

ОСОБЕННОСТЬ ОЦЕНИВАНИЯ АЛЬБЕДО ОДНОКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ПО ЛИДАРНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

Самойлова С.В.¹, Алтынникова Л.А.²

¹ Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск, Россия

² Американский университет в Центральной Азии, Бишкек, Кыргызская Республика

e-mail: ssv@seversk.tomsknet.ru, alltynnikova_l@auca.kg

Система «ЛОЗА-С», Томск, обеспечивает коэффициентами обратного рассеяния β и ослабления σ на длинах волн $\lambda = 355\text{--}1064$ нм с шагом 12 м по высоте. Набор параметров ($3\beta + 2\sigma$) допускает отдельную по фракциям, совместную оценку показателя преломления $m = m_{\text{real}} + m_{\text{image}} * i$ и функции распределения частиц по размерам $U(r) = U^{\text{fine}}(r) + U^{\text{coarse}}(r)$, r – радиус частиц. Ошибки восстановления $m^{\text{fine}} + U^{\text{fine}}(r) / m^{\text{coarse}} + U^{\text{coarse}}(r)$ и соответствующих альбедо исследуются при справедливости $m^{\text{fine}} < / \text{или} > m^{\text{coarse}}$.

Ключевые слова: лидар, оптические параметры, обратная задача, микрофизические характеристики

При использовании потоков и притоков излучения на различных высотах атмосферы необходимо задание стратификации радиационно-значимых параметров атмосферного аэрозоля [1-3]. Одним из них является альbedo однократного рассеяния света ω , соответствующее отношению оптических коэффициентов общего рассеяния α и ослабления σ [4-8]. Осредненное по столбу атмосферы значение ω можно восстановить [6], решая обратную задачу с данными наземных спектральных измерений прямой и рассеянной солнечной радиации. Высотные наблюдения проводятся на лидарных системах [9, 10]. Обработка их сигналов не позволяет оценивать α , но по восстановленным значениям $m + U(r)$ оценка $\omega(\lambda) = \alpha(\lambda) / \sigma(\lambda)$ вполне допустима и является прямой задачей при решении интегрального уравнения на длине волны λ .

