

## Многочастотное лидарное зондирование загрязненности атмосферы твердыми частицами с разделением на респираторные фракции

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

*Белорусский государственный университет  
220023, г. Минск, пр. Независимости, 4, Беларусь*

Поступила в редакцию 14.10.2015 г.

Рассмотрена методология получения пространственных распределений респираторных фракций аэрозоля в нижних слоях атмосферы по данным многочастотного лидарного зондирования без дополнительных измерений оптических и микрофизических параметров аэрозоля на исследуемой трассе. Для этой цели спектральные значения аэрозольного коэффициента ослабления, входящие в лидарные уравнения, предложено заменить линейно-независимыми параметрами их аппроксимации, а пространственные распределения этих параметров восстанавливать путем численного решения системы уравнений, составленных из всех спектрально-временных отсчетов лидарных сигналов. В результате количество неизвестных в решаемой системе уравнений существенно сокращается, а ее матрица оказывается переобусловленной, что можно использовать для выбора физически обоснованных значений аэрозольной индикатрисы обратного рассеяния на рабочих длинах волн лидара. Для определения калибровочных констант лидара используется предположение, что на трассе зондирования присутствуют два участка со схожими профилями аэрозольного коэффициента ослабления. Предложен алгоритм поиска таких участков по спектрально-временной структуре лидарного сигнала. Обратная задача аэрозольного светорассеяния решается на основе устойчивых регрессионных соотношений между концентрациями респираторных фракций аэрозоля и параметрами аппроксимации его спектра ослабления. Путем численных экспериментов по лазерному зондированию аэрозоля показана устойчивость разработанного метода к погрешностям калибровки и пространственным вариациям аэрозольной индикатрисы обратного рассеяния.

*Ключевые слова:* аэрозоль, респираторные частицы, массовая концентрация, лидар, многочастотное зондирование, калибровка, оптические параметры, обратная задача; aerosol, respirable particles, mass concentration, lidar, multifrequency sounding, calibration, optical parameters, inverse problem.

### Введение

В соответствии с действующими международными стандартами по качеству атмосферного воздуха уровень загрязненности воздуха твердыми частицами (аэрозолем) характеризуется массовыми концентрациями частиц диаметрами менее 1,0; 2,5 и 10 мкм –  $PM_{1,0}$ ,  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$  (от англ. Particulate Matter). Согласно данным эпидемиологических и токсикологических исследований [1], повышенное содержание в воздухе этих частиц является одним из факторов риска развития респираторных, сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний.

Эффективное решение задач снижения загрязнения воздуха твердыми частицами и минимизации их влияния на здоровье населения невозможно без развития методов и аппаратных средств мониторинга

атмосферного аэрозоля, отвечающих современным требованиям санитарно-эпидемиологических служб по точности, оперативности и возможности быстрого сбора информации о загрязненности воздуха в различных районах населенного пункта. Потенциально такими возможностями обладают многочастотные лидары [1–4], однако на практике получение пространственных распределений  $PM$  в атмосфере по данным лидарного зондирования осложняется необходимостью проведения дополнительных измерений оптических и микрофизических параметров аэрозоля на зондируемой трассе.

Возможности зондирования  $PM$  в городском воздухе с использованием существующих и перспективных лидарных систем проанализированы нами в работах [5, 6]. В них показано, что при дополнении существующих лидаров на основе Nd:YAG<sup>3+</sup>-лазера еще одним источником излучения с  $\lambda \geq 1,5$  мкм появляется возможность определения массовых концентраций всех респираторных фракций аэрозоля ( $PM_{1,0}$ ,  $PM_{2,5}$ ,  $PM_{10}$ ) с минимальными допущениями об исследуемой среде. Поиск калибровочного

---

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

участка на трассе зондирования (с наименьшей степенью неоднородности) и выбор аэрозольных индикатрис обратного рассеяния на длинах волн зондирующего излучения  $\lambda_i$  в этом случае могут осуществляться исключительно на основе анализа лидарных сигналов с учетом регрессионных соотношений между спектральными коэффициентами аэрозольного ослабления  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  [6].

Для быстрого обращения коэффициентов  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  на зондируемой трассе в пространственные распределения РМ предложено использовать регрессионный подход к решению обратных задач аэрозольного светорассеяния [5–8], основанный на формировании из измеряемых оптических характеристик аэрозоля линейно-независимых величин, связанных устойчивыми регрессионными соотношениями с его микрофизическими параметрами. Соотношения между спектральными коэффициентами  $\varepsilon_a(\lambda_i)$ , а также между РМ и  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  были получены нами на основе статистического моделирования  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  при широкой вариации микрофизических параметров аэрозоля. В отличие от численных методов решения обратных задач, включающих параметризацию распределения частиц по размерам и регуляризацию решения, регрессионный метод, применительно к задачам обращения данных лидарного зондирования, не требует априорной информации о комплексном показателе преломления аэрозольного вещества, более устойчив к погрешностям оптических измерений и позволяет в реальном времени обрабатывать большие объемы экспериментальных данных [5].

Настоящая статья продолжает цикл публикаций авторов, посвященных методам мониторинга загрязненности воздуха твердыми частицами с разделением на фракции РМ<sub>1,0</sub>, РМ<sub>2,5</sub> и РМ<sub>10</sub> [5–7, 9–11]. Основная цель исследований – разработка комплекса методов локального и дистанционного оптического зондирования аэрозольных загрязнений воздуха, позволяющих решать проблему оперативного мониторинга всех реперированных фракций аэрозоля в толще атмосферы, в приземном воздухе населенного пункта, в воздухе рабочих и жилых помещений. Ключевое внимание в настоящей статье будет уделено методу получения распределений РМ на трассах в нижних слоях атмосферы (в которых имеет смысл контролировать вдыхаемые человеком фракции аэрозоля) по данным многочастотного лидарного зондирования без привлечения каких-либо дополнительных измерений оптических и микрофизических параметров аэрозоля на зондируемой трассе.

Для уменьшения влияния информационной неопределенности на результаты обработки лидарных сигналов по-прежнему предполагается использование устойчивых регрессионных соотношений между оптическими и микрофизическими характеристиками аэрозоля, доопределяющих систему лидарных уравнений. Однако, в отличие от предыдущих работ авторов, в настоящей статье предпринята попытка разрешить систему лидарных уравнений не

относительно коэффициентов аэрозольного ослабления  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  на длинах волн лидарного зондирования, а относительно линейно-независимых величин, образованных из этих коэффициентов и тесно коррелированных с концентрациями РМ. Поскольку количество таких величин меньше количества неизвестных спектральных коэффициентов  $\varepsilon_a(\lambda_i)$ , то исходная система уравнений оказывается переобусловленной (количество уравнений больше количества неизвестных), что можно использовать для выбора лидарных соотношений на длинах волн  $\lambda_i$ . Неоднозначность решения устраняется за счет его привязки к опорным значениям оптической толщи протяженного участка трассы зондирования, расположенного между двумя короткими участками с одинаковыми оптическими параметрами. Предлагаемый алгоритм поиска таких участков основан на анализе спектрально-временной структуры сигнала и установленных соотношениях между спектральными коэффициентами аэрозольного ослабления.

