

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ  
И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.508

**Метод определения концентраций аэрозольных фракций  
в приземном воздухе по данным многочастотного  
лидарного зондирования**

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

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

Поступила в редакцию 24.01.2014 г.

Предложен метод дистанционного определения массовых концентраций аэрозольных частиц размерами  $\leq 1$ ; 2,5; 10 и 30 мкм в приземном воздухе. Метод включает лидарное зондирование атмосферы на длинах волн  $\lambda = 0,355$ ; 0,532; 1,064; 2,13 мкм, восстановление из лидарных сигналов спектрально-пространственных распределений аэрозольного коэффициента ослабления и преобразование их в пространственные распределения концентраций аэрозольных фракций на основе регрессионных соотношений между оптическими и микрофизическими характеристиками аэрозоля. Для повышения точности и устойчивости решения системы лидарных уравнений выбор калибровочных констант и лидарных отношений на длинах волн зондирующего излучения выполняется с учетом мультиколлинеарности спектральных коэффициентов аэрозольного ослабления, выраженной в форме уравнения множественной регрессии. Используемые регрессии получены в рамках оптической модели городского аэрозоля, принятой Всемирной метеорологической организацией, при широкой вариации модельных параметров, характеризующих распределение частиц по размерам и комплексный показатель преломления аэрозольного вещества. Проведены численные эксперименты по лазерному зондированию концентраций аэрозольных фракций в атмосфере, демонстрирующие правомочность предложенного метода.

*Ключевые слова:* городской аэрозоль, респираторные частицы, массовая концентрация, лазерное зондирование, множественные регрессии; urban aerosol, respirable particles, mass concentration, remote laser sounding, multiple regressions.

### **Введение**

Среди неблагоприятных факторов окружающей среды, влияющих на здоровье населения, большое значение имеет загрязнение воздуха взвешенными частицами (аэрозолям). По данным последних исследований [1], примерно 2,1 млн смертей ежегодно происходят из-за увеличения объема мелкодисперсных (респираторных) частиц в воздухе, которые могут проникать глубоко в легкие человека, вызывая рак, сердечно-сосудистые и респираторные заболевания. Согласно американским и европейским стандартам качества атмосферного воздуха, индикаторами респираторных частиц в воздухе являются их массовые концентрации  $PM_{1,0}$ ,  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$ , соответствующие ограничению по верхнему размеру частиц — 1,0; 2,5 и 10 мкм. В странах СНГ уровень загрязненности воздуха аэрозолями количественно характеризуется полной массовой концентрацией аэрозоля.

В настоящее время измерения массовой концентрации аэрозоля и его респираторных фракций,

как правило, выполняют гравиметрическим методом, а также с применением различного рода нефелометров и счетчиков частиц [2–4]. Главный недостаток таких измерений — локальность получаемой информации о степени загрязнения воздуха. Для мониторинга атмосферного воздуха в пределах целого города или региона требуются построение сети автоматизированных станций с выходом всех данных на центральный пульт управления либо использование передвижных экологических лабораторий.

Для исследования пространственно-временной изменчивости аэрозоля наиболее удобными являются лазерно-локационные методы, позволяющие оперативно и дистанционно определять характеристики аэрозоля вдоль горизонтальных и наклонных трасс, а также снимать круговую панораму распределения аэрозоля в воздушном бассейне населенного пункта. Однако из-за нерешенных методических задач, связанных с многопараметрической зависимостью регистрируемых сигналов, данные методы в настоящее время не в полной мере устраивают санитарно-гигиенические службы.

На практике интерпретация данных лидарного зондирования атмосферы, как правило, выполняется с привлечением дополнительной информации, получаемой на основе параллельных радиометрических [5], нефелометрических [6] или микрофизических

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

аэрозольных измерений [7]. При этом комплексный показатель преломления аэрозольного вещества и распределение аэрозольных частиц по размерам, получаемые на основе дополнительных измерений, полагаются неизменными вдоль трассы зондирования. Разумеется, такое предположение может существенно сказываться на точности определения концентрации аэрозоля и его отдельных фракций. Кроме того, большинство существующих лидаров работают в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра, что обуславливает наибольшую чувствительность соответствующих измерений к частицам субмикронного аэрозоля, имеющим размер от 0,1 до 1,0 мкм.

Спектр размеров городского аэрозоля, ввиду многообразия его источников, является значительно более широким и включает также промышленные частицы дисперсионного происхождения размерами от единиц до десятков микрометров [8, 9]. Большие возможности в экологическом мониторинге таких частиц открывают существующие и развивающиеся источники широкополосного когерентного излучения в ИК-области спектра [10]. В связи с этим актуальна разработка методов обработки данных оптического зондирования городских аэрозолей с использованием существующих и перспективных источников излучения, а также получение решений соответствующих обратных задач, устойчивых к погрешностям оптических измерений и к вариациям физико-химических свойств аэрозоля.

Настоящая статья посвящена разработке метода дистанционного определения полной массовой концентрации аэрозоля и концентраций его респирбельных фракций ( $PM_{1,0}$ ,  $PM_{2,5}$ ,  $PM_{10}$ ) в городском воздушном бассейне. Поставленная задача решается на основе данных многоволнового лидарного зондирования атмосферы без привлечения дополнительных оптических и микроструктурных аэрозольных измерений. Обработка лазерно-локационных сигналов выполняется в рамках модели городского аэрозоля, принятой Всемирной метеорологической ассоциацией [11].

## Восстановление профилей аэрозольных коэффициентов ослабления из лидарных сигналов

Дистанционное определение микрофизических параметров аэрозоля по данным многочастотного лидарного зондирования включает восстановление из регистрируемых эхосигналов пространственных распределений оптических параметров аэрозоля на длинах волн зондирующего излучения и решение обратной задачи аэрозольного светорассеяния относительно микроструктуры аэрозоля для каждой точки трассы зондирования. Связь лидарных сигналов  $P(\lambda, r)$  с оптическими параметрами атмосферы описывается хорошо известным уравнением лазерной локации [12, 13]:

$$P(\lambda, r) = A(\lambda) \frac{G(r)}{r^2} [\beta_{\pi, a}(\lambda, r) + \beta_{\pi, m}(\lambda, r)] \times$$

$$\times \exp \left\{ -2 \int_0^r [\varepsilon_a(\lambda, x) + \varepsilon_m(\lambda, x)] dx \right\}, \quad (1)$$

где  $r$  – пространственная координата, отсчитываемая от источника излучения;  $A$  – аппаратная константа;  $G$  – геометрический фактор лидара, характеризующий перекрытие поля зрения приемника и посылаемого лазерного импульса;  $\varepsilon_a$  и  $\beta_{\pi, a}$  – коэффициенты аэрозольного ослабления и обратного рассеяния;  $\varepsilon_m$  и  $\beta_{\pi, m}$  – коэффициенты полного и обратного рассеяния света молекулами воздуха;  $x$  – переменная интегрирования. Характеристики молекулярного рассеяния рассчитываются аналитически в соответствии со значениями давления и температуры воздуха в районе проведения измерений [12, 14]. Для восстановления пространственного профиля аэрозольной оптической характеристики ( $\varepsilon_a$  или  $\beta_{\pi, a}$ ) необходимо, во-первых, определить опорное значение этой характеристики на некотором участке трассы, а во-вторых, задать связь между  $\varepsilon_a$  и  $\beta_{\pi, a}$  – так называемое лидарное отношение  $S_a = \varepsilon_a / \beta_{\pi, a}$  [11]. Рассмотрим эти вопросы последовательно.

В зависимости от имеющейся априорной информации и возможностей ее получения из лидарных сигналов можно восстановить профиль коэффициента ослабления  $\varepsilon_a(r)$  или коэффициента обратного рассеяния  $\beta_{\pi, a}(r)$ . Профиль  $\beta_{\pi, a}(r)$ , как правило, восстанавливают при вертикальном зондировании атмосферы, поскольку тогда можно провести калибровку лидара по сигналам молекулярного рассеяния с больших высот в атмосфере, на которых аэрозоль практически отсутствует [14]. При зондировании же приземных трасс в атмосфере подобная калибровка затрудняется высоким содержанием аэрозоля на всей трассе. В этих условиях для восстановления профиля  $\beta_{\pi, a}(r)$  требуется привлечение дополнительных измерений  $\beta_{\pi, a}$  на зондируемой трассе, что, разумеется, приводит к потере всех основных достоинств лазерно-локационных методов исследования аэрозоля (оперативность и возможность исследования пространственно-временной изменчивости аэрозоля). Кроме того, локальные измерения  $\beta_{\pi, a}$  требуют использования сложной приемно-передающей оптики и высокочувствительных приемников излучения.

