

С.Н. Волков, Б.В. Кауль

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ И ОСЛАБЛЕНИЯ СВЕТА В АЭРОЗОЛЬНЫХ СЛОЯХ ТРОПОСФЕРЫ ЛИДАРНОМ, РАБОТАЮЩИМ НА ЧАСТОТАХ УПРУГОГО И КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

Для измерения коэффициентов обратного рассеяния света используется отношение лидарного отклика на несмещенной длине волны 532 нм к сумме откликов в двух участках вращательного спектра комбинационного рассеяния света (КР) на молекулах азота и кислорода.

По отношению интенсивностей вращательного КР в двух участках спектра определяется вертикальный профиль температуры. Для вычисления коэффициента ослабления используется отношение сигналов КР и температур в двух соседних участках трассы. Оцениваются погрешности измерений и возможность их уменьшения.

Введение

Проблема обращения лидарного уравнения относительно коэффициентов обратного рассеяния и ослабления способствовала появлению в свет множества публикаций с вариантами решений, в которых, по существу, дискутировались дополнительные предположения, без введения которых уравнение не может быть решено. Фактически проблема состоит в том, что отношение аэрозольных коэффициентов обратного рассеяния и ослабления

$$\gamma(h) = \beta(h) / \alpha(h), \tag{1}$$

так называемое «лидарное отношение», зависит от микроструктуры аэрозолей и вследствие многообразия последних является сильно изменчивой величиной.

В последние годы при зондировании стратосферы и верхних слоев тропосферы общепризнана методика определения рассеяния

$$R(h) = 1 + \beta^a(h) / \beta^m(h), \tag{2}$$

где β^a и β^m – коэффициенты обратного рассеяния аэрозольного и молекулярного компонентов атмосферы соответственно.

Методика использует калибровку лидарного отклика на отклик с высоты h_k , где значения $R(h_k)$ можно задать априорно, опираясь на известные сведения об оптических свойствах атмосферы. Эта калибровка приводит к следующему выражению для функции $R(h)$:

$$R(h) = R(h_k) \frac{S(h) \beta^m(h_k) \exp \left\{ -2 \int_0^{h_k} \alpha(x) dx \right\}}{S(h_k) \beta^m(h) \exp \left\{ -2 \int_0^h \alpha(x) dx \right\}}, \tag{3}$$

где $S(h)$ – лидарный сигнал, умноженный на квадрат высоты; $\alpha(h) = \alpha^a(h) + \alpha^m(h)$ – сумма коэффициентов ослабления света аэрозольным и молекулярным компонентами атмосферы.

Профиль молекулярного рассеяния $\beta^m(h)$ можно задать существующими моделями молекулярной атмосферы или, что точнее, вычислить по аэрологическим данным о давлении и температуре.

Ошибки метода анализировались, например, в [1]. Если отвлечься от известного произведения в выборе h_k и $R(h_k)$ и прочих источников ошибок, то можно сказать, что методика работает хорошо до тех пор, пока

$$1 - \exp \left\{ -2 \int_h^{h_k} \alpha^a(x) dx \right\} \leq |\delta|, \quad (4)$$

где δ – допустимый уровень относительной ошибки измерений.

Иными словами, ошибка задания лидарного отношения (1) не вносит существенной погрешности в (3) только при небольших аэрозольных замутнениях атмосферы, когда вклад аэрозольного компонента в оптическую толщину составляет величину порядка одной десятой доли единицы. В иных ситуациях погрешность задания лидарного отношения, введенного либо явно, как, например, в [2], либо неявно, как в формуле Клетта [3], играет значительную роль.

В алгоритм Клетта лидарное отношение формально не входит. Но это результат тех предположений, которые принимаются при выводе формулы, например, степенная зависимость между коэффициентами обратного рассеяния и ослабления, а в простейшем случае линейная зависимость. Главное достоинство алгоритма заключается в использовании опорного значения на удаленных участках трассы, что позволяет избежать <раскачки> решения из-за усиления ошибок, но не исключает возможность значительных ошибок, если реальное поведение лидарного отношения существенно отличается от предположений, принятых при выводе формулы.

