

ных интервалов высот, начиная от поверхности Земли ($h = 0$ км). На рис. 2,а показаны вертикальные профили коэффициентов ослабления, включающие в себя молеку-

лярное рассеяние и поглощение озоном, а на рис. 2,б,в профили сигналов обратного рассеяния $P(h)$ для рабочих длин волн лазера на гранате. Результаты показывают, что возможны проблемы с регистрацией сигнала ИК-диапазона в условиях чистой безоблачной атмосферы. Структура сигнала $P(h)$ представлена на рис. 2,в для двух длин волн $\lambda = 0,35$ и $1,06$ мкм. При фоновом состоянии аэрозольной атмосферы отраженный сигнал $P(h)$ на $\lambda = 0,35$ мкм практически полностью определяется молекулярно рассеянным излучением $P_m(h)$. Аэрозольная составляющая сигнала $P_a(h)$ становится сопоставимой с составляющей $P_m(h)$ лишь в нижнем слое тропосферы до высоты порядка $0,2$ км. С увеличением длины волны λ до $1,06$ мкм аэрозольная составляющая сигнала становится определяющей в уровне $P(h)$, начиная с расстояния около $4-5$ км над поверхностью Земли.

Одной из целей космического лидарного комплекса «Тектоника-А» являются обнаружение и, по возможно-

сти, прогнозирование естественных и антропогенных катаклизмов, сопровождающихся экстремальным выбросом аэрозоля в нижнем слое тропосферы. В частности, из измерений [9], выполненных в Гвадалахаре в период землетрясения 9 октября 1995 г., следует, что за несколько часов до первого толчка в пограничном слое атмосферы заметно (в $1,5-2$ раза) увеличивается счетная концентрация крупнодисперсной фракции аэрозольных частиц. В составе частиц отмечается повышенное содержание Si, Ca, Fe, что характерно для природы минералов, эмитируемых с поверхности, а возможно, и из глубины почвы. Результаты [9] по своему уникальны, но представляют несомненный интерес и были использованы нами в численном эксперименте. Трансформированные спектры аэрозольных частиц позволили пересчитать необходимые параметры аэрозольного светорассеяния. Мы предположили, что область повышенного замутнения тропосферы достигает высоты $h = 3,5$ км.

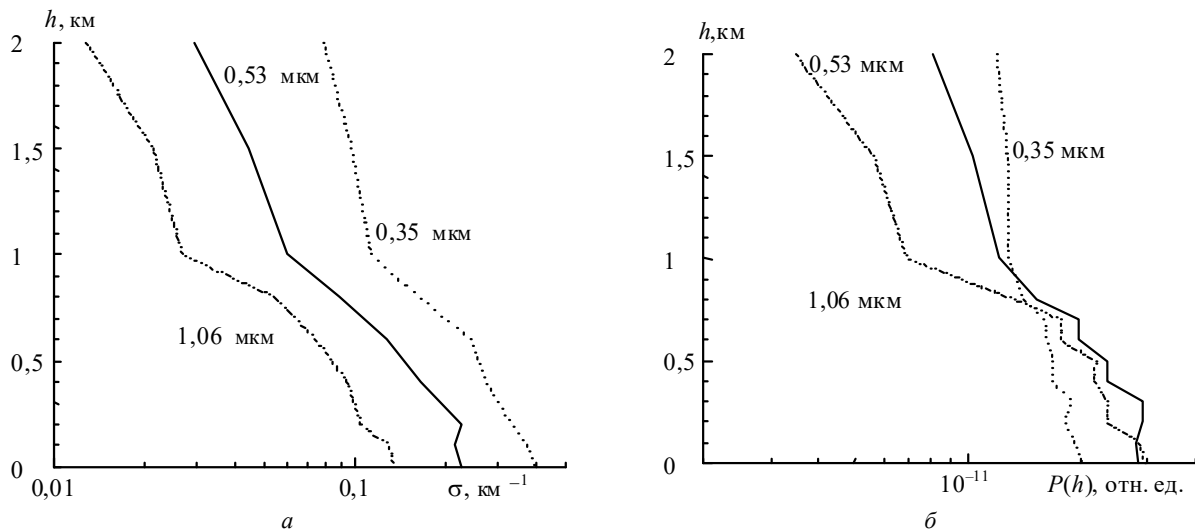


Рис. 3. Результаты численного эксперимента по зондированию пограничного слоя атмосферы при повышенной концентрации аэрозольных частиц: а – модельные профили коэффициентов ослабления $\sigma(h)$; б – высотные профили сигнала лидара $P(h)$ для заданных длин волн. Апертура детектора $\varphi_d = 8,8$ мрад