Определение  $\varepsilon_a$  на приземной трассе представляет значительно более простую в техническом плане задачу, чем определение  $\beta_{\pi, a}$ . Аэрозольный коэффициент ослабления, являясь интегральной характеристикой аэрозольного светорассеяния, в минимальной степени подвержен влиянию формы и комплексного показателя преломления рассеивающих частиц, что обуславливает преимущество его использования для определения количественного содержания частиц в единице объема воздуха. При наличии на трассе зондирования однородного участка опорное значение  $\varepsilon_a$ , необходимое для калибровки лидара, можно определить по скорости убывания логарифма сигнала  $P(r)r^2$  на этом участке [15]. Проблема здесь заключается в отсутствии надежного метода нахождения такого участка по пространственной структу-

ре лидарного сигнала, поскольку логарифм сигнала  $P(r)r^2$  на коротком участке трассы с монотонным убыванием  $\beta_{\pi,a}$  описывается примерно такой же зависимостью от  $r$ , как и на однородном участке.

При регистрации лидарных сигналов на нескольких длинах волн дополнительным критерием однородности участка может служить соотношение между спектральными значениями  $\varepsilon_a$ . В большинстве случаев значения оптических параметров аэрозоля на длинах волн лидарного зондирования являются линейно зависимыми (мультиколлинеарны) [16–18], т.е. аэрозольный коэффициент ослабления или обратного рассеяния на одной длине волны можно в пределах погрешности его измерений представить в виде линейной комбинации аналогичных коэффициентов для других длин волн. Предположим, что значения  $\varepsilon_a$  на длинах волн лидарного зондирования  $\lambda_i$  удовлетворяют следующему соотношению:

$$\sum_{i=1}^{N_\lambda} a_i \ln \varepsilon_a(\lambda_i) = 0, \quad (2)$$

где  $N_\lambda$  – количество длин волн;  $a_i$  – регрессионные коэффициенты, которые будут получены ниже на основе статистического моделирования  $\varepsilon_a(\lambda_i)$ . Использование в (2) логарифмов  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  обеспечивает одинаковую погрешность аппроксимации статистической связи между коэффициентами  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  во всем диапазоне их возможных значений. С учетом соотношения (2) задачу выделения однородного участка на зондируемой трассе по соответствующему ей лидарному сигналу можно свести к задаче поиска минимума функционала

$$F(I, J) = \sum_{i=1}^{N_\lambda} \frac{1}{J-I+1} \left( \sum_{j=I}^J \frac{1}{\Delta L_{ij}} (L(\lambda_i, r_j) - K_i - 2\bar{\varepsilon}_i r_j) \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^{N_\lambda} a_i \ln(\bar{\varepsilon}_i - \bar{\varepsilon}_{m,i}) \right)^2 \quad (3)$$

с ограничениями

$$v_{i,\min} \leq \frac{\ln[(\bar{\varepsilon}_i - \bar{\varepsilon}_{m,i})/(\bar{\varepsilon}_{i+1} - \bar{\varepsilon}_{m,i+1})]}{\ln(\lambda_{i+1}/\lambda_i)} \leq v_{i,\max}, \quad (4)$$

где  $I, J$  – индексы ближней и дальней границ исследуемого участка трассы  $[r_I, r_J]$ ;  $L(\lambda_i, r_j) = \ln[P(\lambda_i, r_j)r_j^2]$  – анализируемый сигнал;  $\Delta L_{ij} = \ln\left(1 + \frac{P(\lambda_i, r_{\max})}{P(\lambda_i, r_j)\xi_i}\right)$  – абсолютная погрешность измерения  $L(\lambda_i, r_j)$ ,  $r_{\max}$  – максимальная дальность зондирования,  $\xi_i$  – отношение сигнал-шум по уровню сигнала, принимаемого с расстояния  $r_{\max}$ ;  $j$  – номер точки на трассе;  $K_i$  и  $\bar{\varepsilon}_i$  – коэффициенты линейной функции, аппроксимирующей зависимость сигнала от  $r_j$  на участке  $[r_I, r_J]$ ;  $\bar{\varepsilon}_{m,i}$  – среднее значение молекулярного коэффициента ослабления на данном участке;  $[v_{i,\min}, v_{i,\max}]$  – диапазон параметра Ангстрема для

исследуемого типа аэрозоля. Первое слагаемое в (3) характеризует разброс сигналов относительно аппроксимирующей их зависимости  $L(\lambda_i, r_j) = K_i + 2\bar{\varepsilon}_i r_j$ , второе является индикатором соответствия средних значений аэрозольного коэффициента ослабления  $\bar{\varepsilon}_{a,i} = \bar{\varepsilon}_i - \bar{\varepsilon}_{m,i}$  на участке  $[r_I, r_J]$  соотношению их спектральной связи (2). Присутствие в (3) весовых коэффициентов, обратно пропорциональных  $\Delta L_{ij}$ , учитывает уровень случайных помех в сигналах, принимаемых с различных расстояний  $r_j$ .

Что касается лидарных отношений  $S_{a,i}$  на длинах волн зондирующего излучения  $\lambda_i$ , то их, при отсутствии априорной информации о микроструктуре аэрозоля, также можно выбирать исходя из спектральных особенностей восстанавливаемой оптической характеристики аэрозоля [16, 17, 19]. Ниже для этой цели будем использовать множественную регрессию между спектральными коэффициентами  $\varepsilon_a(\lambda_i)$ , описываемую уравнением (2). Необходимость соответствия восстанавливаемых профилей  $\varepsilon_a(\lambda_i, r)$  условию (2) накладывает ограничения на задаваемые значения  $S_{a,i}$ . Очевидно, что они должны обеспечивать минимум следующего функционала:

$$H(S_{a,i}) = \sum_{j=1}^{N_r} \left[ \sum_{i=1}^{N_\lambda} a_i \ln \varepsilon_a^*(\lambda_i, r_j, S_{a,i}) \right]^2, \quad (5)$$

где  $N_r$  – общее количество точек на трассе зондирования;

$$\varepsilon_a^*(\lambda_i, r_j, S_{a,i}) = \frac{Z(\lambda_i, r_j, S_{a,i})}{\frac{2}{1 - V_{ref}^2(\lambda_i, S_{a,i})} \int_{r_0}^{r_j} Z(\lambda_i, x, S_{a,i}) dx - 2 \int_{r_0}^r Z(\lambda_i, x, S_{a,i}) dx - \frac{S_{a,i}}{S_{m,i}} \varepsilon_m(\lambda_i, r_j)} \quad (6)$$

– коэффициент аэрозольного ослабления в точке трассы  $r_j$ , восстановленный из лидарного сигнала  $P(\lambda_i, r)$  при неизменном по трассе лидарном отношении  $S_{a,i}$  [20];  $S_{m,i} = 8\pi/3$  – лидарное отношение для молекул воздуха [12–14];

$$Z(\lambda_i, r_j, S_{a,i}) = P(\lambda_i, r_j) r_j^2 S_{a,i} \times \exp \left[ -2 \int_{r_0}^{r_j} \left( 1 - \frac{S_{a,i}}{S_{m,i}} \right) \varepsilon_m(\lambda_i, r) dr \right] \quad (7)$$

– лидарный сигнал, скорректированный на молекулярное рассеяние света;  $r_0$  – минимальная дальность зондирования;

$$V_{ref}(\lambda_i, S_{a,i}) = \exp \left[ - \left( \bar{\varepsilon}_{a,i} + \frac{S_{a,i}}{S_{m,i}} \bar{\varepsilon}_{m,i} \right) (r_I - r_J) \right] \quad (8)$$

– эффективная прозрачность участка трассы  $[r_I, r_J]$ ;  $\bar{\varepsilon}_{a,i}$  и  $\bar{\varepsilon}_{m,i}$  – средние значения аэрозольного и молекулярного коэффициентов ослабления на этом

участке. В качестве начального приближения для лидарных отношений  $S_{a,i}$  целесообразно использовать их средние значения для исследуемого типа аэрозоля, а поиск минимума функционала (5) выполнять в пределах диапазонов возможных значений  $S_{a,i}$ .