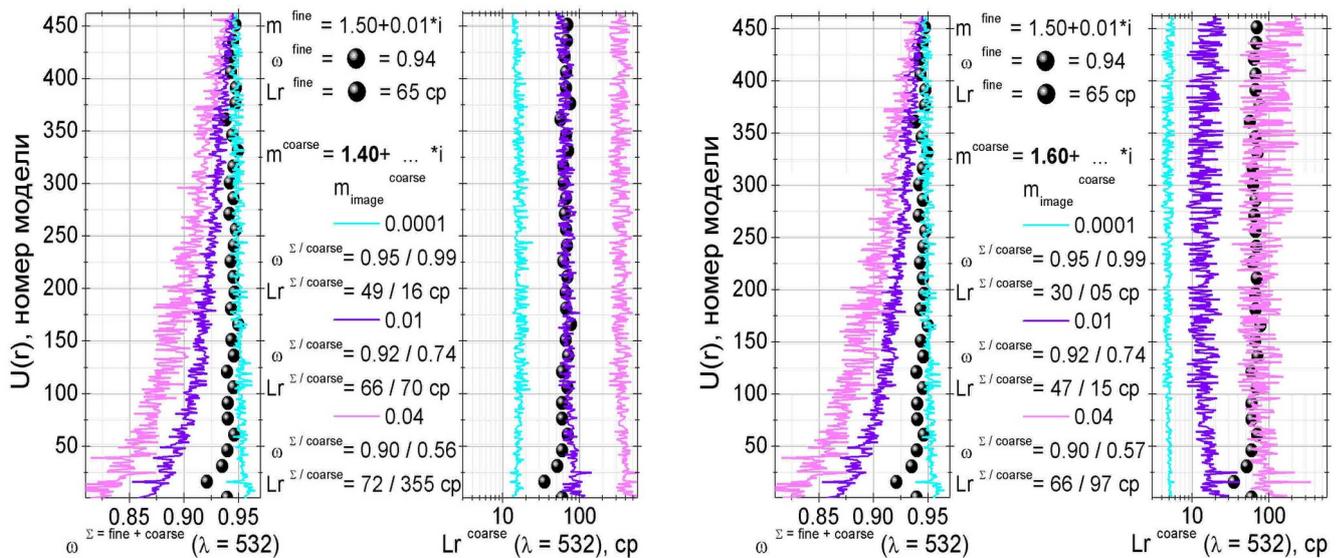


Рис. 1. Модельная вариация оптических параметров; здесь и далее

слева – их значения при $m_{\text{real}}^{\text{fine}} > m_{\text{real}}^{\text{coarse}} = 1.40$, справа – $m_{\text{real}}^{\text{fine}} < m_{\text{real}}^{\text{coarse}} = 1.60$.

Связь между оптическими и микрофизическими параметрами, $\lambda = 532$ нм, иллюстрирует рис. 1. Левая панель обеих частей рисунка показывает изменчивость $\omega^{\text{true}}(532)$, правая – лидарного отношения $Lr^{\text{true}}(532) = \sigma^{\text{true}}(532) / \beta^{\text{true}}(532)$. Расчеты проводились для фиксированного значения $m^{\text{true, fine}} = 1.50 + 0.01 \cdot i$ и изменяющихся величин $m^{\text{true, coarse}}$ ($m_{\text{real}} = 1.40, 1.60$; $m_{\text{image}} = 0.0001, 0.01, 0.04$). Использовались 462 эмпирические модели $U^{\text{true}}(r)$, ансамбль которых был преобразован по возрастанию вклада мелких частиц в суммарную объемную концентрацию $V^{\text{fine}} / V^{\Sigma} = V^{\text{fine}} / (V^{\text{fine}} + V^{\text{coarse}})$, $V^{\text{mode}} = \int U^{\text{mode}}(r) dr / r$. Основное количество моделей соответствует среднему значению $0.35 \leq V^{\text{fine}} / V^{\Sigma} \leq 0.7$; первые 80 моделей – преобладанию крупных частиц, $V^{\text{fine}} / V^{\Sigma} < 0.35$; последние 80 моделей – преобладанию мелких, $V^{\text{fine}} / V^{\Sigma} > 0.7$.

Анализ показывает, что составляющие показателя преломления оказывают заметное и разнонаправленное влияние на рассматриваемые параметры. Например, возрастание $m_{\text{image}}^{\text{coarse}}$ однозначно приводит к уменьшению ω (выражено при $V^{\text{fine}} / V^{\Sigma} < 0.35$) и увеличению Lr (не зависит от $V^{\text{fine}} / V^{\Sigma}$). Разница $m_{\text{real}}^{\text{fine}}$ и $m_{\text{real}}^{\text{coarse}}$ почти не меняет ω , но обеспечивает в разы большие значения Lr^{coarse} , если справедливо $m_{\text{real}}^{\text{fine}} > m_{\text{real}}^{\text{coarse}}$. Выраженная зависимость Lr от рассеивающей и поглощающей компоненты m [11] дает возможность решать обратную задачу и отдельно восстанавливать $m^{\text{fine}} + U^{\text{fine}}(r)$ и $m^{\text{coarse}} + U^{\text{coarse}}(r)$ по лидарным измерениям.

Совместное определение m и $U(r)$ сводится к прямой минимизации функционала невязки $\Phi(m)$ на плоскости физически обоснованных значений m [9-13]. В каждой точке на $(m_{\text{real}}, m_{\text{image}})$ по m определяются ядра уравнений, и на их основе восстанавливается функция распределения. Глобальный минимум $\Phi(m)$ соответствует искомым m и $U(r)$, алгоритмическая процедура состоит из двух этапов.