Соответствующие профили коэффициентов ослабления показаны на рис. 3,а. На рис. 3,б приведены результаты расчетов сигналов обратного рассеяния $P(h)$. Обращает на себя внимание тот факт, что по сравнению с незамутненной атмосферой (рис. 3,б) изменились не только уровни локационных сигналов, но и их соотношение по спектру длин волн. Следует ожидать, и это подтверждают результаты расчетов, что более уверенно будут идентифицироваться локализованные по высоте слои повышенной замутненности, происхождение которых обусловлено, например, горящими торфяниками.

На рис. 4,а подобная ситуация моделируется десятикратным увеличением коэффициента аэрозольного ослабления в километровом слое на высоте $H = 1$ км. Результаты соответствующих расчетов показаны на рис. 4,б. Характерно, что резко возрастает эффективность инфракрасного канала зондирования. Это приводит к тому, что спектральное поведение локационных сигналов меняется на альтернативное (рис. 4,в). Такой эффект, на наш взгляд, может служить качественным критерием обнаружения аномальных аэрозольных слоев терригенного происхождения.

В данной ситуации, однако, возникает вопрос распознавания сигналов, отраженных облачностью нижнего яруса и аэрозольными инверсиями. Облачность отличается, как правило, достаточно высокой оптической плотностью. Сравнительные результаты расчетов сигнала $P(h)$, отраженного облаком, туманом и аэрозольной инверсией, показаны на рис. 4,г. Коэффициент ослабления $\sigma(h)$ для облака и тумана был принят равным 5 км^{-1} , т.е. задано одно из минимально возможных значений для жидкокапельных образований. Расчеты показали, что амплитуда локационного сигнала $P(h)$, отраженного облаком или туманом, как минимум на два порядка выше амплитуды сигнала, отраженного аэрозольной инверсией, даже при увеличении оптической плотности последней в два-три раза. Кроме того, спектральная зависимость сигнала $P(h)$, отраженного жидкокапельным аэрозодем, практически нейтральна. Это обстоятельство диктуется слабым изменением индикатрисы рассеяния $g(\pi)$ в заданном спектральном интервале, а кроме того, при космической схеме зондирования, как было показано в [11, 17], форма индикатрисы рассеяния не играет определяющей роли в формировании локационного сигнала. Следует также ожидать, что поля-

ризационные характеристики сигнала обратного рассеяния от жидкокапельных и минеральных образований будут

заметно отличаться. Однако для космических схем зондирования этот вопрос требует дополнительного изучения.