### Восстановление микрофизических характеристик аэрозоля из спектральных значений его коэффициента ослабления

При малом количестве длин волн оптического зондирования обратную задачу аэрозольного светорассеяния удобнее всего решать регрессионным методом [21, 22], основанным на использовании множественных регрессий между оптическими и микрофизическими характеристиками аэрозоля. Эти регрессии получают на основе результатов моделирования оптических характеристик аэрозоля при широких вариациях модельных параметров, характеризующих микроструктуру и комплексный показатель преломления аэрозольных частиц. Важным достоинством такого подхода является возможность высокоскоростной обработки результатов оптических измерений без решения интегральных уравнений Фредгольма и с минимальным набором априорной информации (если реальные значения микрофизических характеристик аэрозоля не выходят за пределы выборки, используемой для получения регрессионного оператора обратной задачи). Однако применение множественной регрессии, в которой участвуют линейно зависимые значения аэрозольного коэффициента ослабления на длинах волн лидарного зондирования, неизбежно приводит к неустойчивому решению обратной задачи, непригодному для практического использования. В этом случае для выделения полезной информации из измеряемых оптических характеристик аэрозоля необходимы методы сжатия данных. Эффективным методом уменьшения размерности исходных данных без потери содержащейся в них информации является метод разложения данных по собственному базису их ковариационной матрицы [23, 24].

Представим спектральные коэффициенты  $\ln \varepsilon_a(\lambda_i)$  в виде вектора  $\mathbf{y} = (y_i)$  ( $i = 1, \dots, N_\lambda$ ). Для уменьшения размерности  $\mathbf{y}$  разложим его по системе ортогональных базисных векторов  $\mathbf{v}_k$  ( $k = 1, \dots, K < N_\lambda$ ) – собственных векторов  $\mathbf{v}_k$  ковариационной матрицы  $\mathbf{y}$ :

$$\mathbf{y} = \langle \mathbf{y} \rangle + \mathbf{G} \cdot \mathbf{h}, \quad (9)$$

где  $\langle \mathbf{y} \rangle$  – вектор, полученный путем усреднения результатов расчета  $\mathbf{y}$  в рамках оптической модели аэрозоля;  $\mathbf{G} = (\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_K)$  – матрица, состоящая из базисных векторов  $\mathbf{v}_k$ ;  $\mathbf{h} = (h_k)$  – линейно независимые коэффициенты разложения, которые с учетом ортогональности матрицы  $\mathbf{G}$  вычисляются как скалярные произведения

$$h_k = \mathbf{v}_k (\mathbf{y} - \langle \mathbf{y} \rangle). \quad (10)$$

Количество собственных векторов  $\mathbf{v}_k$ , используемых для аппроксимации  $\mathbf{y}$ , можно выяснить путем анализа соответствующих им собственных чисел  $\mu_k$ . Каждое собственное число  $\mu_k$  определяет относительный вклад соответствующего ему вектора  $\mathbf{v}_k$  в вариации  $\mathbf{y}$ . Долю суммарной дисперсии  $\mathbf{y}$ , обусловленную собственными векторами  $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_K$ , можно оценить на основе выражения [24]:

$$d_K = \sum_{k=1}^K \mu_k / \sum_{k=1}^{N_\lambda} \mu_k. \quad (11)$$

Использование первых собственных векторов ковариационной матрицы  $\mathbf{y}$ , соответствующих наибольшим собственным числам, позволяет выделить из  $\mathbf{y}$  несколько линейно независимых компонент (ЛНК)  $h_k$ , содержащих в себе практически столько же информации о микрофизических параметрах аэрозоля, сколько ее и было в исходных данных. При этом регрессионные соотношения между концентрациями аэрозольных фракций  $\text{PM}_X$  ( $X$  – ограничение по верхнему диаметру частиц) и  $h_k$  являются устойчивыми к погрешностям измерения  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  и могут с успехом применяться для решения обратной задачи аэрозольного светорассеяния. Будем использовать для этого полиномиальные множественные регрессии:

$$\ln \text{PM}_X = c_{00} + \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N c_{kn} (h_k)^n, \quad (12)$$

где  $c_{00}$  и  $c_{kn}$  – регрессионные коэффициенты, получаемые на основе ансамбля модельных реализаций  $\text{PM}_X$  и  $\varepsilon_a(\lambda_i)$ ;  $N$  – степень полиномов по  $h_k$  (ниже используется  $N = 3$ ).

### Регрессионные соотношения между оптическими и микрофизическими характеристиками городского аэрозоля

Коэффициенты  $\varepsilon_a(\lambda)$  рассчитывались в приближении модели городского аэрозоля [11], принятой Всемирной метеорологической ассоциацией. Модель описывает оптические свойства аэрозоля в виде суперпозиции трех фракций – сажевой, водорастворимой и пылевой. Каждая фракция характеризуется объемной концентрацией, модальным радиусом и полушириной распределения частиц по размерам, а также комплексным показателем преломления аэрозольного вещества. Диапазоны вариаций модельных параметров, используемые при статистическом моделировании оптических параметров аэрозоля, приведены в работе [25]. Расчет  $\varepsilon_a(\lambda)$  выполнялся по известным формулам Ми [26] для  $\lambda = 0,355; 0,440; 0,532; 0,670; 0,870; 1,064; 1,28; 1,56; 1,61; 2,13$  мкм. Рассматриваемые  $\lambda$  находятся в «окнах прозрачности» атмосферы для видимого и ближнего ИК-диапазонов спектра [18]. Длины волн 0,355;

0,523; 1,064 мкм также соответствуют гармоникам Nd:YAG<sup>3+</sup>-лазера, широко используемого в практике оптического зондирования атмосферы. Массовые концентрации РМ<sub>х</sub> рассчитывались на основе объемных концентраций и распределений частиц аэрозольных фракций по размерам с учетом ограничений по верхнему размеру частиц X. В качестве полной массовой концентрации аэрозоля принималась суммарная масса частиц диаметрами ≤ 30 мкм в единице объема воздуха (ниже она обозначается как РМ<sub>30</sub>). Плотность вещества частиц принята в расчетах равной 1,4 г/см<sup>3</sup>.

Смоделированный ансамбль реализаций РМ<sub>х</sub> и  $\varepsilon_a(\lambda)$  позволяет оценить потенциальную точность восстановления РМ<sub>х</sub> из коэффициентов  $\varepsilon_a(\lambda)$ , соответствующих различным  $\lambda$ , и исследовать устойчивость процедуры восстановления РМ<sub>х</sub> к погрешностям измерения  $\varepsilon_a(\lambda)$ . Такой анализ выполняется в следующей последовательности. Для заданного набора  $\lambda_i$  ( $i = 1, \dots, N_\lambda$ ) формируется ансамбль векторов  $y = (\ln \varepsilon_a(\lambda_i))$ , рассчитываются ковариационная матрица вектора  $y$  и ее собственные векторы  $v_k$ . Далее по формуле (10) находят ЛНК  $h_k$  всех реализаций  $y$  и методом наименьших квадратов вычисляют коэффициенты множественных регрессий между  $h_k$  и РМ<sub>х</sub>. Устойчивость полученных регрессий к погрешностям измерения  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  исследуется на основе тестового набора данных, в котором каждая реализация  $y$  получена путем наложения на коэффициенты  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  случайных отклонений в пределах  $\delta\varepsilon_a$ . Далее перебираются все тестовые реализации  $y$  и для каждой из них по формулам (10), (12) определяются концентрации аэрозольных фракций РМ<sub>х</sub><sup>\*</sup>, которые сравниваются с их фактическими значениями РМ<sub>х</sub>, соответствующими рассматриваемой реализации  $y$ . После перебора всех реализаций  $y$  рассчитываются средние по ансамблю погрешности восстановления РМ<sub>х</sub>, в соответствии с которыми выбирается оптимальное количество ЛНК в формуле (12) и оценивается информативность коэффициентов  $\varepsilon(\lambda_i)$ , отвечающих различным  $\lambda_i$ .

