

# Методика определения концентрации респираторной фракции атмосферного аэрозоля по данным трехчастотного лидарного зондирования

С.А. Лысенко, М.М. Кугейко\*

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

Поступила в редакцию 10.03.2009 г.

На основе статистической модели атмосферного аэрозоля получены уравнения регрессий между значениями коэффициентов аэрозольного ослабления  $\epsilon_a(\lambda)$  и обратного рассеяния  $\beta_{pa}(\lambda)$  на длинах волн 355, 532 и 1064 нм. Проведена апробация полученных уравнений на массиве экспериментальных и расчетных данных AERONET. Путем численных экспериментов оценивается эффективность использования полученных уравнений в алгоритмах восстановления профилей  $\beta_{pa}(\lambda)$  по данным трехчастотного лидарного зондирования атмосферы. Предложен способ определения объемных концентраций частиц аэрозоля  $H_{2.5}$  и  $H_{10}$ , соответствующих стандартам по массовой концентрации  $PM_{2.5}$  и  $PM_{10}$ , основанный на установленной множественной корреляции между данными характеристиками и  $\beta_{pa}(\lambda)$ .

*Ключевые слова:* атмосферный аэрозоль, респираторные фракции  $H_{2.5}$  и  $H_{10}$ , коэффициенты ослабления, коэффициенты обратного рассеяния, множественные корреляции, трехчастотное лидарное зондирование; atmospheric aerosol, respirable fractions  $H_{2.5}$  and  $H_{10}$ , attenuation coefficients, backscattering coefficients, multiple correlation, three-frequency lidar sounding.

## Введение

Для практических потребностей городских санитарных служб наиболее важным является контроль массовой или объемной концентрации атмосферных аэрозолей и в первую очередь их респираторной фракции, оказывающей отрицательное воздействие на здоровье человека. Согласно стандарту Американского агентства по защите окружающей среды (EPA) и европейского стандарта ISO 7708 [1, 2] определены две границы отделения респираторной фракции от общей массы аэрозоля —  $PM_{2.5}$  и  $PM_{10}$ , соответствующие ограничению по верхнему размеру частиц 2,5 и 10 мкм. Оценка загрязнения воздуха в соответствии с требованиями  $PM_{10}$  определяет массу частиц, проникающих в дыхательную систему человека за гортань.  $PM_{2.5}$  позволяет оценить массу частиц, попадающих в альвеолярные отделы дыхательной системы.

Для оперативного мониторинга атмосферного аэрозоля, необходимость которого возрастает также и в связи с важной и не до конца проясненной ролью аэрозоля в климатических изменениях, широко используются лидарные методы. Однако нерешенные методические задачи по интерпретации результатов зондирования в настоящее время не позволяют широко применять их на практике и провести метрологическую аттестацию лидарных систем.

Известные лидарные методы [3–7] требуют использования априорной информации или упрощающих допущений о связи между коэффициентами

аэрозольного ослабления  $\epsilon_a$  и обратного рассеяния  $\beta_{pa}$ . Как правило, при интерпретации данных одночастотного зондирования априорно задается так называемое лидарное отношение —  $S_a = \epsilon_a/\beta_{pa}$  и используется предположение о его постоянстве по трассе зондирования. Это допущение может приводить к высокой неконтролируемой ошибке в определении оптических характеристик рассеивающих частиц, а следовательно, и их микроструктурных характеристик. Поскольку на практике для оценки микроструктурных характеристик аэрозолей зондирование атмосферы осуществляется на нескольких длинах волн, то при интерпретации данных таких измерений необходимо учитывать также и спектральный ход  $S_a(\lambda)$ . При этом влияние ошибок задания  $S_a(\lambda)$  на результаты восстановления профиля  $\beta_{pa}(r, \lambda)$ , где  $r$  — дальность зондирования, возрастает с увеличением оптической толщины зондируемой трассы и уменьшением длины волны  $\lambda$  лазерного импульса [3, 8].

В настоящее время широкое распространение получили локационные системы на основе Nd:YAG-лазера ( $\lambda_1 = 355$ ;  $\lambda_2 = 532$  и  $\lambda_3 = 1064$  нм). В связи с этим представляет несомненный практический интерес возможность получения статистических соотношений между  $\epsilon_a(\lambda_i)$  и  $\beta_{pa}(\lambda_i)$  ( $i = 1, 2, 3$ ), справедливых при разбросе микрофизических характеристик городских и фоновых аэрозолей в широких пределах. В настоящей работе такие уравнения получены с использованием статистической микрофизической модели аэрозоля. Проводится анализ эффективности использования полученных уравнений в алгоритмах интерпретации данных

\* Сергей Александрович Лысенко; Михаил Михайлович Кугейко (bsu@bsu.by).

трехчастотного лидарного зондирования относительно высотных профилей  $\beta_{pa}(\lambda_i)$ . Рассматривается связь  $\beta_{pa}(\lambda_i)$  с объемными концентрациями частиц аэрозоля  $H_{2,5}$  и  $H_{10}$ , соответствующих стандартам по массовой концентрации  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$ .

