

УДК 551.508

Многочастотное лидарное зондирование атмосферного аэрозоля в условиях информационной неопределенности

С.А. Лысенко, М.М. Кугейко, В.В. Хомич*

*Белорусский государственный университет
220030, г. Минск, пр. Независимости, 4, Беларусь*

Поступила в редакцию 2.02.2016 г.

Предложен метод решения обратной задачи многочастотного лидарного зондирования атмосферного аэрозоля, позволяющий восстанавливать пространственные распределения объемных концентраций аэрозольных компонентов, интегральное по трассе зондирования распределение аэрозольных частиц по размерам и комплексный показатель преломления частиц без каких-либо дополнительных данных для калибровки лидара и доопределения обратной задачи. Метод основан на предположении, что средние размеры, дисперсии размеров и комплексные показатели преломления частиц каждой аэрозольной компоненты не меняются вдоль трассы зондирования, а количество спектральных каналов лидара больше количества аэрозольных компонентов. В этом случае система уравнений для спектрально-пространственных отсчетов лидарного сигнала оказывается переопределенной, и ее численное решение позволяет определять не только микрофизические параметры аэрозоля, но и калибровочные константы лидара на его рабочих длинах волн. Приведены примеры обработки лидарных сигналов упругого и комбинационного рассеяния модельной аэродисперсной среды на длинах волн $\lambda_0 = 0,355; 0,532; 1,064$ мкм и $\lambda_R = 0,387; 0,607$ мкм соответственно. Показано, что микрофизические параметры мелкодисперсной компоненты аэрозоля (размерами до 1–2 мкм) восстанавливаются из сигналов с погрешностями < 10%, а погрешности определения микрофизических параметров грубодисперсных частиц существенно зависят от величины их вклада в оптическое пропускание среды. Коэффициенты аэрозольного ослабления и обратного рассеяния, рассчитываемые по восстановленным микрофизическим параметрам аэрозоля, отличаются от их фактических значений на единицы процентов.

Ключевые слова: аэрозоль, оптические параметры, микрофизические параметры, многочастотное зондирование, обратная задача, бескалибровочный метод; aerosol, optical parameters, microphysical parameters, multifrequency sensing, inverse problem, calibration-free method.

Введение

Возрастающее влияние изменений климата на экономическую и социальную жизнь общества, а также деятельность различных отраслей народного хозяйства побуждает мировое научное сообщество к широкомасштабному изучению естественных и антропогенных факторов, обуславливающих происходящие климатические изменения. В числе таких факторов значимая роль отводится атмосферному аэрозолю, влияющему на глобальный радиационный баланс как напрямую — посредством поглощения и рассеяния солнечного излучения, так и косвенно — через его воздействие на формирование облачности [1, 2]. Роль аэрозоля в формировании и изменении климата неоднозначна, поскольку в зависимости от его микрофизических характеристик (комплексного показателя преломления, концентрации, распределения частиц по размерам) он может приводить как к повышению, так и к понижению температуры подстилающей поверхности [3].

Для количественной оценки степени влияния аэрозоля на изменение климата создаются и успешно

функционируют глобальные и региональные сети дистанционного зондирования атмосферы [4–6]. Мощным инструментом исследования аэрозоля в этих сетях является многочастотный лидар, потенциально позволяющий получать информацию о пространственном распределении аэрозоля и составляющих его фракций оперативно и с высоким пространственным разрешением [7–9]. Однако для достижения этого потенциала лидара требуется решение нескольких непростых научных и практических задач. Во-первых, для решения лидарного уравнения его необходимо доопределить соотношением между аэрозольными коэффициентами ослабления и обратного рассеяния, каждый из которых влияет на регистрируемые лидарные сигналы [9–13]. Во-вторых, каким-либо образом установить опорное (калибровочное) значение аэрозольного коэффициента обратного рассеяния в некоторой точке трассы зондирования либо оптическую толщину некоторого участка трассы [9, 14–16]. И, в-третьих, решить обратную задачу аэрозольного светорассеяния, заключающуюся в восстановлении микрофизических параметров (МФП) аэрозоля из коэффициентов его оптического взаимодействия на рабочих длинах волн лидара [7, 17]. В рамках подходов к интерпретации данных многочастотного зондирования атмосферы, действующих в лидарных сетях на пространствах Европы

* Сергей Александрович Лысенко (lisenko@bsu.by); Михаил Михайлович Кугейко (kugeiko@bsu.by); Василий Васильевич Хомич.

(EARLINET) и СНГ (Cis-LiNet), все перечисленные выше задачи решаются с привлечением информации, предварительно получаемой на основе солнечных фотометров [4, 5, 18–21]. Такая интеграция данных оптического зондирования атмосферы в рамках единого метода исследования аэрозоля, несомненно, позволяет расширить объем получаемой информации об аэрозоле по сравнению с использованием каждого средства зондирования в отдельности, однако существенно ограничивает область применения лидара. Соответствующие лидарные измерения могут выполняться только в безоблачные дни и для вертикальных трасс зондирования. Кроме того, лидарные сигналы, принимаемые с определенного направления и диапазона высот (выше теневой зоны лидара и ниже максимальной дальности зондирования), пространственно не соответствуют данным фотометра, измеряющего пропускание всей толщи атмосферы (включая теневую зону лидара) в направлении на Солнце. Очевидно, что для возможности использования лидара как самостоятельного средства дистанционного зондирования аэрозоля на произвольных трассах в атмосфере необходим поиск более совершенных методов количественной интерпретации лидарных сигналов, не требующих параллельных измерений.

Ранее нами были предложены методы определения массовых концентраций аэрозоля $PM_{1,0}$, $PM_{2,5}$ и PM_{10} в нижних слоях атмосферы по данным многочастотного лидарного зондирования [15, 16]. Необходимость в дополнительных измерениях устранена за счет доопределения системы лидарных уравнений регрессионными соотношениями между оптическими и микрофизическими параметрами аэрозоля и использования предположения о наличии на трассе зондирования однородного участка либо двух неоднородных участков со схожим поведением аэрозольного коэффициента ослабления. Однако предложенные алгоритмы обнаружения таких участков по спектрально-пространственной структуре лидарного сигнала проблематично использовать в условиях малого содержания аэрозоля на трассе, что имеет место при вертикальном зондировании атмосферы.

Настоящая статья посвящена решению задачи восстановления оптических и микрофизических параметров аэрозоля на произвольных трассах в атмосфере из сигналов многочастотного лидара. Задача решается в рамках предположений об атмосферном аэрозоле, используемых в современных наземных сетях его мониторинга (AERONET, EARLINET, Cis-LiNet и др.), но без привлечения дополнительных средств оптического зондирования.