Результаты описанного выше анализа позволяют сделать следующие выводы. Спектральные коэффициенты  $\ln \varepsilon_a(\lambda)$ , соответствующие 10 вышеуказанным  $\lambda$ , с высокой точностью описываются тремя собственными векторами ковариационной матрицы  $\ln \varepsilon_a(\lambda)$ . Суммарная дисперсия  $\ln \varepsilon_a(\lambda)$ , приходящаяся на первые три собственных вектора, составляет  $d_3 = 99,998\%$ . Погрешности восстановления РМ<sub>х</sub>, достигаемые с привлечением всего рассматриваемого набора  $\lambda$ :  $\delta\text{PM}_{1,0} = 6,8\%$  (8,5%),  $\delta\text{PM}_{2,5} = 12,4\%$  (13,1%),  $\delta\text{PM}_{10} = 7,1\%$  (7,9%),  $\delta\text{PM}_{30} = 14,2\%$  (15,6%) при  $\delta\varepsilon_a = 1\%$  (10%).

По измерениям  $\varepsilon_a(\lambda)$  на  $\lambda = 0,355; 0,532; 1,064$  мкм с погрешностью  $\delta\varepsilon_a = 1\%$  (10%) концентрации РМ<sub>х</sub> можно определять с погрешностями  $\delta\text{PM}_{1,0} = 9,3\%$  (13,0%),  $\delta\text{PM}_{2,5} = 13,8\%$  (14,2%),  $\delta\text{PM}_{10} = 13,4\%$  (14,7%),  $\delta\text{PM}_{30} = 28,0\%$  (29,3%). Для восстановления РМ<sub>х</sub> в этом случае следует использовать две ЛНК спектральных коэффициентов  $\ln \varepsilon_a(\lambda)$  ( $d_2 = 99,994\%$ ). Привлечение дополнитель-

ных длин волн 0,44; 0,67; 0,87 мкм не сказывается на количестве ЛНК, содержащихся в  $\ln \varepsilon_a(\lambda)$  (остаточная дисперсия при аппроксимации  $\ln \varepsilon_a(\lambda)$  двумя первыми собственными векторами  $v_k$  составляет  $1 - d_2 = 0,0056\%$ ), и не приводит к существенному повышению точности восстановления РМ<sub>х</sub>.

Заметный выигрыш в точности определения массовой концентрации грубодисперсных частиц РМ<sub>10</sub> и РМ<sub>30</sub> можно получить с привлечением данных оптического зондирования атмосферы на  $\lambda > 1,064$  мкм. В коэффициентах  $\varepsilon_a(\lambda)$  на  $\lambda = 0,355; 0,532; 1,064; 2,13$  мкм содержится такое же количество ЛНК ( $d_3 = 99,9998\%$ ), как и в коэффициентах  $\varepsilon_a(\lambda)$  для десяти  $\lambda$  из диапазона  $\lambda = 0,355 - 2,13$  мкм, что свидетельствует о примерно одинаковом информационном содержании этих двух наборов данных. Погрешности восстановления РМ<sub>х</sub> из коэффициентов  $\varepsilon_a(\lambda)$  для  $\lambda = 0,355; 0,532; 1,064; 2,13$  мкм составляют  $\delta\text{PM}_{1,0} = 7,1\%$  (10,0%),  $\delta\text{PM}_{2,5} = 12,6\%$  (13,3%),  $\delta\text{PM}_{10} = 7,2\%$  (8,1%),  $\delta\text{PM}_{30} = 14,3\%$  (15,8%) при  $\delta\varepsilon_a = 1\%$  (10%). Первые три собственных вектора  $v_k$  ковариационной матрицы  $\ln \varepsilon_a(\lambda)$ , соответствующие ее наибольшему собственным числам, приведены в табл. 1. Коэффициенты регрессий между РМ<sub>х</sub> и проекциями  $\ln \varepsilon_a(\lambda)$  на пространство из векторов  $v_k$  указаны в табл. 2. Известные и рассчитанные по формулам (10), (12) концентрации РМ<sub>х</sub> сопоставлены на рис. 1. Коэффициенты корреляции между известными и расчетными значениями РМ<sub>1,0</sub>, РМ<sub>2,5</sub>, РМ<sub>10</sub> и РМ<sub>30</sub> составляют 0,9954; 0,9908; 0,9900; 0,9746 соответственно. Полученные уравнения регрессии позволяют в простом аналитическом виде рассчитывать искомые параметры городского аэрозоля по спектральным значениям его коэффициента ослабления без привлечения априорной информации о комплексном показателе преломления аэрозольного вещества и без применения сложных математических методов решения некорректных обратных задач.

Таблица 1

Средние значения  $\langle y \rangle$  и собственные векторы  $v_k$  ковариационной матрицы  $\ln \varepsilon_a(\lambda)$

$\lambda$ , мкм	$\langle y \rangle$	$v_1$	$v_2$	$v_3$
0,355	-2,7356	0,4999	0,5033	0,5061
0,532	-2,9668	0,5036	0,3574	-0,0962
1,064	-3,5077	-0,5185	0,1165	0,7596
2,130	-4,1689	0,4771	-0,7780	0,3970

Таблица 2

Коэффициенты  $c_{kn}$  уравнений регрессии (12)

$c_{kn}$	РМ <sub>1,0</sub>	РМ <sub>2,5</sub>	РМ <sub>10</sub>	РМ <sub>30</sub>
$c_{00}$	1,6282	2,0149	2,7647	3,3712
$c_{11}$	0,5065	0,5104	0,4956	0,4824
$c_{12}$	-0,0009	-0,0011	-0,0004	-0,0002
$c_{13}$	0,0000	0,0000	-0,0001	-0,0001
$c_{21}$	0,7538	0,4341	-0,6024	-1,0741
$c_{22}$	-0,4720	-0,1746	0,1741	0,1094
$c_{23}$	0,3807	0,1666	0,1673	0,1971
$c_{31}$	-0,4592	0,4996	-0,2807	-1,0243
$c_{32}$	0,2742	1,4576	0,0168	-0,8492
$c_{33}$	1,3107	-2,1047	0,2681	-0,1745