На первом этапе рассчитываются $m^{\text{mean}} + U^{\text{mean}}(r)$ в приближении $m^{\text{mean}} \approx m^{\text{fine}} \approx m^{\text{coarse}}$. $\Phi(m^{\text{mean}})$ строится на разнице значений $(3\beta + 2\sigma)$, измеряемых и рассчитанных по m^{mean} [12]. Большая точность параметров мелких частиц используется при последующем делении ядер исходных уравнений по фракциям. На втором этапе ядра уравнений сохраняются в приближении $m^{\text{mean}} \approx m^{\text{fine}}$ для $r < 0.6$ мкм, при $r > 0.6$ мкм они меняются в каждой точке на плоскости $(m_{\text{real}}, m_{\text{image}})$. В [13] функционал $\Phi(m^{\text{calc}})$ был сформирован для слабо поглощающих частиц ($m_{\text{image}}^{\text{coarse}} = 0.0001$) и основывался на разнице объемной концентрации крупных частиц. Дополнительно вводились жесткие ограничения на область допустимых значений ОДЗ в обеих фракциях функции распределения частиц. Подход – $m^{\text{calc}} \{\text{деление ядер}\} + U^{\text{calc}}(r) \{\text{ОДЗ}\}$ – сохраняется, но результат исследуется также в переходной зоне слабо / средне ($m_{\text{image}}^{\text{coarse}} = 0.01$) и средне / сильно ($= 0.04$) поглощающих частиц.

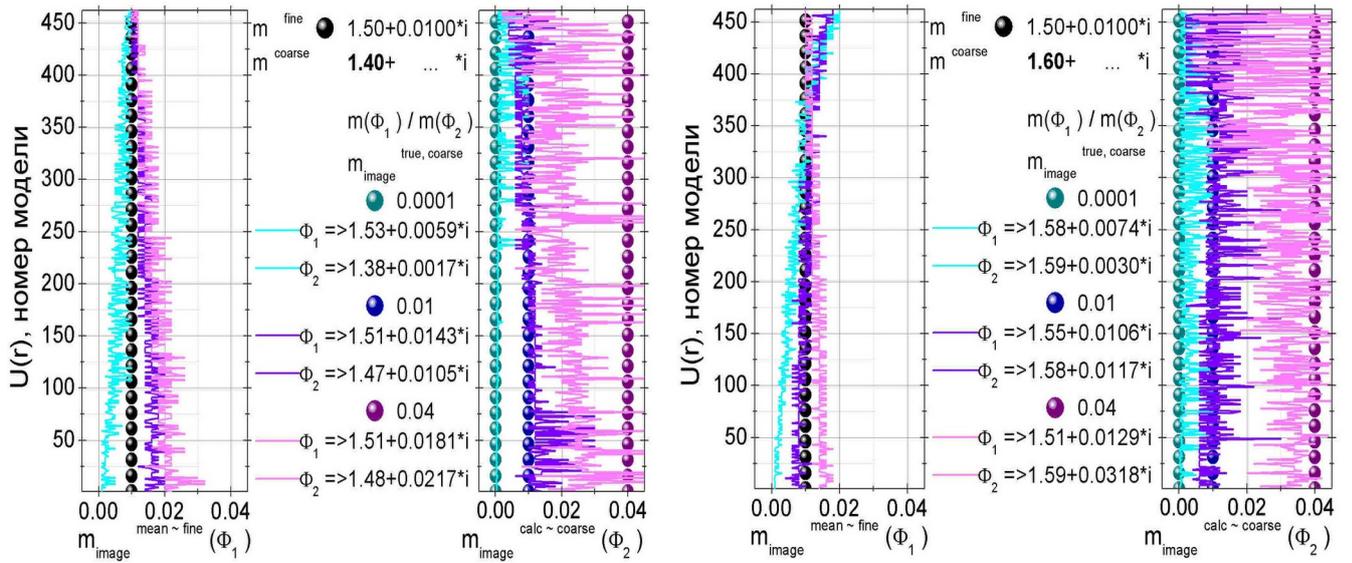


Рис. 2. Восстановленные составляющие показателя преломления.