## Статистическая микрофизическая аэрозольная модель

Для численного моделирования вариаций аэрозольных оптических характеристик и получения регрессионных соотношений между ними использовалась статистическая микрофизическая модель аэрозоля, содержащая все необходимые для расчетов оптических характеристик микрофизические параметры аэрозоля, диапазоны и модель их вариаций.

Модель основана на общепринятом представлении, что частицы атмосферных аэрозолей разного происхождения различаются по своим свойствам и сравнительно слабо взаимодействуют между собой [9]. На основе такого предположения функция распределения по размерам частиц  $f(a)$  реальных атмосферных аэрозолей представляется в виде суммы функций распределения, описывающих отдельные фракции. Каждая фракция характеризуется концентрацией частиц в единице объема  $N_j$ , комплексным показателем преломления вещества частиц (КПП)  $m_j = n_j + i\chi_j$  и функцией распределения частиц по размерам  $f_j(a)$ . Многочисленные экспериментальные исследования показывают, что наиболее близкой к реальному распределению аэрозольных частиц является сумма трех функций, представляющих распределение мелко-, средне- и грубо-дисперсной фракций [9–12]. Для описания функции распределения частиц фракций по размерам нами использовалось логнормальное распределение [12]:

$$f_j(a) = \frac{dN_j}{d \ln a} = \frac{N_j}{\sqrt{2\pi \ln \sigma_j}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln a - \ln a_{0j}}{\ln \sigma_j} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где  $N_j$  – счетная концентрация частиц;  $a_{0j}$  – модальный радиус;  $\sigma_j$  – стандартное отклонение,  $j = 1$  соответствует аэрозолям естественного конденсационного происхождения,  $j = 2$  – фотохимическим аэрозолям, в основном антропогенного происхождения,  $j = 3$  – аэрозолям дисперсного происхождения. Первые две фракции образуются в основном в результате фотохимических реакций и последующих конденсационных процессов. Третья фракция образуется главным образом в результате выветривания и разрушения почв.

Таким образом, трехфракционная модель аэрозоля определяется 15 микрофизическими параметрами (по 5 для каждой фракции: вещественная и мнимая части КПП –  $n_j(\lambda)$  и  $\chi_j(\lambda)$  соответственно; параметры  $a_{0j}$  и  $\sigma_j$  – функции распределения частиц по размерам (1); концентрация частиц фракции  $N_j$ ). Так как вторая фракция образуется в результате эволюции первой фракции, то наблюдается определенное сходство химического состава

и КПП вещества частиц первых двух фракций [9–12]. Полагая равенство КПП частиц мелко- и среднедисперсной фракций аэрозоля (тонкодисперсная фракция), число параметров модели можно сократить до 13. Диапазоны изменений указанных параметров, выбранные на основании анализа многочисленных литературных данных [9–16], приведены в таблице.

Диапазоны вариаций микрофизических параметров частиц трех фракций аэрозоля

Параметр	Фракция аэрозоля		
	мелко-дисперсная	средне-дисперсная	грубо-дисперсная
$\log N, \text{ см}^{-3}$	2–5,5	0,25–3,25	–0,42–1,57
$a_0, \text{ мкм}$	0,015–0,045	0,09–0,35	1,1–6
$\sigma$	1,6–1,9	1,5–2,1	1,6–2,5
$n(\lambda)$	1,33–1,58		1,37–1,6
$\chi(\lambda)$	0,003–0,02		0–0,015

Данные диапазоны охватывают значения параметров аэрозолей в регионах с малой антропогенной нагрузкой (фоновый аэрозоль), а также и в крупных промышленных районах. При фиксированных значениях параметров модели можно по известным формулам теории Ми [17] (конкретно использовались алгоритмы из [18]) вычислять оптические характеристики каждой фракции и находить общие характеристики согласно известным «правилам сложения» [19].

Для превращения модели в статистическую необходимо задать модели вариаций указанных 13 параметров. Припишем, согласно [13, 14], параметрам модели свойства случайных величин с определенными функциями распределения. В [13] для этого использовались нормальные и логнормальные распределения, однако в [14] отмечено, что более удобны равномерные распределения, требующие лишь задания диапазона возможных вариаций параметров, что и сделано нами в данном случае.