Метод восстановления оптических и микрофизических параметров аэрозоля из лидарных сигналов

Допустим, что лидар посылает в атмосферу лазерные импульсы на длинах волн λ_0 и принимает сигналы упругого обратного рассеяния аэрозолем и молекулами воздуха на тех же длинах волн, а также сигналы комбинационного обратного рассеяния одним из атмосферных газов (например,

азотом) на смещенных длинах волн λ_R . Уравнения, связывающие мощность принимаемых сигналов однократного рассеяния P с оптическими параметрами атмосферы, имеют вид [9, 22]:

$$P(\lambda_0, r) = A_0 P_0(\lambda_0) r^{-2} [\beta_{\pi,a}(\lambda_0, r) + \beta_{\pi,m}(\lambda_0, r)] \times \exp \left\{ -2 \int_0^r [\varepsilon_a(\lambda_0, x) + \varepsilon_m(\lambda_0, x)] dx \right\}, \quad (1)$$

$$P(\lambda_R, r) = A_R P_0(\lambda_0) r^{-2} N_R(r) \sigma_{R,\pi}(\lambda_0) \times \exp \left\{ - \int_0^r [\varepsilon_a(\lambda_0, x) + \varepsilon_m(\lambda_0, x)] dx \right\} \times \exp \left\{ - \int_0^r [\varepsilon_a(\lambda_R, x) + \varepsilon_m(\lambda_R, x)] dx \right\}, \quad (2)$$

где P_0 — мощность посылаемого в атмосферу излучения; r — расстояние между лидаром и рассеивающим объемом; A_0 и A_R — аппаратные константы, определяемые площадью приемника лидара и пропусканием света его оптическими элементами на длинах волн λ_0 и λ_R ; ε_a и $\beta_{\pi,a}$ — коэффициенты аэрозольного ослабления и обратного рассеяния; ε_m и $\beta_{\pi,m}$ — коэффициенты полного и обратного рассеяния света молекулами воздуха; N_R — счетная концентрация молекул газа, ответственного за комбинационное рассеяние; $\sigma_{R,\pi}(\lambda_0)$ — сечение обратного комбинационного рассеяния молекул газа на длине волны λ_R при их возбуждении на λ_0 . Первая экспонента в (2) соответствует пропусканию атмосферой излучения на λ_0 при его распространении от источника к рассеивающему объему, вторая — пропусканию излучения на смещенной длине волны λ_R , идущего в обратном направлении.

Пространственные профили характеристик молекулярного рассеяния и концентраций атмосферных газов рассчитываются в соответствии со стандартной моделью атмосферы и приземными значениями метеопараметров [23]. Коэффициенты аэрозольного ослабления и обратного рассеяния связаны с МФП аэрозоля известными интегральными соотношениями

$$\varepsilon_a(\lambda) = \frac{3}{4} \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} a^{-1} Q_{ext} \left[m(\lambda), \frac{2\pi a}{\lambda} \right] \frac{dV(a)}{d \ln a} d \ln a, \quad (3)$$

$$\beta_{\pi,a}(\lambda) = \frac{3}{4} \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} a^{-1} Q_{\pi} \left[m(\lambda), \frac{2\pi a}{\lambda} \right] \frac{dV(a)}{d \ln a} d \ln a, \quad (4)$$

где a_{\min} и a_{\max} — границы спектра размеров частиц; Q_{ext} и Q_{π} — факторы эффективности ослабления и обратного рассеяния, зависящие от комплексного показателя преломления (КПП) частицы $m = n + ix$ и ее дифракционного параметра $2\pi a/\lambda$ [24]; $dV(a)/d \ln a$ — распределение объемов частиц полидисперсного ансамбля.

В рамках модели атмосферного аэрозоля, используемой в глобальной радиометрической сети

AERONET [25] и лидарных сетях на пространстве Европы (EARLINET) и СНГ (Cis-LiNet), спектр размеров частиц описывается в формате двухмодального логнормального распределения:

$$\frac{dV(a)}{d \ln a} = \sum_{v=1}^2 \frac{C_v}{\sqrt{2\pi}\sigma_v} \exp\left[-\frac{(\ln a - \ln a_v)^2}{2\sigma_v^2}\right], \quad (5)$$

где $v=1$ соответствует мелкодисперсной моде, $v=2$ – крупнодисперсной; C_v – объемная концентрация частиц моды v ; a_v – модальный радиус ($\ln a_v = \ln \bar{a}$); σ_v – среднеквадратичное отклонение $\ln a$. КПП частиц обеих мод полагается одинаковым и не зависящим от λ .

Пусть микрофизические параметры аэрозоля нужно оценить на некотором участке трассы $[r_1, r_2]$. Для уменьшения количества неизвестных величин в исходных уравнениях (1)–(5) полагаем, что параметры a_v и σ_v распределения (5), а также КПП частиц на исследуемом участке трассы постоянны. Произведение всех характеристик лидара, входящих в уравнения (1) и (2), и оптического пропускания участка $[0, r_1]$ заменим двумя переменными

$$K_0 = A_0 P_0(\lambda_0) \exp\left\{-2 \int_0^{r_1} [\varepsilon_a(\lambda_0, x) + \varepsilon_m(\lambda_0, x)] dx\right\},$$

$$K_R = A_R P_0(\lambda_0) \times$$

$$\times \exp\left\{-\int_0^{r_1} [\varepsilon_a(\lambda_0, x) + \varepsilon_m(\lambda_0, x) + \varepsilon_a(\lambda_R, x) + \varepsilon_m(\lambda_R, x)] dx\right\}. \quad (6)$$

Подставим интегральные соотношения для оптических параметров аэрозоля (3), (4) в лидарные уравнения (1), (2) и с учетом сделанных допущений и обозначений запишем полученные уравнения в дискретной форме, соответствующей последовательности отсчетов сигналов по переменной r :

$$L(\lambda_0, r_j) = \ln[P(\lambda_0, r_j) r_j^2] =$$

$$= \ln K_0 + \ln\left[\beta_{\pi, m}(\lambda_0, r_j) + \sum_{v=1}^2 C_v(r_j) \Omega_{\pi, v}(\lambda_0, a_v, \sigma_v, n, \chi)\right] -$$

$$- 2 \sum_{l=1}^j \omega_l \varepsilon_m(\lambda_0, r_l) - 2 \sum_{v=1}^2 \Omega_{ext, v}(\lambda_0, a_v, \sigma_v, n, \chi) \sum_{l=1}^j \omega_l C_v(r_l), \quad (7)$$

$$L(\lambda_R, r_j) = \ln\left[\frac{P(\lambda_R, r_j) r_j^2}{N_{N_2}(r_j) \sigma_{R, \pi}(\lambda_0)}\right] =$$

$$= \ln K_R - \sum_{l=1}^j \omega_l [\varepsilon_m(\lambda_0, r_l) + \varepsilon_m(\lambda_R, r_l)] -$$

$$- \sum_{v=1}^2 [\Omega_{ext, v}(\lambda_0, a_v, \sigma_v, n, \chi) + \Omega_{ext, v}(\lambda_R, a_v, \sigma_v, n, \chi)] \times$$

$$\times \sum_{l=1}^j \omega_l C_v(r_l), \quad (8)$$

где ω_l – коэффициенты квадратурной формулы численного интегрирования; $j = 1, \dots, N_r$, N_r – количество отсчетов сигнала на исследуемом участке трассы; $\Omega_{ext, v}$ и $\Omega_{\pi, v}$ – полидисперсные коэффициенты ослабления и обратного рассеяния частиц моды v , приведенные к единичной объемной концентрации моды:

$$\Omega_{ext(\pi), v}(\lambda, a_v, \sigma_v, n, \chi) = \frac{3}{4\sqrt{2\pi}\sigma_v} \times$$

$$\times \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} a^{-1} Q_{ext(\pi)}\left[n, \chi, \frac{2\pi a}{\lambda}\right] \exp\left[-\frac{(\ln a - \ln a_v)^2}{2\sigma_v^2}\right] d \ln a. \quad (9)$$