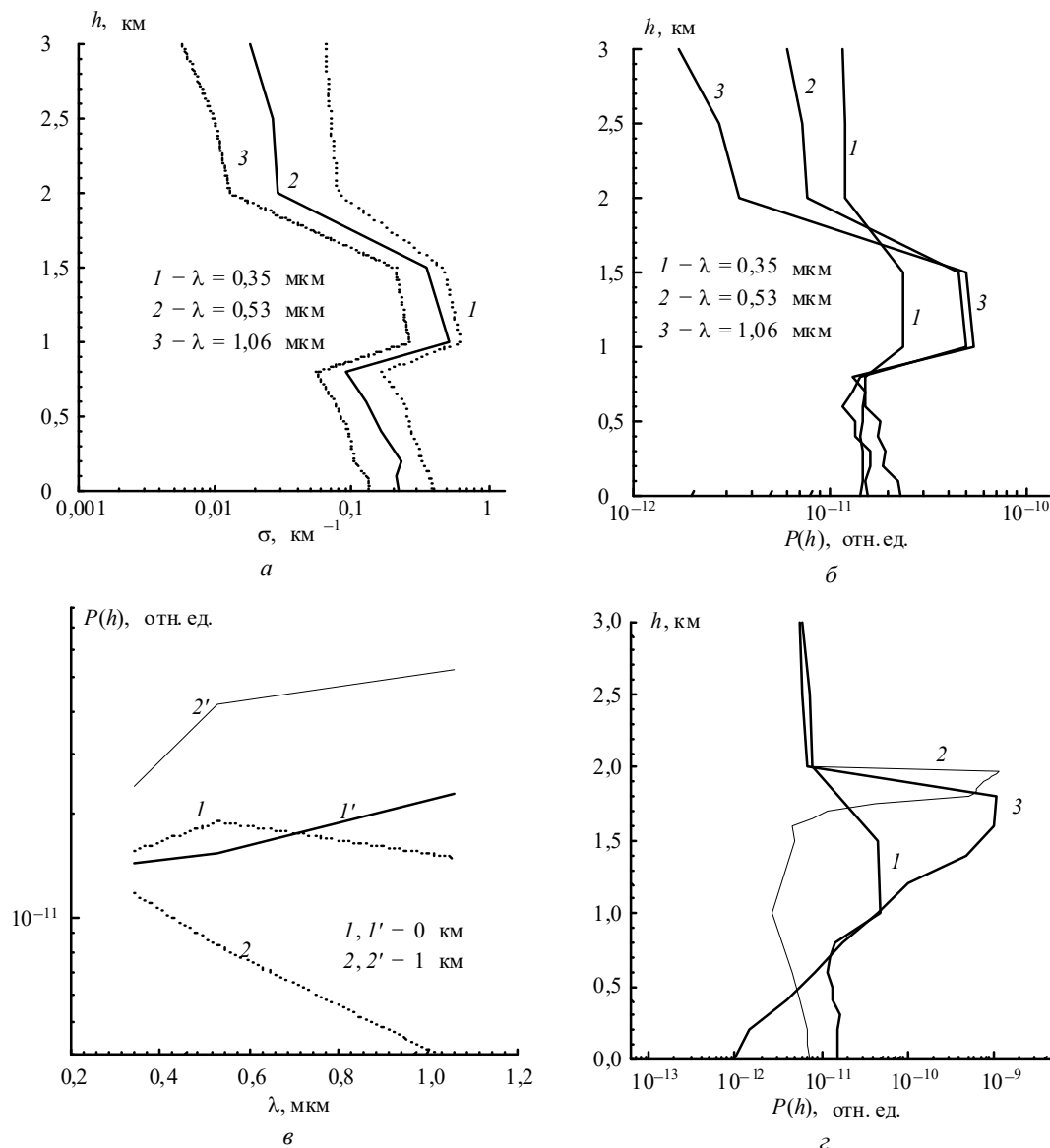


Рис. 4. Результаты зондирования аэрозольной инверсии в приземной атмосфере: а – модельные профили $\sigma(h)$; б – высотные профили $P(h)$; в – спектральное поведение сигнала лидара от двух участков высот; 2, 2' – в зоне инверсии и 1, 1' – вне ее; г – сопоставление сигналов, отраженных 1 – аэрозольной инверсией, 2 – облаком толщиной $\Delta h = 0,2$ км и 3 – слоем тумана с $\Delta h = 1$ км. Расчеты приведены для апертуры $\varphi_d = 8,8$ мрад

Конструктивные особенности приемной системы настоящего многоволнового лидара, связанные с большими (до 20 мрад) углами поля зрения, налагают особые требования к точности оценок помехи многократного рассеяния в различных возможных условиях, включая экстремальные. Именно помеха многократного рассеяния ограничивает информационные возможности каналов лазерного зондирования в плане получения достоверных количественных данных о параметрах атмосферы. Строгий расчет сигналов от тропосферы в отсутствие облачности иллюстрируется рис. 5. Результаты представлены в форме высотной зависимости относительного вклада многократного рассеяния $Pm(h)$ в полный сигнал $P(h)$. Величина этого функционала зависит в первую очередь от оптической плотности среды, а также от граничных условий эксперимента. На рис. 5,а приведено соотношение

$Pm(h)/P(h)$ для различных оптических состояний атмосферного аэрозоля на длине волны $\lambda = 0,53$ мкм и угловой апертуре приема $\varphi_d = 10$ мрад.

