

ВЕРИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МНОГОЧАСТОТНОГО ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АЭРОЗОЛЯ

С. А. Лысенко^{1*}, В. В. Хомич²

УДК 551.508

¹ Институт природопользования НАН Беларуси,
220114, Минск, ул. Ф. Скорины, 10, Беларусь; e-mail: lysenkorfe@gmail.com

² Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь; e-mail: vasili.khomich@gmail.com

(Поступила 20 февраля 2018)

Рассматривается алгоритм обработки лидарных сигналов, который для трасс зондирования с постоянными качественными характеристиками аэрозоля (распределение частиц по размерам в каждой моде аэрозоля, комплексный показатель преломления частиц) позволяет получать профили концентраций его мелкодисперсного компонента без использования дополнительной априорной информации. Верификация алгоритма выполнена на данных лидара Института физики НАН Беларуси. Вертикальный профиль объемной концентрации мелкодисперсных частиц, полученный предлагаемым алгоритмом, хорошо согласуется с результатами его независимого восстановления на основе комплексной обработки данных лидара и солнечного фотометра.

Ключевые слова: атмосферный аэрозоль, оптические параметры, микрофизические параметры, лидар, обратная задача.

The algorithm for processing lidar signals is considered, which provides concentration profiles of a fine aerosol component for the sensing paths with constant qualitative aerosol characteristics (particle size distribution in each aerosol mode, complex refractive index of particles) with no additional a priori information. Verification of the algorithm is performed using lidar data of the Institute of Physics, NAS of Belarus. The vertical profile of the volume concentration of fine particles obtained by the proposed algorithm is in good agreement with the results of its independent retrieval on the basis of simultaneous processing of the lidar and sun photometer data.

Keywords: atmospheric aerosol, optical parameters, microphysical parameters, lidar, inverse problem.

Введение. Атмосферный аэрозоль — важный и наиболее изменчивый компонент атмосферы, влияющий на качество окружающей среды, радиационный баланс планеты, формирование облаков и их свойства. В связи с этим регулярный мониторинг его оптических (альbedo однократного рассеяния, индикатрисы рассеяния, оптической толщины) и микрофизических (концентрации, распределения по размерам и комплексного показателя преломления (КПП) частиц) характеристик в региональном и глобальном масштабах необходим для совершенствования моделей климата и переноса загрязняющих веществ в атмосфере, а также для эффективного и своевременного принятия мер по уменьшению негативного влияния окружающей среды на здоровье людей.

Эффективным средством наземного мониторинга аэрозоля является многочастотный лидар, потенциально обладающий возможностью получения вертикальных профилей оптических и микрофизических параметров аэрозоля оперативно и с высоким пространственным разрешением (единицы метров). Однако при решении обратной задачи по восстановлению параметров аэрозоля из лидарных сигналов проявляется ее математическая некорректность [1], которую сложно преодолеть лишь с помощью доступной лидару измерительной информации. В последнее время для доопределения этой

VERIFICATION OF A DATA PROCESSING ALGORITHM FOR THE AEROSOL MULTI-FREQUENCY LIDAR SENSING

S. A. Lisenko^{1*}, V. V. Khomich² (¹ Institute for Nature Management of the National Academy of Science of Belarus, 10 F. Skoriny Str., Minsk, 220114, Belarus; e-mail: lysenkorfe@gmail.com; ² Belarusian State University, Minsk, 220030, Belarus; e-mail: vasili.khomich@gmail.com)

обратной задачи наиболее часто используются данные солнечных фотометров, измеряющих интенсивность прямого солнечного излучения на нижней границе атмосферы и угловую структуру рассеянного атмосферой излучения в зависимости от его длины волны. Интеграция данных, получаемых с помощью лидара и солнечного фотометра, существенно улучшает постановку обратной задачи и расширяет объем получаемой информации об аэрозоле [2—8]. Однако при этом предполагаются горизонтальная однородность атмосферы и постоянство концентраций аэрозольных компонентов в пределах теневой зоны лидара. В городских условиях при наличии большого количества источников аэрозоля оба эти предположения могут нарушаться, что нивелирует положительные эффекты от использования данных солнечного фотометра при обработке лидарных сигналов. Кроме того, такие комплексные измерения можно выполнять только в светлое время суток и при полном отсутствии облачности на небосводе.

В работе [9] предложен алгоритм восстановления вертикальных профилей оптических и микрофизических параметров аэрозоля из сигналов лидара, работающего на длинах волн упругого (355, 532, 1064 нм) и комбинационного (387 и 607 нм) рассеяния света в атмосфере. Алгоритм основан на предположении о постоянстве качественных характеристик аэрозоля (распределения частиц по размерам в каждой его моде, КПП частиц) на трассе зондирования и итерационной подгонке расчетных лидарных сигналов к соответствующим экспериментальным данным с учетом ограничений на область поиска решения обратной задачи. В численных экспериментах показано, что разработанный алгоритм позволяет без дополнительных калибровочных данных восстанавливать высотный профиль объемной концентрации мелкодисперсной моды аэрозоля (частицы радиусами $<1\text{—}2$ мкм) и параметры их распределения по размерам из лидарных сигналов на длинах волн 355, 532, 1064 нм, а с привлечением сигналов комбинационного рассеяния света атмосферным азотом (387 и 607 нм) — еще и КПП аэрозольного вещества.