Интегрирование уравнения лазерной локации без введения каких-либо предположений о виде функции (1) дает следующее решение [4]:

$$\alpha(h) = S(h) / \left\{ \frac{\alpha(h_k)}{S(h_k)} - 2 \int_{h_k}^h S(x) dx + \frac{S(h_k)}{\gamma(h_k)} \int_{h_k}^h \gamma'_x(x) \exp \left[-2 \int_{h_k}^x \alpha(\xi) d\xi \right] dx \right\}, \quad (5)$$

где $\gamma'_x(x)$ – производная лидарного отношения по расстоянию. Остальные обозначения приняты выше.

Формула дает решение для $\alpha(h)$ в неявном виде, если задать функцию $\gamma'_x(x)$. В [5] дан пример итерационного алгоритма решения по формуле (5) для расчета профиля ослабления вдоль вертикальной трассы. При этом предполагалось, что изменения $\gamma(h)$ происходят за счет перераспределения обратного рассеяния между молекулярным и аэрозольным компонентами атмосферы. Дополнительно предполагалось, что лидарное отношение аэрозольного компонента остается постоянным вдоль трассы. Эти предположения приводят к вполне определенной зависимости $\gamma'_h(h)$ от $\alpha(h)$.

Формула (5) переходит в формулу Клетта, если положить $\gamma'_h(h) = 0$ и поменять местами пределы интегрирования во втором члене знаменателя. Она позволяет оценить с общих позиций условия удовлетворительной работы алгоритма Клетта.

Анализ ошибок различных приемов решения уравнения локации приведен в [6] и там, в частности, показано, что прием, аналогичный алгоритму Клетта, работает удовлетворительно при выполнении условия

$$\gamma'_h(h) / \gamma(h) \ll \alpha(h), \quad (6)$$

т.е. на достаточно оптически плотных трассах с медленно меняющимся лидарным отношением. Это же следует из численного эксперимента, приведенного в [5], и сравнительного анализа, проведенного авторами [7].

В качестве резюме к вышеизложенному следует признать, что нет и не может быть удовлетворительного решения уравнения лазерного зондирования для трасс с резко меняющимися оптическими характеристиками, если ограничиваться приемом сигнала только на частоте лазерного передатчика.

Сравнительно давно высказана и экспериментально реализована идея использования молекулярного репера, получаемого посредством регистрации сигналов на частотах комбинационного рассеяния света (КР) на молекулах воздуха [8–11]. Это позволяет разделить задачи вычисления коэффициентов обратного рассеяния и ослабления. Но вследствие малых сечений КР и более сложной аппаратуры этот метод не получил широкого распространения. Только в начале 90-х годов авторами [7] были опубликованы впечатляющие результаты исследований аэрозолей в верхних слоях тропосферы с использованием метода, основанного на КР. Успеху

способствовало применение мощного лазера, работающего в ультрафиолетовом диапазоне ($\lambda = 308$ нм), где сечения КР велики.

В методике, принятой авторами упомянутой работы, имеется все же два звена, которые требуют априорных допущений или привлечения результатов дополнительных измерений. Первое: поскольку используется КР на длине волны колебательной линии азота ($\lambda = 322$ нм), приходится вводить величину, равную некоторой степени отношения длин волн упругого λ_0 и КР – λ_R компонентов сигнала

$$(\lambda_0 / \lambda_R)^k . \quad (7)$$

Это отношение учитывает спектральный ход коэффициента ослабления света аэрозольным компонентом. Показатель степени зависит от типа аэрозоля, что вносит некоторую неопределенность в методику. Второе: поскольку профиль температуры в лидарном эксперименте не измеряется, то его нужно либо задать по модели атмосферы, либо получить из аэрологических измерений.

Ниже описывается методика, в которой два вышеупомянутых обстоятельства отсутствуют. Дается краткое описание аппаратуры, посредством которой реализуется эта методика, и приводятся примеры ее использования для определения коэффициентов обратного рассеяния и ослабления в аэрозольных слоях тропосферы.

Теория метода

Излагаемый ниже метод предполагает регистрацию сигналов обратного рассеяния на несмещенной длине волны λ_0 и в двух узких участках длин волн вращательного спектра КР молекул азота и кислорода.

