

М.М. Кугейко, С.А. Лысенко

## Методические аспекты восстановления оптических характеристик атмосферы из результатов лазерно-локационных измерений

Белорусский государственный университет, г. Минск

Поступила в редакцию 18.11.2005 г.

На основе полученных аналитических выражений для погрешностей определения как общих, так и аэрозольных коэффициентов ослабления атмосферы из результатов лазерного зондирования поясняются общие особенности их восстановления при комплексном влиянии всех факторов, отягощающих решение уравнения лазерной локации. Предлагаются рекомендации по выбору алгоритмов расчета, использованию априорной информации об оптических параметрах в различных атмосферных ситуациях (чистая, слабозамутненная, оптически плотная) для повышения точности измерения коэффициента ослабления. Приводятся результаты численного моделирования, подтверждающие аналитические выводы, показывается возможность использования полученных аналитических выражений для погрешностей определения коэффициента ослабления при оценке результатов измерений в конкретных ситуациях.

### Введение

Наиболее полно методические вопросы восстановления оптических характеристик атмосферы из сигналов обратного рассеяния рассмотрены в [1]. На основе предложенной общей векторной модели различных схем обработки лидарных сигналов установлены основные факторы, влияющие на точность определения как локальных  $\epsilon(r)$  — коэффициент ослабления, так и интегральных  $V^2(r_i, r_j)$  — прозрачность участка  $[r_i, r_j]$ , значений данных оптических характеристик. Проведен анализ помехоустойчивости различных схем обработки лидарных сигналов с использованием общей модели, оценено влияние различных помех на точность интерпретации, а также исследованы требования к точности измерений. В работах [2–6] получены частные аналитические выражения, объясняющие влияние отдельных факторов (опорных значений определяемых характеристик, непостоянства индикатрисы рассеяния в направлении назад  $g_\pi$ , точности регистрации сигналов).

Очевидно, что актуально решение и такой задачи, как оценка комплексного влияния всех возмущающих факторов на точность интерпретации лидарных измерений. Кроме того, до сих пор не существует аналитических выражений, позволяющих при известной априори атмосферной ситуации и параметрах измерительной аппаратуры заранее оценивать предельные точностные характеристики измерения  $\epsilon(r)$  в данной среде и предлагать с учетом всех возмущающих факторов оптимальные в плане точности восстановления  $\epsilon(r)$  алгоритмы обработки сигналов обратного рассеяния. Ниже приводятся

полученные нами аналитические выражения для погрешности решения уравнения лазерной локации относительно  $\epsilon(r)$  при комплексном воздействии всех вышеотмеченных факторов, а также при наличии фона + шума в сигнале обратного рассеяния  $P(r)$ .

### 1. Аналитические выражения для погрешности определения коэффициента ослабления из результатов лазерного зондирования неоднородных двухкомпонентных сред

В наиболее общем случае уравнение лазерной локации можно записать следующим образом [7]:

$$S(r) = [P(r) - B]r^2Y(r) = A\epsilon(r)\exp\left\{-2\int_{r_0}^r \epsilon(x)dx\right\}, \quad (1)$$

где  $r_0$  — минимальное расстояние, на котором достигается полное перекрытие полей зрения приемника и посылаемого импульса;  $A$  — аппаратная постоянная системы;

$$\epsilon(r) = \epsilon_a(r) + \frac{3}{8\pi g_{\pi,a}(r)} \epsilon_m(r)$$

— коэффициент ослабления среды,  $\epsilon_a(r)$  и  $\epsilon_m(r)$  — аэрозольный и молекулярный коэффициенты ослабления соответственно;  $g_{\pi,a}(r)$  — аэрозольная индикатриса рассеяния в направлении назад;

$$Y(r) = \frac{1}{g_{\pi,a}(r)} \exp \left\{ -2 \int_{r_0}^r \left( \frac{3}{8\pi g_{\pi,a}(x)} - 1 \right) \varepsilon_m(x) dx \right\}$$

– априорно задаваемая функция;  $B$  – фоновая составляющая сигнала.