Цель настоящей работы — апробация разработанного алгоритма на экспериментальных лидарных сигналах и сравнение полученных результатов с независимыми оценками микрофизических параметров аэрозоля на основе совместного лидарного и радиометрического зондирования атмосферы. Такие комплексные измерения дополняют друг друга в информационном содержании и формируют надежную основу для косвенных оценок микрофизических параметров аэрозоля, прямые измерения которых требуют локальных заборов проб воздуха и трудно реализуемы во временных масштабах лидарного зондирования.

Алгоритм восстановления оптических и микрофизических параметров аэрозоля. Рассмотрим алгоритм обработки лидарных сигналов, измеряемых в условиях упругого однократного рассеяния лазерного импульса в атмосфере. Уравнение лазерной локации (лидарное уравнение) в этом случае имеет вид [10]:

$$P(\lambda, r) = A(\lambda)P_0(\lambda)r^{-2} \left[\beta_{\pi, a}(\lambda, r) + \beta_{\pi, m}(\lambda, r) \right] \exp \left\{ -2 \int_0^r [\varepsilon_a(\lambda, r') + \varepsilon_m(\lambda, r')] dr' \right\}, \quad (1)$$

где P — мощность принимаемого сигнала; P_0 — мощность посылаемого в атмосферу излучения; r — расстояние между лидаром и рассеивающим объемом; $A(\lambda)$ — аппаратная функция лидара; ε_a и $\beta_{\pi, a}$ — показатели аэрозольного ослабления и обратного рассеяния; ε_m и $\beta_{\pi, m}$ — показатели молекулярного ослабления и обратного рассеяния.

Показатели оптических взаимодействий света с частицами зависят от их размеров, формы и КПП. Для ансамбля полидисперсных сферических частиц их можно рассчитать на основе интегральных соотношений:

$$\varepsilon_a(\lambda) = \frac{3}{4} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} x^{-1} Q_{\text{ext}}(m(\lambda), \rho) \frac{dV(x)}{d \ln x} d \ln x, \quad (2)$$

$$\beta_{\pi, a}(\lambda) = \frac{3}{4} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} x^{-1} Q_{\pi}(m(\lambda), \rho) \frac{dV(x)}{d \ln x} d \ln x, \quad (3)$$

где $x_{\min}$ и $x_{\max}$ — минимальный и максимальный размер аэрозольных частиц в предположении, что более мелкие частицы несущественно влияют на оптические свойства аэрозоля, а более крупные частицы содержатся в ничтожно малой концентрации; Q_{ext} и Q_{π} — факторы эффективности ослабления и обратного рассеяния света одиночной частицей, зависящие от ее КПП (m) и дифракционного параметра $\rho = 2\pi x/\lambda$; $dV(x)/d \ln x$ — распределение объемов частиц полидисперсного ансамбля.

В рамках модели атмосферного аэрозоля, используемой в глобальной сети наземных фотометров AERONET [11] и лидарных сетях на пространстве Европы (EARLINET) и СНГ (Cis-LiNet), распределение частиц аэрозоля по размерам описывается двухмодальной логнормальной функцией:

$$\frac{dV(x)}{d \ln x} = \sum_{v=1}^2 \frac{C_v}{\sqrt{2\pi}\sigma_v} \exp \left[-\frac{(\ln x - \ln x_v)^2}{2\sigma_v^2} \right], \quad (4)$$

где C_v , x_v и σ_v — объемная концентрация, средний радиус и стандартное отклонение радиусов частиц моды v соответственно. КПП частиц обеих мод полагается одинаковым и не зависящим от λ .

При пространственной дискретизации трассы зондирования 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 $\beta_{\pi,a}(\lambda_i, r_j)$, где λ_i — рабочие длины волн лидара ($i = 1, \dots, N_\lambda$), r_j — координаты точек трассы, которым приписываются значения регистрируемых сигналов ($j = 1, \dots, N_r$). Очевидно, что решение такой системы уравнений невозможно без упрощающих допущений, сокращающих число неизвестных. Предположим, что параметры микрофизической модели аэрозоля x_v , σ_v и m не изменяются вдоль трассы зондирования. Тогда с учетом уравнений (2)–(4) регистрируемый лидарный сигнал можно представить в дискретном виде:

$$L(\lambda_i, r_j) = \ln \left[P(\lambda_i, r_j) r_j^2 \right] = \ln K_i + \ln \left[\beta_{\pi,m}(\lambda_i, r_j) + \sum_{v=1}^2 C_v(r_j) \Omega_{\pi,v}(\lambda_i, x_v, \sigma_v, m) \right] - \\ - 2 \sum_{l=1}^j \omega_l \varepsilon_m(\lambda_i, r_l) - 2 \sum_{v=1}^2 \Omega_{\text{ext},v}(\lambda_i, x_v, \sigma_v, m) \sum_{l=1}^j \omega_l C_v(r_l), \quad (5)$$