При каждом конкретном акте использования модели по известным правилам моделирования равномерно распределенных случайных величин для каждого набора из 13 параметров рассчитываются требуемые оптические аэрозольные характеристики. Однако при получении выборки микрофизических параметров путем их случайных вариаций могут получаться не встречающиеся в реальности расчетные значения как оптических, так и некоторых интегральных микрофизических характеристик, например объемных концентраций, лидарного отношения, коэффициента ослабления, его спектрального хода и т.д. Чтобы «отфильтровать» выборку, т.е. исключить не встречающиеся в реальности значения отмеченных выше параметров, нами накладывались ограничения на значения:

1) коэффициента ослабления:

$$0,005 \leq \epsilon_a(0,55 \text{ мкм}) \leq 1 \text{ км}^{-1};$$

2) отношения коэффициентов обратного рассеяния:

$$0,7 \leq \beta_{pa}(0,55) / \beta_{pa}(1,02) \leq 2,5;$$

3) параметра Ангстрема

$$v = \frac{\ln \varepsilon_a(\lambda_1) - \ln \varepsilon_a(\lambda_2)}{\ln \lambda_2 - \ln \lambda_1} \quad (\lambda_1 = 355, \lambda_2 = 532 \text{ нм}):$$

$$0,6 \leq v \leq 2,2;$$

4) отношения объемных концентраций частиц грубодисперсной и тонкодисперсной фракций:

$$0,1 \leq C_{V_3} / \sum_{i=1}^2 C_{V_i} \leq 10;$$

5) эффективного размера частиц аэрозоля

$$a_t = \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} a^3 \sum_{i=1}^3 f_i(a) d \ln a / \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} a^2 \sum_{i=1}^3 f_i(a) d \ln a,$$

а также его тонкодисперсной  $a_f$  и грубодисперсной  $a_c$  фракций:

$$0,1 \leq a_t \leq 1 \text{ мкм}, \quad 0,1 \leq a_f \leq 0,33 \text{ мкм}, \quad 1 \leq a_c \leq 5 \text{ мкм}.$$

Такие ограничения выбраны на основании анализа многочисленных данных сети глобального мониторинга на основе сканирующих солнечных фотометров AERONET [20, 21].

## Уравнения регрессии между коэффициентами аэрозольного ослабления и обратного рассеяния

На основе сгенерированного ансамбля из 1000 реализаций микрофизических параметров аэрозоля и расчетов его коэффициентов ослабления  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  ( $\text{км}^{-1}$ ) и обратного рассеяния  $\beta_{pa}(\lambda_i)$  ( $\text{км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ ) на длинах волн  $\lambda_1 = 355$ ;  $\lambda_2 = 532$  и  $\lambda_3 = 1064$  нм с использо-

ванием методов математической статистики [22] получены уравнения множественной регрессии между ними:

$$\varepsilon_a(\lambda_1) = 1,3820\beta_{pa}(\lambda_1) + 75,9625\beta_{pa}(\lambda_2) + 43,7665\beta_{pa}(\lambda_3),$$

$$\varepsilon_a(\lambda_2) = -1,3738\beta_{pa}(\lambda_1) + 52,8682\beta_{pa}(\lambda_2) + 25,3304\beta_{pa}(\lambda_3),$$

$$\varepsilon_a(\lambda_3) = 0,6273\beta_{pa}(\lambda_1) + 4,5588\beta_{pa}(\lambda_2) + 28,0760\beta_{pa}(\lambda_3). \quad (2)$$

Для каждой реализации по уравнениям регрессии (2), с учетом добавления в расчетные значения  $\beta_{pa}(\lambda_i)$  случайных погрешностей измерения (в пределах 10%), рассчитывались значения  $\varepsilon_a(\lambda_i)$ , которые сравнивались с их точными значениями. Соответствующие гистограммы погрешностей определений  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  из уравнений (2) представлены на рис. 1, а–в. Также указаны значения средних по выборке микрофизических параметров аэрозоля погрешностей восстановления  $\varepsilon_a(\lambda_i)$ .

Следует отметить, что в силу широких диапазонов вариаций аэрозольных микрофизических характеристик регрессионные уравнения (2) справедливы для городских и фоновых аэрозолей. Очевидно, что при меньших диапазонах (соответствующих региональным особенностям аэрозоля) коэффициенты ослабления можно определять с большей точностью.

Для подтверждения достоверности регрессионных уравнений, полученных на основе статистической модели, использовался массив оптических и микрофизических характеристик аэрозоля, накопленный на станциях AERONET: г. Минск, Томск (городской аэрозоль) и Бельск (аэрозоль, ввиду малой антропогенной нагрузки региона, близок по своим физико-химическим свойствам к фоновому).