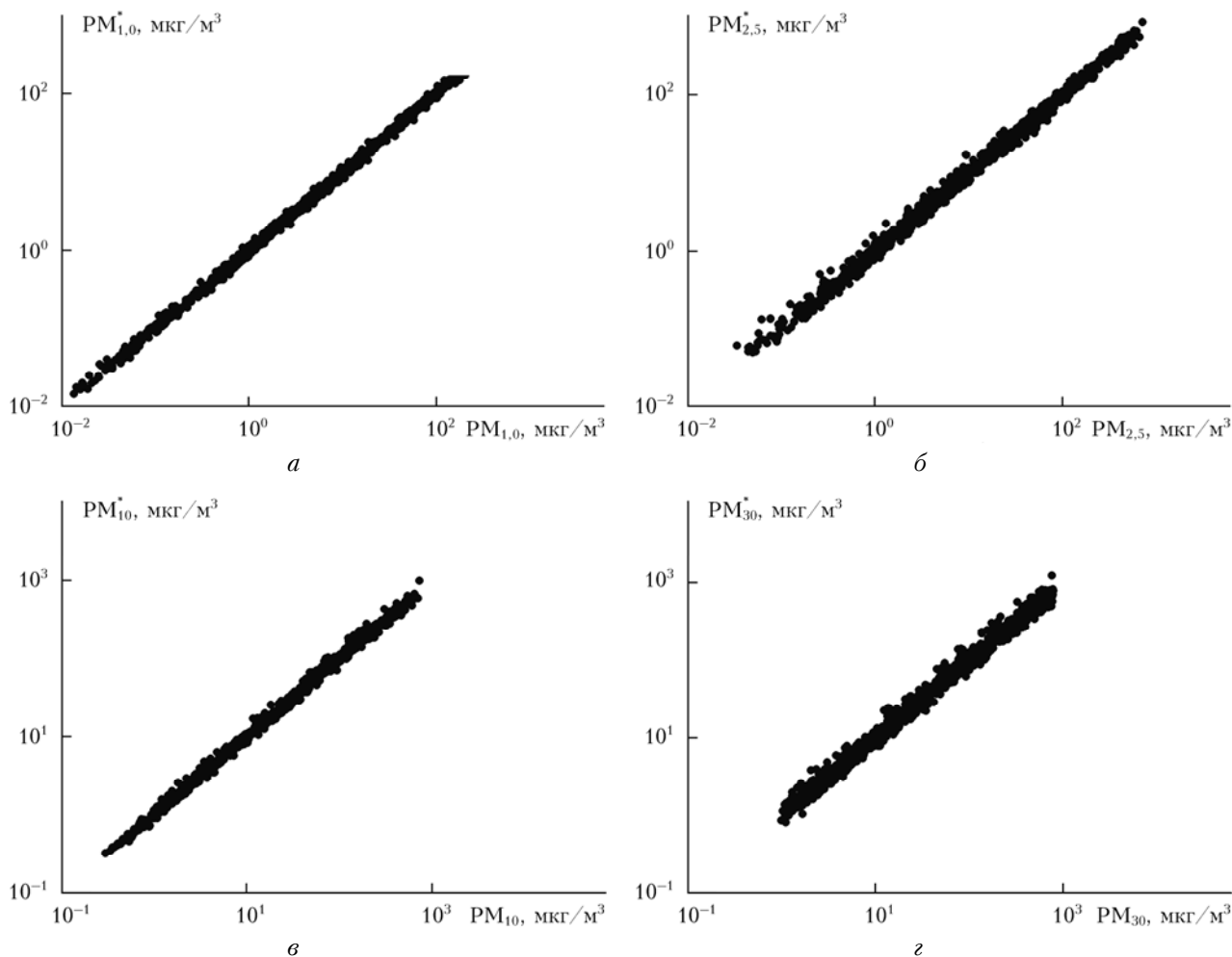


Рис. 1. Сопоставление известных (ось абсцисс) и восстановленных из коэффициентов  $\varepsilon_a(\lambda)$  (ось ординат) концентраций аэрозольных частиц размерами  $\leq 1,0$  (а),  $\leq 2,5$  (б),  $\leq 10$  (в) и  $\leq 30$  мкм (г) для смоделированного ансамбля оптических и микрофизических параметров аэрозоля

Представляет интерес сравнить статистические связи между  $PM_X$  и  $\varepsilon_a(\lambda)$ , получаемые в рамках используемой модели городского аэрозоля, с экспериментальными данными. К настоящему времени получены многочисленные корреляционные связи  $PM_X$  с аэрозольными коэффициентами ослабления  $\varepsilon_a$  и рассеяния  $\beta_a$ . Эти взаимосвязи, как правило, описываются коэффициентами  $H_X(\lambda) = \varepsilon(\lambda)/PM_X$  и  $V_X(\lambda) = \beta(\lambda)/PM_X$ , которые, разумеется, не являются строго детерминированными, а зависят от распределения аэрозольных частиц по размерам и их комплексного показателя преломления. Исследованию  $H_X(\lambda)$  и  $V_X(\lambda)$  в зависимости от региона, времени года, метеопараметров и синоптической обусловленности воздушной массы посвящено большое количество работ. Рассмотрим результаты некоторых из них.

В работе [27] на основе 30 измерений  $\beta_a$  (0,55 мкм) и  $PM_{2,5}$  в городской и сельской местностях для коэффициента  $V_{2,5}$  (0,55 мкм) получен диапазон  $2,0-5,0$  м<sup>2</sup>/г. При этом для сельской местности было зафиксировано два случая с  $V_{2,5}$  (0,55 мкм)  $\sim 10$  м<sup>2</sup>/г. В [28] выявлена связь  $\beta_a$

(0,532 мкм) с  $PM_{2,5}$ , которая при  $V_{2,5}$  (0,532 мкм) =  $4,1$  м<sup>2</sup>/г проявляется с коэффициентом корреляции 0,8. Для районов Пекина  $H_{2,5}$  (0,55 мкм) =  $(3,4 \pm 1,2)$  м<sup>2</sup>/г [29]. Коэффициент корреляции между  $PM_{2,5}$  и  $\varepsilon_a$  (0,55 мкм), согласно данным [30], равен 0,6 и достигается при  $H_{2,5}$  (0,55 мкм) =  $(4,93 \pm 0,69)$  м<sup>2</sup>/г. Все эти данные близки к результатам вышеописанного статистического моделирования, исходя из которых значение  $V_{2,5}$  (0,55 мкм) находится в диапазоне  $2,0-9,9$  м<sup>2</sup>/г, а средние значения  $V_{2,5}$  (0,532 мкм) и  $H_{2,5}$  (0,55 мкм) составляют  $4,0$  и  $5,3$  м<sup>2</sup>/г соответственно.

Согласно экспериментальным данным [31], коэффициент связи между  $\beta_a$  (0,55 мкм) и  $PM_{10}$  для городских аэрозолей изменяется в диапазоне  $0,6-3,2$  м<sup>2</sup>/г, а его среднее значение равняется  $(1,5 \pm 0,5)$  м<sup>2</sup>/г. Для воздуха Пекина с относительно низким содержанием антропогенных частиц ( $PM_{2,5} < 50$  мкг/м<sup>3</sup>) значение коэффициента  $H_{10}$  (0,55 мкм) составляет  $(1,4 \pm 0,9)$  м<sup>2</sup>/г, тогда как для относительно загрязненного воздуха ( $PM_{2,5} > 100$  мкг/м<sup>3</sup>)  $H_{10}$  (0,55 мкм) =  $(3,1 \pm 0,9)$  м<sup>2</sup>/г [29]. По результатам наших модельных расчетов для коэффициента  $H_{10}$  (0,55 мкм)

получен диапазон 0,56–4,41 м<sup>2</sup>/г и среднее значение 1,8 м<sup>2</sup>/г, что с учетом неопределенности плотности аэрозольного вещества (в наших расчетах она принята равной 1,4 г/см<sup>3</sup>) достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Таким образом, статистические связи между оптическими и микрофизическими параметрами аэрозоля, полученные в рамках используемой модели, адекватны свойствам реального аэрозоля и могут с успехом использоваться при обработке данных дистанционного лазерного зондирования атмосферы. При этом уравнения множественных регрессий между РМ<sub>х</sub> и спектральными значениями  $\varepsilon_a(\lambda)$  являются значительно более устойчивыми к вариациям микроструктуры и комплексного показателя преломления аэрозоля, чем коэффициенты  $H_x(\lambda)$ , соответствующие конкретной  $\lambda$ .

Предложенный метод восстановления пространственных профилей  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  из лидарных сигналов предполагает знание соотношения спектральной связи между коэффициентами  $\varepsilon_a(\lambda_i)$ , используемого при выборе однородного участка на трассе зондирования и среднего по трассе лидарного отношения. Для коэффициентов  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  на  $\lambda_1 = 0,355$ ;  $\lambda_2 = 0,532$ ;  $\lambda_3 = 1,064$  и  $\lambda_4 = 2,13$  мкм это соотношение можно представить в форме множественной регрессии:

$$\ln \varepsilon_a(\lambda_2) = 0,59136 \ln \varepsilon_a(\lambda_1) + 0,54320 \ln \varepsilon_a(\lambda_3) - 0,13363 \ln \varepsilon_a(\lambda_4). \quad (13)$$

Значения параметров Ангрстрема  $v_i$ , соответствующие рассматриваемым длинам волн  $\lambda_i$  и  $\lambda_{i+1}$  ( $i = 1, 2, 3$ ), находятся в диапазонах  $v_1 = -0,04$ – $1,32$ ,  $v_2 = -0,03$ – $1,7$ ,  $v_3 = -0,07$ – $2,5$ . Как несложно убедиться, сумма регрессионных коэффициентов перед  $\ln \varepsilon_a(\lambda_i)$  в правой части (13) отличается от единицы лишь в четвертом знаке после запятой, что гарантирует линейную зависимость значений  $\varepsilon_a(\lambda_2)$ , получаемых на основе (13), от количества аэрозольных частиц в единице объема воздуха и свидетельствует о высокой репрезентативности смоделированного ансамбля реализаций  $\varepsilon_a(\lambda_i)$ . Погрешность вычисления  $\varepsilon_a(\lambda_2)$  с использованием соотношения (13) для рассматриваемой области вариаций микрофизических параметров аэрозоля не превышает 7%, а средняя погрешность составляет ~1%.