## Восстановление оптических и микрофизических параметров аэрозоля из лидарных сигналов

Связь лидарных эхосигналов  $P(\lambda_i, r)$  с оптическими параметрами атмосферы в приближении однократного рассеяния описывается хорошо известным уравнением лазерной локации

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

где  $r$  – пространственная координата, отсчитываемая от источника излучения;  $A$  – аппаратная постоянная, определяемая площадью приемника лидара и пропусканием света его оптическими элементами на рабочих длинах волн  $\lambda_i$  ( $i = 1, \dots, N_\lambda$ );  $\varepsilon_a$  и  $\beta_{\pi,a}$  – коэффициенты аэрозольного ослабления и обратного рассеяния;  $\varepsilon_m$  и  $\beta_{\pi,m}$  – коэффициенты полного и обратного рассеяния света молекулами воздуха, рассчитываемые аналитически в соответствии со значениями температуры и давления воздуха в районе проведения измерений.

Преобразуем (1) в дискретную форму, считая, что в процессе оцифровки лидарного сигнала на каждой длине волны  $\lambda_i$  мы имеем массив равноотстоящих отсчетов  $P(\lambda_i, r_j)$  с шагом  $\Delta r = r_{j+1} - r_j$  ( $j = 1, \dots, N_r$ ). В этом случае уравнение (1) распадается на  $N_\lambda N_r$  уравнений с  $(2N_r + 1)N_\lambda$  неизвестными –  $A(\lambda_i)$ ,  $\varepsilon_a(\lambda_i, r_j)$  и  $\beta_{\pi,a}(\lambda_i, r_j)$ . Очевидно, что решение указанной системы уравнений невозможно без упрощающих допущений, сокращающих число неизвестных. Во-первых, как и в большинстве алгоритмов восстановления профилей оптических параметров аэрозоля [3, 4, 12–14], полагаем постоянство аэрозольной индикатрисы обратного рассеяния  $g_{\pi,a}(\lambda_i) = \beta_{\pi,a}(\lambda_i)/\varepsilon_a(\lambda_i)$  по трассе зондирования.

При зондировании горизонтальных и наклонных трасс в нижних слоях атмосферы такое предположение является вполне уместным, за исключением случаев, когда трасса проходит через аэрозольный шлейф от локального источника горения или от трубы промышленного предприятия. Во-вторых, учтем, что спектральную зависимость аэрозольного коэффициента ослабления в области длин волн, используемых в лазерном зондировании атмосферы, можно описать при помощи небольшого количества параметров. Наиболее точная параметризация спектральных коэффициентов  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  при минимальном количестве свободных параметров достигается с использованием собственных векторов ковариационной матрицы аппроксимируемой функции, образующих ортогональный базис [15, 16]. Учитывая широкий диапазон значений  $\varepsilon_a(\lambda_i)$ , реализуемых в атмосфере, будем использовать логарифмическую параметризацию

$$\ln \varepsilon_a(\lambda_i, r) = \overline{\ln \varepsilon_a(\lambda_i)} + \sum_{k=1}^K h_k(r) \psi_k(\lambda_i), \quad (2)$$

где  $\overline{\ln \varepsilon_a(\lambda_i)}$  – среднестатистическое значение логарифма аэрозольного коэффициента ослабления;  $\psi_k(\lambda_i)$  – собственные векторы ковариационной матрицы  $\varepsilon_a(\lambda_i)$ , состоящие из  $N_\lambda$  компонент;  $K$  – размерность базиса из векторов  $\psi_k$ ;  $h_k(r)$  – параметры, зависящие от конкретной реализации  $\varepsilon_a(\lambda_i, r)$  в точке  $r$  трассы зондирования;  $k = 1, \dots, K$ . Статистические характеристики спектра аэрозольного ослабления –  $\overline{\ln \varepsilon_a(\lambda_i)}$  и  $\psi_k(\lambda_i)$  – можно получить на основе численных расчетов  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  при большом количестве случайных реализаций микрофизических параметров аэрозоля из области их вариаций, соответствующей накопленным к настоящему времени экспериментальным данным.

С учетом сделанных допущений систему лидарных уравнений (1) при их спектральной и пространственной дискретизации представим в следующем виде:

$$\begin{aligned} L_{ij} = \ln[P(\lambda_i, r_j) r_j^2] = \ln A(\lambda_i) + \ln \left[ \beta_{\pi, m}(\lambda_i, r_j) + \right. \\ \left. + g_{\pi, a}(\lambda_i) \exp \left( \overline{\ln \varepsilon_a(\lambda_i)} + \sum_{k=1}^K h_k(r_j) \psi_k(\lambda_i) \right) \right] - \\ - 2 \sum_{l=1}^j \omega_l \left[ \varepsilon_m(\lambda_i, r_l) + \exp \left( \overline{\ln \varepsilon_a(\lambda_i)} + \sum_{k=1}^K h_k(r_l) \psi_k(\lambda_i) \right) \right], \quad (3) \end{aligned}$$

где  $\omega_l$  – коэффициенты квадратурной формулы численного интегрирования;  $h_k(r_l)$  – параметры спектра аэрозольного коэффициента ослабления в точке  $r_l$  трассы зондирования. Система уравнений (3) содержит  $N_r K + 2N_\lambda$  неизвестных величин:  $N_\lambda$  калибровочных констант  $A(\lambda_i)$ ,  $N_\lambda$  индикатрис обратного рассеяния  $g_{\pi, a}(\lambda_i)$  и  $KN_r$  параметров  $h_k(r_l)$ . Поскольку параметры  $h_k$ , будучи проекциями спек-

тра  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  на ортогональный базис, являются линейно независимыми и  $K < N_\lambda \ll N_r$ , то рассматриваемая обратная задача значительно лучше обусловлена, чем задача восстановления профилей  $\varepsilon_a(\lambda_i, r)$  из лидарных сигналов (1). Однако и в том, и в другом случае обратная задача имеет бесконечное множество решений, соответствующих различным константам  $A(\lambda_i)$ . Для нахождения единственного решения системы уравнений (3) ее необходимо доопределить граничными условиями в виде опорных значений  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  на некотором участке трассы зондирования. С учетом используемой параметризации спектра  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  и пространственной дискретизации трассы зондирования будем искать решение системы уравнений (3), подчиняющееся следующим граничным условиям:

$$\tau_{a, i} = \sum_{l=j_1}^{j_2} \omega_l \left[ \exp \left( \overline{\ln \varepsilon_a(\lambda_i)} + \sum_{k=1}^K h_k(r_l) \psi_k(\lambda_i) \right) \right], \quad (4)$$

где  $\tau_{a, i}$  – значения аэрозольной оптической толщины участка трассы зондирования  $[r_{j_1}, r_{j_2}]$  на длинах волн лидара.