Каждый из трех сигналов описывается уравнением лазерной локации

$$P_i(h) h^2 = K_i G(h) \beta_i(h) \exp \left\{ - \int_0^h [\alpha_0(x) + \alpha_i(x)] dx \right\}, \quad (8)$$

где i – номер спектрального участка, принимающий значения 0, 1, 2 ... ; $P_i(h)$ – мощность сигнала в i -м участке спектра, принимаемая с дистанции h ; K_i – аппаратная константа для канала, регистрирующего излучение в i -м участке спектра; $G(h)$ – геометрическая функция, учитывающая перекрытие диаграмм направленности приемной и передающей антенн лидара; β_i и α_i – коэффициенты обратного рассеяния и ослабления соответственно. Для последних можно записать следующие соотношения:

при упругом рассеянии

$$\beta_0(h) = \beta_0^a(h) + \beta_0^m(h); \quad (9)$$

$$\alpha_0(h) = \alpha_0^a(h) + \alpha_0^m(h), \quad (10)$$

где индексы a и m обозначают соответственно аэрозольный и молекулярный компоненты. Кроме того,

$$\beta_0^m(h) = N(h) d\sigma^m/(d\Omega), \quad (11)$$

где $N(h)$ – концентрация молекул на высоте h ; $d\sigma^m/(d\Omega)$ – дифференциальное сечение рэлеевского обратного рассеяния для молекул воздуха.

Для неупругого рассеяния

$$\beta_i(h) = N(h) \left[\eta \frac{d\sigma_i^a}{d\Omega} + \kappa \frac{d\sigma_i^k}{d\Omega} \right], \quad (12)$$

где η , κ – относительное содержание азота и кислорода в воздухе; $d\sigma_i^a/(d\Omega)$ и $d\sigma_i^k/(d\Omega)$ имеют смысл сечений обратного КР, усредненных по вращательным состояниям, попадающим в выделенные интервалы вращательного спектра,

$$\alpha_i(h) = \alpha_i^a(h) + \alpha_i^m(h) .$$

Поскольку максимальный спектральный сдвиг составляет 32 Å при $l = 5320$ Å, то

$$\alpha_0^m(h)/\alpha_2^m(h) = (\lambda_2/\lambda_0)^4 = 1,024 . \quad (13)$$

Спектральный ход коэффициента аэрозольного ослабления менее выражен, и разница в коэффициентах ослабления на λ_0 и λ_2 будет наблюдаться только в третьем знаке после запятой. Поэтому при зондировании аэрозольных образований, сравнимых по оптической плотности с молекулярным компонентом атмосферы или, тем более, значительно ее превышающих с ошибкой в оптической толще не более 1%, в системе уравнений (8) для всех i можно принять

$$\alpha_0(h) + \alpha_i(h) = 2 \alpha_0(h) \quad (14)$$

и получить с учетом (9)–(12) следующее соотношение:

$$P_0(h)/[P_1(h) + P_2(h)] = K R(h) , \quad (15)$$

где $R(h)$ – отношение рассеяния, введенное формулой (2), а коэффициент K определяется следующим выражением:

$$K = K_0 \frac{d\sigma^m}{d\Omega} \left[K_1 \left(\eta \frac{d\sigma_1^a}{d\Omega} + k \frac{d\sigma_1^k}{dW} \right) + K_2 \left(\eta \frac{d\sigma_2^a}{d\Omega} + k \frac{d\sigma_2^k}{d\Omega} \right) \right]^{-1} . \quad (16)$$

Строго говоря, коэффициент K может зависеть от высоты вследствие изменения температуры, что, в свою очередь, ведет к перераспределению интенсивностей между вращательными уровнями КР. Но можно показать, что при соответствующем подборе положения и ширины спектральных интервалов температурная зависимость суммы сигналов $P_1(h) + P_2(h)$ практически устраняется [12–13]. Введем обозначение

$$S(h) = [P_1(h) + P_2(h)] h^2 . \quad (17)$$

Для вычисления коэффициента ослабления на участке Δh используется отношение суммы сигналов вращательного КР на двух соседних участках трассы. С учетом соотношений (12) и (14) можно получить

$$\frac{S(h_{j+1})}{S(h_j)} = \frac{G(h_{j+1})N(h_{j+1})}{G(h_j)N(h_j)} \exp \left\{ -2 \int_{h_j}^{h_{j+1}} \alpha(x) dx \right\} . \quad (18)$$