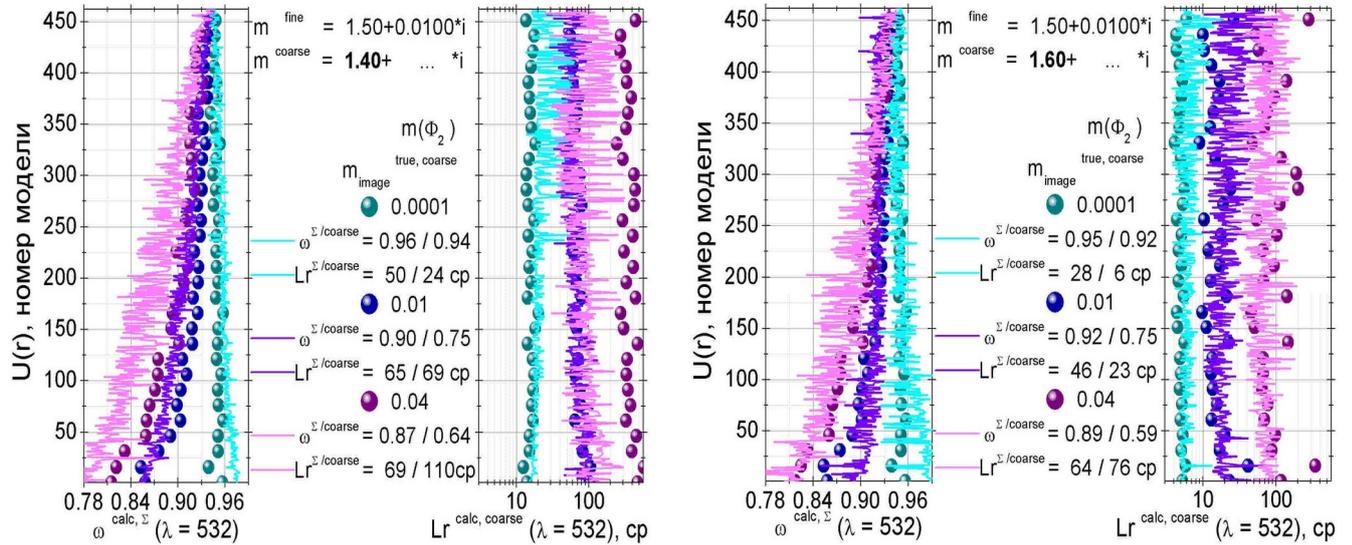


Рис. 3. Сопоставление модельных и оцениваемых оптических параметров.

Расхождение восстанавливаемых величин $m^{\text{mean} \sim \text{fine}}$ и $m^{\text{calc} \sim \text{coarse}}$ иллюстрирует рис. 2, вариацию соответствующих $\omega^{\text{calc}, \Sigma}$ (532) и $Lr^{\text{calc}, \text{coarse}}$ (532) – рис. 3. Если $m_{\text{real}}^{\text{fine}} < m_{\text{real}}^{\text{coarse}}$ (правая часть рис. 2 и 3), алгоритмическая процедура разделяет показатель преломления по фракциям и обеспечивает правдоподобие $\omega^{\text{calc}, \Sigma}$ (532), $Lr^{\text{calc}, \Sigma / \text{fine} / \text{coarse}}$ (532) для произвольных значений $m_{\text{image}}^{\text{coarse}}$. Когда же $m_{\text{real}}^{\text{fine}} > m_{\text{real}}^{\text{coarse}}$ (левая часть рис. 2 и 3), меньшая информативность – и большие погрешности искомых параметров – крупных частиц приводит к большим ошибкам $m^{\text{calc}, \text{coarse}}$, $Lr^{\text{calc}, \text{coarse}}$ (532), $\omega^{\text{calc}, \Sigma}$ (532) и справедливости $U^{\text{mean} \sim \text{calc}, \text{coarse}}(r)$ при значениях $m_{\text{image}}^{\text{coarse}} > 0.01$.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