Стандартный алгоритм решения переобусловленных систем нелинейных уравнений включает их линеаризацию (путем разложения в ряд Тейлора), приведение системы к нормальному виду (с квадратной матрицей) и последующее уточнение решения по итерационной формуле

$$\mathbf{x}^{(n+1)} = \mathbf{x}^{(n)} + [\mathbf{K}^T(\mathbf{x}^{(n)}) \mathbf{K}(\mathbf{x}^{(n)})]^{-1} \mathbf{K}^T(\mathbf{x}^{(n)}) \mathbf{F}(\mathbf{x}^{(n)}), \quad (5)$$

где  $n$  – номер итерации;

$$\begin{aligned} \mathbf{x} = (h_1(r_1), \dots, h_1(r_{N_r}), \dots, h_K(r_1), \dots, h_K(r_{N_r}), \\ g_{\pi, a}(\lambda_1), \dots, g_{\pi, a}(\lambda_{N_\lambda}), \ln A(\lambda_1), \dots, \ln A(\lambda_{N_\lambda}))^T \end{aligned}$$

– вектор неизвестных;  $\mathbf{F}$  – вектор невязки между левыми и правыми частями линеаризованных уравнений (3) и (4);  $\mathbf{K}$  – матрица, составленная из частных производных от  $L_{ij}$  и  $\tau_{a, i}$  по аргументам  $h_k(r_l)$ ,  $g_{\pi, a}(\lambda_p)$  и  $\ln A(\lambda_p)$  ( $l = 1, \dots, N_r$ ;  $p = 1, \dots, N_\lambda$ ), элементы которой несложно получить в аналитическом виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_{ij}}{\partial h_k(r_l)} = \\ = \begin{cases} \delta_{jl} \frac{g_{\pi, a}(\lambda_i) \varepsilon_a^*(\lambda_i, r_l) \psi_k(\lambda_i)}{\beta_{\pi, m}(\lambda_i, r_l) + g_{\pi, a} \varepsilon_a^*(\lambda_i, r_l)} - 2\omega_l \varepsilon_a^*(\lambda_i, r_l) \psi_k(\lambda_i), & l \leq j; \\ 0, & p > j, \end{cases} \\ \frac{\partial L_{ij}}{\partial g_{\pi, a}(\lambda_p)} = \delta_{ip} \frac{\varepsilon_a^*(\lambda_p, r_j)}{\beta_{\pi, m}(\lambda_p, r_j) + g_{\pi, a}(\lambda_p) \varepsilon_a^*(\lambda_p, r_j)}, \\ \frac{\partial L_{ij}}{\partial \ln A(\lambda_p)} = \delta_{ip}, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \tau_{a,i}}{\partial h_k(r_l)} = \begin{cases} \omega_l \varepsilon_a^*(\lambda_i, r_l) \psi_k(\lambda_i), & j_1 \leq l \leq j_2; \\ 0, & l < j_1 \text{ или } l > j_2, \end{cases}$$

где  $\delta_{ip}$  и  $\delta_{jl}$  – символ Кронекера;  $\varepsilon_a^*(\lambda_i, r_l)$  – оценка аэрозольного коэффициента ослабления в точке  $r_l$ , получаемая по формуле (2).

На каждой итерации вышеописанного алгоритма необходимо решать систему линейных алгебраических уравнений с сильно разреженной матрицей  $\mathbf{K}^T \mathbf{K}$  большой размерности  $KN_r + 2N_\lambda$ . При решении подобных задач хорошо себя зарекомендовали метод сопряженных градиентов или его аналог для случая несимметричных матриц – метод бисопряженных градиентов [17], который и используется нами ниже в численных экспериментах по восстановлению оптических параметров аэрозоля из лидарных сигналов. Итерационный процесс завершается, когда норма вектора невязки выходит на стационарное значение и ее изменение на соседних итерациях не превышает некоторую заранее заданную малую величину.

При необходимости профили параметров  $h_k(r_p)$  ( $k = 1, \dots, K$ ), восстановленные из лидарных сигналов, можно легко пересчитать в профили  $\varepsilon_a(\lambda_i, r)$  на основе аппроксимации (2). Что касается параметров микроструктуры аэрозоля (PM), то для их определения не требуется знать спектральную зависимость  $\varepsilon_a(\lambda_i)$ , достаточно информации о параметрах ее аппроксимации  $h_k$ , поскольку они связаны с концентрациями PM устойчивыми регрессионными соотношениями вида [5, 6]:

$$\ln \text{PM} = c_{00} + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M c_{km} (h_k)^m, \quad (6)$$

где  $c_{00}$  и  $c_{km}$  – коэффициенты полиномиальных регрессий, которые предварительно получают в рамках оптической модели аэрозоля с варьируемыми параметрами распределения частиц по размерам и спектра комплексного показателя преломления аэрозольного вещества;  $M$  – степень полиномов.

Сравнение статистических связей между оптическими и микроструктурными параметрами городского аэрозоля, полученных нами в модельном приближении, с независимыми расчетными и экспериментальными данными [6, 7, 11] позволяет говорить о возможности использования соотношений (6) как для сельской местности, так и для регионов с высоким содержанием антропогенных частиц. Очевидными преимуществами такого подхода к определению параметров микроструктуры аэрозоля по сравнению с численными методами решения обратных задач аэрозольного светорассеяния являются возможность быстрой обработки большого массива данных, соответствующего различным точкам трассы зондирования, отсутствие необходимости использования априорной информации о комплексном показателе преломления аэрозольных частиц и допущений о принадлежности решения к определенному виду распределения по размерам.

## Калибровка многочастотного лидара

Как было отмечено выше, для устранения неоднозначности решения системы лидарных уравнений (3) требуется априорная информация о коэффициенте аэрозольного ослабления на некотором участке трассы зондирования, которую, как правило, получают на основе дополнительных измерений [18–20]. При наличии на трассе зондирования однородного участка опорное значение  $\varepsilon_a$  можно определить без сопутствующих измерений по скорости убывания логарифма сигнала  $P(r)r^2$  на этом участке [4, 6]. Однако оптическая толщина такого участка должна быть достаточной для заметного изменения на нем лидарного сигнала на фоне погрешности его измерений. Для атмосферных ситуаций, характеризующихся малым содержанием аэрозоля в атмосфере, а также при зондировании атмосферы в ближней ИК-области спектра такой однородный участок трассы должен быть достаточно протяженным, что далеко не всегда выполнимо в действительности. В связи с этим рассмотрим альтернативный подход к калибровке многочастотного лидара в условиях априорной неопределенности, основанный на определении опорных значений оптической толщи протяженного неоднородного участка трассы на рабочих длинах волн лидара.