Как следствие уравнения состояния идеального газа и барометрической формулы можно записать

$$\frac{N(h_{j+1})}{N(h_j)} = \frac{T(h_j)}{T(h_{j+1})} \exp \left\{ -\frac{\mu g}{R} \int_{h_j}^{h_{j+1}} \frac{dh}{T(h)} \right\} , \quad (19)$$

где $T(h)$ – температура воздуха на высоте h ; μ – масса одного моля воздуха; R – универсальная газовая постоянная; g – ускорение свободного падения.

Если подставить (19) в (18), прологарифмировать и применить теорему о среднем и формулу трапеций для интегральных членов на малом интервале высоты $\Delta h_{(j,j+1)} = h_{j+1} - h_j$, то можно получить следующее выражение:

$$\bar{\alpha}_{(j,j+1)} = \frac{1}{2 \Delta h_{j,j+1}} \left[\ln \frac{G_{j+1}}{G_j} + \ln \frac{S_j T_j}{S_{j+1} T_{j+1}} \right] - \frac{\mu g}{4 R} \frac{T_j + T_{j+1}}{T_j T_{j+1}} . \quad (20)$$

Если рассматриваемый участок трассы удален настолько, что геометрическая функция становится константой, то первый член в квадратных скобках обращается в нуль. Как следует из формулы (20), определение профиля коэффициента ослабления вдоль вертикальной трассы возможно, если известен профиль температуры.

Описание метода измерения температуры по вращательному спектру КР приведено, например, в [14], а применительно к аппаратуре, используемой авторами излагаемой здесь работы, – в [15, 16]. Определение вертикального профиля температуры основано на оптимальном выборе двух участков вращательного спектра, для которых отношение интенсивностей наиболее чувствительно к температурному перераспределению заселенности вращательных уровней. Показано [14], что при изменении температуры на один градус изменение отношения интенсивностей может составлять 1,5–2%.

Профиль температуры выражается через отношение сигналов $L(h) = P_1(h) / P_2(h)$ следующей формулой:

$$T(h) = a / [\ln L(h) - b], \quad (21)$$

где a и b – константы, зависящие от выбора положения и ширины спектральных участков.

Измеренный профиль температуры позволяет решить уравнение (20) и вычислить рэлеевские компоненты обратного рассеяния и ослабления. Для этого достаточно воспользоваться формулой (19), известным соотношением между концентрацией молекул и рэлеевским рассеянием и сведениями о давлении воздуха на нулевом или ином уровне, который принимается в качестве опорного.

После того как вычислены профили рэлеевских коэффициентов обратного и объемного рассеяния, воспользовавшись формулами (2) и (15), можно вычислить коэффициент обратного рассеяния аэрозольного компонента и определить долю последнего в общем ослаблении.

Аппаратура

Лидар, использованный в приведенных ниже исследованиях, описан нами ранее в [16], поэтому ограничимся здесь лишь кратким описанием.

Лазерный передатчик излучает импульсы с длительностью 15 нс, энергией в импульсе 50–80 мДж, с частотой 10 Гц на длине волны 532 нм.

Передающая антенна коллимирует лазерный пучок так, что расходимость излучения равна одной угловой минуте.

Относительно небольшие энергетические характеристики лазера частично компенсируются тем, что прием сигнала производится на приемную антенну лидарного комплекса станции лазерного зондирования [17], имеющую диаметр 2,2 м. Рассеянное излучение, сфокусированное в фокальную плоскость антенны, световодным жгутом передается на щель двойного монохроматора, в котором выделяются три спектральных интервала, центры которых соответствуют положению несмещенной длины волны $\lambda_0 = 532$ нм и вращательным линиям азота с квантовыми числами $J = 6$ и $J = 14$. Подавление фона несмещенной частоты на интервалах $J = 6$ и $J = 14$ составляет не менее 10^8 . Излучение указанных трех спектральных интервалов регистрируется фотоумножителями ФЭУ-104 и счетчиками импульсов с быстродействием 25 МГц.