где K_i — неизвестная переменная, равная произведению аппаратных констант лидара и оптического пропускания его теневой зоны; $\Omega_{\text{ext},v}$ и $\Omega_{\pi,v}$ — полидисперсные сечения ослабления и обратного рассеяния частиц моды v ; ω_l — коэффициенты квадратурной формулы численного интегрирования. Сечения $\Omega_{\text{ext},v}$ и $\Omega_{\pi,v}$ для полидисперсной системы частиц, описываемой функцией (4), рассчитываются по формуле:

$$\Omega_{\text{ext}(\pi),v}(\lambda_i, x_v, \sigma_v, m) = \frac{3}{4\sqrt{2\pi}\sigma_v} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} x^{-1} Q_{\text{ext}(\pi)} \left[m, \frac{2\pi x}{\lambda_i} \right] \exp \left[-\frac{(\ln x - \ln x_v)^2}{2\sigma_v^2} \right] d \ln x. \quad (6)$$

Обратная задача решается путем итерационного подбора модельных параметров и констант K_i , обеспечивающих наилучшее соответствие расчетных лидарных сигналов экспериментальным данным. Для того чтобы избежать расходимости решения и ускорить его сходимость, используется численный алгоритм, основанный на минимизации следующей целевой функции:

$$J(\mathbf{p}) = (\mathbf{L}_{\text{exp}} - \mathbf{f}(\mathbf{p}))^T \mathbf{S}_L^{-1} (\mathbf{L}_{\text{exp}} - \mathbf{f}(\mathbf{p})) + \gamma (\mathbf{p} - \mathbf{p}_0)^T \mathbf{S}_p^{-1} (\mathbf{p} - \mathbf{p}_0), \quad (7)$$

где $\mathbf{p} = (\ln K_1, \dots, \ln K_{N_\lambda}, C_1(r_1), \dots, C_1(r_{N_r}), C_2(r_1), \dots, C_2(r_{N_r}), x_1, \sigma_1, x_2, \sigma_2, m)^T$ — вектор искомых параметров; $\mathbf{p}_0$ — начальное приближение для этих параметров на первой итерации алгоритма; $\mathbf{L}_{\text{exp}}$ — вектор, составленный из спектрально-пространственных отсчетов экспериментальных сигналов; $\mathbf{f}(\mathbf{p})$ — прямая модель задачи, основанная на формулах (5) и (6); $\mathbf{S}_L$ — ковариационная матрица погрешностей измерения сигнала $L(\lambda_i, r_j)$; $\mathbf{S}_p$ — ковариационная матрица вектора $\mathbf{p}$; γ — параметр регуляризации [9].

Оптимальное значение $\mathbf{p} = \mathbf{p}_{\text{opt}}$, удовлетворяющее условию $dJ(\mathbf{p})/d\mathbf{p} = 0$, находится итерационным методом Ньютона [12]:

$$\mathbf{p}_{n+1} = \mathbf{p}_0 + \left(\mathbf{F}_n^T \mathbf{S}_L^{-1} \mathbf{F}_n + \gamma_n \mathbf{S}_p^{-1} \right)^{-1} \mathbf{F}_n^T \mathbf{S}_L^{-1} (\mathbf{L}_{\text{exp}} - \mathbf{F}(\mathbf{p}_n) + \mathbf{F}_n (\mathbf{p}_n - \mathbf{p}_0)), \quad (8)$$

где $\mathbf{p}_n$ — n -е приближение к решению обратной задачи; $\mathbf{F}_n = (d\mathbf{f}/d\mathbf{p})_{\mathbf{p}=\mathbf{p}_n}$ — матрица из частных производных от функций (5) по модельным параметрам. С целью ускорения сходимости алгоритма и уменьшения влияния начального приближения на область поиска решения обратной задачи параметр регуляризации γ_n на каждой итерации выбирается в зависимости от невязки $\rho_n = \|\mathbf{L}_{\text{exp}} - \mathbf{f}(\mathbf{p}_n)\|$. Изначально полагается $\gamma_0 = 1$. Далее если $\rho_{n+1} > \rho_n$, то $\gamma_{n+1} = 1.2\gamma_n$, иначе $\gamma_{n+1} = 0.8\gamma_n$. Итерации завершаются, когда невязка выходит на некоторое стационарное значение.