Предлагаемый метод калибровки лидара предполагает, что на трассе зондирования присутствуют два участка (в общем случае неоднородных) с одинаковыми оптическими параметрами. Обозначим эти участки как  $[r_1, r_2]$  и  $[r_3, r_4]$ , а их прозрачности как  $T(r_1, r_2)$  и  $T(r_3, r_4)$ . Введя коэффициент ослабления  $\varepsilon$  и индикатрису обратного рассеяния  $g_\pi$  элементарного объема атмосферы в виде

$$\varepsilon(r) = \varepsilon_a(r) + \varepsilon_m(r)$$

и

$$g_\pi = (\beta_{\pi,a}(r) + \beta_{\pi,m}(r)) / \varepsilon(r),$$

из (1) несложно получить выражение для нормированного лидарного сигнала, принимаемого с одного из рассматриваемых участков:

$$\frac{P_i(r)r^2}{\int_{r_1}^{r_2} P_i(x)x^2 dx} = \frac{A_i \varepsilon_i(r) g_{\pi,i} T_i^2(r_0, r)}{0,5 A_i g_{\pi,i} T_i^2(r_0, r_1) [1 - T_i^2(r_1, r_2)]} = \frac{2 \varepsilon_i(r) T_i^2(r_1, r)}{1 - T_i^2(r_1, r_2)}, \quad (7)$$

где индекс  $i$  относится к длине волны зондирующего излучения. Из выражения (7) видно, что эхосигнал от точек трассы  $r \in [r_1, r_2]$ , нормированный на интегральный сигнал от всего участка  $[r_1, r_2]$ , зависит только от профиля коэффициента ослабления на этом участке. Таким образом, о близости профилей  $\varepsilon(r)$  на участках  $[r_1, r_2]$  и  $[r_3, r_4]$  можно судить по соответствующим им нормированным сигналам (7). При наличии на трассе зондирования

двух участков с одинаковыми коэффициентами ослабления и геометрическими протяженностями аэрозольную оптическую толщину участка трассы  $[r_1, r_3]$ , необходимую для калибровки лидара, можно определить на основе очевидного выражения

$$\begin{aligned} \tau_{a,i}(r_1, r_3) = \\ = \frac{1}{2} \ln \left( \int_{r_1}^{r_2} P_i(x) x^2 dx / \int_{r_3}^{r_4} P_i(x) x^2 dx \right) - \tau_{m,i}(r_1, r_3), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\tau_{m,i}$  — оптическая толщина участка  $[r_1, r_3]$ , обусловленная рассеянием света молекулами воздуха.

Для повышения достоверности оценок  $\tau_{a,i}(r_1, r_3)$  воспользуемся свойством мультиколлинеарности значений аэрозольного коэффициента ослабления на длинах волн лидарного зондирования [6], которое выразим в форме уравнения множественной регрессии

$$\sum_{i=1}^{N_i} a_i \ln \varepsilon_a(\lambda_i) = 0, \quad (9)$$

где  $a_i$  — регрессионные коэффициенты. Использование в (9) логарифмов позволяет обеспечить одинаковую погрешность аппроксимации статистической связи между коэффициентами  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  во всем диапазоне их возможных значений, охватывающем несколько порядков. При этом для получения безразмерной величины в левой части уравнения коэффициенты  $a_i$  в сумме должны давать нуль, что гарантирует независимость связи (9) от общей концентрации аэрозольных частиц. Как показано в [6], при репрезентативной выборке  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  выполнение этого условия достигается автоматически.

С учетом вышесказанного предлагаемый алгоритм поиска на трассе зондирования двух равных по длине участков с наиболее близкими профилями коэффициента ослабления заключается в выборе трех точек трассы (с порядковыми номерами  $j_1, j_2, j_3$ ), минимизирующих следующую целевую функцию:

$$\begin{aligned} G(j_1, j_2, j_3) = \sum_{i=1}^{N_i} \frac{1}{j_2 - j_1 + 1} \times \\ \times \sum_{k=j_1}^{j_2} \left( \frac{P_i(r_k) r_k^2}{\sum_{j=j_1}^{j_2} \omega_j P_i(r_j) r_j^2} - \frac{P_i(r_{k+j_3-j_1}) r_{k+j_3-j_1}^2}{\sum_{j=j_3}^{j_3+j_2-j_1} \omega_j P_i(r_j) r_j^2} \right)^2 + \\ + \left( \sum_{i=1}^{N_i} a_i \ln \left( \frac{\tau_{a,i}^*}{r_3 - r_1} \right) \right)^2, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $j_1$  и  $j_2$  — индексы ближней и дальней по отношению к лидару границ участка  $[r_1, r_2]$ ,  $j_3$  и  $j_3 + j_2 - j_1$  — то же самое для участка  $[r_3, r_4]$ ;  $\omega_j$  — квадратурные коэффициенты;  $\tau_{a,i}^*$  — оценка  $\tau_{a,i}(r_1, r_3)$  по формуле (8). Первое слагаемое в (10) — это среднеквадратическое отклонение нормированных сигналов (7) для двух участков трассы, а второе

отвечает за соответствие средних значений  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  на калибровочном участке трассы соотношению (9).

## Анализ эффективности решения обратных задач многочастотного лидарного зондирования аэрозоля

Представленные выше подходы к калибровке многочастотного лидара, к решению системы лидарных уравнений для длин волн зондирующего излучения и обратной задачи аэрозольного светорассеяния составляют основу нового метода восстановления пространственных профилей аэрозольного коэффициента ослабления и концентраций респираторных фракций аэрозоля по данным лидарного зондирования. Для возможности его практической реализации необходимо предварительно получить статистические характеристики коэффициентов  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  на длинах волн используемого лидара —  $\overline{\ln \varepsilon_a(\lambda_i)}$  и  $\psi_k(\lambda_i)$ , а также уравнения множественной регрессии (6) и (9). Рассмотрим в качестве примера систему, выполняющую лазерное зондирование атмосферы на длинах волн  $\lambda_1 = 0,355$ ,  $\lambda_2 = 0,532$ ,  $\lambda_3 = 1,064$  и  $\lambda_4 = 1,5$  мкм. Первые три длины волны соответствуют гармоникам Nd:YAG-лазера, являющегося основным источником излучения в современных лидарах [18, 21]. Выбор четвертой длины волны продиктован необходимостью определения концентрации  $PM_{10}$  и возможностью практической реализации соответствующих измерений. Известно, что смещение длины волны зондирующего излучения в ИК-область спектра позволяет получать более достоверные оценки концентрации крупных аэрозольных частиц [22]. Наибольшей эффективности зондирования таких частиц можно достичь с использованием излучения с длиной волны 2,13 мкм [6, 22], попадающей в окно прозрачности атмосферы [22, 23]. К сожалению, примеры подобных лидаров в литературе пока не встречаются, в отличие от лидаров, работающих на  $\lambda = 1,5$  мкм [24, 25]. Однако при этом следует иметь в виду, что излучение с  $\lambda = 1,5$  мкм частично поглощается водяным паром, содержащимся в атмосфере. Для лидаров [24, 25], позволяющих проводить зондирование атмосферного аэрозоля на расстояниях до 3–5 км, оптическое пропускание водяного пара при абсолютной влажности воздуха 12 г/м<sup>3</sup> и нормальных условиях (давление 1 атм, температура воздуха 15°C) будет ~0,847–0,905, что необходимо учитывать при анализе лидарных сигналов.