Профили коэффициента ослабления $\sigma(h)$ для кривых 1, 2, 3 показаны на рис. 2,а, 3,а и 4,а соответственно. Оптическая толщина τ рассматриваемого 30-километрового слоя атмосферы в указанных оптических ситуациях составляла $\tau \approx 0,175$ в первом случае, 0,25 во втором и 0,75 в третьем. Видно, что даже незначительное увеличение оптической толщи атмосферы приводит к заметному росту вклада $Pm(h)$ в сигнал, отраженный пограничным слоем атмосферы. При отражении от инверсионного слоя фоновый компонент сигнала быстро нарастает и начинает играть преобладающую роль, сохраняющуюся и вне инверсии до конца трассы зондирования. Следует отметить, что сигналы от средней атмо-

сферы (при зондировании в надир) с хорошей точностью удовлетворяют приближению однократного рассеяния во всем заданном спектральном интервале.

Зависимость соотношения $Pm(h)/P(h)$ от угловых размеров детектора показана на рис. 5, б для длины волны $\lambda = 0,35$ мкм и стробов сигнала, приходящего от различных высотных участков трассы зондирования. Аэрозольная модель в данном примере соответствовала случаю умеренно замутненного пограничного слоя, согласно рис. 3, а, но для УФ-канала зондирования, тем не менее, оптическая плотность среды более высока. Как видим, с увеличением угловой апертуры приема до значения $\varphi_d \approx 10$ мрад вклад фонового компонента в сигнал сначала быстро нарастает, а затем рост практически прекращается. Возникает своеобразный эффект насыщения сигнала, когда добавка фона многократного рассеяния за счет кратностей высокого порядка становится малозначимой. Подобные явления отмечались и ранее, а в схемах космического мониторинга они проявляются наиболее отчетливо.

Следует отметить, что при лазерном зондировании удаленных дисперсных образований для каждой конкретной схемы эксперимента всегда можно теоретически оценить некоторое предельное значение угла поля зрения

$\varphi_d^{(n)}$, с превышением которого амплитуда сигнала $P(h)$ заметно не меняется, т.е. задание $\varphi_d > \varphi_d^{(n)}$ становится не целесообразным.

При многочастотном зондировании необходимо также учитывать, что фон многократного рассеяния имеет спектральную зависимость. На рис. 5, в приведены результаты расчетов соотношения $Pm(h)/P(h)$ для среднезамутненной атмосферы с профилем $\sigma(h)$, показанным на рис. 3, а для двух углов приема $\varphi_d = 2,5$ и 10 мрад. Уровень $Pm(h)$ наиболее высок в УФ-области спектра, где молекулярное рассеяние играет относительно большую роль в связи с высоким значением индикатрисы рассеяния $g(\pi)$. При космической схеме зондирования аэрозольной атмосферы форма индикатрисы рассеяния не играет заметной роли в формировании фонового компонента сигнала. Это показали расчеты спектральной зависимости $Pm(h)/P(h)$ в предположении отсутствия молекулярного рассеяния и одинаковой оптической плотности среды. В данной ситуации указанное соотношение для заданных длин волн имеет близкие значения, а разница в уровнях сигнала вызвана только зависимостью индикатрисы рассеяния $g(\pi)$ от длины волны излучения.