Для ограничения области определения минимизируемого функционала (5) необходимо задать диапазоны вариаций  $S_{a,i}$ . Исходя из результатов нашего статистического моделирования  $S_{a,i}$ , для городского аэрозоля можно рекомендовать следующие диапазоны:  $S_{a,1} = 24$ – $140$  ср,  $S_{a,2} = 23$ – $135$  ср,  $S_{a,3} = 17$ – $180$  ср,  $S_{a,4} = 41$ – $202$  ср. Средние значения  $S_{a,i}$  составляют 59, 62, 54 и 78 ср для  $\lambda = 0,355$ ; 0,532; 1,064 и 2,13 мкм соответственно.

## Анализ эффективности метода

Описанные выше подходы к определению оптических и микрофизических характеристик аэрозоля,

по данным многочастотного лидарного зондирования, составляют основу метода дистанционного мониторинга загрязненности воздуха аэрозольными фракциями РМ<sub>1,0</sub>, РМ<sub>2,5</sub>, РМ<sub>10</sub> и РМ<sub>30</sub>. Для оценки потенциальных возможностей этого метода выполнен численный эксперимент по лазерному зондированию городского аэрозоля.

В приближении модели [11] задавались микрофизические параметры аэрозоля вдоль трассы зондирования. Профили всех микрофизических параметров являлись гладкими функциями, медленно изменяющимися относительно некоторого среднего значения в пределах  $\pm 5\%$  для параметров распределения частиц по размерам (модального радиуса, ширины распределения) и  $\pm 50\%$  для объемных концентраций сажевых, водорастворимых и пылевых частиц. Профили аэрозольного коэффициента обратного рассеяния  $\beta_{\pi,a}(\lambda_i, r)$  и лидарного отношения  $S_a(\lambda_i, r)$  ( $i = 1, \dots, 4$ ) на длинах волн  $\lambda_1 = 0,355$ ,  $\lambda_2 = 0,532$ ,  $\lambda_3 = 1,064$  и  $\lambda_4 = 2,13$  мкм, рассчитанные по формулам теории Ми [26] в соответствии с заданными микрофизическими параметрами аэрозоля, приведены на рис. 2, а, б. Характеристики молекулярного рассеяния задавались одинаковыми по всей трассе и соответствующими нормальным условиям в атмосфере (давление 1 атм, температура воздуха 15 °С) [14]. Лидарные сигналы рассчитывались по формуле (1) с внесением в расчетные значения  $P(\lambda_i, r)$  случайных помех с уровнем отношения сигнал-шум в конце трассы зондирования  $\xi_1 = 40$ ,  $\xi_2 = 30$ ,  $\xi_3 = 20$ ,  $\xi_4 = 10$ . Различие погрешностей измерения сигналов для различных  $\lambda$  связано с убыванием аэрозольного коэффициента обратного рассеяния и соответствующего ему лидарного сигнала с увеличением  $\lambda$ .

Смоделированные лидарные сигналы изображены на рис. 2, в. Их обработка выполнялась по формулам (3)–(8), (10), (12). На первом этапе проводился поиск участка трассы с наименьшей степенью неоднородности. Результатом такого поиска, отвечающим минимуму функционала (3) для рассматриваемой трассы, является участок  $r = 3,1$ – $3,3$  км. По смоделированным профилям оптических параметров среды (см. рис. 2, а, б) видно, что найденный участок действительно является наиболее подходящим для калибровки лидара. Погрешности определения средних значений  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  на этом участке составляют 7,0, 5,6, 2,6 и 0,8% для  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  и  $\lambda_4$  соответственно. Следует обратить внимание на то, что рассматриваемая трасса включает несколько неоднородных участков, в пределах которых сигналы  $L(\lambda_i, r)$  убывают по линейному закону. При автоматизированном анализе сигналов такие участки могут быть ошибочно приняты за однородные. Однако спектральные значения аэрозольного коэффициента ослабления, определяемые по скорости убывания  $L(\lambda_i, r)$  на этих участках, не удовлетворяют соотношению спектральной связи (2) и ограничениям (4), что автоматически исключает возможность использования данных участков для калибровки лидара.

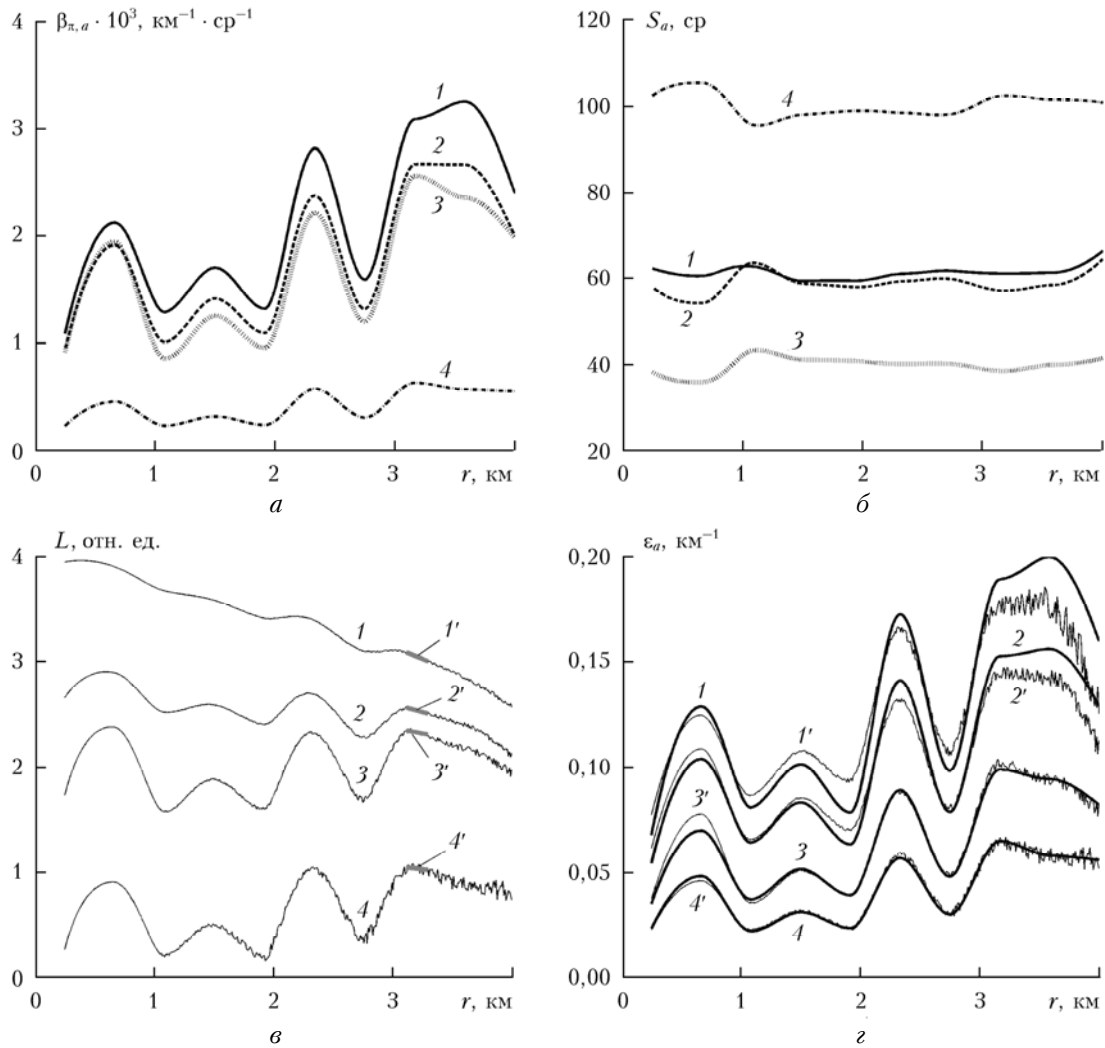


Рис. 2. Результаты численного эксперимента по восстановлению профилей  $\varepsilon_a(\lambda, r)$  из лидарных сигналов на  $\lambda = 0,355$  (1), 0,532 (2), 1,064 (3) и 2,13 мкм (4): профили аэрозольных коэффициентов обратного рассеяния (а); профили лидарных отношений (б); сигналы  $L(\lambda, r) = \ln[P(\lambda, r)r^2]$ , смоделированные для заданных профилей оптических параметров среды, и их линейные аппроксимации на участке трассы с наименьшей степенью неоднородности (1', ..., 4') (в); известные (1, ..., 4) и восстановленные (1', ..., 4') профили  $\varepsilon_a(\lambda, r)$  на указанных выше  $\lambda$  (г)