В качестве исходных данных для получения статистических характеристик спектра аэрозольного коэффициента ослабления использовались результаты его моделирования. Модель городского аэрозоля, используемая для получения статистик  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  и  $PM$ , детально описана в работе [11]. Сравнение этой модели с экспериментальными данными, проведенное в [6, 11], показывает ее адекватность свойствам реального аэрозоля. Коэффициенты уравнения регрессии (9), полученные на основе

модельных реализаций  $\varepsilon_a(\lambda_i)$ , имеют следующие значения:  $a_1 = -0,5168$ ,  $a_2 = 1,0$ ,  $a_3 = -0,9554$ ,  $a_4 = 0,4724$ . На основе смоделированного ансамбля  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  также рассчитан средний спектральный ход  $\ln \varepsilon_a(\lambda_i)$  (табл. 1) и его спектральная ковариационная матрица.

Таблица 1

Статистические характеристики спектрального коэффициента аэрозольного ослабления

$\lambda_i$ , мкм	$\overline{\ln \varepsilon_a(\lambda_i)}$	$\psi_1(\lambda_i)$	$\psi_2(\lambda_i)$	$\psi_3(\lambda_i)$
0,355	-2,7381	0,4988	0,5016	0,5023
0,532	-2,9872	0,5822	0,3620	-0,2704
1,064	-3,5496	-0,5456	0,4417	0,5494
1,500	-3,8515	0,3385	-0,6499	0,6105

Первые три собственных вектора  $\psi_k(\lambda_i)$  этой матрицы (табл. 1) образуют ортогональный базис, позволяющий построить аппроксимацию функции  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  с погрешностью, не превышающей 2% во всем диапазоне вариаций микрофизических параметров городского аэрозоля. Ради сравнения следует заметить, что широко используемая на практике формула Ангстрема [26] обеспечивает аппроксимацию  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  для того же ансамбля данных с погрешностью 12,5%. Коэффициенты выражения (6), связывающего концентрации РМ с параметрами аппроксима-

ции спектральной зависимости  $\varepsilon_a(\lambda_i)$ , приведены в табл. 2. Средние погрешности восстановления РМ по формулам регрессии (6) в условиях априорной неопределенности микрофизических параметров городского аэрозоля составляют  $\delta \text{PM}_{1,0} = 8\%$ ,  $\delta \text{PM}_{2,5} = 14\%$  и  $\text{PM}_{10} = 11\%$ .

Таблица 2

Коэффициенты уравнений регрессии (6)

$c_{kn}$	$\text{PM}_{1,0}$ , мкг/м <sup>3</sup>	$\text{PM}_{2,5}$ , мкг/м <sup>3</sup>	$\text{PM}_{10}$ , мкг/м <sup>3</sup>
$c_{00}$	1,5991	1,9604	2,7462
$c_{11}$	0,5054	0,5073	0,4986
$c_{12}$	$-3,3 \cdot 10^{-4}$	$-6,0 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$
$c_{13}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$-1,1 \cdot 10^{-4}$
$c_{21}$	0,8478	0,4459	-0,9568
$c_{22}$	-0,6512	-0,1355	0,2838
$c_{23}$	0,8385	0,3440	0,5030
$c_{31}$	0,7440	1,4605	-1,0950
$c_{32}$	-1,2422	-2,2354	-11,1998
$c_{33}$	2,1830	4,1454	35,5367

Об эффективности обработки лидарных сигналов методами, учитывающими статистические связи между оптическими и микрофизическими параметрами аэрозоля, можно судить по результатам замкнутого численного эксперимента, представленным на рис. 1 и 2.

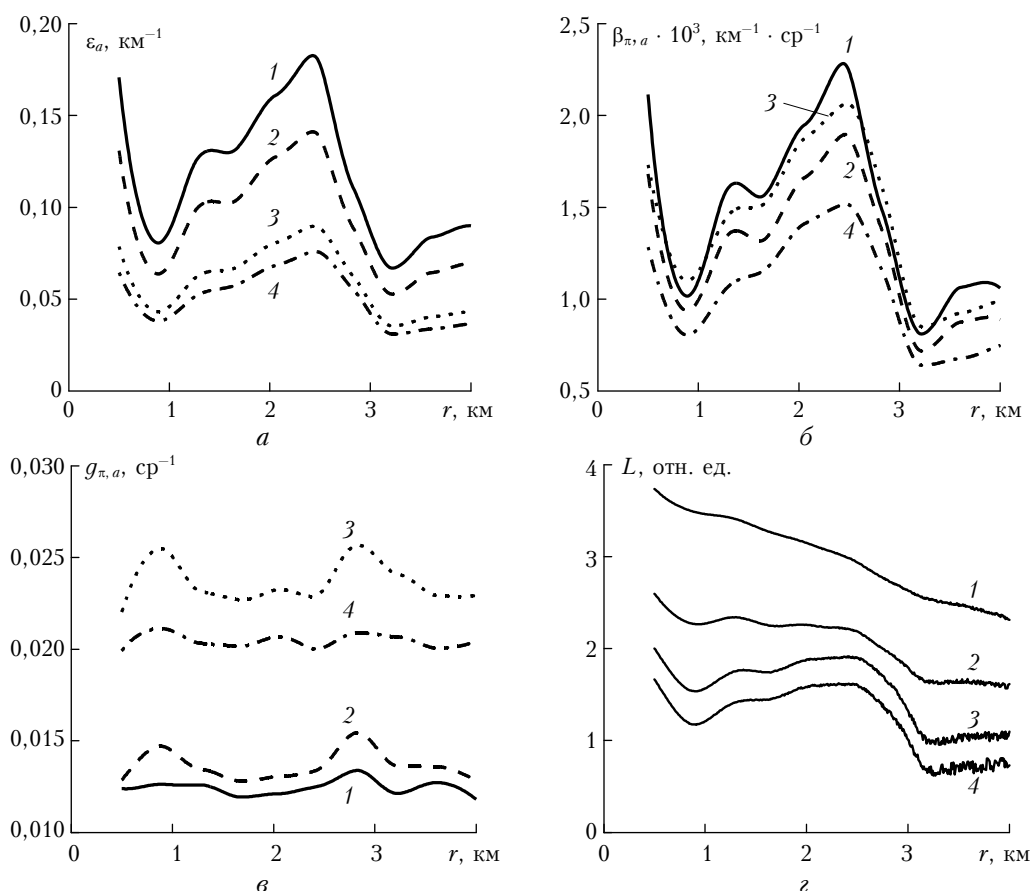


Рис. 1. Профили оптических параметров модельной среды – коэффициентов ослабления (а), коэффициентов обратного рассеяния (б), индикатрисы обратного рассеяния (в) – и соответствующие им лидарные сигналы  $L(\lambda, r) = \ln[P(\lambda, r)r^2]$  (г) на  $\lambda = 0,355$  (1); 0,532 (2); 1,064 (3) и 1,5 мкм (4)