Общее решение уравнения (1) имеет вид [1]:

$$\varepsilon(r) = 0,5S(r) \left[ I_k - \int_{r_k}^r S(x) dx \right]^{-1}, \quad (2)$$

где  $I_k$  – константа калибровки, способ определения которой заключается в использовании априорной информации об оптических параметрах среды. При использовании локальных  $\varepsilon(r_k)$  и интегральных

$$V^2(r_0, r_k) = \exp \left\{ -2 \int_{r_0}^{r_k} \varepsilon(r) dr \right\}$$

опорных точек соответствующие решения уравнения (1) выражаются следующим образом [1, 2, 7]:

$$\varepsilon(r) = S(r) \left[ \frac{S(r_k)}{\varepsilon(r_k)} - 2 \int_{r_k}^r S(x) dx \right]^{-1}, \quad (3)$$

$$\varepsilon(r) = S(r) \left\{ \frac{2}{1 - V^2(r_0, r_k)} \int_{r_0}^{r_k} S(x) dx - 2 \int_{r_0}^r S(x) dx \right\}^{-1}. \quad (4)$$

С помощью (3) и (4) легко показать, что профиль  $\varepsilon(r)$ , восстановленный при использовании интегральной опорной точки  $V^2(r_0, r_k)$ , аналогичен профилю, восстановленному при использовании локальной опорной точки

$$\varepsilon(r_k) = \frac{S(r_k)[V^2(r_0, r_k) - 1]}{2 \int_{r_0}^{r_k} S(r) dr}. \quad (5)$$

Как следует из (3) и (4), для решения уравнения (1) необходимо знание  $g_{\pi,a}(r)$ ,  $\varepsilon_m(r)$  и опорных значений определяемых оптических характеристик.

Введя обозначение  $I(r_k, r) = \int_{r_k}^r S(x) dx$  и используя метод конечных приращений, из (2) легко получить выражение для ошибки восстановления  $\varepsilon(r)$ , которое имеет следующий вид:

$$\delta\varepsilon(r) = \frac{\tilde{\varepsilon}(r) - \varepsilon(r)}{\varepsilon(r)} = \frac{\delta S(r) - \delta I(r)}{1 + \delta I(r)}, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \delta I(r) = & \frac{1}{Q(r)V^2(r_k, r)} \left\{ Q(r_k)\delta I_k + \right. \\ & \left. + \left( Q(r_k) - Q(r)V^2(r_k, r) - 2 \int_{r_k}^r Q(x)\varepsilon(x)V^2(r_k, x) dx \right) - \right. \\ & \left. - 2 \left( \int_{r_k}^r Q(x)\varepsilon(x)V^2(r_k, x) dx \right) \delta I(r_k, r) \right\}; \quad (7) \end{aligned}$$

$$Q(r) = [g_{\pi,a}(r)\varepsilon_a(r) + 3\varepsilon_m(r)/8\pi] / [\tilde{g}_{\pi,a}(r)\varepsilon_a(r) + 3\varepsilon_m(r)/8\pi]$$

– фактор искажения, определяемый отличием задаваемой индикатрисы обратного рассеяния  $\tilde{g}_{\pi,a}(r)$  от ее точного значения  $g_{\pi,a}(r)$ ;

$$\delta I_k = [\delta S(r_k) - \delta\varepsilon(r_k)] / [1 + \delta\varepsilon(r_k)]$$

– относительная ошибка вычисления константы калибровки, определяемая несоответствием опорного значения  $\varepsilon(r_k)$  измеряемому сигналу в опорной точке  $r_k$ ;

$$\delta I(r_k, r) = \frac{\int_{r_k}^r S(x)\delta S(x) dx}{\int_{r_k}^r S(x) dx}$$

– относительная ошибка, обусловленная наличием ошибок измерения сигнала обратного рассеяния.

Выражение (7) было получено для заданной локальной опорной точки  $\varepsilon(r_k)$ , однако справедливо и при интегральной калибровке. В этом случае, исходя из (5), в выражении для  $\delta I_k$  значение  $\delta\varepsilon(r_k)$  определяется следующим соотношением:

$$\delta\varepsilon(r_k) = \frac{Q(r_k)(1 + \delta S(r_k))[1 - V^2(r_0, r_k)]}{2 \int_{r_0}^{r_k} Q(x)\varepsilon(x)V^2(r_0, x)(1 + \delta S(x)) dx} - 1. \quad (8)$$

В выражение для  $\delta I(r)$  входят три составляющие ошибки: за счет  $\delta S(r)$ , неточности калибровки и различия между  $\tilde{g}_{\pi,a}(r)$  и  $g_{\pi,a}(r)$ . Рассмотрим в отдельности вклад каждой из них.

## 2. Влияние точности задания и расположения опорных точек

Для получения выражения погрешности восстанавливаемого профиля  $\varepsilon(r)$  при неточном задании опорного значения  $\varepsilon(r_k)$  предположим в (6) и (7), что  $\tilde{g}_{\pi,a} = g_{\pi,a}$  и  $\delta S(r) = 0$ . В этом случае следующие из (6) и (7) соотношения совпадают с полученными ранее в [2–4]. Поэтому приведем здесь лишь основные выводы, следующие из этих выражений.