Уравнения (7)–(9) являются исходными для нахождения МФП аэрозоля и составляют прямую модель вида $\mathbf{L} = \mathbf{f}(\mathbf{p})$, где \mathbf{L} – вектор из $N_\lambda N_r$ спектрально-пространственных отсчетов лидарных сигналов, N_λ – количество длин волн лидарного зондирования; $\mathbf{p} = (\ln K_0, \ln K_R, C_1(r_1), C_1(r_{N_r}), C_2(r_1), \dots, C_2(r_{N_r}), a_1, \sigma_1, a_2, \sigma_2, n, \chi)^T$ – вектор параметров модели, общее количество которых – $N_\lambda + 2N_r + 6$; \mathbf{f} – операторная форма уравнений (7)–(9). Поскольку на практике, как правило, $N_r \gg N_\lambda + 6$, то при $N_\lambda \geq 3$ система исходных уравнений оказывается переопределенной (количество уравнений больше количества неизвестных). Ее решение выполняется численно, путем итерационного подбора модельных параметров, обеспечивающих наилучшее соответствие расчетных лидарных сигналов экспериментальным данным. Для того чтобы избежать расходимости решения и ускорить его сходимость, воспользуемся численным алгоритмом решения обратной задачи, минимизирующим следующую целевую функцию [26]:

$$J(\mathbf{p}) = (\mathbf{L}_{exp} - \mathbf{f}(\mathbf{p}))^T \mathbf{S}_L^{-1} (\mathbf{L}_{exp} - \mathbf{f}(\mathbf{p})) + \gamma (\mathbf{p} - \mathbf{p}_0)^T \mathbf{S}_p^{-1} (\mathbf{p} - \mathbf{p}_0), \quad (10)$$

где \mathbf{L}_{exp} – вектор, составленный из спектрально-пространственных отсчетов экспериментальных сигналов; \mathbf{p}_0 – начальное приближение; \mathbf{S}_L – ковариационная матрица погрешностей измерения $L(\lambda_{0(R)}, r_j)$; \mathbf{S}_p – ковариационная матрица вектора модельных параметров \mathbf{p} ; γ – параметр регуляризации, определяющий соотношение между невязкой решения и мерой его близости к начальному приближению.

Оптимальное значение $\mathbf{p} = \mathbf{p}_{opt}$, очевидно, должно удовлетворять условию $dJ(\mathbf{p})/d\mathbf{p} = 0$. Воспользовавшись итерационным методом Ньютона для решения этого уравнения и полагая, что в окрестности \mathbf{p}_{opt} вектор невязки $(\mathbf{L}_{exp} - \mathbf{f}(\mathbf{p}))$ пренебрежимо мал, получаем итерационную формулу для нахождения \mathbf{p}_{opt} [26]:

$$\mathbf{p}_{n+1} = \mathbf{p}_0 + (\mathbf{F}_n^T \mathbf{S}_L^{-1} \mathbf{F}_n + \gamma_n \mathbf{S}_p^{-1})^{-1} \mathbf{F}_n^T \mathbf{S}_L^{-1} (\mathbf{L}_{exp} - \mathbf{f}(\mathbf{p}_n) + \mathbf{F}_n (\mathbf{p}_n - \mathbf{p}_0)), \quad (11)$$

где \mathbf{p}_n – n -е приближение к решению обратной задачи; $\mathbf{F}_n = (df/d\mathbf{p})_{\mathbf{p}=\mathbf{p}_n}$ – матрица из частных производных от функций (7), (8) по модельным параметрам. Нахождение производных df/dn и $df/d\chi$ предполагает численный расчет соответствующих производных от факторов оптических взаимодействий аэрозольных частиц $Q_{ext(\pi)}$. Остальные производные рассчитываются аналитически, исходя из формул (7)–(9). В целях ускорения сходимости алгоритма и устранения влияния начального приближения на область поиска решения обратной задачи, параметр регуляризации γ_n на каждой итерации выбирается в зависимости от невязки $\rho_n = \|\mathbf{L}_{exp} - \mathbf{f}(\mathbf{p}_n)\|$, рассчитываемой как евклидово расстояние между \mathbf{L}_{exp} и $\mathbf{f}(\mathbf{p}_n)$. Изначально полагается $\gamma_0 = 1$. Далее, если $\rho_{n+1} > \rho_n$, то $\gamma_{n+1} = 1,2\gamma_n$, иначе $\gamma_{n+1} = 0,8\gamma_n$. Первое условие означает, что поиск минимума невязки в данный момент осуществляется в неверном направлении, поэтому параметр регуляризации увеличивается, это позволяет на следующей итерации приблизить модельные параметры к начальному приближению и тем самым изменить направление поиска \mathbf{p}_{opt} . В противном случае, когда поиск \mathbf{p}_{opt} идет в верном направлении, параметр γ_n уменьшается, в результате чего на следующей итерации уточнение модельных параметров будет в большей степени определяться их соответствием экспериментальным сигналам, а не начальному приближению. Итерации завершаются, когда невязка выходит на некоторое стационарное значение. Таким образом, второе слагаемое в (10) лишь регулирует сходимость алгоритма и практически не ограничивает область поиска модельных параметров, поскольку на последних итерациях $\gamma_n \rightarrow 0$.

При вертикальном зондировании атмосферы в качестве начального приближения для КПП аэрозольных частиц и параметров их распределения по размерам a_v и σ_v целесообразно использовать соответствующие средние значения для района проведения измерений. Средние значения и диапазоны вариаций микрофизических параметров n , χ , a_v и σ_v континентального аэрозоля, полученные по данным AERONET для ряда европейских станций [27], указаны в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Средние значения и диапазоны вариаций КПП и параметров распределения аэрозольных частиц по размерам

МФП	n	χ	a_1 , МКМ	σ_1	a_2 , МКМ	σ_2
Минимум	1,33	$5 \cdot 10^{-4}$	0,1	0,3	1,2	0,3
Максимум	1,60	0,065	0,5	1,0	6,0	1,0
Среднее	1,45	0,01	0,18	0,45	2,9	0,65

При зондировании аэрозоля в пределах индустриального центра начальные приближения для его МФП можно взять, например, из модели городского аэрозоля, принятой Всемирной метеорологической ассоциацией [28]. Начальные приближения для $C_v(r)$ в предлагаемом методе можно задавать постоянными по трассе в пределах некоторых разумных значе-

ний. Исходя из данных лидарно-радиометрического зондирования атмосферы [18, 20, 29], в качестве начального приближения для $C_v(r)$ можно рекомендовать использование значения из диапазона $0,01$ – $0,02$ мм³/м³. Значения $C_v(r)$ на итерациях, разумеется, должны быть неотрицательными и не превышать некоторый максимум $C_{v,max}$. Последний выберем, исходя из данных [30], согласно которым массовая концентрация аэрозольных частиц в экстремально загрязненном приземном воздухе достигает значений ~ 300 мкг/м³, что при средней плотности аэрозольного вещества $1,5$ г/см³ соответствует $C_{v,max} = 0,2$ мм³/м³. Калибровочные константы $\ln K_0$ и $\ln K_R$, входящие в исходные уравнения аддитивно, изначально можно задавать любыми и на итерациях не ограничивать.

При расчете ковариационной матрицы \mathbf{S}_p полагаем, что МФП аэрозоля p_i не коррелируют друг с другом и равномерно распределены в пределах известных диапазонов $[p_{i,min}, p_{i,max}]$. В этом случае в матрице \mathbf{S}_p отличными от нуля будут только диагональные элементы, равные дисперсиям равномерно распределенных случайных величин: $(p_{i,max} - p_{i,min})^2/12$. Калибровочные константы могут принимать любые положительные значения, поэтому соответствующие им элементы матрицы \mathbf{S}_p^{-1} равны нулю. Ковариационная матрица погрешностей измерения лидарного сигнала \mathbf{S}_L также имеет диагональный вид с элементами, зависящими от координаты r , шумовых характеристик и нелинейности приемного тракта лидара [31]. Однако, как показывают численные эксперименты по обращению лидарных сигналов предлагаемым методом (приведены ниже), наилучшие результаты восстановления МФП аэрозоля достигаются в том случае, когда для каждой длины волны лидарного зондирования λ_i ($i = 1, \dots, N_\lambda$) все пространственные отсчеты сигнала входят в невязку с одинаковыми весовыми коэффициентами, а матрица \mathbf{S}_L имеет следующий вид:

$$\mathbf{S}_L = \begin{pmatrix} [\ln(1 + \delta P_{\max}(\lambda_1))]^2 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & [\ln(1 + \delta P_{\max}(\lambda_{N_\lambda}))]^2 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где $\delta P_{\max}(\lambda_i)$ – оценка погрешности измерения сигнала обратного рассеяния на λ_i для наиболее удаленных от лидара точек трассы зондирования.