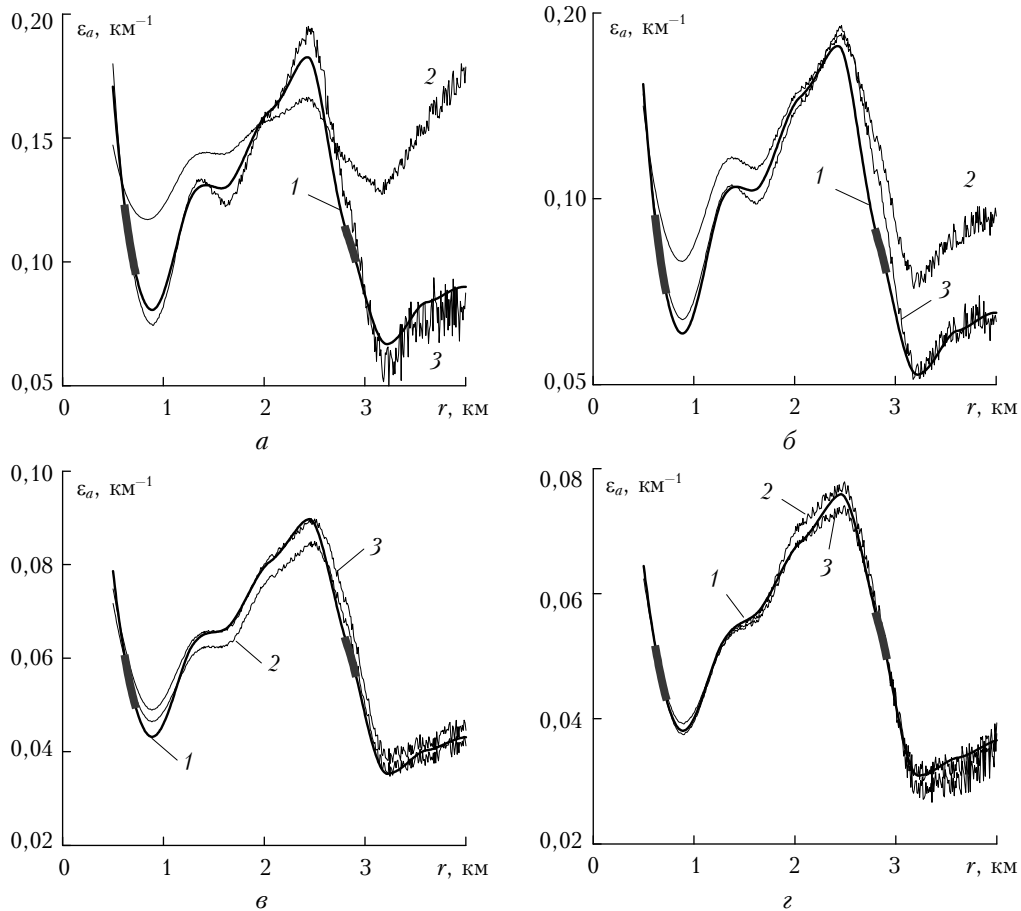


Рис. 2. Результаты восстановления профилей  $\varepsilon_a(\lambda, r)$  на  $\lambda = 0,355$  (а);  $0,532$  (б);  $1,064$  (в) и  $1,5$  мкм (г) из лидарных сигналов: 1 – заданные профили; 2 и 3 – профили, восстановленные аналитическим и численным методами соответственно

Профили параметров микроструктуры моделируемой среды задавались в виде функций, медленно меняющихся по трассе зондирования в некоторых пределах относительно своих средних значений. Для объемных концентраций аэрозольных компонентов (сажевого, водорастворимого и пылевого) выбран 50%-й разброс по трассе. Для параметров распределения частиц по размерам (модальные радиусы и полуширины распределений) этот разброс составлял 5%. Комплексные показатели преломления аэрозольных компонентов брались в соответствии с моделью городского аэрозоля, принятой Всемирной метеорологической ассоциацией [27]. При заданных профилях микрофизических параметров моделируемой среды ее оптические параметры рассчитывались по формулам теории Ми [28]. Характеристики молекулярного рассеяния среды соответствовали нормальным условиям в атмосфере [14]. Расчет лидарных сигналов выполнялся по формуле (1). В сигналы искусственно вносились случайные возмущения с эквивалентными им отношениями сигнал-шум в конце трассы зондирования 50, 33, 17 и 12 для  $\lambda = 0,355, 0,532, 1,064$  и  $1,5$  мкм соответственно. Различие уровней шума в сигналах для указанных  $\lambda$  связано с предположением, что мощность излучения, посылаемого в атмосферу, одинакова для всех  $\lambda$ , а коэффициент

обратного рассеяния атмосферы убывает с ростом  $\lambda$  по закону Ангстрема, как  $\lambda^{-\nu}$  с параметром  $\nu = 1,0$ .

Обработка лидарных сигналов выполнялась в три этапа. На первом этапе сигналы анализировались на предмет наличия на трассе зондирования двух участков с одинаковыми оптическими параметрами. Участки трассы  $[r_1, r_2]$  и  $[r_3, r_4]$ , граничные точки которых обеспечивают минимум функционала (10), выделены на профилях  $\varepsilon_a(\lambda_i, r)$  жирными линиями (рис. 2). Несложно убедиться, что выделенные участки действительно обладают близкими значениями  $\varepsilon_a$ . Оптические толщи опорного участка трассы  $[r_1, r_3]$ , полученные на основе выражения (8), отличаются от их истинных значений для  $\lambda = 0,355, 0,532, 1,064$  и  $1,5$  мкм на 2, 4, 8 и 5% соответственно. Таким образом, для трасс в атмосфере, включающих в себя хотя бы два участка со схожим поведением функций  $\varepsilon_a(\lambda_i, r)$ , предложенный метод позволяет достаточно надежно определять калибровочные значения оптической характеристики аэрозоля, восстанавливаемой из данных многочастотного лидарного зондирования.