На втором этапе обработки лидарных сигналов выполняется их обращение относительно профилей  $\varepsilon_a(\lambda_i, r)$ . Из семейства решений лидарного уравнения, получаемых при различных значениях лидарного отношения  $S_{a,i}$ , выбиралось решение, обеспечивающее минимум функционала (5). Профили аэрозольного коэффициента ослабления  $\varepsilon_a(\lambda_i, r)$ , соответствующие анализируемым сигналам, и профили  $\varepsilon_a^*(\lambda_i, r, S_{a,i})$ , отвечающие минимуму функционала (5), сопоставлены на рис. 2, г. Средние по трассе погрешности восстановления  $\varepsilon_a(\lambda_i, r)$  составляют 7,4, 5,3, 3,2 и 3,1% для  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  и  $\lambda_4$  соответственно. Следует отметить, что предложенный критерий выбора значений  $S_{a,i}$  позволяет в значительной степени повысить достоверность восстановления профилей  $\varepsilon_a(\lambda_1, r)$  и  $\varepsilon_a(\lambda_2, r)$  по сравнению с произвольным выбором  $S_{a,i}$  или с заданием средних значений  $S_{a,i}$  для исследуемого типа аэрозоля. Это особенно ощутимо в тех случаях, когда однородный участок среды, используе-

мый для калибровки лидара, располагается в начале трассы зондирования, поскольку решение лидарного уравнения (1) с опорной точкой в начале трассы зондирования является неустойчивым и характеризуется наличием краевого эффекта [20]. Так, при точном задании опорных значений аэрозольного коэффициента ослабления  $\bar{\varepsilon}_{a,i}$  в начальной точке трассы  $r_0$  и при использовании в качестве  $S_{a,i}$  среднего значения лидарного отношения для городского аэрозоля (71 ср) [32] погрешности восстановления рассматриваемых профилей  $\varepsilon_a(\lambda_1, r)$  и  $\varepsilon_a(\lambda_2, r)$  (см. рис. 2) составят соответственно 908 и 13,8%, причем восстановленный профиль  $\varepsilon_a(\lambda_1, r)$  в точке  $r = 3,5$  км уходит в область отрицательных значений. В то же время выбор значений  $S_{a,i}$  на основе предложенного критерия позволяет стабилизировать решение лидарного уравнения (1) и исключить физически абсурдные результаты. Погрешности восстановления  $\varepsilon_a(\lambda_1, r)$  и  $\varepsilon_a(\lambda_2, r)$  в этом случае составят 3,3 и 6,4%



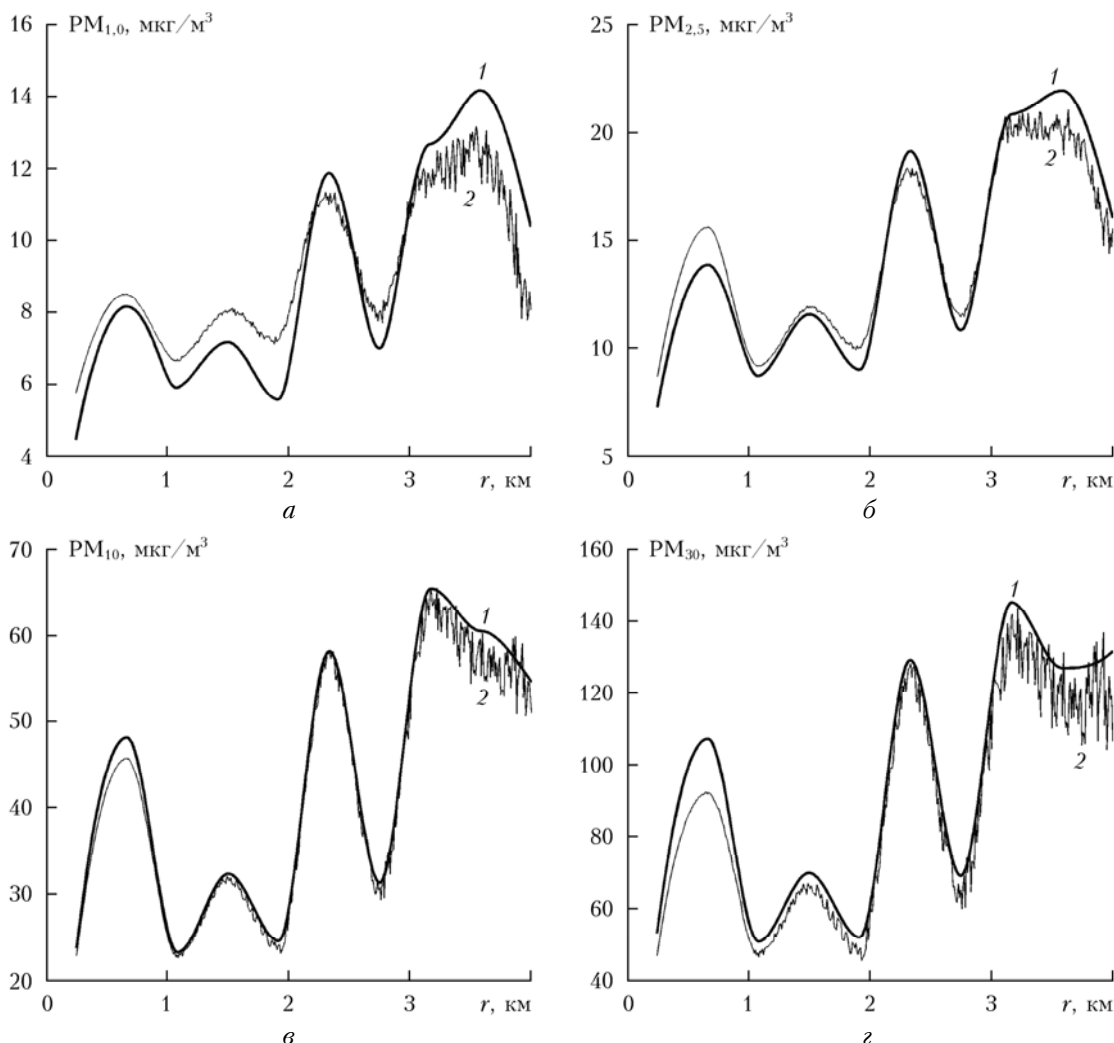


Рис. 3. Сопоставление известных (1) и восстановленных из лидарных сигналов (2) пространственных распределений концентраций аэрозольных частиц размерами  $\leq 1,0$  (а),  $\leq 2,5$  (б),  $\leq 10$  (в) и  $\leq 30$  мкм (г)

соответственно. При этом результаты восстановления профилей  $\varepsilon_a(\lambda_3, r)$  и  $\varepsilon_a(\lambda_4, r)$  практически не зависят от априорно задаваемых значений  $S_{a,i}$ . Это связано с тем, что вклад молекулярного рассеяния в лидарные сигналы на  $\lambda_3$  и  $\lambda_4$  пренебрежимо мал по сравнению с ослаблением света аэрозолем и лидарные отношения  $S_{a,i}$  фактически входят в константу лидара, определяемую путем калибровки. Пространственные вариации  $S_{a,i}$ , несмотря на существенный разброс микроструктуры аэрозоля на рассматриваемой трассе, находятся в пределах 10% (см. рис. 2, б).

Последний этап обработки лидарных сигналов заключается в получении пространственных распределений микрофизических параметров аэрозоля путем преобразования спектральных коэффициентов ослабления для каждой точки трассы по формулам (10), (12). Профили  $PM_X(r)$ , восстановленные из  $\varepsilon_a^*(\lambda_i, r, S_{a,i})$ , изображены на рис. 3. Средние по трассе погрешности восстановления  $PM_{1,0}$ ,  $PM_{2,5}$ ,  $PM_{10}$  и  $PM_{30}$  составляют соответственно 11,1, 6,3, 3,3 и 7,6%.

## Заключение

Таким образом, разработанный метод позволяет с приемлемой для практики точностью определять профили полной массовой концентрации аэрозоля и концентраций всех его респираторных фракций. При этом не требуется проведение сопутствующих измерений оптических и микрофизических параметров аэрозоля на трассе зондирования, что повышает удобство практического использования метода и устраняет необходимость использования предположения об одинаковости коэффициента связи между оптическими и микрофизическими параметрами аэрозоля в точке их измерений и на всей трассе. Предложенные подходы к определению калибровочных констант и выбору лидарных отношений на длинах волн оптического зондирования существенно повышают достоверность и устойчивость решения лидарного уравнения относительно оптических характеристик аэрозоля, а полученные регрессионные соотношения между оптическими и микрофизическими характеристиками аэрозоля позволяют в простом аналитическом

виде рассчитывать пространственные распределения  $PM_{10}$  и оперативно получать карты загрязненности атмосферы.