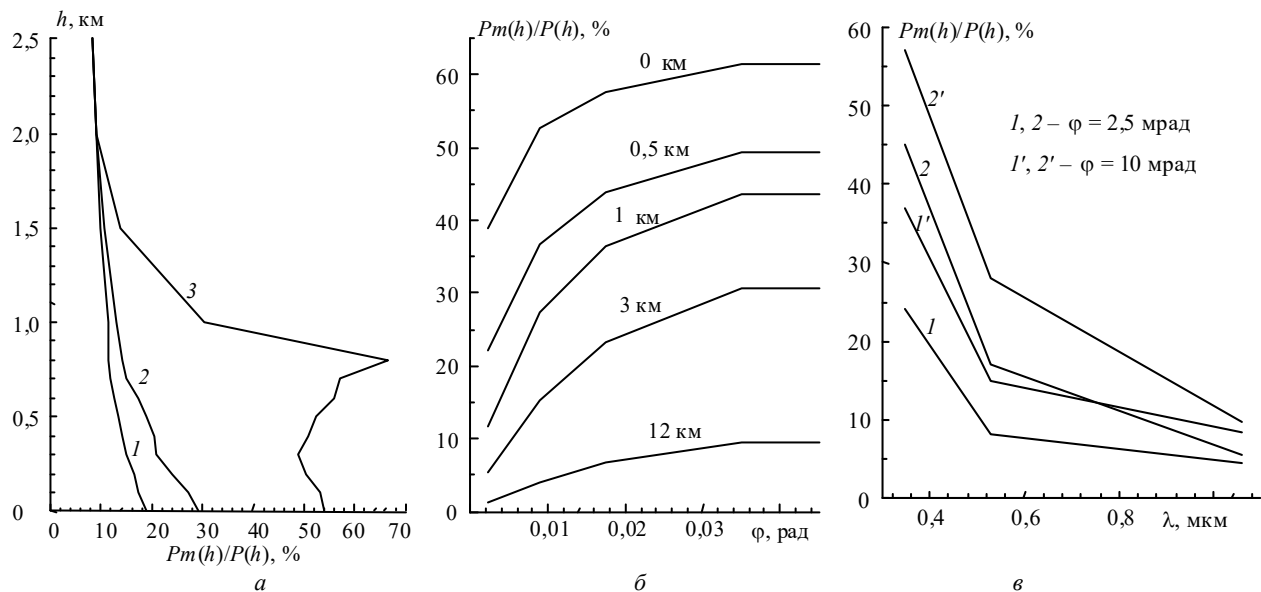


Рис. 5. Зависимость отношения фоновой составляющей сигнала $Pm(h)$ к полному сигналу $P(h)$ от оптико-геометрических условий эксперимента: а – от оптической плотности среды, расчет для $\lambda = 0,53$ мкм; б – от угла приема φ_d для различных участков трассы зондирования на длине волны $\lambda = 0,53$ мкм; в – от длины волны источника излучения

Другим важным фактором, ограничивающим оперативные возможности орбитального лидарного комплекса, ориентированного на контроль аэрозольных аномалий в нижней тропосфере, могут явиться перистые облака, постоянно покрывающие значительную часть воздушного бассейна планеты. Ввиду малой оптической толщины перистые облака способны стать источником ложных решений при анализе локационных сигналов либо исказить полезный сигнал от подоблачного аэрозоля. На рис. 6 показано, как резко может возрасти помеха многократного рассеяния при появлении облачных слоев в интервале высот $h = 5,5 - 7$ км по сравнению с моделью чистой атмосферы (см. рис. 2, а). Излучение, многократно рассеянное в облаках, участвует в формировании сигнала, отраженного подоблачным слоем аэрозоля.

Выполненные расчетные оценки позволяют остановиться еще на одном вопросе методического характера,

касающемся возможности использования приближенных оценок при восстановлении оптических свойств среды из сигнала лидара. На рис. 7 представлен полный сигнал обратного рассеяния с разделением по вкладам рассеяния различной кратности для трех длин волн. Номера кривых соответствуют кратности рассеяния. Рассмотрен пример слабозамутненной атмосферы. Нетрудно убедиться, что в случае чистой или слабозамутненной атмосферы при решении обратной задачи в ближнем ИК-диапазоне хорошую точность гарантирует учет двух кратностей рассеяния. Для УФ-области спектра ситуация усложняется, здесь необходим аналитический учет не менее трех кратностей рассеяния. Исходя из сказанного выше, нужно отметить, что УФ-область спектра может использоваться при зондировании атмосферы в качестве опорной для селекции молекулярной составляющей.

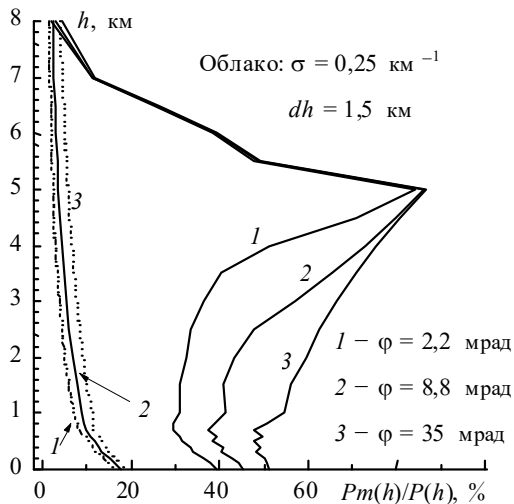


Рис. 6. Влияние перистых облаков с оптической толщиной $\tau = 0,5$ на формирование фона многократного рассеяния; серия кривых 1 – 3 слева – расчет для условий «фоновое» состояния атмосферы