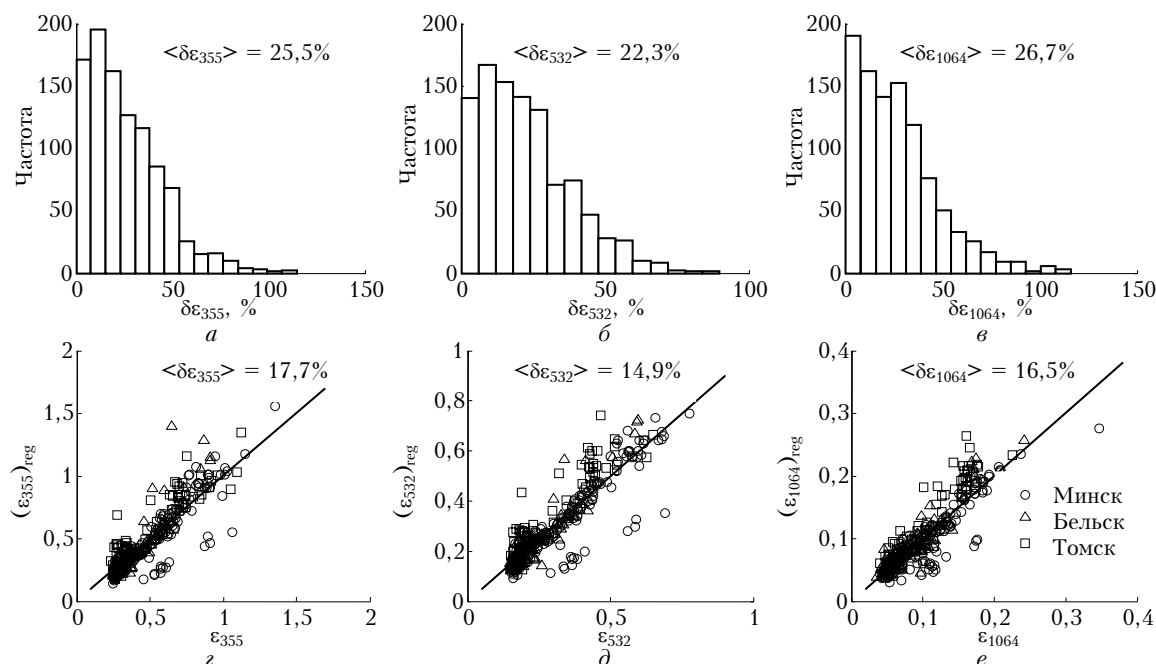


Рис. 1. Оценки погрешностей определения  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  с использованием уравнений регрессии (2): гистограммы погрешностей восстановления  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  на длинах волн 355 (а), 532 (б) и 1064 нм (в) для 1000 реализаций параметров статистической микрофизической модели аэрозоля; г, д, е – результаты восстановления  $\varepsilon_a(\lambda_i)$ , соответствующие данным по оптическим характеристикам аэрозоля, полученным на станциях AERONET

Очевидно, что характеристики аэрозоля, полученные на основе измерений угловой зависимости яркости неба в солнечном альмукантарате, относятся не к локальному объему, а являются интегральными по всей толще атмосферы. Тем не менее использование уравнений (2) для данного массива правомерно в силу их линейности, что позволяет использовать независимые расчетные и экспериментальные данные для апробации полученных уравнений.

На рис. 1 представлены результаты восстановления  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  с использованием уравнений (2) по значениям  $\beta_{pa}(\lambda_i)$ , взятым из AERONET. Видно хорошее соответствие восстановленных с использованием (2) значений  $\varepsilon_a(\lambda_i)$  с данными AERONET, что и свидетельствует об общности полученных уравнений. Средние относительные отклонения в значениях  $\varepsilon_a(\lambda_i)$ , указанные на рис. 1,  $z-e$ , меньше средних по выборке параметров аэрозоля погрешностей восстановления  $\varepsilon_a(\lambda_i)$ . Такие погрешности, как будет показано ниже, являются вполне приемлемыми для восстановления профилей коэффициентов обратного рассеяния из результатов трехчастотного зондирования.

## Использование регрессионных связей при интерпретации данных трехчастотного зондирования

Интерпретация данных многоволнового аэрозольного лидара в задачах исследования пространственно-временной структуры атмосферного аэрозоля основывается на обращении системы уравнений лазерного зондирования, связывающих мощность принимаемых сигналов обратного рассеяния  $P(r, \lambda_i)$  с параметрами среды. В приближении однократного рассеяния данные уравнения имеют вид [3]:

$$P(r, \lambda_i) = G(\lambda_i)r^{-2}[\beta_{pa}(r, \lambda_i) + \beta_{pm}(r, \lambda_i)] \times \exp\left\{-2 \int_{r_0}^r [\varepsilon_a(r, \lambda_i) + \varepsilon_m(r, \lambda_i)] dx\right\}, \quad (3)$$

где  $r$  — текущая координата по трассе зондирования;  $\lambda_i$  — длина волны;  $G(\lambda_i)$  — константа калибровки;  $\beta_{pa}(r, \lambda_i)$  и  $\beta_{pm}(r, \lambda_i)$  — соответственно профили коэффициентов обратного аэрозольного и молекулярного рассеяния;  $\varepsilon_a(r, \lambda_i)$  и  $\varepsilon_m(r, \lambda_i)$  — профили коэффициентов аэрозольного и молекулярного ослабления; расстояние  $r_0$  соответствует концу «теневого зоны» лидара.