1. Ошибка  $\delta\varepsilon(r)$  является функцией от  $\delta\varepsilon(r_k)$  и оптической толщины

$$\tau_\varepsilon(r_k, r) = \int_{r_k}^r \varepsilon(x) dx.$$

При удалении влево от  $r_k$  ошибка восстановления асимптотически стремится к нулю, а при удалении вправо монотонно возрастает, стремясь при

$$\tau_\varepsilon(r_k, r) = -0,5 \ln \{ \delta\varepsilon(r_k) / [1 + \delta\varepsilon(r_k)] \}$$

к бесконечности, что соответствует случаю, когда в некоторой точке знаменатель в (3) обращается в нуль. Если  $\tilde{g}_{\pi,a}(r) = g_{\pi,a}(r)$ , то ошибка восстановления  $\delta\varepsilon(r)$  будет одного знака с ошибкой задания опорного значения, причем при положительных отклонениях в опорных значениях наблюдается более быстрая сходимость получаемого решения к точному, чем при таких же по модулю отрицательных.

2. Для малых оптических толщин  $\tau_\varepsilon(r_k, r)$  и при относительно небольших ошибках задания опорного значения  $\delta\varepsilon(r_k)$  размещение опорной точки не имеет принципиального значения. Это замечание справедливо для лидарных систем, работающих в относительно чистой атмосфере в видимой или инфракрасной областях спектра, где вклад молекулярной составляющей пренебрежимо мал.

3. При увеличении вклада молекулярной составляющей в обратное рассеяние относительная ошибка восстановления оказывается более чувствительной к расположению опорной точки и помещению последней в глубь трассы становится более предпочтительной. Аналогичным образом будет вести себя ошибка и при уменьшении аэрозольной индикатрисы обратного рассеяния.

### 3. Чувствительность решения к непостоянству аэрозольной индикатрисы рассеяния в направлении назад на трассе зондирования

Влияние неточного задания  $g_{\pi,a}(r)$  на восстановление профиля  $\varepsilon(r)$  наиболее наглядно можно рассмотреть, используя получаемое из (6) и (7) выражение для ошибки  $\delta\varepsilon(r)$ , соответствующее точной локальной калибровке при  $\delta S(r) = 0$ :

$$\delta\varepsilon(r) = Q(r)V^2(r_k, r) \times \left[ Q(r_k) - 2 \int_{r_k}^r Q(x)\varepsilon(x)V^2(r_k, x) dx \right]^{-1}. \quad (9)$$

Из анализа (9) можно сделать вывод, что если на участке трассы  $[r_k, r]$  значение  $Q(r) = \text{const}$ , то  $\delta\varepsilon(r)$  на этом отрезке равна нулю даже тогда, когда  $\tilde{g}_{\pi,a}(r) \neq g_{\pi,a}(r)$ , поскольку интеграл в знаменателе (9) можно представить в следующем виде:

$$\int_{r_k}^r Q(x)\varepsilon(x)V^2(r_k, x) dx = 0,5Q[1 - V^2(r_k, r)].$$

Однако в общем случае  $Q(r) \neq \text{const}$ , что может приводить к увеличению  $\delta\varepsilon_a(r)$  в обоих направлениях при удалении от точки  $r_k$ , в которой задается граничное условие. При использовании интегральной калибровки, как следует из (8), равенство  $\delta\varepsilon(r_k) = 0$  достигается при любом выбранном значении  $\tilde{g}_{\pi,a}$  лишь при однородности всего участка  $[r_0, r_k]$ . Однако важно отметить, что эти выводы справедливы при условии точного задания опорных значений ( $\varepsilon_a(r_k)$  или  $V^2(r_0, r_k)$ ).

Результаты восстановления профилей  $\varepsilon_a(r_k) = \varepsilon(r) - 3\varepsilon_m(r)/8\pi g_{\pi,a}$  при использовании локальной и интегральной калибровок представлены на рис. 1. Для простоты полагалось, что  $g_{\pi,a}(r) = \text{const}$ ,  $\tilde{g}_{\pi,a} = g_{\pi,a}$ , профиль  $\varepsilon_m(r)$  считался известным.