Объективность полученных результатов может быть подтверждена неоднократным сопоставлением по-

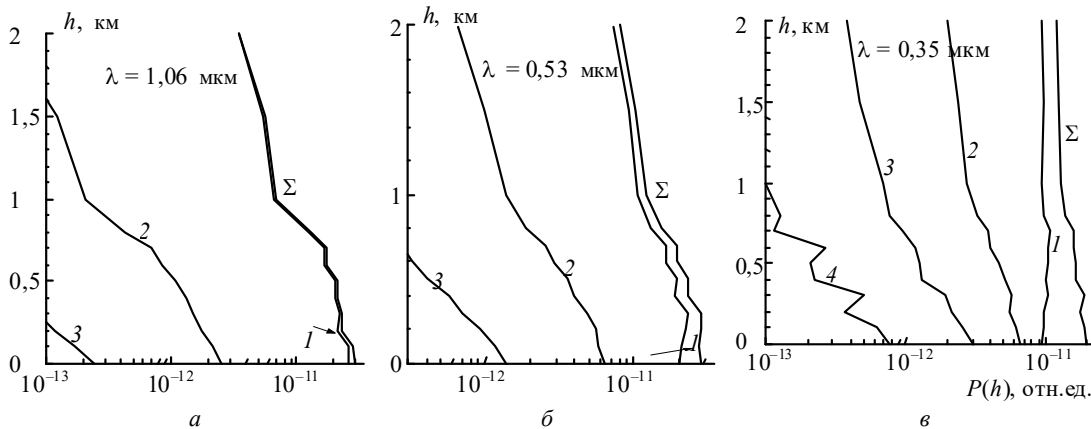


Рис. 7. Распределение сигнала $P(h)$ по кратностям рассеяния (цифры у кривых соответствуют порядку кратностей) для заданного набора длин волн. Угол приема $\varphi_d = 8,8$ мрад. Знаком Σ обозначен суммарный сигнал

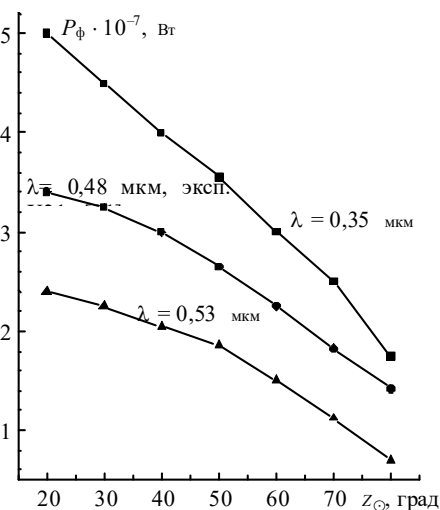


Рис. 8. Влияние зенитного угла Солнца на уровень мощности уходящей радиации

лучаемых нами численных оценок с результатами экспериментов (см., например, [17, 18]). Кроме того, они успешно использовались для разработки методов интерпретации измеренных данных (см., например, [19]).

Анализ будет не полным, если не рассмотреть вопрос, связанный с вероятным ограничением потенциальных возможностей орбитальных лидаров из-за помехи, вызванной фоновым излучением системы «атмосфера – подстилающая поверхность». Источником указанного фонового излучения, в первую очередь, является Солнце, в значительно меньшей степени – Луна, звезды, зондируемые объекты (например, облака) и т.п.

Во многих случаях фоновое излучение может быть аппроксимировано законом Планка, т.е. представлено как излучение абсолютно черного тела с температурой T_s . Согласно этому закону спектральная интенсивность $W(\lambda)$ излучения единичной площадки в полусфере в спектральном диапазоне $(\lambda, \lambda + d\lambda)$ для неполяризованного излучения имеет вид

$$W(\lambda) d\lambda = 2\pi c^2 h \Delta\lambda / \lambda^5 [\exp(hc/\lambda kT_s) - 1],$$

где c – скорость света; h и k – постоянные Планка и Больцмана.