Измерения, калибровки и анализ ошибок

Измерения проводятся в режиме счета фотонов с накоплением сигнала по $5 \cdot 10^3$ – 10^4 посылкам лазерных импульсов в последовательности временных стробов, длительность которых соответствует пространственному стробу 48 м. Для уменьшения статистических флуктуаций сигналов производится усреднение по нескольким (до десяти) стробам так, что пространственное разрешение может изменяться от 48 до 480 м.

На рис. 1 можно видеть пример реализации всех трех сигналов, описываемых системой уравнений (8). Регистрируемый сигнал является смесью полезного сигнала, внутреннего шума детектора и шума фоновых засветок. Средняя величина шумовой составляющей сигналов определяется в каждом канале как средняя скорость счета импульсов в стробах, положение которых на оси времени соответствует пространственному удалению 40 км и выше. При обработке средняя составляющая шума вычитается из сигнала, предварительно скорректированного на шум последствия ФЭУ [19].

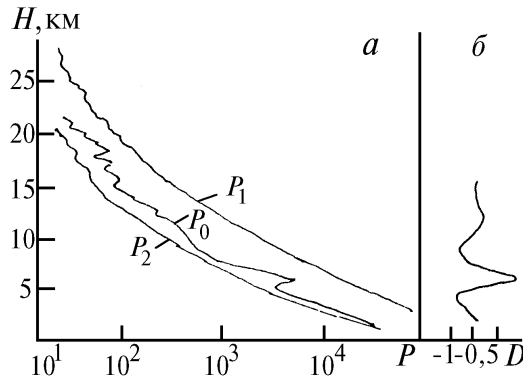


Рис. 1. Пример реализации сигналов: P_0 – на несмещенной длине волны; P_1 и P_2 в спектральных интервалах вращательного КР. Центры интервалов соответствуют вращательным квантовым числам молекул азота $J=6$ и $J=14$ соответственно. P – число фотонов, зарегистрированных во временном строке, соответствующем пространственному разрешению 480 м. Кривая справа – пример выбора высот калибровки по минимуму отношения сигналов $D = \lg [P_0/(P_1 + P_2)]$

Определение R -отношения общего обратного рассеяния к молекулярному

Для определения $R(h)$ по формуле (15) необходимо знать коэффициент K , который определяется формулой (16). Соотношения между входящими в (16) коэффициентами K_0 , K_1 , K_2 легко устанавливаются экспериментально, но сечения вращательных уровней известны с малой точностью. Поэтому нами используется известная процедура калибровки по слою на некоторой высоте h_k , в которой $R(h_k)$ может быть задана априорно. Для калибровки выбираются те высоты, в которых отношение сигналов (15) имеет минимум. Для них задается отношение рассеяния

$$R(h_k) = 1 + \beta_M^a(h_k) / \beta_M^m(h_k), \quad (22)$$

где β_M^a и β_M^m – соответственно аэрозольный и молекулярный компоненты коэффициента обратного рассеяния, взятые из модели [18].

В примере, представленном на рис. 1, в качестве калибровочных высот могут быть взяты 4,5 и 8 км. Согласно модели, $R(h = 4,5 \text{ км}) = 1,21$, а $R(h = 8 \text{ км}) = 1,05$. Если воспользоваться этими значениями, то для коэффициента K получаются соответственно значения 0,089 и 0,116, т.е. случайный разброс калибровочного коэффициента может быть значительным. Но при многократных повторениях калибровочной процедуры появляется возможность оценить среднее и дисперсию среднего. Наша оценка по 9 реализациям в разные дни дала следующий результат $K = 0,112 \pm 0,007$, что соответствует относительной ошибке 6% и принято нами для оценки ошибки изменения $R(h)$.

Если считать статистику сигналов и шумов пуассоновской, то можно показать, что относительная ошибка измерения $R(h)$ не превышает величины

$$\delta R \leq \sqrt{(\delta K)^2 + 3(P + p_{\text{ш}}) / 2(P - p_{\text{ш}})^2}, \quad (23)$$

где K – ранее оцененная относительная ошибка калибровки; P – сумма сигнальных и шумовых фотоотсчетов в наиболее слабом из трех сигналов; $p_{\text{ш}}$ – оценка среднего шума.