Таким образом, для практической реализации описанного выше метода необходимо знать примерные диапазоны вариаций МФП аэрозоля и примерную погрешность измерения лидарных сигналов. Предложенный метод можно использовать для восстановления оптических и микрофизических параметров слоисто-неоднородных сред в предположении, что качественные микрофизические характеристики компонентов аэрозоля (КПП, средний размер и дисперсия размеров) неизменны в пределах каждого слоя. При этом метод не требует

калибровки лидара на основе сопутствующих измерений, поскольку калибровочные константы наряду с МФП аэрозоля подбираются путем минимизации невязки между расчетными и экспериментальными данными. Единственное условие, необходимое для решения обратной задачи, — это превышение количества спектрально-пространственных отсчетов лидарного сигнала над количеством неизвестных параметров прямой модели.

Анализ эффективности метода

Рассмотрение особенностей предлагаемого метода обращения лидарных сигналов проведем на примере лидарной системы с Nd:YAG³⁺-лазером в качестве источника излучения, измеряющей сигналы упругого обратного рассеяния аэрозолем и молекулами воздуха на $\lambda_0 = 0,355; 0,532; 1,064$ мкм и сигналы комбинационного обратного рассеяния атмосферным азотом на $\lambda_R = 0,387; 0,607$ мкм. Соответствующие сигналы рассчитывались численно при заданных микрофизических параметрах моделируемой среды и обрабатывались описанным выше методом. Ниже рассмотрен пример вертикального зондирования атмосферы.

Комплексный показатель преломления и параметры спектра размеров (a_v, σ_v) частиц моделируемой среды брались из базы данных AERONET [27] и полагались неизменными по трассе зондирования. Высотные распределения объемных концентраций мелкодисперсной $C_1(r)$ и грубодисперсной $C_2(r)$ фракций аэрозоля соответствовали реальной ситуации в атмосфере [32]. Диапазон высот, охватываемый экспериментальными профилями $C_v(r)$ ($r = 1-6$ км), разбивался на $N_r = 150$ равноотстоящих отсчетов, для которых по формулам (1), (2) в рамках стандартной модели молекулярно-газовой атмосферы [23] рассчитывались лидарные сигналы. Калибровочные константы K_0 и K_R задавались равными 10 для всех λ_0 и λ_R . Сечение комбинационного обратного рассеяния атмосферным азотом $\sigma_{R,\pi}(\lambda_0)$ полагалось равным $1,5 \cdot 10^{-34} (0,355/\lambda_0)^4 \text{ м}^2$ [33] (неопределенность его абсолютного значения автоматически учитывается при подборе калибровочных констант и не влияет на точность обращения лидарных сигналов). К сигналам добавлялись случайные помехи с амплитудой 2% от величин сигналов на максимальной дальности зондирования $r_{\max} = 6$ км. Разумеется, на практике уровень шума в сигналах комбинационного обратного рассеяния существенно превышает аналогичный уровень для сигналов упругого рассеяния, поскольку сечения соответствующих оптических взаимодействий отличаются примерно на четыре порядка. Однако нас в первую очередь интересовали информационное содержание обоих типов лидарного сигнала и потенциальная точность извлечения из них информации об аэрозоле при их раздельной и совместной обработке.

Смоделированные лидарные сигналы на длинах волн упругого и комбинационного рассеяний приведены на рис. 1.

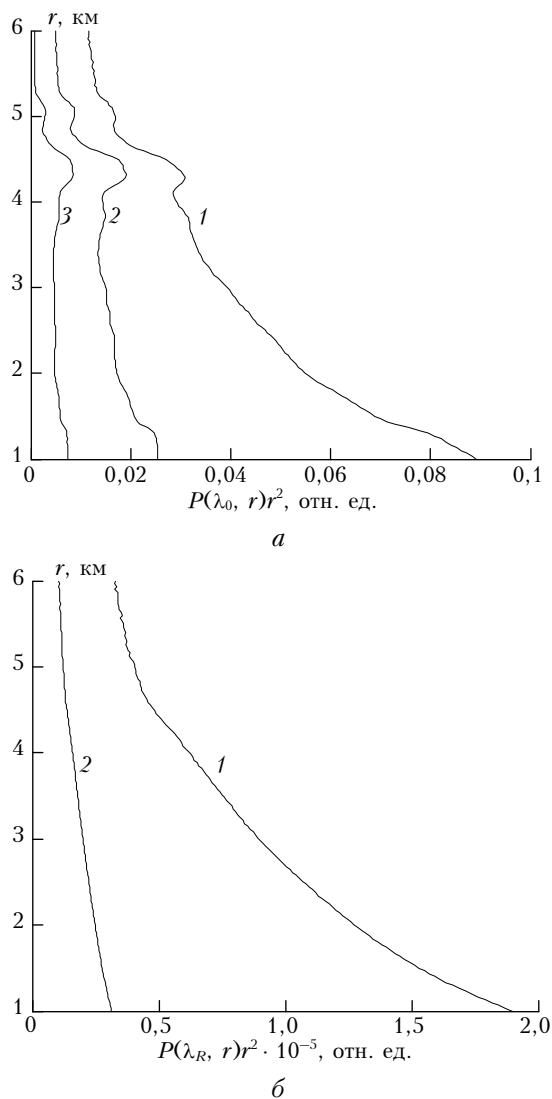


Рис. 1. Сигналы упругого (а) и комбинационного (б) обратного рассеяния моделируемой среды на длинах волн $\lambda_0 = 0,355$ (1); 0,532 (2); 1,064 мкм (3) и $\lambda_R = 0,387$ (1); 0,607 мкм (2) соответственно

Комплексный показатель преломления частиц и параметры их распределения по размерам (5), при которых выполнен расчет представленных сигналов, соответствовали одному из наблюдений на станции AERONET в Минске (табл. 2) и достаточно сильно отличались от их начального приближения (см. табл. 1), используемого в алгоритме (11). Ковариационная матрица модельных параметров S_p рассчитывалась в предположении их равномерного распределения в диапазонах, указанных в табл. 1. Элементы ковариационной матрицы (12) рассчитывались, исходя из уровня шума в сигналах (в данном случае $\delta P_{\max} = 0,02$ для всех длин волн оптического зондирования). Высотные профили $C_v(r)$, КПП и параметры распределения аэрозольных частиц по размерам восстанавливались из лидарных сигналов по итерационной формуле (11). При анализе только сигналов упругого рассеяния алгоритм сходился за 16 итераций, обеспечивая среднееквадратическое

Микрофизические параметры аэрозоля, при которых рассчитывались лидарные сигналы, и соответствующие параметры, восстановленные из этих сигналов

МФП	a_1 , МКМ	σ_1	a_2 , МКМ	σ_2	n	χ
Фактические	0,14	0,70	4,0	0,56	1,53	0,022
Восстановленные из $P(\lambda_0, r)$	0,15	0,63	3,5	0,59	1,47	0,010
Восстановленные из $P(\lambda_0, r)$ и $P(\lambda_R, r)$	0,14	0,71	3,6	0,49	1,52	0,021

отклонение между фактическими и подобранными сигналами $\sim 0,29\%$. При совместной обработке сигналов упругого и комбинационного рассеяний стационарное значение аналогичной невязки $\sim 0,36\%$ достигалось за 24 итерации.