Литература

1. Hansen J.E., Travis L.D. Light scattering in planetary atmospheres // Space Sci. Rev. 1974. V. 16. P. 527–610. <https://doi.org/10.1007/BF00168069>.
2. Haywood J., Boucher O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review // Rev. Geophys. 2000. V. 38. P. 513–543. <https://doi.org/10.1029/1999RG000078>.
3. Seinfeld J., Pandis S. Chemistry and Physics: from Air Pollution to Climate Change // New York: John Wiley & Sons Inc. 2016. Available at: https://books.google.co.uk/books?id=n_RmCgAAQBAJ.
4. Twomey S. Pollution and the planetary albedo // Atmos. Environ. 1974. V. 8. P. 1251–1256.
5. Loeb N.G., Su W. Direct Aerosol Radiative Forcing Uncertainty Based on a Radiative Perturbation Analysis // J. Climate 2010. V. 23. P. 5288–5293. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3543.1>.
6. Panchenko M.V., Zhuravleva T.B. Vertical profile of optical and microphysical characteristics of tropospheric aerosol from aircraft measurements // In: Kokhanovsky A. ed. Light Scattering Rev. 2015. P. 199–234. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46762-6>.
7. Lacagnina C., Hasekamp O.P., Bian H., Curci G., Myhre G., van Noije T., et al. Aerosol single-scattering albedo over the global oceans: Comparing PARASOL retrievals with AERONET, OMI, and Aero-Com models estimates // J. Geophys. Res.-Atmos. 2015. V. 120. P. 9814–9836. <https://doi.org/10.1002/2015JD023501>.
8. Quaas J., Arola A., Cairns B., Christensen M., Deneke H., Ekman A.M.L., et al. Constraining the Twomey effect from satellite observations: issues and perspectives // Atmos. Chem. Phys. 2020. V. 20. P. 15079–15099. <https://doi.org/10.5194/acp-20-15079-2020>.
9. Pérez-Ramírez D., Whiteman D.N., Veselovskii I., Colarco P., Korenski M., da Silva A. Retrievals of aerosol single-scattering albedo by multiwavelength lidar measurements: Evaluations with NASA Langley HSRL-2 during discover-AQ field campaigns // Remote Sens. Environ. 2019. V. 222. P. 144–164. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.022>.
10. Pérez-Ramírez D., Whiteman D.N., Veselovskii I., Korenskiy M., Colarco P., da Silva A. Optimized profile retrievals of aerosol microphysical properties from simulated spaceborne multiwavelength lidar // J. Quant. Spectrosc. Ra. 2020. V. 246. P. 106932. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.106932>.
11. Müller D., Chemyakin E., Kolgotin A., Ferrare R.A., Hostetler C.A., Romanov A. Automated, unsupervised inversion of multiwavelength lidar data with TiARA: assessment of retrieval performance of microphysical parameters using simulated data // Appl. Opt. 2019. V. 58. P. 4981–5008. <https://doi.org/10.1364/AO.58.004981>.
12. Samoilova S.V., Penner I.E., Kokhanenko G.P., Balin Yu.S. Simultaneous reconstruction of two microphysical aerosol characteristics from the lidar data // J. Quant. Spectrosc. Ra. 2019. V. 222-223. P. 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.10.014>.
13. Samoilova S.V., Penner I.E., Balin Yu.S. Separate retrieval of microphysical characteristics in aerosol fraction // J. Quant. Spectrosc. Ra. 2022. V. 285. P. 108168. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2022.108168>.