При статистике, обычной в наших измерениях, относительная ошибка определения $R(h)$ до высот 8 км не превышает 7% и постепенно возрастает до 20% на высоте 15 км.

Определение профиля температуры

Как сказано выше, температура определяется по отношению сигналов P_1 и P_2 в двух участках вращательного спектра КР (формула (21)). Относительная ошибка определения температуры выражается формулой

$$\delta T \leq \sqrt{(\delta a)^2 + T^2(\delta a)^2 / a^2 + T^2 b^2(\delta b)^2 / a^2} . \quad (24)$$

Значение эмпирических констант a и b находятся процедурой минимизации суммы квадратов отклонений между значениями температуры, измеренными посредством шар-зондовых датчиков и вычисляемых по формуле (21). Калибровка производится по участку температурного профиля на высотах 1,5–5 км, где относительные флуктуации сигналов невелики.

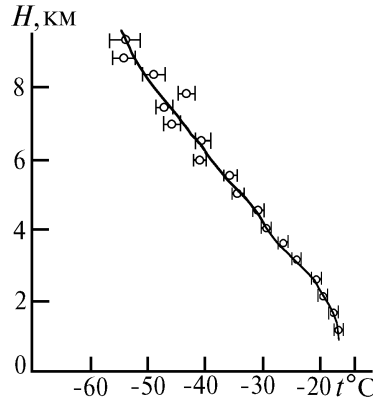


Рис. 2. Пример совмещения профилей температуры, измеренных шар-зондом (сплошная кривая) и лидаром для определения констант a и b , входящих в формулу (21)

На рис. 2 приведен пример совмещения температурных профилей, измеренных двумя методами. На участке 1,5–5 км профили хорошо совмещаются в пределах, обусловленных статистическими флуктуациями сигналов и ошибками шар-зондовых измерений так, что возможные ошибки не превышают 10% от ошибок, обусловленных статистическими флуктуациями сигналов. Поэтому для относительной ошибки определения температуры нами принимается следующая оценка:

$$\delta T(h) = T(h) \delta L(h) / a , \quad (25)$$

или, если считать статистику фотоотсчетов пуассоновской, можно записать для верхнего предела относительной ошибки

$$\delta T_j = 100 \frac{T_j}{a(P_j - p_j)} \sqrt{2(P_j + p_j)} , \% , \quad (26)$$

где P_j и p_j – соответственно общее число фотоотсчетов и среднее число импульсов шума, приходящихся на j -й строб. Отношение T/a имеет значение около 0,3. При отношении сигнал-шум равном 100, и накоплении в j -м стробе 10^4 фотоотсчетов относительная ошибка определения температуры составит около 0,5% или около 1,5 К.

Для относительной ошибки определения коэффициента ослабления по алгоритму (20) можно записать следующую приближенную формулу:

$$d\bar{\alpha}_{j,j+1} = \tau_{j,j+1}^{-1} \sqrt{(\delta G_j)^2 + (\delta S_j)^2 + (\delta T)^2} , \quad (27)$$

где $\tau_{j,j+1}$ – оптическая толщина участка трассы $h_{j+1} - h_j$.

Первый член под знаком корня имеет принципиальное значение для используемого автотрама лидара, поскольку влияние геометрического фактора ощутимо до высоты 7 км. Расчеты по формулам геометрической оптики дают лишь грубую оценку из-за сложности контроля всех параметров, от которых зависит функция геометрического фактора. Поэтой причине приходится оценивать эту функцию экспериментально, используя формулу (20), примененную в условиях, когда профиль $\alpha(h)$ можно задать исходя из измеренного отношения рассеяния и модельных представлений об аэрозоле, как, например, в случае, представленном на рис. 4, демонстрирующем выборку из представленного на рис. 3 ряда наблюдений вертикальных про-

филой аэрозольного рассеяния, проводившихся в течение 2,5 ч. На профиле есть участок от 2 до 8 км, где R имеет стабильное малое значение, так что вклад аэрозольного рассеяния невелик и может быть оценен из модельных представлений.