Для определения константы калибровки лидара необходима априорная информация об оптических характеристиках среды. При этом используются те или иные допущения о характере помутнения на трассе (например, о наличии на зондируемой трассе однородных участков [3, 7], участков с чисто молекулярным рассеянием [24]) и в пределах перекрывающихся интервалов различной протяженности [23]. Исходя из общего свойства устойчивости решения (3), опорное значение восстанов-

ливаемой оптической характеристики более предпочтительно задавать в конце трассы [3, 5, 8]. При известном опорном значении  $\beta_{pa}(r_k, \lambda_i)$  восстановление профилей  $\beta_{pa}(r, \lambda_i)$  удобно осуществлять с использованием метода Фернальда [4], требующего задания профиля лидарного отношения  $S_a(r, \lambda_i) = \varepsilon_a(r, \lambda_i)/\beta_{pa}(r, \lambda_i)$  и использующего предположение о его постоянстве по трассе зондирования.

Ниже в качестве примера восстановления профилей  $\beta_{pa}(r, \lambda_i)$  с использованием уравнений (2) рассматривается итерационный вариант метода Фернальда. Суть его заключается в следующем. Профили  $\beta_{pa}^{(1)}(r, \lambda_i)$ , полученные при первоначальном допущении  $S_a^{(1)}(r, \lambda_i) = \text{const}$ , рассматриваются как первое приближение. Далее в соответствии с уравнениями (2) вычисляются профили лидарных отношений  $S_a^{(2)}(r, \lambda_i)$  для следующей итерации и проводится уточнение профилей  $\beta_{pa}^{(2)}(r, \lambda_i)$  с использованием получаемых на основе метода Фернальда соотношений:

$$\beta_{pa}^{(n)}(r, \lambda_i) = -\beta_{pm}(r, \lambda_i) + P(r, \lambda_i)Y^{(n)}(r, \lambda_i) / \left\{ \frac{P(r_k, \lambda_i)Y^{(n)}(r_k, \lambda_i) S_a^{(n)}(r, \lambda_i)}{[\beta_{pa}^{(n)}(r_k, \lambda_i) + \beta_{pm}(r_k, \lambda_i)] S_a^{(n)}(r_k, \lambda_i)} - 2S_a^{(n)}(r, \lambda_i) \int_{r_k}^r P(x, \lambda_i)Y^{(n)}(x, \lambda_i) dx \right\}, \quad (4)$$

где

$$Y^{(n)}(r, \lambda_i) = S_a^{(n)}(r, \lambda_i)r^2 \exp\left\{-2 \int_{r_0}^r [S_a^{(n)}(x, \lambda_i) - S_m] \beta_{pm}(x, \lambda_i) dx\right\}.$$

Критерием завершения итерационной процедуры является выполнение условия

$$\int_{r_0}^{r_{\max}} |\beta_{pa}^{(n)}(x, \lambda_i) - \beta_{pa}^{(n-1)}(x, \lambda_i)| dx / \int_{r_0}^{r_{\max}} \beta_{pa}^{(n)}(x, \lambda_i) dx \leq \delta,$$

где  $\delta$  — заданная малая величина;  $r_{\max}$  — максимальная дальность зондирования.

Для оценки эффективности и погрешностей восстановления профилей  $\beta_{pa}(r, \lambda_i)$  с использованием итерационного варианта метода Фернальда и уравнений регрессии (2) проведены численные эксперименты по лазерному зондированию атмосферы на длинах волн  $\lambda_1 = 355$ ,  $\lambda_2 = 532$  и  $\lambda_3 = 1064$  нм. Модельные профили молекулярных коэффициентов обратного рассеяния  $\beta_{pm}(r, \lambda_i)$  соответствовали профилям давления и температуры стандартной модели газовой атмосферы [14]. Профили коэффициента аэрозольного обратного рассеяния  $\beta_{pa}(r, \lambda_i)$  брались из [25] и соответствуют вертикальным трассам в тропосфере, для которых характерно

практически экспоненциальное спадание с высотой концентрации аэрозоля, а следовательно, и его оптических характеристик. Для оценки чувствительности алгоритма (4) к точности используемой зависимости между коэффициентами ослабления и обратного рассеяния на модельные профили  $\varepsilon_a(r, \lambda_i)$ , удовлетворяющие уравнениям (2), накладывались 30%-е относительные отклонения. Восстановление профилей  $\beta_{\pi a}(r, \lambda_i)$  производилось как в предположении  $S_a(r, \lambda_i) = \text{const}$  (конкретно выбраны значения 75, 69 и 43 ср, равные соответственно полученным по модельным расчетам средним значениям  $S_a$  на длинах волн  $\lambda_1, \lambda_2$  и  $\lambda_3$ ), так и с использованием уравнений регрессии (2).