Значения аппаратных констант, полученные в результате решения обратной задачи, с высокой точностью соответствуют их априори заданным значениям. При анализе только сигналов упругого рассеяния получено: $K_0 = 10,0; 9,90; 9,03$ для $\lambda_0 = 0,355; 0,532; 1,064$ мкм соответственно. При совместном анализе сигналов упругого и комбинационного рассеяний: $K_0 = 10,01; 10,03; 9,73$ для

тех же λ_0 и $K_R = 9,99; 10,01$ для $\lambda_R = 0,387; 0,607$ мкм. Это свидетельствует о том, что при постоянстве качественных характеристик аэрозольных частиц на исследуемом участке трассы зондирования и количестве спектральных каналов лидара, превышающем количество аэрозольных компонентов, калибровочные константы лидара можно определять из решения переопределенной системы уравнений для спектрально-пространственных отсчетов сигнала обратного рассеяния.

Фактические и восстановленные профили объемных концентраций мелко- и грубодисперсной фракций аэрозоля представлены на рис. 2.

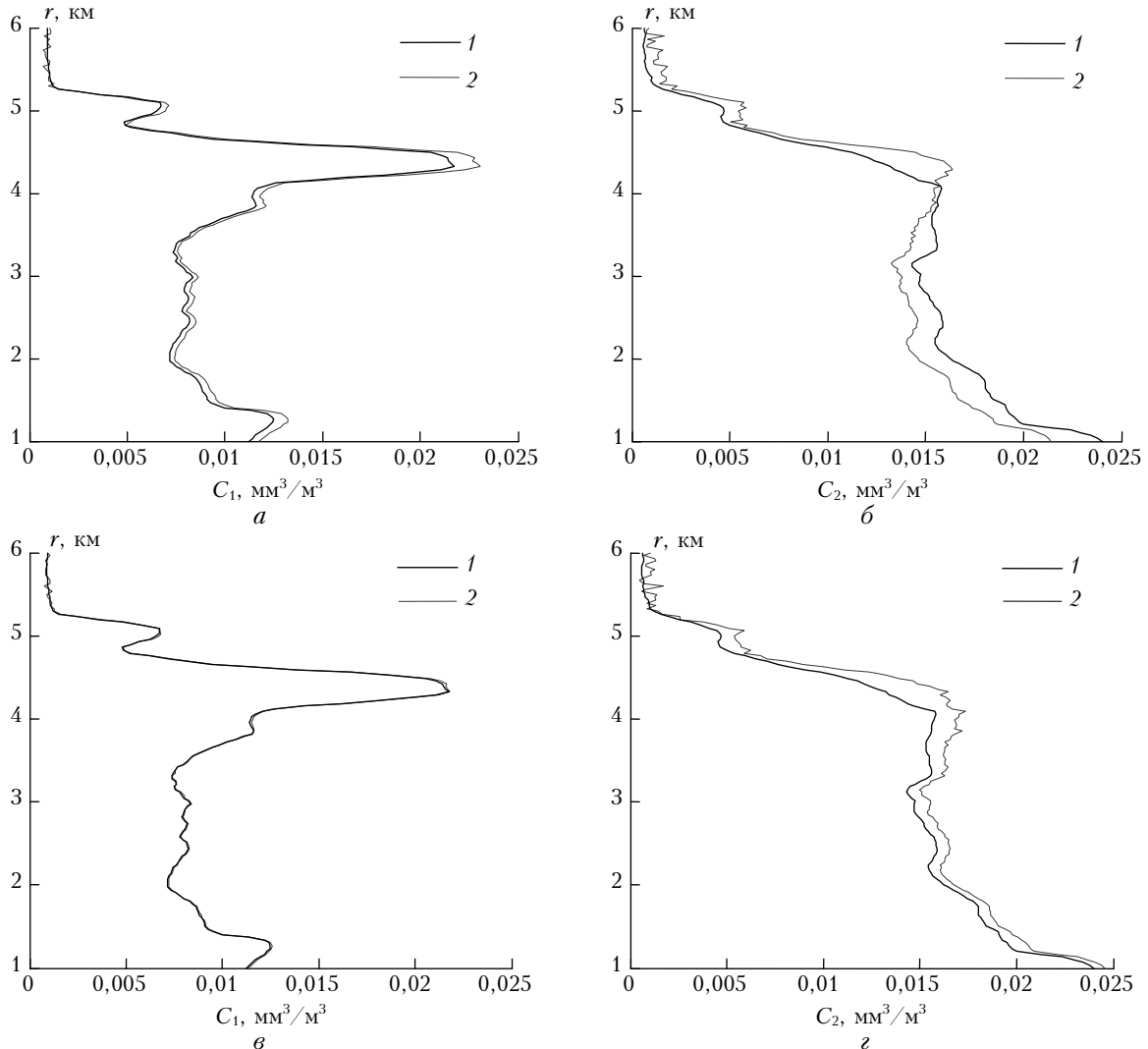


Рис. 2. Результаты восстановления высотных профилей объемных концентраций мелкодисперсной (а, в) и грубодисперсной (б, г) компонентов аэрозоля из сигналов упругого (а, б), упругого и комбинационного (в, г) обратного рассеяния моделируемой среды; 1 и 2 – фактические и восстановленные профили соответственно

Средние по высоте погрешности восстановления C_1 из данных трехволнового (на λ_0) и пятиволнового (на λ_0 и λ_R) лидарного зондирования — 5,4 и 1,9% соответственно. При любых других МФП аэрозоля, зафиксированных на станции AERONET в Минске, аналогичные погрешности также не превышают единиц процентов. Учитывая репрезентативность экспериментальных данных о МФП аэрозоля, накопленных на радиометрической станции в Минске, и их хорошее соответствие данным других станций на пространстве Европы и СНГ [34], полученные оценки погрешности восстановления $C_1(r)$ можно считать вполне объективными. Что касается объемных концентраций грубодисперсных частиц аэрозоля C_2 , то аналогичные результаты для них значительно хуже. В рассматриваемом случае (рис. 2, б, з) средняя по высоте погрешность восстановления C_2 из сигналов упругого рассеяния составляет 20,6% и уменьшается до 14,4% с привлечением каналов комбинационного рассеяния. При других МФП аэрозоля эта погрешность может достигать 70%. Однако такие погрешности связаны не с особенностями предложенного метода решения обратной задачи, а со слабым влиянием грубодисперсных частиц аэрозоля на рассматриваемые лидарные сигналы. Для пояснения данного обстоятельства в табл. 3 представлены спектральные значения полидисперсных коэффициентов ослабления $\Omega_{ext,v}$ и обратного рассеяния $\Omega_{\pi,v}$ мелко- ($v = 1$) и грубодисперсных ($v = 2$) частиц аэрозоля, приведенные к единичным объемным концентрациям соответствующих аэрозольных компонентов. Расчет выполнен по формулам Ми [24] при заданных МФП моделируемой среды (см. табл. 2).