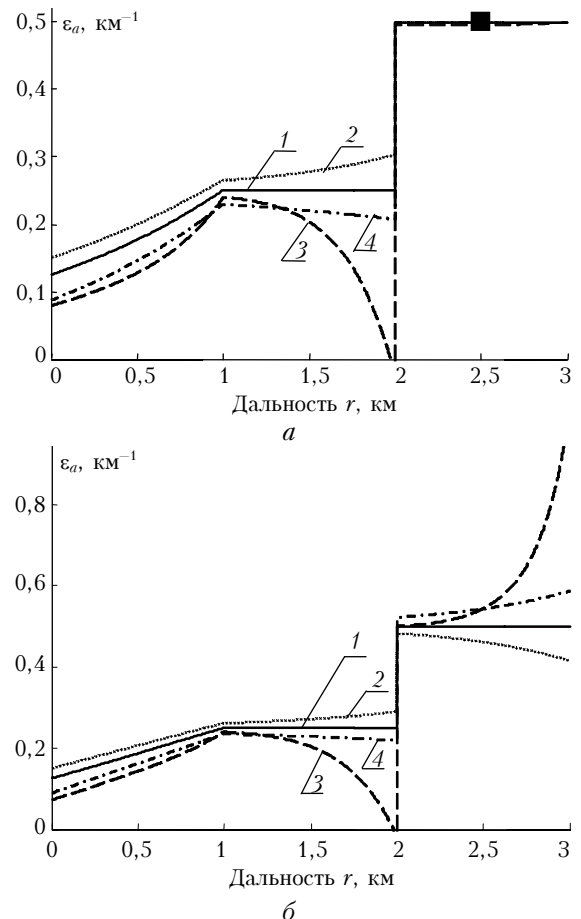


Рис. 1. Результаты восстановления профиля  $\varepsilon_a(r)$  при использовании локальной (а) и интегральной (б) калибровок ( $g_{\pi,a} = 0,03 \text{ ср}^{-1}$ ): 1 – модельный профиль  $\varepsilon_a(r)$ ; 2, 3 – восстановленные профили  $\varepsilon_a(r)$  при  $\varepsilon_m = 0,145 \text{ км}^{-1}$  и  $\tilde{g}_{\pi,a} = 0,05$  и  $0,01 \text{ ср}^{-1}$  соответственно; 4 – восстановленный профиль  $\varepsilon_a(r)$  при  $\varepsilon_m = 0,0116 \text{ км}^{-1}$  и  $\tilde{g}_{\pi,a} = 0,01 \text{ ср}^{-1}$

Как показывает рис. 1,а,  $\delta\varepsilon_a(r) = 0$  независимо от значения  $\tilde{g}_{\pi,a}$  на однородном участке от 2 до

3 км, на котором точно задается опорное значение  $\varepsilon_a(r_k)$ . При интегральной калибровке (рис. 1, б) ошибка на этом участке не равна нулю из-за непостоянства  $\varepsilon_a(r)$  на предшествующем ему участке 0–2 км, что подтверждает сказанное выше.

На однородном участке от 1 до 2 км наблюдается сходимость восстановленного профиля к точному значению  $\varepsilon_a$  при удалении влево от опорной точки, причем при заниженных значениях  $\tilde{g}_{\pi,a}$  решение быстрее изменяется на этом участке из-за большей скорости изменения  $V^2(r_k, r)$ , зависящей от  $\tilde{g}_{\pi,a}$ .

Для неоднородных участков (рис. 1) восстановленный профиль расходится от точных значений  $\varepsilon_a(r)$  даже при приближении к началу трассы. В случае, когда  $Q(r) \neq \text{const}$ , т.е. хотя бы одна из составляющих, входящих в  $Q(r)$ , изменяется, расходимость решения может существовать при любом расположении опорной точки. Следовательно, неоднородность двухкомпонентной среды является доминирующим фактором для ошибок восстановления профиля  $\varepsilon_a(r)$  из-за неточности задания индикатрисы.

Из рис. 1 также видно, что при уменьшении вклада молекулярной составляющей (что достигается увеличением длины волны зондирующего излучения) восстанавливаемый профиль  $\varepsilon_a(r)$  становится менее чувствителен к заданию индикатрисы.

Для объяснения различных результатов восстановления  $\varepsilon_a(r)$  при использовании завышенных и заниженных значений  $\tilde{g}_{\pi,a}$  получим [исходя из (7)] выражение для скорости изменения  $Q(r)$  при изменении  $\varepsilon_a(r)$ :

$$\frac{dQ(r)}{d\varepsilon_a(r)} = \frac{\beta_{\pi,m}(r)[g_{\pi,a} - \tilde{g}_{\pi,a}]}{[\beta_{\pi,m}(r) + \varepsilon_a(r)\tilde{g}_{\pi,a}]^2}, \quad (10)$$

где  $\beta_{\pi,m}(r) = g_{\pi,m}\varepsilon_m(r)$  — молекулярный коэффициент обратного рассеяния.