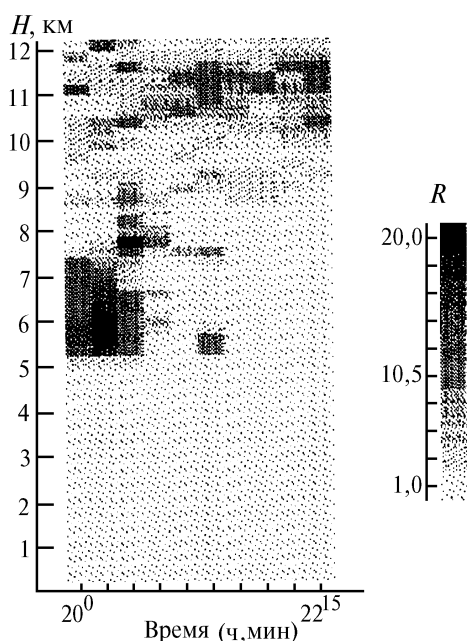


Рис. 3. Изменение отношения рассеяния R во времени

Точность подобной оценки зависит от высоты и составляет 5–7% на высотах от 5 до 8 км. На высотах ниже 5 км относительная ошибка оценки геометрического фактора увеличивается до 10% и более. Это обстоятельство ограничивает применимость методики при измерениях с использованием описанного выше лидара, но не является принципиальным. На высотах, где действие геометрического фактора сводится к убыванию сигнала обратно пропорционально квадрату расстояния, первый член под корнем становится равным нулю, и ошибка определения коэффициента ослабления зависит, в конечном счете, от статистических ошибок измерения сигналов. Наличие в формуле (27) множителя $1/t$ накладывает жесткие ограничения на эти ошибки, если иметь в виду зондирование слабозамутненной атмосферы или стремиться к высокому пространственному разрешению.

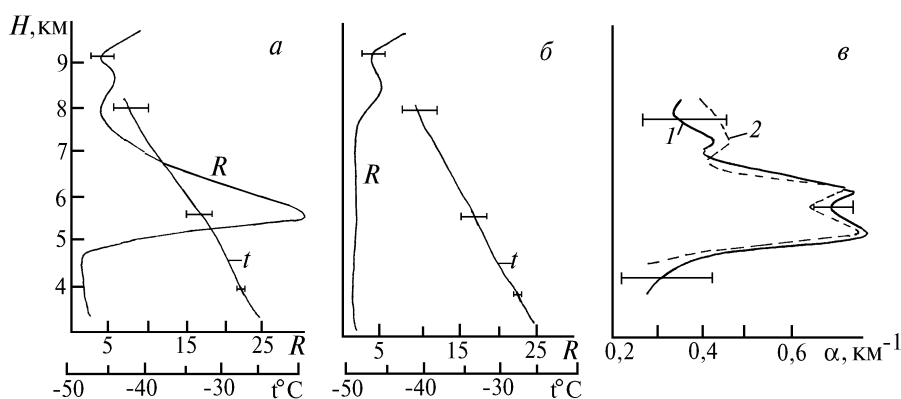


Рис. 4. Профили отношения рассеяния R и температуры t , соответствующие времени: a – 20 ч 15 мин и b – 21 ч 30 мин, представленного на рис. 3 временного измерения вертикального распределения аэрозоля; v – профиль коэффициента ослабления, рассчитанный по формуле (20) – кривая 1, и сравнением профилей (a) и (b) при определенных допущениях (см. по тексту статьи) – кривая 2

В существующем варианте лидара можно рассчитывать на относительные ошибки 15–30% при зондировании аэрозольных образований с отношением рассеяния $R > 10$ на высотах 5–8 км и пространственным разрешением 0,5 км. На рис. 4, в приведен пример определения α по описанной методике (кривая 1) в сравнении с расчетом α , проведенным в предположении, что рассеяние облачным образованием на высоте 6 км (рис. 4, а) существовало на фоне рассеяния в свободной атмосфере, представленном на рис. 4, б. В пределах значений $R > 10$ имеется удовлетворительное совпадение.