Таблица 3

Полидисперсные коэффициенты ослабления и обратного рассеяния мелко- и грубодисперсных компонентов аэрозоля на длинах волн λ_0 , приведенные к единичным концентрациям компонентов

λ_0 , мкм	0,355	0,532	1,064
$\Omega_{ext,1}$, $\text{км}^{-1}/(\text{мм}^3/\text{м}^2)$	9,89	5,74	1,52
$\Omega_{ext,2}$, $\text{км}^{-1}/(\text{мм}^3/\text{м}^2)$	0,47	0,48	0,51
$\Omega_{\pi,1}$, $\text{км}^{-1}\text{ср}^{-1}/(\text{мм}^3/\text{м}^2)$	0,1536	0,0949	0,0367
$\Omega_{\pi,2}$, $\text{км}^{-1}\text{ср}^{-1}/(\text{мм}^3/\text{м}^2)$	0,0011	0,0023	0,0100

Видно, что в ближней УФ- и видимой областях спектра нормированные коэффициенты оптических взаимодействий мелкодисперсных частиц превышают аналогичные коэффициенты грубодисперсных частиц более чем на порядок. В ближней ИК- области спектра эти различия менее ощутимы (3–4 раза), поэтому лидарный сигнал на $\lambda_0 = 1,064$ мкм является наиболее информативным относительно микроструктуры грубодисперсной компоненты аэрозоля. Однако аэрозольная оптическая толщина всей трассы зондирования на данной λ_0 составляет всего 0,095, поэтому экспонента в формуле (1) для сигнала $P(\lambda_0, r)$ близка к единице, и он, главным

образом, определяется профилем аэрозольного коэффициента обратного рассеяния. Последний зависит от произведения $C_2(r)\Omega_{\pi,2}$ и при неизвестных параметрах распределения грубодисперсных частиц по размерам определить по нему концентрацию $C_2(r)$, очевидно, не представляется возможным. Тем не менее при высоком содержании грубодисперсных частиц на трассе зондирования, когда влияние аэрозольного ослабления на сигнал $P(\lambda_0, r)$ при $\lambda_0 = 1,064$ мкм не является пренебрежимо малым, например при зондировании горизонтальных трасс предложенным методом, в принципе, можно определять объемные концентрации обеих мод аэрозольного спектра размеров. В общем случае вклад грубодисперсных частиц в лидарный сигнал можно увеличить путем смещения длины волны зондирующего излучения в ИК-область спектра [15, 35].

Помимо возможности определения $C_v(r)$ на зондируемой трассе разработанный метод решения обратной задачи многочастотного лидарного зондирования позволяет также получать оценки параметров распределения аэрозольных частиц по размерам, а при совместной обработке сигналов упругого и комбинационного обратного рассеяния — еще и КПП аэрозольного вещества. О погрешностях восстановления КПП частиц и параметров функции их распределения по размерам (5) можно судить по табл. 2, в которой фактические МФП аэрозоля на моделируемой трассе сопоставлены с их оценками по лидарным сигналам на трех (λ_0) и пяти (λ_0, λ_R) длинах волн. Во втором случае восстановленные параметры распределения мелкодисперсных частиц (a_1, σ_1) по размерам и КПП аэрозольного вещества практически не отличаются от их истинных значений. Точность восстановления параметров a_2 и σ_2 грубодисперсных частиц несколько хуже (~10%) и не улучшается за счет использования каналов регистрации комбинационного рассеяния, что связано с отмеченными выше особенностями ослабления и обратного рассеяния излучения аэрозольными компонентами (см. табл. 3). Тем не менее такие погрешности удовлетворяют общим требованиям к методам дистанционного зондирования аэрозоля, выдвигаемым с целью обнаружения и количественной оценки влияния аэрозоля на климат [36]. Согласно этим требованиям для количественной оценки влияния аэрозоля на облака и осадки эффективный радиус и эффективная дисперсия аэрозольного спектра размеров должны определяться с погрешностями 10 и 50% соответственно [36].

Для оценки вклада аэрозоля в атмосферный энергетический баланс необходимо также знать его оптические характеристики. При известных микрофизических параметрах аэрозоля на трассе зондирования расчет всех его необходимых оптических характеристик не представляет особой сложности. Профили $\epsilon_a(\lambda_0, r)$ и $\beta_{\pi,a}(\lambda_0, r)$ моделируемой среды, рассчитанные по формулам (3)–(5) при точных и восстановленных МФП аэрозоля ($C_v(r), a_v, \sigma_v, m$), сопоставлены на рис. 3.

Средние на моделируемой трассе погрешности (%) восстановления коэффициентов ослабления $\delta\varepsilon_a(\lambda_0)$ и обратного рассеяния $\delta\beta_{\pi,a}(\lambda_0)$ аэрозоля из лидарных сигналов

λ_0 , мкм	Восстановление из $P(\lambda_0, r)$		Восстановление из $P(\lambda_0, r)$ и $P(\lambda_R, r)$	
	$\delta\varepsilon_a(\lambda_0)$	$\delta\beta_{\pi,a}(\lambda_0)$	$\delta\varepsilon_a(\lambda_0)$	$\delta\beta_{\pi,a}(\lambda_0)$
0,355	2,4	2,6	1,3	1,8
0,532	3,6	2,4	1,2	1,5
1,064	4,6	13,5	4,8	4,2

В целом погрешности восстановления профилей $\varepsilon_a(\lambda_0, r)$ и $\beta_{\pi,a}(\lambda_0, r)$, характерные для пятиволновой методики зондирования аэрозоля, примерно в 2 раза меньше аналогичных погрешностей трехволновой методики и составляют единицы процентов.

Заключение

Предложен метод восстановления оптических и микрофизических характеристик многокомпонентных аэрозолей из сигналов многочастотного лидарного зондирования атмосферы без использования каких-либо дополнительных данных для установления калибровочных констант лидара на его рабочих длинах волн и для доопределения обратной задачи. Метод основан на предположении о постоянстве качественных характеристик аэрозольных компонентов (КПП, средних размеров и дисперсий размеров частиц) на трассе зондирования и итерационной подгонке расчетных лидарных сигналов к соответствующим экспериментальным данным. При количестве длин волн оптического зондирования, превышающем количество аэрозольных фракций, система уравнений для спектрально-пространственных отсчетов лидарного сигнала оказывается переопределенной, что позволяет включить калибровочные константы лидара в число параметров, определяемых из решения обратной задачи. В результате можно получать оценки пространственных профилей концентраций аэрозольных компонентов, интегрально по трассе распределения частиц по размерам и комплексного показателя преломления частиц. На основе этой информации можно выполнять расчеты любых оптических параметров аэрозоля, влияющих на перенос солнечного излучения в атмосфере.

При наличии на трассе зондирования нескольких участков с отличающимися качественными характеристиками аэрозоля разработанный метод можно использовать для каждого участка в отдельности, поскольку он, в отличие от известных методов решения обратных задач многочастотного лидарного зондирования [4, 8–11, 14, 17–22], не требует опорных (калибровочных) значений оптических характеристик аэрозоля на исследуемом участке трассы. Кроме того, предложенным методом можно получать оценки МФП аэрозоля как на вертикальных, так и на горизонтальных трассах зондирования и тем самым решать задачи климатической и экологической направленности.

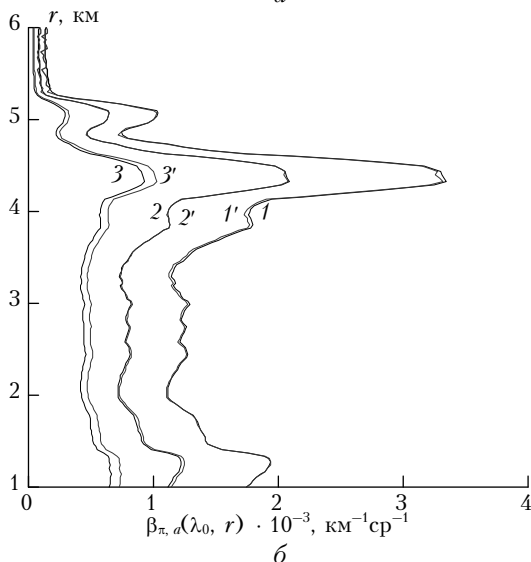
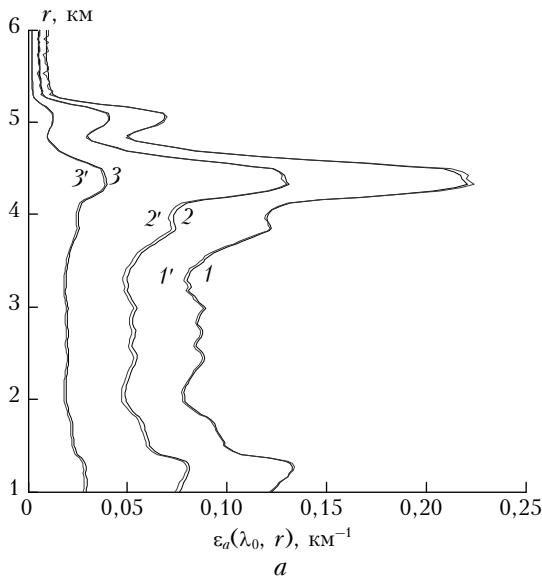