Как видно из (10), при изменении  $\varepsilon_a(r)$  на величину  $d\varepsilon_a$  соответствующее изменение  $|dQ(r)|$  будет значительно больше при  $\tilde{g}_{\pi,a} < g_{\pi,a}$ , чем и объясняется большее искажение восстанавливаемого профиля  $\varepsilon_a(r)$ .

Из (10) также видно, что чем меньше  $\tilde{g}_{\pi,a}$ , тем больше скорость изменения  $Q(r)$ . Максимум скорости изменения  $Q(r)$ , как следует из (10), достигается при выполнении условия  $\beta_{\pi,m}(r) = \tilde{g}_{\pi,a}\varepsilon_a(r)$ . Таким образом, в чистой или слабозамутненной среде, где наиболее вероятно выполнение этого условия, восстанавливаемый профиль  $\varepsilon_a(r)$  будет наиболее чувствителен к ошибкам задания  $g_{\pi,a}$  и более строгие требования должны предъявляться к выбору ее значения.

Для оценки влияния непостоянства  $g_{\pi,a}(r)$  на эффективность восстановления  $\varepsilon_a(r)$  итерационным методом с использованием функциональной связи между  $g_{\pi,a}(r)$  и  $\varepsilon_a(r)$ , предложенной в [8] для условий чистой или слабозамутненной атмосферы:

$$g_{\pi,a} = 0,02[\varepsilon_a + 0,000415]^{-0,23+0,03\sqrt{\varepsilon_a}}, \quad (11)$$

проведено численное моделирование (рис. 2, а). Поскольку  $\varepsilon_a(r_k)$  задавалось точно, то погрешность восстановления  $\varepsilon_a(r)$  определялась только погрешностью задания профиля  $\tilde{g}_{\pi,a}(r)$ .

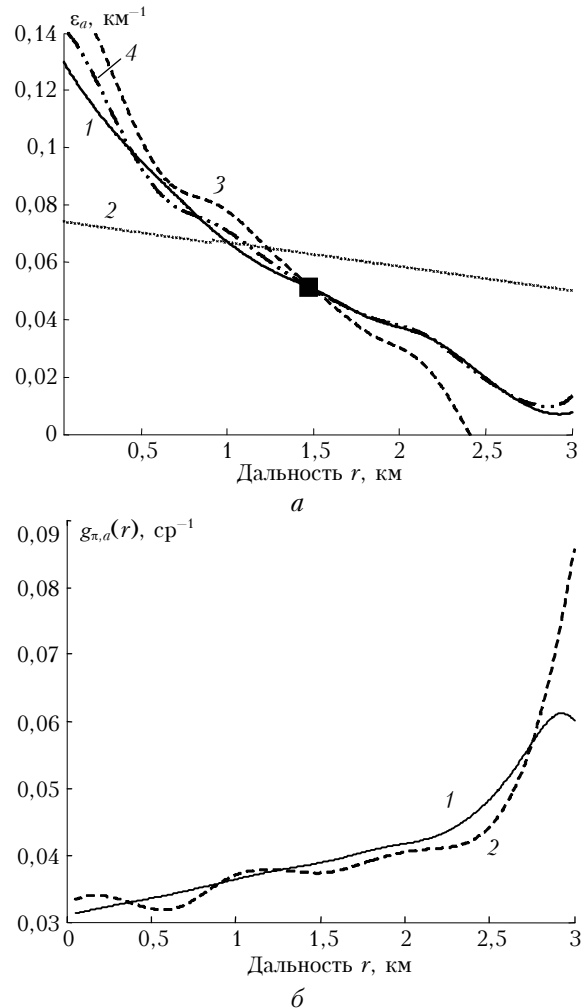


Рис. 2. Примеры восстановления различными методами профиля аэрозольного коэффициента ослабления в неоднородной двухкомпонентной атмосфере: а (1, 2 — модельные профили  $\varepsilon_a(r)$  и  $\varepsilon_m(r)$  соответственно; 3 — восстановленный профиль  $\varepsilon_a(r)$  при использовании постоянного значения индикатрисы, равного ее среднему значению по трассе; 4 — профили  $\varepsilon_a(r)$ , полученные с применением итерационного алгоритма при достоверно известной функциональной связи (11) и при наложении отклонений на эту зависимость соответственно); б (1 — профиль  $g_{\pi,a}(r)$ , удовлетворяющий соотношению (11); 2 — возмущенный профиль  $g_{\pi,a}(r)$ )

Как видно из рис. 2, а, использование для данной среды  $g_{\pi,a}(r) = \text{const}$  приводит к существенной погрешности на всей трассе зондирования (средняя по трассе погрешность 38%), причем для участка трассы правее опорной точки наблюдается появление отрицательных значений  $\varepsilon_a(r)$ . В то же время использование итерационного алгоритма приводит

к точному восстановлению модельных параметров при достоверном знании функциональной связи между  $\epsilon_a(r)$  и  $g_{\pi,a}(r)$ .