1. Silva R.A., West J.J., Zhang Y., Anenberg S.C., Lamarque J.F., Shindell D.T., Collins W.J., Dalsoren S., Faluvegi G., Folberth G., Horowitz L.W., Nagashima T., Naik V., Rumbold S., Skeie R., Sudo K., Takemura T., Bergmann D., Cameron-Smith P., Cionni I., Doherty R.M., Eyring V., Josse B., MacKenzie I.A., Plummer D., Righi M., Stevenson D.S., Strode S., Szopa S., Zeng G. Global premature mortality due to anthropogenic outdoor air pollution and the contribution of past climate change // *Environ. Res. Lett.* 2013. V. 8, N 3. P. 034005.
2. Клименко А.П., Королев В.И., Шевцов В.И. Непрерывный контроль концентрации пыли. Киев: Техника, 1980. 181 с.
3. Дудкин Н.И., Адаев И.С. Измерение массовой концентрации аэрозолей // *Мир измерений.* 2007. № 11. С. 37–40.
4. Görner P., Simon X., Bémer D., Lidén G. Workplace aerosol mass concentration measurement using optical particle counters // *J. Environ. Monit.* 2012. V. 14, N 2. P. 420–428.
5. 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.
6. Adam M., Pahlow M., Kovalev V., Ondov J.M., Parlange M.B., Nair N. Aerosol optical characterization by nephelometer and lidar: The Baltimore Supersite experiment during the Canadian forest fire smoke intrusion // *J. Geophys. Res. D.* 2004. V. 109, iss. D16. DOI: 10.1029/2003JD004047.
7. Zavyalov V.V., Marchant C.C., Bingham G.E., Wilkerson T.D., Hatfield J.L., Martin R.S., Silva P.J., Moore K.D., Swasey J., Ahlstrom D.J., Jones T.L. Aglite lidar: Calibration and retrievals of well characterized aerosols from agricultural operations using a three-wavelength elastic lidar // *J. Appl. Remote Sens.* 2009. V. 3, iss. 1. P. 033522-01–033522-21.
8. Илев Л.С., Васильев А.В., Белан Б.Д., Панченко М.В., Терпугова С.А. Оптико-микрофизические модели городских аэрозолей // Третья Междунар. конф. «Естественные и антропогенные аэрозоли»: Сб. трудов. Санкт-Петербург, 24.09–27.09.2001. СПб.: Изд-во НИИХ СПбГУ, 2003. С. 161–170.
9. Хмелевцов С.С., Коршунов В.А., Никитин В.М., Кобелев В.В. Многоволновое и поляризационное лидарное зондирование аэрозольных промышленных выбросов // *Оптика атмосф. и океана.* 2005. Т. 18, № 3. С. 232–237.
10. Креков Г.М., Крекова М.М., Суханов А.Я. Оценка эффективности использования перспективных лидаров белого света для зондирования микрофизических параметров слоистой облачности: 1. Аналитический обзор // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 7. С. 661–670.
11. 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.
12. Зуев В.Е., Кауль В.В., Самохвалов И.В. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. Новосибирск: Наука, 1986. 192 с.
13. Креков Г.М., Кавкянов С.И., Крекова М.М. Интерпретация сигналов оптического зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 184 с.
14. Böckmann C., Wandinger U., Ansmann A., Bosenberg J., Amiridis V., Boselli A., Delaval A., De Tomasi F., Frioud M., Grigorov I.V., Hågård A., Horvat M., Iarlori M., Komquern L., Kreipl S., Larcheveque G., Matthias V., Papayannis A., Pappalardo G., Rocadenbosch F., Antonio 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. Kovalev V.A., Eichinger W.E. Elastic Lidar: Theory, Practice, and Analysis Methods. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2004. 615 p.
16. Лысенко С.А., Кугейко М.М. Методика восстановления высотного распределения массовой концентрации аэрозоля в атмосфере из результатов лидарного зондирования на длинах волн Nd:YAG-лазера // *Оптика и спектроскопия.* 2010. Т. 109, № 6. С. 1212–1220.
17. 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.
18. Лысенко С.А., Кугейко М.М. Восстановление массовой концентрации пыли в промышленных выбросах из результатов оптического зондирования // *Оптика атмосф. и океана.* 2011. Т. 24, № 11. С. 960–968.
19. 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.
20. Kovalev V.A. Stable near-end solution of the lidar equation for clear atmospheres // *Appl. Opt.* 2003. V. 42, N 3. P. 585–591.
21. Кугейко М.М., Лысенко С.А. Лазерная спектрофелометрия аэродисперсных сред. Минск: БГУ, 2012. 208 с.
22. Лысенко С.А., Кугейко М.М. Регрессионный подход к анализу информативности и интерпретации данных аэрозольных оптических измерений // *Журн. прикл. спектроскопии.* 2009. Т. 76, № 6. С. 876–883.
23. Шифрин К.С. Введение в оптику океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 280 с.
24. Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент земной атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 264 с.
25. Лысенко С.А., Кугейко М.М. Нефелометрический метод измерения массовых концентраций городских аэрозолей и их респираторных фракций // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 5. С. 435–442.
26. Bohren G.F., Huffman D.R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. New York: John Wiley & Sons, 1983. 544 p.
27. NAPAP (1991) State of science and technology. The US National Acid Precipitation Assessment Program, Washington, DC. V. III, ch. 24. P. 24–90.
28. Thompson J.E., Hayes P.L., Jimenez J.L., Adachi K., Zhang X., Liu J., Weber R.J., Buseck P.R. Aerosol optical properties at Pasadena, CA during CalNex 2010 // *Atmos. Environ.* 2012. V. 55. P. 190–200.
29. 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 (CARE-Beijing-2006) // *J. Geophys. Res. A.* 2009. V. 114, iss. D2. DOI: 10.1029/2008JD010337.
30. *Trier A., Cabrini N., Ferrer J.* Correlations between urban atmospheric light extinction coefficients and particle mass concentrations // *Atmosfera.* 1997. V. 10, N 3. P. 151–160.
31. *Titos G., Foyo-Moreno I., Lyamani H., Querol X., Alastuey A., Alados-Arboledas L.* Optical properties and chemical composition of aerosol particles at an urban location: An estimation of the aerosol mass scattering and absorption efficiencies // *J. Geophys. Res. A.* 2012. V. 117, iss. D4. DOI: 10.1029/2011JD016671.
32. *Catrrall C., Reagan J., Thome K., Dubovic O.* Variability of aerosol spectral lidar and backscatter and extinction ratio of key aerosol types derived from selected Aerosol Robotic Network locations // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110, iss. D10. DOI: 10.1029/2004JD005124.

*S.A. Lysenko, M.M. Kugeiko, V.V. Khomich.* **Method for determination of mass concentrations of aerosol fractions in ground air from data of multifrequency lidar sounding.**

The method for determination of the mass concentrations of particulate matter smaller than 1.0, 2.5, 10, and 30  $\mu\text{m}$  suspended in ground air was proposed. The method involves remote lidar sounding of the atmosphere at wavelengths  $\lambda = 0.355, 0.532, 1.064, 2.13 \mu\text{m}$ , recovering the spectral-spatial distributions of aerosol extinction coefficient from the lidar signal, and their converting to the spatial distribution of the mass concentrations of aerosol fractions based on regression relations between optical and microphysical characteristics of the aerosol. To improve the accuracy and stability of the solution of system of lidar equations the choice of calibration constants and the lidar ratio at the wavelengths of the sounding radiation is carried out taking into account the multicollinearity of the spectral aerosol extinction coefficients, which is expressed in the form of multiple regression equation. The regressions were obtained in the framework of World Meteorological Organization's optical model of urban aerosol under wide variations in model parameters which characterize the particle size distribution and the complex refractive index of the aerosol matter. The numerical experiments on remote laser sounding of the mass concentration of aerosol fractions in the atmosphere have shown the robustness of the proposed method.