Рис. 3. Результаты восстановления высотных профилей аэрозольных коэффициентов ослабления (а) и обратного рассеяния (б) на длинах волн $\lambda_0 = 0,355$ (1, 1'); 0,532 (2, 2'); 1,064 мкм (3, 3') из сигналов упругого обратного рассеяния моделируемой среды; 1, 2, 3 — фактические профили; 1', 2', 3' — восстановленные профили

Исходными данными для оценки МФП аэрозоля в данном случае служили сигналы упругого обратного рассеяния на длинах волн λ_0 . Профили оптических параметров аэрозоля $\varepsilon_a(\lambda_0, r)$ и $\beta_{\pi,a}(\lambda_0, r)$, полученные в результате решения обратной задачи, достаточно точно воспроизводят их фактические профили. Наибольшая погрешность соответствует результатам восстановления $\beta_{\pi,a}(\lambda_0, r)$ на $\lambda_0 = 1,064$ мкм, что связано с недостаточно точными оценками микроструктуры грубодисперсных частиц.

О преимуществах использования для зондирования аэрозоля каналов приема комбинационного рассеяния, по сравнению с приемом только упруго рассеянного сигнала, можно судить по погрешностям восстановления оптических параметров аэрозоля в том и другом случаях, указанных в табл. 4.

Проведенные численные эксперименты показали, что на базе существующих лидарных систем с Nd:YAG³⁺-лазером в качестве источника излучения можно получать превосходные оценки объемной концентрации и спектра размеров мелкодисперсных частиц аэрозоля (радиусами < 1–2 мкм), а с привлечением каналов регистрации комбинационного рассеяния атмосферным азотом — еще и КПП аэрозольного вещества. Для эффективного определения объемной концентрации грубодисперсных частиц и параметров их распределения по размерам необходимы мощные лазерные источники с длиной волны излучения, сравнимой с размерами таких частиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований по договору № Ф15М-044.

1. *Логинов В.Ф.* Глобальные и региональные изменения климата: Причины и следствия. Минск: ТетраСистемс, 2008. 496 с.
2. *Кондратьев К.Я., Ивлев Л.С., Крапивин В.Ф.* Свойства, процессы образования и последствия воздействий атмосферного аэрозоля: от нано- до глобальных масштабов. СПб.: ВВМ, 2007. 807 с.
3. *Гинзбург А.С., Губанова Д.П., Минашкин В.М.* Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). 2008. Т. LII, № 5. С. 112–119.
4. *Чайковский А.П., Иванов А.П., Балин Ю.С., Ельников А.В., Тулинов Г.Ф., Плюснин И.И., Букин О.А., Чен Б.Б.* Лидарная сеть CIS-LiNet для мониторинга аэрозоля и озона: методология и аппаратура // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 12. С. 1066–1072.
5. *Pappalardo G., Amodeo A., Apituley A., Comeron A., Freudenthaler V., Linné H., Ansmann A., Bösenberg J., D'Amico G., Mattis L., Mona L., Wandinger U., Amiridis V., Alados-Arboledas L., Nicolae D., Wiegner M.* EARLINET: Towards an advanced sustainable European aerosol lidar network // Atmos. Meas. Technol. 2014. V. 7, N 8. P. 2389–2409.
6. *Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A.* AERONET – A federate instrument network and data archive for aerosol characterization // Remote Sens. Environ. 1988. V. 66, N 1. P. 1–16.
7. *Зуев В.Е., Наац И.Э.* Обратные задачи лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1982. 240 с.
8. *Креков Г.М., Кавкянов С.И., Крекова М.М.* Интерпретация сигналов оптического зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 184 с.
9. *Kovalev V.A., Eichinger W.E.* Elastic Lidar: Theory, Practice, and Analysis Methods. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2004. 615 p.
10. *Ершов А.Д., Балин Ю.С., Самойлова С.В.* Обращение лидарных данных при исследовании оптических характеристик слабозамутненной атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15, № 10. С. 894–899.
11. *Самойлова С.В., Балин Ю.С., Коханенко Г.П., Пеннер И.Э.* Исследование вертикального распределения тропосферных аэрозольных слоев по данным многочастотного лидарного зондирования. Часть 1. Методы восстановления оптических параметров // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 4. С. 344–357; *Samoilova S.V., Balin Yu.S., Kokhanenko G.P., Penner I.E.* Investigations of the vertical distribution of troposphere aerosol layers based on the data of multifrequency raman lidar sensing. Part 1. Methods of Optical parameter retrieval // Atmos. Ocean. Opt. 2009. V. 22, N 3. P. 302–315.
12. *Лысенко С.А., Кугейко М.М.* Методика определения концентрации респираторной фракции атмосферного аэрозоля по данным трехчастотного лидарного зондирования // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 2. С. 149–155; *Lysenko S.A., Kugeiko M.M.* Method for the determination of the concentration of the respirable atmospheric aerosol fraction from the data of three-frequency lidar sensing // Atmos. Ocean. Opt. 2010. V. 23, N 3. P. 222–228.
13. *Лысенко С.А., Кугейко М.М.* Восстановление оптических и микрофизических характеристик поствулканического стратосферного аэрозоля из результатов трехчастотного лидарного зондирования // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 4. С. 308–318; *Lysenko S.A., Kugeiko M.M.* Retrieval of optical and microphysical characteristics of postvolcanic stratospheric aerosol from the results of three-frequency lidar sensing // Atmos. Ocean. Opt. 2011. V. 24, N 5. P. 466–477.
14. *Böckmann C., Wandinger U., Ansmann A., Bösenberg J., Amiridis V., Boselli A., Delaval A., De Tomasi F., Frioud M., Grigorov I.V., Hågård A., Horvat M., Iarlori M., Komguem L., Kreipl S., Larcheveque G., Matthias V., Papayannis A., Pappalardo G., Rocadenbosch F., António Rodrigues J., Schneider J., Shcherbakov V., Wiegner M.* Aerosol lidar intercomparison in the framework of the EARLINET project. 2. Aerosol backscatter algorithms // Appl. Opt. 2004. V. 43, N 4. P. 977–989.
15. *Лысенко С.А., Кугейко М.М., Хомич В.В.* Метод определения концентраций аэрозольных фракций в приземном воздухе по данным многочастотного лидарного зондирования // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 3. С. 199–209; *Lysenko S.A., Kugeiko M.M., Khomich V.V.* Technique for determining mass concentrations of aerosol fractions in the surface air from multifrequency lidar sounding data // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 5. P. 455–465.
16. *Лысенко С.А., Кугейко М.М., Хомич В.В.* Многочастотное лидарное зондирование загрязненности атмосферы твердыми частицами с разделением на респираторные фракции // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 1. С. 70–79.
17. *Müller D., Böckmann C., Kolgotin A., Schneidenbach L., Chemyakin E., Rosemann J., Znak P., Romanov A.* Microphysical particle properties derived from inversion algorithms developed in the framework of EARLINET // Atmos. Meas. Technol. Discuss. 2014. V. 8, N 12. P. 12823–12885.
18. *Chaikovskiy A., Ivanov A., Balin Yu., Elnikov A., Tulinov G., Plusnin J., Bukin O., Chen B.* Lidar network CIS-LiNet for monitoring aerosol and ozone in CIS regions // Proc. SPIE. 2006. V. 6160. P. 616035 (9 p.).
19. *Raut J.-C., Chazette P.* Retrieval of aerosol complex refractive index from a synergy between lidar, sunphotometer and in situ measurements during LISAIR experiment // Atmos. Chem. Phys. 2007. V. 7, N 11. P. 2797–2815.
20. *Chaikovskiy A., Dubovik O., Holben B., Bril A., Goloub P., Tanré D., Pappalardo G., Wandinger U., Chaikovskaya L., Denisov S., Grudo Y., Lopatin A., Karol Y., Lapyonok T., Amiridis V., Ansmann A., Apituley A., Allados-Arboledas L., Binietoglou I., Boselli A., D'Amico G., Freudenthaler V., Giles D., Granados-Muñoz M.J., Kokkalis P., Nicolae D., Oshchepkov S., Papayannis A., Perrone M.R., Pietruc-*