Для оценки чувствительности итерационного алгоритма к точности используемой функциональной зависимости между  $g_{\pi,a}(r)$  и  $\epsilon_a(r)$  на удовлетворяющий (11) профиль  $g_{\pi,a}(r)$  накладывались отклонения, не превышающие 40% (рис. 2, б). Как видно из рис. 2, а, качество восстановления  $\epsilon_a(r)$  итерационным методом (кривая 4) даже в этом случае остается вполне удовлетворительным (средняя по трассе погрешность составляет 7%).

#### 4. Чувствительность решения к ошибкам измерения сигнала обратного рассеяния

При восстановлении профиля  $\epsilon(r)$  атмосферы наличие шума в  $P(r)$  наиболее сильно сказывается на вычислении константы калибровки  $I_k$ , особенно если локальная опорная точка располагается в конце трассы, где сигнал сравнивается с шумом [9–11]. В этом случае, даже при точном задании  $\epsilon(r_k)$ ,  $I_k$  может вычисляться с большой погрешностью, равной  $\delta I(r_k) = \delta S(r_k)$ . В предположении белого шума, за счет усреднения  $\delta I(r_k, r) \approx 0$ , поэтому, как следует из (7):

$$\delta I(r) = V^2(r, r_k) \delta S(r_k). \quad (12)$$

Из (6) и (12) легко получить выражение для ошибки вычисления  $\epsilon(r)$  с учетом шума

$$\delta \epsilon(r) = \frac{\delta S(r) - V^2(r, r_k) \delta S(r_k)}{1 + V^2(r, r_k) \delta S(r_k)}. \quad (13)$$

Как видно из (13), наибольшие ошибки восстановления возникают при расположении опорной точки на удаленном расстоянии от лидара. При пересчете влево от опорной точки  $r_k$ , вследствие уменьшения  $V^2(r, r_k)$ , ошибка калибровки будет все меньше сказываться на точности восстановления профиля  $\epsilon(r)$ . При точном задании локальной опорной точки в начале трассы, в силу малости  $\delta S(r_0)$ , значение константы калибровки вычисляется достаточно точно и, как следует из (13),  $\delta \epsilon(r) = \delta S(r)$ .

Важно отметить, что при использовании в качестве опорного значения величины интегрального пропускания всей трассы зондирования  $V^2(r_0, r_{\max})$  точность вычисления профиля  $\epsilon(r)$  повышается, поскольку в этом случае, как видно из (8),  $\delta \epsilon(r_{\max}) \approx \delta S(r_{\max})$ , что, согласно (6), соответствует точному определению константы калибровки.

Как следует из (13), влияние шума в сигнале обратного рассеяния становится все менее существенным при увеличении оптической толщины участка  $[r, r_k]$ . Следовательно, для оптически плотных сред ни наличие шума в сигнале обратного рассеяния, ни ошибки задания опорного значения (что было отмечено в разд. 1), не оказывают сильного влияния на точность восстановления профиля  $\epsilon(r)$  с опорной точкой в конце трассы. Это подтвержда-

ется и результатами моделирования, приведенного на рис. 3, а (оптическая ситуация «дымка–облако–дымка»).