Оценка случайной погрешности определения параметров $\mathbf{p}$ по измеряемым сигналам получается из матрицы апостериорной дисперсии [13]:

$$\mathbf{C}_p = \left(\mathbf{F}^T \mathbf{S}_L^{-1} \mathbf{F} + \gamma \mathbf{S}_p^{-1} \right)^{-1}, \quad (9)$$

где матрица S_p характеризует априорную (известную до измерений) неопределенность параметров p , а матрица $F^T S_L^{-1} F$ — уточняющий вклад измерений в их априорно известные значения. Среднеквадратическая погрешность восстановления параметра p_k находится как $\sqrt{(C_p)_{kk}}$, где $(C_p)_{kk}$ — диагональный элемент матрицы C_p . При абсолютно адекватной модели измеряемых величин, задаваемой оператором F , погрешности восстановления модельных параметров обусловлены только наличием погрешностей измерений. В этом случае оценка погрешностей восстановления искомых параметров по формуле (9) — предельная теоретически возможная погрешность решения обратной задачи, которая не может быть уменьшена алгоритмически.

Следует отметить, что при решении обратной задачи не используется априорная информация о свойствах искомых профилей $C_v(r)$ (непрерывность, гладкость и т. п.), значения $C_v(r)$ в дискретных точках трассы восстанавливаются только с учетом их положительной определенности и ограниченности сверху [9]. Причины этого следующие. Во-первых, при регистрации лидарных сигналов с разрешением десятки и даже сотни метров, что имеет место для верхних слоев тропосферы, профили $C_v(r)$, восстанавливаемые из сигналов, более уместно представлять в виде гистограмм, чем в виде искусственно сглаженных непрерывных функций. Во-вторых, наложение подобных ограничений на искомые профили требует введения дополнительного параметра регуляризации, что ввиду неопределенности его оптимального значения приводит к еще большей неоднозначности решения обратной задачи. В-третьих, использование предположения о постоянстве качественных характеристик частиц аэрозоля (x_v , σ_v и m) на трассе зондирования само по себе способствует сглаживанию расчетных профилей $C_v(r)$ с увеличением гладкости исходных лидарных сигналов.

Другой важной особенностью предложенного алгоритма является то, что он позволяет восстанавливать высотный профиль мелкодисперсной моды аэрозоля из сигналов многочастотного лидара без использования дополнительных данных для его калибровки и для доопределения обратной задачи [9]. На первый взгляд этот результат противоречит сложившейся методологии обработки данных лидарного зондирования. Согласно этой методологии, для решения лидарного уравнения необходима априорная информация о связи показателей ослабления и обратного рассеяния аэрозоля на трассе зондирования, а также дополнительные измерения опорного (калибровочного) значения одного из этих показателей в некоторой точке трассы. Однако в действительности разработанный алгоритм во все не исключает необходимости априорной информации, а лишь заменяет ее упрощающими предположениями об исследуемой среде, что на практике, разумеется, гораздо предпочтительнее. Примеры определения калибровочных значений оптических параметров аэрозоля на основе анализа спектрально-пространственной структуры лидарного сигнала приведены в [10, 14–17]. В частности, известно, что при наличии на трассе зондирования однородного участка его можно использовать для определения опорного значения показателя аэрозольного ослабления методом логарифмической производной [10], что позволяет решать лидарное уравнение без необходимости калибровки лидара. В нашем случае предположено, что качественные микрофизические характеристики аэрозоля одинаковы для всех точек трассы. При комплексном анализе спектрально-пространственных отсчетов лидарного сигнала это можно использовать для определения неизвестных калибровочных констант.

Верификация алгоритма. В работе [9] возможности предложенного алгоритма проанализированы в численных экспериментах для модельных задач с известными решениями. Следующим шагом верификации этого алгоритма является его апробация на экспериментальных лидарных сигналах с привлечением дополнительных средств контроля параметров аэрозоля. С учетом сложностей проведения прямых измерений микрофизических параметров аэрозоля на вертикальных трассах в атмосфере в качестве опорных данных использованы результаты комплексного эксперимента по лидарному и радиометрическому зондированию аэрозоля.

Сканирующие солнечные фотометры дают всю недостающую для интерпретации лидарных сигналов априорную информацию. Оптическая толщина аэрозоля, непосредственно измеряемая фотометром, используется для калибровки лидара. Удельные (на единицу массы) показатели ослабления и обратного рассеяния аэрозольных компонентов, получаемые на основе анализа спектрально-угловых характеристик рассеяния и пропускания света атмосферой, позволяют связать лидарные сигналы с профилями концентраций аэрозольных компонентов. Таким образом, лидарные и радиометрические измерения дополняют друг друга в информационном содержании и в дневное время суток в отсутствие облаков на небосводе позволяют получать достаточно надежные оценки оптических и микрофизических параметров аэрозоля.