Опорные значения  $\beta_{\pi a}(r_k, \lambda_i)$  в (4) задавались с 50%-й погрешностью в конце трассы. Профили  $\beta_{\pi a}(r, \lambda_i)$ , изображенные на рис. 2, а–в кривой 2, соответствуют первой итерации в алгоритме (4) или, что то же самое, восстановлению в предположении  $S_a(r, \lambda_i) = \text{const}$ . Средние погрешности восстановления  $\beta_{\pi a}(r, \lambda_i)$  составляют 76,5; 52,4 и 39,0%. Последующее уточнение этих профилей по описанной выше итерационной процедуре дает средние погрешности 11,2; 10,0 и 35,6%. Примерно одинаковые значения погрешностей, соответствующие  $\lambda_3 = 1064$  нм, объясняются малыми значениями  $\varepsilon_a(r, \lambda_3)$  и  $\varepsilon_m(r, \lambda_3)$  и слабой зависимостью от них сигналов обратного рассеяния. При этом погрешность восстановления  $\beta_{\pi a}(r, \lambda_3)$  обусловлена, в первую очередь, погрешностью задания опорного значения  $\beta_{\pi a}(r_k, \lambda_3)$ .

Таким образом, можно утверждать, что использование для интерпретации данных трехчастотного зондирования уравнений регрессии (2), при

значениях относительных отклонений от них реальной связи между  $\varepsilon_a(r, \lambda_i)$  и  $\beta_{\pi a}(r, \lambda_i)$ , сравнимых с указанными на рис. 1 значениями средних отклонений, позволяет существенно повысить точность восстановления профилей  $\beta_{\pi a}(r, \lambda_i)$ , а значит, и микрофизических характеристик аэрозоля.

## Связь обратного рассеяния с объемной концентрацией частиц респираторной фракции аэрозоля

Ниже рассматривается возможность применения значений коэффициентов обратного рассеяния на длинах волн 355, 532 и 1064 нм для оценки объемных концентраций частиц аэрозоля  $H_{2,5}$  и  $H_{10}$ , связанных с соответствующими стандартами по массовой концентрации соотношением  $PM_X = \bar{\rho}N_X$ , где  $\bar{\rho}$  – средняя плотность аэрозольного вещества.

Предлагаемый метод оценки характеристик  $H_{2,5}$  и  $H_{10}$  основан на множественной корреляции между ними и значениями коэффициента обратного рассеяния на указанных длинах волн, установленной нами на основе статистической микрофизической модели аэрозоля, с использованием аппарата математической статистики [22] для выборки из 1000 реализаций варьируемых параметров модели:

$$\begin{aligned} \ln H_{2,5} &= 1,4545 + 0,0353 \ln \beta_{\pi a}(\lambda_1) + \\ &+ 0,4011 \ln \beta_{\pi a}(\lambda_2) + 0,3937 \ln \beta_{\pi a}(\lambda_3), \\ \ln H_{10} &= 2,1362 - 0,0379 \ln \beta_{\pi a}(\lambda_1) + \\ &+ 0,2423 \ln \beta_{\pi a}(\lambda_2) + 0,6111 \ln \beta_{\pi a}(\lambda_3). \end{aligned} \quad (5)$$

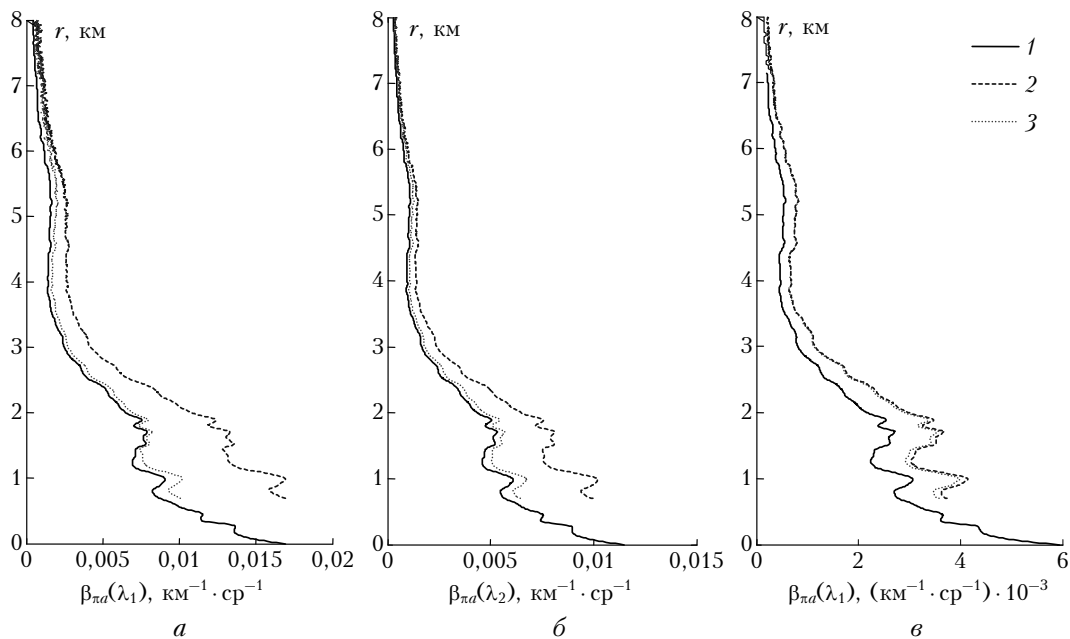


Рис. 2. Результаты восстановления профилей  $\beta_{\pi a}(r, \lambda_i)$  на длинах волн 355 (а), 532 (б) и 1064 нм (в) с использованием локальной калибровки в конце трассы зондирования: 1 – заданные профили  $\beta_{\pi a}(r, \lambda_i)$ ; 2 и 3 – соответственно профили  $\beta_{\pi a}(r, \lambda_i)$ , восстановленные в предположении  $S_a(r, \lambda_i) = \text{const}$  и при использовании уравнений регрессии (2)