Особенности формирования фонов солнечного излучения в аэрозольной атмосфере к настоящему времени достаточно полно исследованы. обстоятельный обзор инженерных методов оценки яркости уходящего излучения $B_A(\lambda)$ в видимом диапазоне волн выполнен в монографии В.А. Смеркалова [20].

Для лидарной системы «Тектоника-А» мы используем оценки фона солнечного излучения, полученные методом Монте-Карло. Как отмечалось выше, этот метод позволяет строго учесть сложные граничные условия задачи и использовать реалистичную модель атмосферы. Основным фактором, определяющим уровень фона в приемной системе лидара, являются: зенитный угол Солнца Z_\odot , размер S и угол поля зрения φ_d приемного зеркала. На рис. 8 приводится зависимость мощности фонового сигнала P_A от зенитного угла Солнца Z_\odot для двух длин волн зондирования 0,35 и 0,53 мкм, угла $\varphi_d = 1,5$ мрад и площади приемного зеркала $S = 2 \text{ м}^2$.

Качественная и количественная правомерность результатов удостоверяется сопоставлением с результатами прямых спутниковых измерений [21], пересчитанных на параметры

заданного лидара. Зависимость P_A от угла приема φ_d приведена на рис. 9, уровень фоновой помехи уходящей радиации квадратично возрастает с увеличением угла поля зрения φ_d .

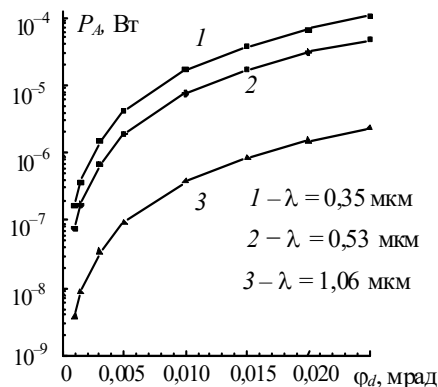


Рис. 9. Зависимость уровня мощности фоновой составляющей сигнала лидара (за счет уходящей радиации) от угловых размеров детектора

Характерно, что даже в малых углах приема (1–3 мрад) величина фоновой засветки в дневных условиях оказывается сопоставимой по величине мощности с полезным сигналом, так как динамический диапазон изменения его величины $P(h)$, при указанных выше параметрах лидарной системы и значениях энергии в импульсе на длинах волн $\lambda = 0,35$ и $0,53$ мкм, лежит в пределах $10^{-9} \leq P(h) \leq 10^{-7}$ Вт. Это обстоятельство, известное, впрочем, из результатов первых космических экспериментов, делает нереальной задачу восстановления достоверных профилей оптических характеристик аэрозольного рассеяния при существующих энергетических характеристиках малогабаритных лидаров.

С другой стороны, известные (см., например, [22]) оценки фона ночного неба дают основание считать его пренебрежимо малым для рассматриваемого класса задач. Даже в условиях полнолуния яркость ночного неба при наблюдении в надир в видимом диапазоне на несколько порядков ниже уровня полезного сигнала от аэрозоля.

В итоге на основе проведенных расчетов можно отметить, что рассмотренный многочастотный лидар сможет обеспечить обнаружение аэрозольных аномалий в нижней атмосфере на неосвещенной стороне планеты. В таких условиях допустимо использование приемного зеркала с широкой угловой апертурой $\varphi_d \approx 20$ мрад, которая не приведет к дополнительному росту вклада помехи многократного рассеяния, так как насыщение сигнала происходит при значительно меньших значениях $\varphi_d^{(n)}$.

1. Morley B.M., Laursen K.K., Radke L.F., and Clarke A.D. Early results the aerosol characterization experiment-1 using airborne lidar and in situ aerosol sampling // International airborne remote sensing conference and exhibition. 24–27 June 1996, San Francisco, California USA.

Krekov G.M., Krekova M.M., G.G. Matvienko. Simulation of operation of many-frequency space lidar «Tektonika-A».