Необходимые экспериментальные и расчетные данные подготовлены и любезно предоставлены Центром оптического дистанционного зондирования НАН Беларуси. Исходные эхо-сигналы атмосферы измерены 04.04.2016 в Минске многоволновым лидаром Института физики НАН Беларуси, включенным в международные лидарные сети на пространствах Европы (EARLINET) и СНГ (CisLi-Net). Параллельно проведены измерения яркости атмосферы в главной плоскости и в солнечном альмукантате радиометром CIMEL (CE-318). Опорные распределения объемных концентраций мелкодисперсного $C_1(r)$ и грубодисперсного $C_2(r)$ компонентов аэрозоля получены в результате комплексной обработки данных лидара и радиометра алгоритмом LIRIC (Lidar-Radiometer Inversion Code) [6].

Верифицируемые профили $C_1(r)$ и $C_2(r)$ восстановлены из экспериментальных лидарных сигналов на длинах волн 355, 532 и 1064 нм (рис. 1). Начальные приближения для искомым микрофизических параметров аэрозоля выбраны на основании анализа архивных данных AERONET [18] для Восточной Европы и результатов комплексного лидарно-радиометрического зондирования атмосферы [4, 19]: $x_1 = 0.18$ мкм, $\sigma_1 = 0.45$, $x_2 = 2.9$ мкм, $\sigma_2 = 0.65$, $m = 1.45 + 0.01i$, $C_{1,2}(r) = (0.02 \text{ мм}^3/\text{м}^3)e^{-(r-r_0)/r_0}$, где $r_0 = 1$ км. Диапазоны вариаций этих параметров, ограничивающие область поиска решения обратной задачи: $x_1 = 0.1—0.5$ мкм, $\sigma_1 = 0.3—1.0$, $x_2 = 1.2—6.0$ мкм, $\sigma_2 = 0.3—1.0$, $Rem = 1.33—1.60$, $Imm = 5 \cdot 10^{-4}—0.065$, $C_{1,2}(r) = 0—0.2 \text{ мм}^3/\text{м}^3$.

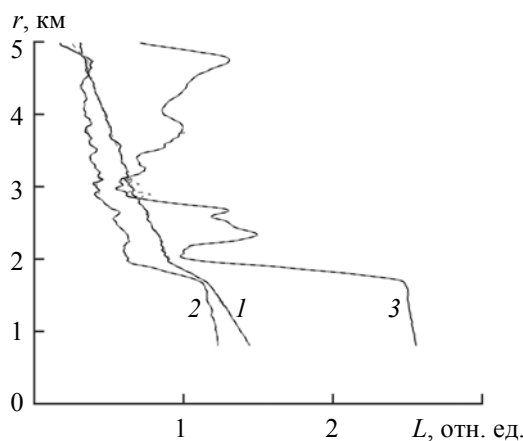


Рис. 1. Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (штриховые) лидарные сигналы на длинах волн 355 (1), 532 (2) и 1064 нм (3)

При расчете ковариационной матрицы S_p полагается, что микрофизические параметры аэрозоля не коррелируют друг с другом и равномерно варьируются в указанных выше диапазонах. В этом случае матрица S_p принимает диагональный вид с элементами, равными дисперсиям равномерно распределенных случайных величин: $(p_{i, \max} - p_{i, \min})^2/12$. Диапазоны поиска калибровочных констант K_i в формуле (5) не ограничивались, поэтому значения соответствующих им элементов матрицы S_p^{-1} равны нулю. Элементы ковариационной матрицы погрешностей измерения S_L зависят от уровня шума, фоновой засветки и нелинейных искажений фотоприемного устройства, а также от самого регистрируемого сигнала и времени его накопления по последовательно посылаемым в атмосферу лазерным импульсам [8]. Однако ввиду отсутствия в нашем распоряжении достаточной информации о точностных характеристиках лидара и условиях регистрации сигналов матрица S_L задавалась в диагональном виде с элементами, получаемыми на основе лидарного уравнения (1) и модели высотной стратификации атмосферы:

$$(S_L)_{kk} = \langle \Delta L(r_k) \Delta L(r_k) \rangle \approx \left(\frac{\beta_{\pi, a}(r_{\max}) + \beta_{\pi, m}(r_{\max})}{\beta_{\pi, a}(r) + \beta_{\pi, m}(r)} \exp \left\{ -2 \int_r^{r_{\max}} [\varepsilon_a(r') + \varepsilon_m(r')] dr' \right\} \left(\frac{r}{r_{\max}} \right)^2 \delta P(r_{\max}) \right)^2, \quad (10)$$