В (5) используются логарифмы величин, так как в этом случае мы имеем дело с числами одного порядка, а абсолютная ошибка логарифма дает оценку относительной ошибки самой величины. Использование уравнений (5) позволяет осуществлять оперативный контроль концентрации респираторной фракции аэрозоля по данным трехчастотного зондирования без решения некорректных обратных задач [26], использования дополнительной априорной информации и сопутствующих измерений. Широкие диапазоны вариаций микрофизических параметров модели позволяют утверждать о справедливости уравнений (5) для аэрозолей как в сельской местности, так и в крупных промышленных районах.

На рис. 3 представлены результаты восстановления характеристик  $H_{2,5}$  и  $H_{10}$  для 1000 реализаций параметров модели аэрозоля при наложении на расчетные значения  $\beta_{\text{па}}(\lambda_i)$  случайных погрешностей в пределах 10%.

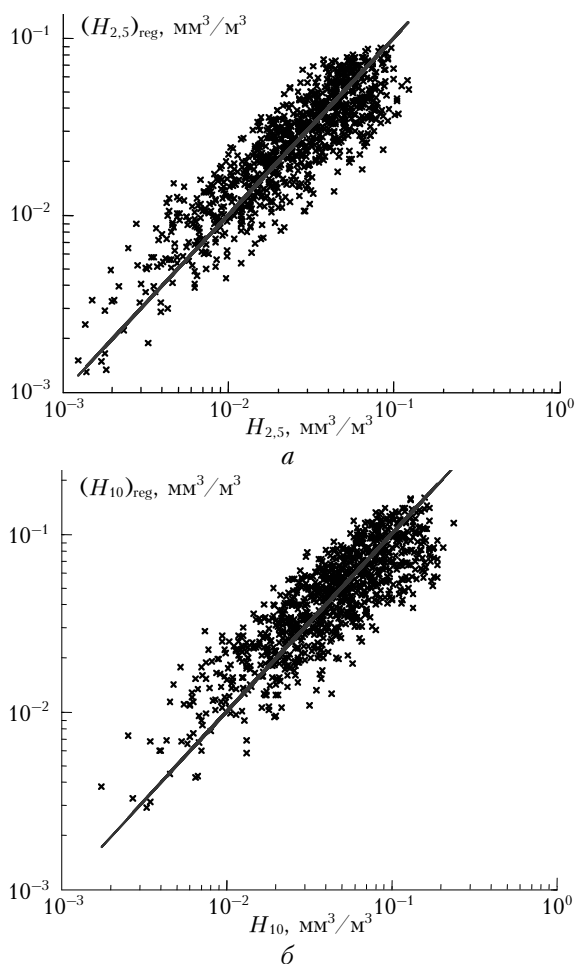


Рис. 3. Результаты восстановления концентраций  $H_{2,5}$  и  $H_{10}$  с использованием уравнений (5) при наложении на значения  $\beta_{\text{па}}(\lambda_i)$ , рассчитанные для 1000 реализаций варьируемых параметров модели, случайных погрешностей в пределах 10%

При некоторых комбинациях микрофизических параметров аэрозоля уравнения (5) погрешности определения искомых параметров могут быть более

100%. Однако средние погрешности их восстановления, равные для  $H_{2,5}$  и  $H_{10}$  соответственно 35 и 33%, ввиду широких диапазонов возможных значений искомых характеристик (в два порядка), являются вполне приемлемыми для удовлетворения потребностей ряда задач экологического мониторинга окружающей среды (например, по превышению ПДК).

## Заключение

Получены уравнения регрессии, связывающие значения коэффициентов аэрозольного ослабления и обратного рассеяния на длинах волн 355, 532 и 1064 нм. Путем численных экспериментов показано, что использование полученных уравнений в алгоритмах интерпретации данных трехчастотного зондирования позволяет значительно повысить точность восстановления профилей коэффициентов обратного рассеяния. Показано, что использование множественной корреляции между объемными концентрациями  $H_{2,5}$  и  $H_{10}$  и спектральными значениями коэффициента аэрозольного обратного рассеяния позволяет проводить достаточно точные оценки экологически значимых характеристик аэрозоля по данным трехчастотного зондирования атмосферы без решения некорректных обратных задач и использования дополнительной априорной информации. Предлагаемая методика может эффективно использоваться для организации оперативного экологического мониторинга как городского, так и фоновых аэрозолей.