Signals of many-frequency space-borne lidar «Tektonika-A» have been calculated by the Monte-Carlo method. The lidar is designed for detecting aerosol inversions in the boundary atmospheric layer. Estimates are obtained for the wavelengths $\lambda = 1.06, 0.53$, and $0.35 \mu\text{m}$ (for three harmonics of YAG laser) and boundary conditions reflecting actual peculiarities of the laser's receiving-transmitting system. The basic optical model corresponded to the background conditions assuming stratified heterogeneities. The model as well assumes the aerosol inversions of both natural and anthropogenic origin. The obtained results allow conclusions on dynamic range of a signal in given spectral region at any optical situations. Limiting levels of error both of active origin and due to outgoing radiation have been determined under various optical geometry of the lidar system operation.

2. Шаманаев В.С. Применение самолетного лидара для зондирования морских акваторий // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 2. С. 165–168.

3. Zuev V.E., Krekov G.M., Naats I.E. Determination of aerosol parameters of the atmosphere by laser sounding from space // Acta Astronautica. 1974. V. 1. P. 93–103.

4. Лазерное зондирование атмосферы из космоса // Под ред. В.М. Захарова. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 213 с.

5. Balin Y.S., Burkov V.V., Znamenskii I.V. et al. Spaceborne aerosol lidar «Balkan-1» // 15th International laser radar conference: Abstract. July 23–27, 1990. Tomsk, USSR. P. 12–13.

6. Mc Cormick M.P., Winker D.M., Browell E.V. Scientific investigations planned for the lidar in-space technology experiment (LITE) // Bull. of the Meteorol. Soc. 1993. V. 74. P. 205–214.

7. Балин Ю.С., Тихомиров А.А., Самойлова С.В. Предварительные результаты зондирования облаков и подстилающей поверхности Земли лидаром «Балкан» // Оптика атмосферы и океана. 1997. № 3. С. 333–352.

8. Renger W., Kieme C., Schreiber H.-G., Wirth M., Moerl P. Airborne backscatter lidar measurements at 3 wavelenflths during ELITE // Final Results Workshop Proc. (IROE-CNR, Florence, Italy), 1995. P. 15–19.

9. Илев Л.С., Давыдова В.И., Варгас О.А., Мартинес А. Изменчивость характеристик аэрозолей, озона и сернистого газа в приземном слое при землетрясении в западной Мексике // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 5. С. 490–495.

10. Matvienko G.G., Kokhanenko G.P., Shamanaev V.S. and Alekseev V.A. Project of the spaceborne lidar TECTONICA-A // Intern. Symp. Remote Sensing. Conf. Abstr. Barcelona, 1998. P. 37–38.

11. Креков Г.М., Крекова М.М. Структура сигнала орбитального лидара, отраженного верхней кромкой облаков // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 1. С. 46–54.

12. Zuev V.E., Krekov G.M., Krekova M.M., Titov G.A. Mean Characteristics of lidar signals from brocen clouds // Appl. Optics. 1987. V. 26. N 15. P. 3018–3025.

13. Крекова М.М. Расчет структуры сигнала орбитального лидара, отраженного облаками верхнего яруса // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. №4. С. 376–381.

14. Krekov G.M., Krekova M.M., Shamanaev V.S. Laser sensing of a subsurface oceanic layer // Appl. Optics. 1998. V. 37. N 9. P. 1589–1601.

15. Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А. и др. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1976.

16. Зув В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 256 с.

17. Креков Г.М., Крекова М.М., Самохвалов И.В. Оценка сигналов орбитального лидара при зондировании слоистых облаков // Исследование Земли из космоса. 1986. № 6. С. 77–83.

18. Креков Г.М., Кавкянов С.И., Крекова М.М. Интерпретация сигналов оптического зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 185 с.

19. Самойлова С.В., Балин Ю.С., Крекова М.М. Учет эффектов многократного рассеяния при восстановлении оптических параметров облаков по данным зондирования из космоса // Оптика атмосферы и океана. 1988. Т. 11. № 1. С. 55–60.

20. Смеркалов В.А. Прикладная оптика атмосферы. СПб.: Гидрометеиздат, 1997. 335 с.

21. Лактионов А.Г., Луцева Н.А. Мироненко В.А., Суетин В.С. Модель уходящего коротковолнового излучения над Тихим океаном по данным спутника «Интеркосмос-21» // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. № 1. С. 104–106.

22. Прайт В.К. Лазерные системы связи. Л.: Связь, 1972. 232 с.