где $\langle \dots \rangle$ — усреднение по множеству случайных реализаций сигнала $L(r) = \ln(P(r)r^2)$; $\Delta L(r)$ — его случайное отклонение, вызванное погрешностью измерений $\delta P(r)$; $r_{\max}$ — максимальная дальность зондирования. Профили показателей взаимодействия света с молекулами воздуха вычислены в рамках стандартной модели атмосферы для лета средних широт [20]. Для оценки аналогичных характери-

стик аэрозоля использована экспоненциальная модель его высотного распределения $\varepsilon_a(z) = \varepsilon_a(z=0) \times \exp(-z/z_a)$, где $z_a = 1.5$ км [21]. Лидарное отношение, задающее связь между ε_a и $\beta_{\pi, a}$, выбрано равным 70 ср, что соответствует его среднему значению для континентального аэрозоля [22]. Величина $\delta P(r_{\max})$, имеющая смысл погрешности измерения сигнала $P(r)$ в конечной точке трассы, использована в качестве эмпирического параметра, посредством которого регулируется сходимость алгоритма.

Исходные экспериментальные сигналы охватывают диапазон высот в атмосфере 0.8—6.8 км с разрешением ~ 15 м. Поскольку предложенный алгоритм интерпретации данных лидарного зондирования предполагает, что параметры распределения по размерам частиц каждой моды аэрозоля не изменяются по зондируемой трассе, обеспечить его работоспособность в столь широком диапазоне высот оказалось невозможным ни при каких параметрах регуляризации в уравнении (8). В связи с этим анализировались только сигналы, принятые с высот ≤ 5 км. Это позволило достичь быстрой сходимости алгоритма и хорошего воспроизведения экспериментальных сигналов в рамках используемой модели аэрозоля (рис. 1).

Профили объемных концентраций мелкодисперсной и грубодисперсной мод аэрозоля, восстановленные разработанным алгоритмом только из лидарных сигналов и алгоритмом LIRIC [6] с привлечением радиометрических данных, сопоставлены на рис. 2. Видно, что различия между высотными распределениями мелкодисперсных частиц аэрозоля, полученными двумя алгоритмами, в целом незначительны (среднеквадратическое отклонение $4 \cdot 10^{-4}$ мм³/м³) и находятся в пределах апостериорной погрешности, получаемой по формуле (9). Наибольшие расхождения полученных результатов наблюдаются для нижних слоев атмосферы ($r < 1.8$ км), что имеет объяснение. Дело в том, что при комплексном анализе данных лидара и солнечного фотометра необходимо каким-либо образом доопределить профили $C_1(r)$ и $C_2(r)$ в области высот, с которых лидарные сигналы не принимаются. В первую очередь это касается теневой зоны лидара, которая в данном случае составляет ~ 0.8 км и содержит значительную массу аэрозоля. В алгоритме LIRIC высотные профили $C_1(r)$ и $C_2(r)$ в пределах теневой зоны лидара доопределяются константами, что автоматически приводит к завышению или занижению искомых величин на прилегающих к этой зоне участках трассы зондирования.

Несмотря на принципиальные различия двух алгоритмов в плане моделирования формы частиц аэрозоля (в алгоритме LIRIC аэрозоль моделируется смесью сферических и сфероидальных частиц, в нашем алгоритме используется модель сферических частиц Ми), вертикальные распределения мелкодисперсной моды аэрозоля, полученные двумя алгоритмами, хорошо согласуются (рис. 2, а). Такой результат вполне ожидаем ввиду сравнительно малых дифракционных параметров частиц мелкодисперсной моды аэрозоля, с уменьшением которых влияние формы частиц на их оптические характеристики быстро ослабевает [23]. Это дает основание утверждать, что при исследовании вертикальных распределений мелкодисперсных частиц в атмосфере на основе лидарного зондирования для решения обратной задачи вполне можно ограничиться моделью полидисперсных сферических частиц.

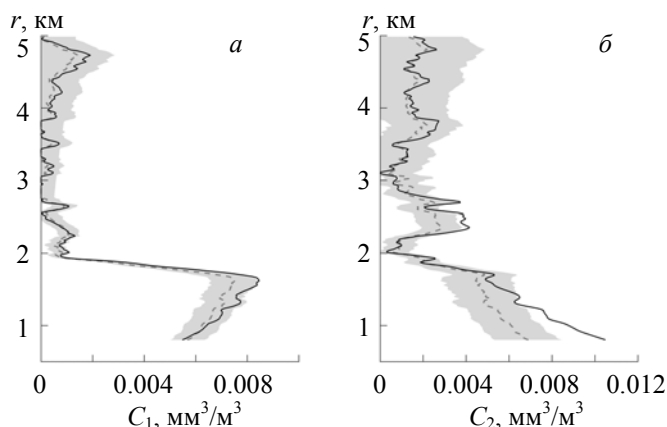


Рис. 2. Результаты восстановления профилей объемных концентраций мелкодисперсного C_1 (а) и грубодисперсного C_2 (б) компонентов аэрозоля из лидарных сигналов с использованием алгоритма LIRIC (сплошная линия) и алгоритма авторов (штриховая), закрашенные области соответствуют среднеквадратическим отклонениям восстановленных профилей, полученным на основе апостериорной ковариационной матрицы (9)