Второй этап обработки лидарных сигналов включает численное решение системы уравнений (3), дополненных граничными условиями (4), по итерационной формуле (5). Результатом решения являются пространственные профили параметров  $h_k$

( $k = 1, 2, 3$ ), описывающих спектральный ход  $\varepsilon_a$ . Профили  $\varepsilon_a(\lambda_i, r)$ , рассчитанные по аппроксимационной формуле (2), представлены на рис. 2. Средние по трассе отличия восстановленных профилей  $\varepsilon_a(\lambda_i, r)$  от истинных составляют 5,3; 5,1; 5,8 и 2,2% для  $\lambda_i = 0,355; 0,532; 1,064$  и  $1,5$  мкм соответственно. Для сравнения на этом же рисунке представлены результаты восстановления  $\varepsilon_a(\lambda_i, r)$  методом, предложенным в нашей более ранней работе [6], где для устранения произвола в выборе средних по трассе зондирования индикатрис обратного рассеяния  $g_{\pi,a}(\lambda_i)$  предложено учитывать мультиколлинеарность спектральных коэффициентов  $\varepsilon_a(\lambda_i)$ , а в качестве оптимальных значений  $g_{\pi,a}(\lambda_i)$  выбирать те, которые обеспечивают наилучшее соответствие восстановленных профилей  $\varepsilon_a(\lambda_i, r)$  регрессионному соотношению между  $\varepsilon_a(\lambda_i)$ . При заданных значениях  $g_{\pi,a}(\lambda_i)$  лидарные уравнения (1) для каждой длины волны  $\lambda_i$  решаются аналитически независимо друг от друга. Константы, входящие в общее решение уравнений (1), в данном случае определялись на основе найденной ранее оптической толщи калибровочного участка трассы. Средние по трассе погрешности восстановления  $\varepsilon_a(\lambda_i, r)$  методом [6] составляют 37; 21; 4,3 и 4,4% в порядке возрастания  $\lambda_i$ . Видно, что для длин волн зондирующего излучения, для которых аналитические решения лидарного уравнения являются наиболее чувствительными к неточности априорного задания  $g_{\pi,a}$  и погрешности определения калибровочных констант [29], численный метод решения системы лидарных уравнений дает существенный выигрыш в точности. Причинами этому служат, во-первых, лучшая обусловленность решаемой задачи и, как следствие, большая устойчивость ее решения к отмеченным выше дестабилизирующим факторам, а во-вторых, используемый численный алгоритм интерпретации лидарных сигналов, основанный не на последовательном пересчете восстанавливаемого параметра аэрозоля от точки к точке трассы зондирования, а на подборе всего его пространственного профиля под спектрально-временные отсчеты сигнала. Последнее обстоятельство исключает последовательное накопление ошибки, присущее аналитическим методам решения лидарного уравнения, особенно в тех случаях, когда калибровочный участок трассы располагается в ее начале [29].

Последний этап обработки лидарных сигналов разработанным методом предполагает пересчет восстановленных профилей  $h_k(r)$  в пространственные распределения  $PM_{1,0}(r)$ ,  $PM_{2,5}(r)$  и  $PM_{10}(r)$  по формулам регрессии (6). Его результаты представлены на рис. 3.

Для рассматриваемой трассы зондирования средние погрешности восстановления  $PM_{1,0}$ ,  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$  составляют 7,2; 5,3; и 9,8% соответственно. Большая погрешность восстановления  $PM_{10}$  по сравнению с  $PM_{1,0}$  и  $PM_{2,5}$  связана, во-первых, с микрофизическими особенностями моделируемой среды, влияющими на точность калибровки лидара

и пространственные вариации лидарного отношения, а во-вторых, с недостаточной эффективностью длины волны 1,5 мкм для зондирования крупных аэрозольных частиц.

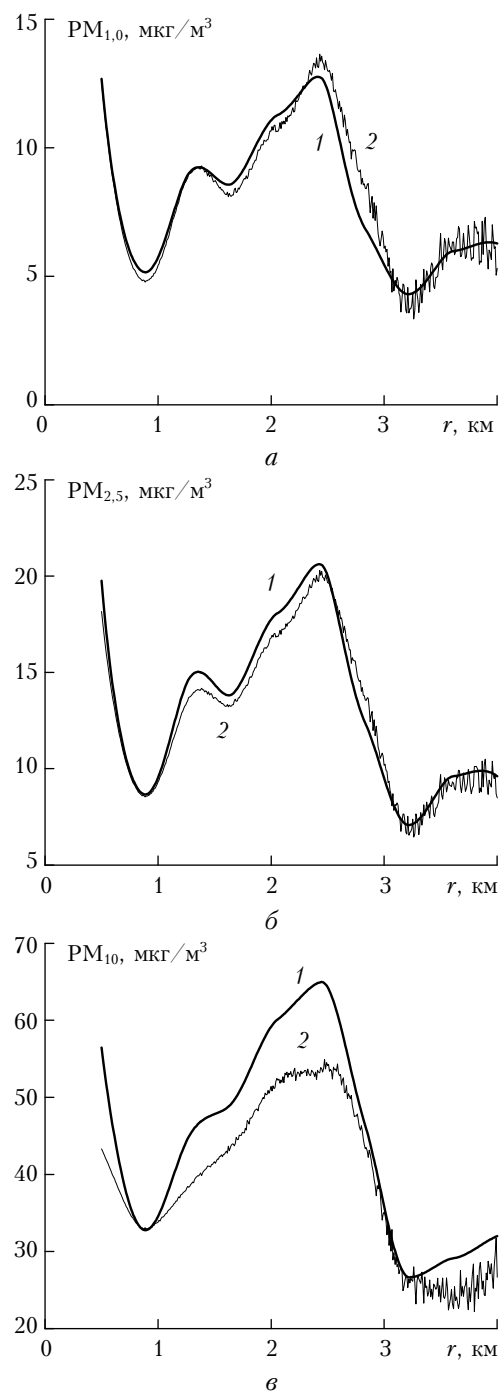


Рис. 3. Сопоставление известных (1) и восстановленных из лидарных сигналов (2) пространственных распределений массовых концентраций аэрозольных частиц размерами  $\leq 1,0$  (а);  $\leq 2,5$  (б) и  $\leq 10$  (в)

### Заключение

Представленный метод реконструкции пространственных распределений  $PM_{1,0}$ ,  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$  в нижних слоях атмосферы по данным многочастотного



лидарного зондирования позволяет с приемлемой для практики точностью определять уровень загрязненности воздуха взвешенными частицами и вести его непрерывный дистанционный мониторинг в соответствии с действующими международными стандартами. Отличительной особенностью разработанного метода является использование в нем принципиально нового помехоустойчивого алгоритма обращения лидарных сигналов, заключающегося в одновременной обработке всех их спектрально-временных отсчетов и извлечении из них профилей линейно-независимых параметров спектра аэрозольного ослабления. Сокращение количества неизвестных величин в лидарных уравнениях без потери их информативности о микроструктуре аэрозоля делает матрицу решаемой системы лидарных уравнений переобусловленной, за счет чего повышается устойчивость решения обратной задачи к погрешностям калибровки и непостоянству аэрозольной индикатрисы обратного рассеяния по трассе зондирования. Численное решение системы уравнений, составленных из спектрально-временных отсчетов лидарных сигналов, позволяет в значительной степени нивелировать известный недостаток аналитических методов решения лидарного уравнения, заключающийся в сильной зависимости значения оптической характеристики аэрозоля, восстановленной в некоторой точке трассы, от погрешностей восстановления данной характеристики на предшествующем участке трассы.