- zuk A., Rocadenbosch F., Sicard M., Slutsker I., Talianu C., De Tomasi F., Tsekeri A., Wagner J., Wang X. Lidar-Radiometer Inversion Code (LIRIC) for the retrieval of vertical aerosol properties from combined lidar/radiometer data: Development and distribution in EARLINET // Atmos. Meas. Technol. Discuss. 2015. V. 8, N 12. P. 12759–12822.
21. Biniotoglou I., Basart S., Alados-Arboledas L., Amiridis V., Argyrouli A., Baars H., Baldasano J.M., Balis D., Belegante L., Bravo-Aranda J.A., Burlizzi P., Carrasco V., Chaikovsky A., Comerón A., D'Amico G., Filioglou M., Granados-Muñoz M.J., Guerrero-Rascado J.L., Ilic L., Kokkalis P., Maurizi A., Mona L., Monti F., Muñoz-Porcar C., Nicolae D., Papayannis A., Pappalardo G., Pejanovic G., Pereira S.N., Perrone M.R., Pietruczuk A., Posyniak M., Rocadenbosch F., Rodriguez-Gómez A., Sicard M., Siomos N., Szkop A., Terradellas E., Tsekeri A., Vukovic A., Wandinger U., Wagner J. A methodology for investigating dust model performance using synergistic EARLINET/AERONET dust concentration retrievals // Atmos. Meas. Technol. 2015. V. 8, N 9. P. 3577–3600.
 22. Ansmann A., Wandinger U., Riebesell M., Weitkamp C., Michaelis W. Independent measurement of extinction and backscatter profiles in cirrus clouds by using a combined Raman elastic-backscatter lidar // Appl. Opt. 1992. V. 31, N 33. P. 7113–7131.
 23. Kneizys F.X., Abreu L.W., Anderson G.P., Chetwynd J.H., Shettle E.P., Berk A., Bernstein L.S., Robertson D.C., Acharya P., Rothman L.S., Selby J.E.A., Gallery W.O., Clough S.A. The MODTRAN 2/3 report and LOWTRAN 7 model. North Andover: Ontar Corporation, 1996. 261 p.
 24. Bohren G.F., Huffman D.R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. New York: John Wiley & Sons, 1983. 544 p.
 25. Omar A.H., Winker D., Won J. Aerosol models for the CALIPSO lidar inversion algorithms // Proc. SPIE. 2003. V. 5240. P. 153–164.
 26. Jun L., Daren L. Nonlinear retrieval of atmospheric ozone profile from solar backscatter ultraviolet measurements: Theory and simulation // Adv. Atmos. Sci. 1997. V. 14, N 4. P. 473–480.
 27. Goddard Space Flight Center, AERONET. URL: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>
 28. World Meteorological Organization. World Climate Research Programme: A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation. Switzerland, Geneva. Report WCP-112, WMO/TD-24. 1986. 60 p.
 29. Perrone M.R., Burlizzi P., De Tomasi F., Chaikovsky A. Profiling of fine- and coarse-mode particles with LIRIC (Lidar/Radiometer Inversion Code) // Atmos. Meas. Technol. Discuss. 2014. V. 7, N 8. P. 8881–8926.
 30. Jung J., Lee H., Kim Y.J., Liu X., Zhang Y., Hu M., Sugimoto N. Optical properties of atmospheric aerosols obtained by in situ and remote measurements during 2006 Campaign of Air Quality Research in Beijing (CAREBeijing-2006) // J. Geophys. Res. D. 2009. V. 114, N 2. D00G02 (18 p.).
 31. Lopatin A., Dubovik O., Chaikovsky A., Goloub P., Lapyonok T., Tanre D., Litvinov P. Enhancement of aerosol characterization using synergy of lidar and sun-photometer coincident observations: The GARRLiC algorithm // Atmos. Meas. Technol. 2013. V. 6, N 8. P. 2065–2088.
 32. Biniotoglou I., Chaikovsky A., D'Amico G., Papagianopoulos N., Pappalardo G. A methodology for the retrieval of aerosol volume concentration profiles through the synergy of lidar and photometer // ACCENT-Plus Symposium, Urbino, 17–20 September 2013. URL: http://www.accent-network.org/accent_documents/ext_abs_2013/biniotoglou.pdf.
 33. Fenner W.R., Hyatt H.A., Kellam J.M., Porto S.P.S. Raman cross-section of some simple gases // J. Opt. Soc. Amer. 1973. V. 63, N 1. P. 73–77.
 34. Лысенко С.А., Кузейко М.М. Определение концентрации аэрозольных частиц в вертикальном столбе атмосферы по спутниковым измерениям спектральной оптической толщины // Ж. прикл. спектроскопии. 2011. Т. 78, № 5. С. 793–800.
 35. Лысенко С.А., Кузейко М.М. Восстановление массовой концентрации пыли в промышленных выбросах из результатов оптического зондирования // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 11. С. 960–968; Lysenko S.A., Kugeiko M.M. Retrieval of the mass concentration of dust in industrial emissions from optical sensing data // Atmos. Ocean. Opt. 2012. V. 25, N 1. P. 35–43.
 36. Mishchenko M.I., Cairns B., Hansen J.E., Travis L.D., Burg R., Kaufman Y.J., Martins J.V., Shettle E.P. Monitoring of aerosol forcing of climate from space: Analysis of measurement requirements // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2004. V. 88, N 1–3. P. 149–161.

Lisenko S.A., Kugeiko M.M., Khomich V.V. Multifrequency lidar sensing of atmospheric aerosol under conditions of information uncertainty.

We have proposed a method for solving the inverse problem of multifrequency lidar sensing of the atmospheric aerosol, which enables to retrieve the spatial distribution of volume concentrations of aerosol components, aerosol particle size distribution integrated along the sensing path, and the complex refractive index of the particles, without any additional data for calibration of the lidar and for supplementary definition of the inverse problem. The method is based on the assumption that the average sizes, the variance of sizes, and the complex refractive index of the particles of each aerosol components do not change along the sensing path, and the number of lidar spectral channels is greater than the number of aerosol components. In this case the system of equations for the spectral-temporal readings of lidar signal becomes overdetermined, and its numerical solution allows determining not only the microphysical parameters of aerosol but also lidar calibration constants at operating wavelengths. Examples of processing of elastic and Raman scattering lidar signals of model aerodispersive medium at wavelengths $\lambda_0 = 0.355, 0.532, 1.064 \mu\text{m}$ and $\lambda_R = 0.387, 0.607 \mu\text{m}$, respectively, were presented.

It is shown that microphysical parameters of fine components (with particles size less than 1–2 μm) are retrieved from the signals with an error less than 10%. The error of microphysical parameters of coarse particles retrieval is strongly dependent on the significance of their contribution to the total transmission of the medium. The difference between aerosol extinction and backscatter coefficients calculated on the base of retrieved microphysical aerosol parameters and their actual values are within a few percents.