Для грубодисперсных частиц ситуация обстоит иначе. Профили их объемной концентрации, восстановленные двумя алгоритмами, различаются достаточно сильно на протяжении всей трассы, зондируемой лидаром (рис. 2, б). Причин этому может быть несколько, в том числе сильное влияние формы больших частиц на их оптические характеристики, несоответствие априорно задаваемой матрицы S_L условиям измерений лидарных сигналов, неопределенность профиля $C_2(r)$ в теневой зоне лидара, сказывающаяся на эффективности алгоритма LIRIC, и т. д. На наш взгляд, основная причина различия восстановленных профилей концентрации грубодисперсных частиц — недостаточная чувствительность к ним сигналов обратного рассеяния, регистрируемых на рабочих длинах волн лидара. Как известно, в ближней УФ и видимой областях спектра электромагнитного излучения сечения оптических взаимодействий мелкодисперсных частиц превышают аналогичные сечения грубодисперсных частиц более чем на порядок [9]. В ближнем ИК диапазоне спектра эти различия не столь существенны, поэтому наибольшую информацию о грубодисперсном компоненте аэрозоля содержит лидарный сигнал на $\lambda = 1064$ нм. Однако оптическая толщина всей трассы зондирования на этой длине волны мала (аэрозольное ослабление света в атмосфере убывает с длиной волны по закону Ангстрема как $1/\lambda^v$, где $v \sim 0.5\text{—}2.0$), поэтому экспонента в формуле (1) для лидарного сигнала близка к единице и он в первую очередь определяется профилем аэрозольного показателя обратного рассеяния. Последний зависит от произведения концентрации и сечения обратного рассеяния грубодисперсных частиц, что делает невозможным определение по нему искомой концентрации при неизвестных параметрах микроструктуры частиц. Указанная проблема свойственна всем алгоритмам интерпретации данных многочастотного лидара и может быть преодолена только за счет использования дополнительной априорной информации, получаемой другими методами исследования аэрозоля (в частности, фотометрическим методом).

Закключение. Результаты восстановления микрофизических параметров аэрозоля из экспериментальных лидарных сигналов разработанным алгоритмом вполне согласуются с его информационными возможностями [9]. Алгоритм позволяет получать адекватные оценки объемной концентрации мелкодисперсных частиц аэрозоля в атмосфере, несмотря на упрощенное описание их формы моделью однородных сфер, причем эта задача решается без необходимости калибровки лидара и установления опорных значений оптических параметров аэрозоля на трассе зондирования. Профиль концентрации грубодисперсной моды аэрозоля, восстанавливаемый из лидарных сигналов разработанным алгоритмом, в целом отражает особенности ее вертикального распределения в атмосфере, но мало пригоден для количественных оценок этого распределения. Для решения этой задачи, по-видимому, необходимо привлечение дополнительных методов исследования аэрозоля.

Данные совместных лидарных и фотометрических измерений, с которыми проводилось сравнение разработанного нами алгоритма, представлены результатами решения обратной задачи и поэтому не дают прямой информации о микрофизических параметрах аэрозоля. В связи с этим на основании проведенного сравнения можно говорить лишь о возможности получения непротиворечивых оценок микрофизических параметров аэрозоля по лидарным сигналам без вспомогательных измерений, что позволяет рассматривать предложенный алгоритм в качестве одного из возможных алгоритмов обработки данных в действующих лидарных сетях.

Авторы выражают глубокую признательность заведующему Центром оптического дистанционного зондирования НАН Беларуси, канд. физ.-мат. наук А. П. Чайковскому за любезно предоставленные данные для верификации описанного алгоритма.

- [1] В. Е. Зуев, И. Э. Наац. Обратные задачи лазерного зондирования атмосферы, Новосибирск, Наука (1982)
- [2] А. П. Чайковский, А. П. Иванов, Ю. С. Балин, А. В. Ельников, Г. Ф. Тулинов, И. И. Плюснин, О. А. Букин, Б. Б. Чен. Опт. атм. и океана, 18, № 12 (2005) 1066—1072
- [3] G. Pappalardo, A. Amodeo, A. Apituley, A. Comeron, V. Freudenthaler, H. Linne, A. Ansmann, J. Bösenberg, G. D'Amico, I. Mattis, L. Mona, U. Wandinger, V. Amiridis, L. Alados-Arboledas, D. Nicolae, M. Wiegner. *Atm. Meas. Technol.*, 7, № 8 (2014) 2389—2409
- [4] A. Chaikovsky, A. Ivanov, Yu. Balin, A. Elnikov, G. Tulinov, J. Plusnin, O. Bukin, B. Chen. *Proc. SPIE*, 6160 (2006) 616035-1—616035-9
- [5] J.-C. Raut, P. Chazette. *Atm. Chem. Phys.*, 7, N 11 (2007) 2797—2815