1. U.S.EPA Guidance for using continuous monitors in PM2.5 monitoring networks. OAQPS EPA-454/R-98-012, May 1998.
2. European Standard EN 12341. Air quality. Determination of the PM10 fraction of suspended particulate matter. Reference method and field test procedure to demonstrate reference equivalence of measurement methods. 1998.
3. Креков Г.М., Кавкянов С.И., Крекова М.М. Интерпретация сигналов оптического зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 184 с.
4. Fernald F.G. Analysis of atmospheric lidar observation: some comments // Appl. Opt. 1984. V. 23. N 5. P. 652–653.
5. Klett J.D. Stable analytic inversion solution for processing lidar returns // Appl. Opt. 1981. V. 20. N 2. P. 211–220.
6. Klett J.D. Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios // Appl. Opt. 1985. V. 24. N 11. P. 1638–1643.
7. Ковалев В.А. Функциональные зависимости между полным и обратным рассеянием для восстановления профиля показателя ослабления по данным лидарного зондирования // Оптика атмосфер. и океана. 1992. Т. 5. № 5. С. 534–538.
8. 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.
9. Кондратьев К.Я., Ивлев Л.С., Крапивин В.Ф. Свойства, процессы образования и последствия воздействия атмосферного аэрозоля: от нано- до глобальных масштабов. СПб.: ВВМ, 2007. 807 с.
10. Ивлев Л.С., Андреев С.Д. Оптические свойства атмосферных аэрозолей. Л.: ЛГУ, 1986. 359 с.

11. *Андреев С.Д., Ивлев Л.С.* Моделирование оптических характеристик аэрозолей приземного слоя атмосферы в области 0,3–15 мкм. Ч. I. Принципы построения модели. Ч. II. Выбор параметров модели. Ч. III. Результаты моделирования // *Оптика атмосф. и океана*. 1995. Т. 8. № 5. С. 788–795; № 8. С. 1227–1235; 1236–1243.
12. *Зуев В.Е., Креков Г.М.* Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 256 с.
13. *Васильев А.В., Ивлев Л.С.* Оптическая статистическая модель атмосферы для района Ладожского озера // *Оптика атмосф. и океана*. 2000. Т. 13. № 2. С. 198–203.
14. *Ивлев 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 / Отв. ред. Л.С. Ивлев. НИИ химии СПбГУ, 2003. С. 161–170.
15. *Chunlei L., Smith M.H.* Urban and rural aerosol particle optical properties // *Atmos. Environ.* 1995. V. 29. N 1–2. P. 3293–3301.
16. *Иванов В.П.* Прикладная оптика атмосферы в тепловидении. Казань: Новое Знание, 2000. 357 с.
17. *Борен К., Хаффман Д.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами / Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 660 с.
18. *Васильев А.В.* Универсальный алгоритм расчета оптических характеристик однородных сферических частиц. II. Ансамбли частиц // *Вестн. СПбГУ. Сер. 4: Физика, химия*, 1997. Вып. 1 (N 4). С. 14–24.
19. *Тимофеев Ю.М., Васильев А.В.* Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003. 474 с.
20. *Catrall 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, D10S11. doi: 10.1029/2004JD005124.
21. <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>.
22. *Колемаев В.А., Калинин В.Н.* Теория вероятностей и математическая статистика. М.: ИНФРА-М, 1997. 302 с.
23. *Кугейко М.М., Оношко Д.М.* Теория и методы оптико-физической диагностики неоднородных рассеивающих сред. Минск: БГУ, 2003. 186 с.
24. *Межерис Р.* Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
25. *Ferrare R.A., Melfi S.H., Whiteman D.N., Evans K.D., Leifer R.* Raman lidar measurements of aerosol extinction and backscattering 1. Methods and comparisons // *J. Geophys. Res.* D. 1998. V. 103. N 16. P. 19663–19672.
26. *Зуев В.Е., Наац И.Э.* Обратные задачи оптики атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 286 с.

*S.A. Lysenko, M.M. Kugeiko. A method for determination of the respiratory fraction of atmospheric aerosol by three-frequency lidar sounding.*

On the basis of statistical model of the atmospheric aerosol the regression equations between values of aerosol extinction and backscatter coefficients at wavelengths of 355, 532, and 1064 nm are obtained. These equations were tested on calculated and measured data of AERONET. By means of numerical experiments the effectiveness of application of the obtained equations in algorithms of retrieval of profiles of  $\beta_{pa}(\lambda)$  from three-wavelength lidar sounding of atmosphere is evaluated. A method for determination of volume concentrations  $H_{2.5}$  and  $H_{10}$  of atmospheric aerosol particles, corresponding to mass concentration standards  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$ , is proposed, which is based on multiple correlation between concentrations and  $\beta_{pa}(\lambda)$ .