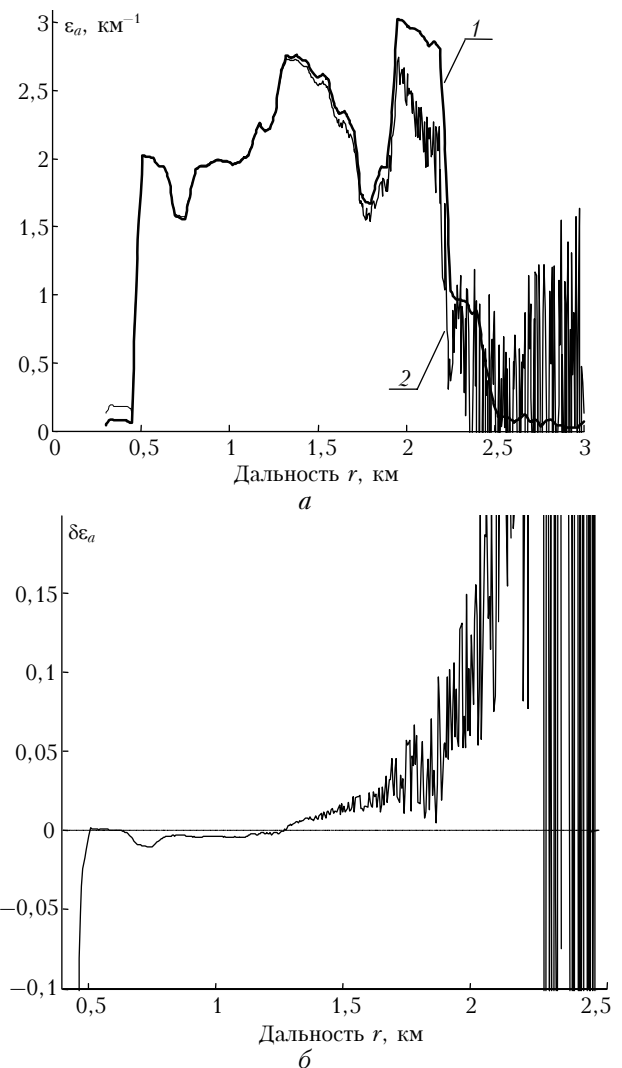


Рис. 3. Результат восстановления профиля коэффициента ослабления в оптически плотной атмосфере (опорная точка задавалась с 100%-й погрешностью в конце трассы, отношение сигнал-шум в начале трассы  $10^4$ ): а (1 и 2 – модельный и восстановленный профиль  $\epsilon_a(r)$  соответственно); б (полученная с использованием (6) и по результатам численного моделирования зависимость относительной ошибки восстановления  $\delta \epsilon_a(r)$  от расстояния до лидара)

Модельные индикатрисы обратного рассеяния в облаке и дымке равны соответственно 0,03 и 0,05  $\text{sr}^{-1}$ . При восстановлении профиля  $\epsilon_a(r)$  опорное значение аэрозольного коэффициента ослабления задавалось в точке  $r_k = 3$  км с погрешностью 100%, индикатриса обратного рассеяния в дымке и облаке полагалась постоянной и равной 0,05  $\text{sr}^{-1}$ . На рис. 3, б отображена полученная с использованием (6) и (7) зависимость погрешности восстановления  $\epsilon_a(r)$  при тех же условиях, для которых проводился расчет  $\epsilon_a(r)$ , представленный на рис. 3, а.

Погрешность восстановления  $\epsilon_a(r)$  определялась также по результатам численного моделирования

$\varepsilon_a(r)$ , приведенного на рис. 3,а, и отображалась на рис. 3,б. Поскольку полученные результаты совпадают, то на рис. 3,б мы видим одну кривую. Таким образом, зная априори атмосферную ситуацию и характеристики измерительной аппаратуры, с использованием полученных аналитических выражений можно заранее оценивать предельные точностные характеристики измерения  $\varepsilon(r)$  и  $\varepsilon_a(r)$  в данной среде.

### Выводы

В чистых и слабозамутненных средах, при наличии ошибок в сигнале обратного рассеяния, опорную точку предпочтительней помещать в начале трассы. Для более удаленных опорных точек точность восстановления  $\varepsilon(r)$  будет хуже, чем при расположении опорной точки в начале трассы, даже при уменьшении  $\delta S(r)$  и  $\delta I(r)$  за счет усреднения по множеству реализаций. Точность восстановления также можно повысить при использовании в качестве опорного значения величины интегрального пропускания всей трассы зондирования.

Однако в слабозамутненных средах наиболее жесткие требования должны предъявляться к выбору значения  $\tilde{g}_{\pi,a}$ , поскольку при неудачном выборе этого параметра возможны расхожимость решения и появление отрицательных значений  $\varepsilon(r)$  даже при точном задании опорной точки и отсутствии ошибок измерения сигнала обратного рассеяния. Поэтому, поскольку невозможно задать точное значение параметра  $\tilde{g}_{\pi,a}$ , то при восстановлении профиля  $\varepsilon_a(r)$  в чистой атмосфере необходимо использовать известные функциональные зависимости между  $\varepsilon_a(r)$  и  $g_{\pi,a}(r)$ . При этом ни расположение опорной точки, ни используемое в качестве начального приближения значение параметра  $\tilde{g}_{\pi,a}$  не сказываются на точности восстановления  $\varepsilon_a(r)$  (определяется лишь точностью задания опорного значения и функциональной связи между  $g_{\pi,a}(r)$  и  $\varepsilon_a(r)$ ).