- [6] A. Chaikovsky, O. Dubovik, B. Holben, A. Bril, P. Goloub, D. Tanre, G. Pappalardo, U. Wandinger, L. Chaikovskaya, S. Denisov, Y. Grudo, A. Lopatin, Y. Karol, T. Lapyonok, V. Amiridis, A. Ansmann, A. Apituley, L. Allados-Arboledas, I. Binietoglou, A. Boselli, G. D'Amico, V. Freudenthaler, D. Giles, M. J. Granados-Muñoz, P. Kokkalis, D. Nicolae, S. Oshchepkov, A. Papayannis, M. R. Perrone, A. Pietruczuk, F. Rocadenbosch, M. Sicard, I. Slutsker, C. Talianu, F. De Tomasi, A. Tsekeri, J. Wagner, X. Wang. *Atm. Meas. Tech. Discuss*, **8**, N 12 (2015) 12759—12822
- [7] I. Binietoglou, S. Basart, L. Alados-Arboledas, V. Amiridis, A. Argyrouli, H. Baars, J. M. Baldasano, D. Balis, L. Belegante, J. A. Bravo-Aranda, P. Burlizzi, V. Carrasco, A. Chaikovsky, A. Comerón, G. D'Amico, M. Filioglou, M. J. Granados-Muñoz, J. L. Guerrero-Rascado, L. Ilic, P. Kokkalis, A. Maurizi, L. Mona, F. Monti, C. Muñoz-Porcar, D. Nicolae, A. Papayannis, G. Pappalardo, G. Pejanovic, S. N. Pereira, M. R. Perrone, A. Pietruczuk, M. Posyniak, F. Rocadenbosch, A. Rodríguez-Gómez, M. Sicard, N. Siomos, A. Szkop, E. Terradellas, A. Tsekeri, A. Vukovic, U. Wandinger, J. Wagner. *Atm. Meas. Technol.*, **8**, N 9 (2015) 3577—3600
- [8] A. Lopatin, O. Dubovik, A. Chaikovsky, P. Goloub, T. Lapyonok, D. Tanre, P. Litvinov. *Atm. Meas. Technol.*, **6**, N 8 (2013) 2065—2088
- [9] С. А. Лысенко, М. М. Кугейко, В. В. Хомич. *Опт. атм. и океана*, **29**, № 5 (2016) 404—413
- [10] V. A. Kovalev, W. E. Eichinger. *Elastic Lidar: Theory, Practice, and Analysis Methods*, Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons (2004)
- [11] A. H. Omar, D. Winker, J. Won. *Proc. SPIE*, **5240** (2003) 153—164
- [12] L. Jun, L. Daren. *Adv. Atm. Sci.*, **14**, № 04 (1997) 473—480
- [13] Ю. М. Тимофеев, А. В. Поляков. *Математические аспекты решения обратных задач атмосферной оптики*, Санкт-Петербург, Изд-во СПб университета (2001)
- [14] Jung, H. Lee, Y. J. Kim, X. Liu, Y. Zhang, M. Hu, N. Sugimoto. *J. Geophys. Res. D*, **114**, N 2 (2009) D00G02
- [15] М. М. Кугейко, Д. М. Оношко. *Теория и методы оптико-физической диагностики неоднородных рассеивающих сред*, Минск, БГУ (2003)
- [16] А. Лысенко, М. М. Кугейко, В. В. Хомич. *Опт. атм. и океана*, **29**, № 1 (2016) 70—79
- [17] С. А. Лысенко, М. М. Кугейко, В. В. Хомич. *Опт. атм. и океана*, **28**, № 3 (2015) 199—209
- [18] Goddard Space Flight Center, AERONET; <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>, Date of access: 15.01.2016
- [19] M. R. Perrone, P. Burlizzi, F. De Tomasi, A. Chaikovsky. *Atm. Measur. Tech. Discuss*, **7**, N 8 (2014) 8881—8926
- [20] The MODTRAN 2/3 Report and LOWTRAN 7 MODEL, Eds. L. W. Abreu, G. P. Anderson (1996); <http://web.gps.caltech.edu/~vijay/pdf/modrept.pdf>. Date of access: 15.01.2016
- [21] D. Turner, R. A. Ferrare, L. A. Brasseur. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, N 23 (2001) 4441—4444
- [22] A. H. Omar, D. Winker, J. Won. *Proc. SPIE*, **5240** (2003) 153—164
- [23] M. I. Mishchenko, L. D. Travis, A. A. Lacis. *Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles*, Cambridge Univ. Press, New York (2002)