Заключение

Описанная выше методика определения коэффициентов обратного рассеяния и ослабления света представляется весьма перспективной для исследования тропосферы и стратосферы до высот 20–25 км.

Оценки показывают, что увеличение средней излучаемой энергии до 10 Вт позволит не превысить относительной ошибки 7 и 25% соответственно на высотах 5 и 15 км при пространственном разрешении соответственно 0,25 и 0,5 км. Для интервала высот 15–25 км могут быть получены удовлетворительные оценки с пространственным разрешением 2–3 км.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 93–05–9376.

1. Rassel P.B., Swisler T.J., and McCormick M.P. // *Appl.Opt.* 1979. V. 18. P. 3783–3797.
2. Sasano Y., Browell E.V., and Ismail S. // *Appl.Opt.* 1985. V. 24. P. 3929–3932.
3. Klett J.D. // *Appl.Opt.* 1981. V. 20. P. 211–220.
4. Кауль Б.В. Лазерное зондирование аэрозольных загрязнений атмосферы. Автореф. дис. Томск, 1976.
5. Кауль Б.В., Краснов О.А., Кузнецов А.Л. // *Изв. АН СССР. Сер. ФАО.* 1988. Т. 24. №8. С. 824–828.
6. Зуев В.Е., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. и др. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. Новосибирск: Наука, 1985. 186 с.
7. Ansmann A., Wandinger U., Weitkamp C., Michaelis W. // *Appl.Opt.* 1992. V. 31. №33. P. 7113–7191.
8. Coony J., Orr J., and Tomasetti C. // *Nature.* 1969. V. 224. P. 1098–1099.
9. Melfi S.H. // *Appl.Opt.* 1972. V. 11. P. 1605–1610.
10. Arshinov Yu.F., Bobrovnikov S.M., and Zuev V.E. // *In Proceed. of Twelfth Intern. Laser Radar Conf. France.* 1984. P. 63.
11. Mitev V.M., Grigorov I.V., Simeonov V.B., Arshinov Yu.F. // *Bulg. J. Phys.* 1990. V. 17. P. 67–74.
12. Cohen A., Cooney J.A., and Geller K.N. // *Appl.Opt.* 1976. V. 15. №11. P. 2896–2900.
13. Бобровников С.М. Разработка и исследование метода дистанционного определения оптических характеристик атмосферных аэрозолей с использованием эффекта СКР. Автореф. дис. канд. физ-мат. наук. Томск. 1983. 16 с.
14. Arshinov Yu.F., Bobrovnikov S.M., Zuev V.E., and Mitev V.M. // *Appl.Opt.* 1983. V. 22. №19. P. 2984–2990.
15. Волков С.Н., Кауль Б.В., Шапранов В.А., Шелефонтьук Д.И. // *Оптика атмосферы и океана.* 1992. Т. 5. №6. С. 608–610.
16. Волков С.Н., Кауль Б.В., Кузнецов А.Л. и др. // *Оптика атмосферы и океана.* 1993. Т. 6. №5. С. 547–552.
17. Кауль Б.В. // *Оптика атмосферы и океана.* 1992. Т. 5. №4. С. 431–437.
18. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 256 с.
19. Кауль Б.В., Краснов О.А., Кузнецов А.Л. // *Оптика атмосферы.* 1990. Т.3. №11. С. 1226–1228.

Институт оптики атмосферы
СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию
28 июля 1994 г.

S.N. Volkov, B.V. Kaul'. Method for Determination of Back Scattering and Light Attenuation Coefficients in Tropospheric Aerosol Layers Using Molecular and Raman Scattering Frequencies Lidar.

The ratio of lidar response at unbiased wavelength of 532 nm to a sum of responses from two regions of rotational spectrum of Raman Scattering (RS) by nitrogen and oxygen molecules is used to measure the light backscattering coefficients.

The ratio of the rotational RS intensities from two spectral regions can determine the temperature vertical profile; the ratio between RS signals and temperatures values from two neighbour parts of a path are used to calculate the attenuation coefficients.

Measurement errors and ways to lower them are also discussed in the paper.