Разработанный метод наиболее эффективен для трасс зондирования, содержащих хотя бы два участка со схожим пространственным ходом аэрозольного коэффициента ослабления, поскольку в этом случае калибровочные константы лидара на его рабочих длинах волн можно определять по самим сигналам, без привлечения дополнительных измерений. Предложенный алгоритм поиска таких участков позволяет надежно выявлять их присутствие на трассе зондирования по спектрально-временной структуре сигнала.

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

1. *Silva R.A., West J.J., Zhang Y., Anenberg S.C., Lamarque J.F., Shindell D., 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. *Зуев В.Е., Кауль В.В., Самохвалов И.В.* Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. Новосибирск: Наука, 1986. 192 с.
3. *Креков Г.М., Кавкянов С.И., Крекова М.М.* Интерпретация сигналов оптического зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 184 с.
4. *Kovalev V.A., Eichinger W.E.* Elastic lidar: Theory, practice, and analysis methods. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2004. 615 p.

5. *Лысенко С.А., Кугейко М.М., Хомич В.В.* Многочастотное лидарное зондирование микроструктуры многокомпонентных городских аэрозолей // *Ж. прикл. спектроскопии.* 2015. Т. 82, № 1. С. 115–123.
6. *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 3. P. 199–209.
7. *Лысенко С.А., Кугейко М.М.* Регрессионный подход к анализу информативности и интерпретации данных аэрозольных оптических измерений // *Ж. прикл. спектроскопии.* 2009. Т. 76, № 6. С. 876–883.
8. *Лысенко С.А., Кугейко М.М.* Восстановление микроразмерных параметров поствулканического стратосферного аэрозоля из результатов спутникового и наземного многочастотного зондирования // *Исслед. Земли из космоса.* 2011. № 5. С. 21–33.
9. *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 2. P. 149–155.
10. *Лысенко С.А., Кугейко М.М.* Метод определения концентрации аэрозольных частиц в вертикальном столбе атмосферы по спутниковым измерениям спектральной оптической толщины // *Журн. прикл. спектр.* 2011. № 5. С. 793–800.
11. *Лысенко С.А., Кугейко М.М.* Нефелометрический метод измерений массовых концентраций городских аэрозолей и их респираторных фракций // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 5. С. 435–442. *Lysenko S.A., Kugeiko M.M.* Nephelometric Method for Measuring Mass Concentrations of Urban Aerosols and Their Respirable Fractions // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 5. P. 435–442.
12. *Klett J.D.* Stable analytic inversion solution for processing lidar returns // *Appl. Opt.* 1981. V. 20, N 2. P. 211–220.
13. *Fernald F.G.* Analysis of atmospheric lidar observation: Some comments // *Appl. Opt.* 1984. V. 23, N 5. P. 652–653.
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., Antonio Rodrigues J., Schneider J., Scherbakov 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. *Обухов А.М.* О статистически ортогональных разложениях эмпирических функций // *Изв. АН СССР. Геофиз.* 1959. № 3. С. 432–439.
16. *Зуев В.Е., Комаров В.С.* Статистические модели температуры и газовых компонент земной атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 264 с.
17. *Henk A. van der Vorst.* Iterative Krylov methods for large linear systems. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 221 p.

18. 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 аппаратаура // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 12. С. 1066–1072.
19. 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. 16. DOI: 10.1029/2003JD004047.
20. 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.
21. Murayama T., Sugimoto N., Uno I., Kinoshita K., Aoki K., Hagiwara N., Liu Z., Matsui I., Sakai T., Shibata T., Arai K., Sohn B.-J., Won J.-G., Yoon S.-C., Li T., Zhou J., Hu H., Abo M., Iokibe K., Koga R., Iwasaka Y. Ground-based network observation of Asian dust events of April 1998 in east Asia // J. Geophys. Res. D. 2001. V. 106, N 16. P. 18345–18359.
22. Лысенко С.А., Кугейко М.М. Восстановление массовой концентрации пыли в промышленных выбросах из результатов оптического зондирования // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 11. С. 960–968. 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.
23. Креков Г.М., Крекова М.М., Суханов А.Я. Оценка эффективности использования перспективных лидаров белого света для зондирования микрофизических параметров слоистой облачности: 2. Параметрическая модификация итерационного метода решения лидарного уравнения // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 8. С. 795–802.
24. Spuler S.M., Mayor S.D. Eye-safe aerosol lidar at 1.5 microns: Progress toward a scanning lidar network // Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring VIII, San Diego, CA. Proc. SPIE. 2007. V. 6681. P. 668102 (11 p.). DOI: 10.1117/12.739519.
25. Xia H., Shentu G., Shangguan M., Xia X., Jia X., Wang C., Zhang J., Pelc J.S., Fejer M.M., Zhang Q., Dou X., Pan J.W. Long-range micro-pulse aerosol lidar at 1.5  $\mu\text{m}$  with an upconversion single-photon detector // Opt. Lett. 2015. V. 40, N 7. P. 1579–1582.
26. Angstrom A. The parameters of atmospheric turbidity // Tellus. 1964. V. 16, N 1. P. 64–75.
27. 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.
28. Bohren G.F., Huffman D.R. Absorption and scattering of light by small particles. New York: John Wiley & Sons, 1983. 544 p.
29. Кугейко М.М., Лысенко С.А. Методические аспекты восстановления оптических характеристик атмосферы из результатов лазерно-локационных измерений // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19, № 5. С. 435–440.

*S.A. Lisenko, M.M. Kugeiko, V.V. Khomich. Multifrequency lidar sounding of atmospheric pollution by respirable particulated matter with separation into respirable fractions.*

The article is devoted to the methodology of obtaining the spatial distributions of respirable fractions of aerosol in the atmosphere from multifrequency lidar sounding data without the use of additional optical and microphysical aerosol parameters on the path under study. For this purpose, it has been suggested to replace the spectral values of the aerosol extinction coefficient involved in lidar equations by the linearly independent parameters of their approximation, and retrieve the spatial distributions of these parameters from the numerical solution of the system of equations created from all spectral-temporal readings of lidar signals. As a result, the number of unknowns in the system of equations, which are solved, is significantly reduced, and its matrix becomes well-conditioned that can be used to select physically reasonable values of backscatter-extinction aerosol ratio at the operating lidar wavelengths. The assumption that there are two segments with the similar profiles of aerosol extinctions coefficients is used to determine the calibration constants of lidar. The algorithm for searching such segments from the spectral-temporal structure of lidar signal is suggested. The inverse problem of aerosol light scattering is solved on the basis of stable regression relations between the concentrations of respirable aerosol fractions and approximation parameters of its extinction spectrum. The tolerance of the technique developed to the calibration errors and the spatial variations in backscatter-extinction aerosol ratio is shown from numerical experiment on laser sounding of aerosol.