В оптически плотных средах (облачная и туманная атмосфера) восстанавливаемый профиль  $\varepsilon(r)$  наиболее чувствителен к расположению опорной точки (решение сходится так же быстро, как и расходится) и наиболее оптимальным является вариант с помещением последней в глубине трассы. При этом ни точность ее задания, ни наличие шума в  $S(r)$  практически не сказываются на качестве восстановления профиля в начале трассы, поскольку влияние ошибки калибровки на получаемый профиль быстро уменьшается с увеличением оптиче-

ской толщины между  $r$  и  $r_k$ . Кроме того, так как в оптически плотных средах  $\varepsilon_a(r) \gg \varepsilon_m(r)$ , то ошибки, связанные с неточным выбором индикатрисы, не влияют на точность восстановления при медленноменяющейся или быстроосциллирующей  $g_{\pi,a}(r)$ . В этом случае  $Q(r) = g_{\pi,a}(r) / \tilde{g}_{\pi,a}(r)$  не зависит от профилей аэрозольного и молекулярного коэффициентов ослабления и для повышения точности восстановления необходимо знать не среднее по трассе значение индикатрисы, а ее относительный ход, поскольку при этом можно провести коррекцию  $S(r)$  под постоянство индикатрисы по трассе [12].

1. Креков Г.М., Кавкянов С.И., Крекова М.М. Интерпретация сигналов оптического зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 184 с.
2. Kovalev V.A., Moosmuller H. Distortion of particulate extinction profiles measured with lidar in two-component atmosphere // Appl. Opt. 1994. V. 33. N 27. P. 6499–6507.
3. Matsumoto M., Takeuchi N. Effects of misestimated far end boundary values on two common lidar inversion solutions // Appl. Opt. 1994. V. 33. N 27. P. 6451–6456.
4. Rocadenbosch F., Comeron A. Error analysis for the lidar backward inversion algorithm // Appl. Opt. 1999. V. 38. No. 21. P. 4461–4473.
5. Sasano Y., Browell E.V., Ismail S. Error caused by using a constant extinction/backscattering ratio in the lidar solution // Appl. Opt. 1985. V. 24. N 22. P. 3929–3932.
6. Sasano Y., Nakane H. Significance of the extinction/backscatter ratio and the boundary value term in the solution for the two-component lidar equation // Appl. Opt. 1984. V. 23. N 1. P. 11–13.
7. Fernald F.G. Analysis of atmospheric lidar observation: some comments // Appl. Opt. 1984. V. 23. N 5. P. 652–653.
8. Ершов А.Д., Балин Ю.С., Самойлова С.В. Обращение лидарных данных при исследовании оптических характеристик слабозамутненной атмосферы // Оптика атм. и океана. 2002. Т. 15. № 10. С. 894–899.
9. Kunz G.J., Leeuw G. Inversion of lidar signal with the slope method // Appl. Opt. 1993. V. 32. N 18. P. 3249–3256.
10. Rocadenbosch F., Comeron A., Pineda D. Assessment of lidar inversion errors for homogeneous atmospheres // Appl. Opt. 1998. V. 37. N 12. P. 2199–2206.
11. Shimizu H., Sasano Y., Nakane H., Sugimoto N., Matsui I., Takeuchi N. Large scale laser radar for measuring aerosol distribution over a wide area // Appl. Opt. 1985. V. 24. N 5. P. 617–626.
12. Кугейко М.М., Оношко Д.М. Теория и методы опико-физической диагностики неоднородных рассеивающих сред. Минск: БГУ, 2003. 186 с.

#### *M.M. Kugeiko, S.A. Lysenko. Methods of atmospheric optical characteristics reconstruction from laser-location measurements.*

On the basis of the obtained analytical expressions for errors of determination both total, and aerosol extinction coefficients of an atmosphere from the results of laser sensing, the common features of their restoration are explained at complex influence of all factors burdening the solution of the laser location equation. The recommendations are offered concerning the choice of calculation algorithms, use of the a priori information about optical parameters in various atmospheric situations (pure, weakly turbid, optically dense atmosphere) for rising a measurement accuracy of the extinction coefficients. The numerical simulation results, which confirm analytical conclusions, are given. The possibility of using the obtained analytical expressions for errors the extinction coefficients determination at estimation of measurement results in particular situations is shown.