

Оценка достоверности мониторинга аэрозольных загрязнений в атмосфере путем сравнения результатов обработки данных лидарного зондирования и локального забора проб

© А.В. Колготин

АО «ВПК «НПО машиностроения», г. Реутов,
Московская обл., 143966, Россия

Приведены данные, полученные в ходе кампании ORACLES в 2016 г. с использованием одновременно локальных и дистанционных (лидарных) методов измерения параметров атмосферных аэрозолей. Выполнена обработка данных лидарного зондирования, включающих коэффициенты обратного рассеяния аэрозолей на длинах волн 355, 532, 1064 нм и коэффициенты ослабления аэрозолей на 355, 532 нм. Зондирование проводилось с использованием лидара высокого спектрального разрешения авиационного базирования. Для обработки лидарных данных применялся специально разработанный регуляризирующий алгоритм, позволяющий восстанавливать микрофизические и оптические параметры аэрозолей. В рамках кампании ORACLES оптические и микрофизические параметры аэрозолей также определялись путем локального забора проб с борта самолета. Локальные и дистанционные (лидарные) измерения были одновременно совмещены в пространстве и времени. Локальные измерения использовались для контроля точности и достоверности результатов обработки данных лидарного зондирования с помощью регуляризирующего алгоритма. Показано, что достоверность результатов, полученных с использованием регуляризирующего алгоритма, достигает 90 %, точность оценки эффективного размера, количественной концентрации и объема — ± 25 %, реальной и мнимой частей комплексного показателя преломления — $\pm 0,05$ и $\pm 0,005$ соответственно, альбедо однократного рассеяния $\pm 0,05$.

Ключевые слова: лидарное зондирование, атмосферный аэрозоль, некорректные задачи, регуляризирующие алгоритмы, программно-математическое обеспечение

Введение. Уровень научного понимания и точность количественных оценок, связанных с аэрозольной составляющей атмосферы, являются наиболее низкими при исследовании климата и радиационного бюджета Земли [1]. Для исследования влияния аэрозольных загрязнений на окружающую среду необходима долговременная достоверная информация о временных и пространственных вариациях их характеристик.

Мониторинг аэрозольных загрязнений в атмосфере возможен благодаря применению методов дистанционного зондирования. Одним из перспективных инструментов дистанционного зондирования является лидар. Преимущество использования лидара состоит в том, что он позволяет проводить измерения с высоким разрешением по высоте (H), времени (T), работать как в дневное, так и в ночное время суток.

Для обеспечения требования глобальности мониторинга аэрозолей необходимо применение лидаров космического базирования. Пионером в создании таких лидаров еще в советскую эпоху было НПО машиностроения. В настоящее время в NASA проходит фаза летно-конструкторских испытаний лидара высокого спектрального разрешения (ЛВСП), установленного на борту самолета.

В настоящее время стали доступны данные лидарных наблюдений, полученные в ходе крупномасштабной кампании ORACLES (<https://espoarchive.nasa.gov/archive/browse/oracles/id8/ER2>). В рамках этой кампании осуществлялся локальный забор проб (ЛЗП) с борта самолета, который барражировал одновременно с самолетом, оборудованным ЛВСП. Результаты локального забора проб также находятся в открытом доступе (<https://espoarchive.nasa.gov/archive/browse/oracles/P3/mrg1>).

Таким образом, появляется уникальная возможность оценить достоверность и точность результатов обработки данных лидарных измерений с помощью существующих методов путем сравнения их с результатами ЛЗП. Настоящая статья посвящена этому исследованию.

Математическая модель и постановка задачи. Многоволновой лидар, в том числе ЛВСП, обеспечивает измерение таких оптических данных, как коэффициенты обратного рассеяния аэрозолей $\beta(\lambda)$ на длинах волн $\lambda = 355, 532, 1064$ нм и коэффициенты ослабления аэрозолей $\alpha(\lambda)$ на длинах волн $\lambda = 355, 532$ нм, — так называемый набор коэффициентов $3\beta + 2\alpha$ [2]. Оптические данные связаны с объемным распределением аэрозолей по размерам (РАР) $\nu(r)$ интегральным преобразованием:

$$\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} k_g(\lambda, m, r)\nu(r)dr = g(\lambda), \quad g = \alpha, \beta, \quad (1)$$

где ядро интегрального преобразования $k_g(\lambda, m, r)$ известно и в случае сферических частиц с радиусом r и комплексным показателем преломления (КПП) $m = m_R - im_I$ описывается теорией Ми рассеяния света [3]. В случае $g = \alpha$ ядро $k_\alpha(\lambda, m, r)$ есть функция сечения ослабления, тогда как при $g = \beta$ ядро $k_\beta(\lambda, m, r)$ — это функция сечения обратного рассеяния. Для атмосферного аэрозоля радиус и КПП удовлетворяют следующим условиям:

$$\begin{aligned} r \in [r_{\min} = 0,01 \text{ мкм}; r_{\max} = 20 \text{ мкм}], \\ m_R \in [1,3; 1,8], \quad m_I \in [0; 0,1]. \end{aligned} \quad (2)$$

Распределение аэрозолей по размерам является неизвестной характеристикой и должно быть восстановлено при мониторинге атмосферы. Оно, в свою очередь, позволяет найти такие микрофизические параметры аэрозолей, как эффективный размер r_{eff} , количественная концентрация n , объем v , а также альbedo однократного рассеяния $\omega(\lambda)$:

$$r_{\text{eff}} = \frac{\int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} v(r) dr}{\int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} \frac{v(r)}{3r} dr}, \quad n = \frac{3}{4\pi} \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} \frac{v(r)}{r^3} dr,$$

$$v = \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} v(r) dr, \quad \omega(\lambda) = \frac{\int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} k_s(\lambda, m, r) v(r) dr}{\int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} k_\alpha(\lambda, m, r) v(r) dr}. \quad (3)$$

Здесь $k_s(\lambda, m, r)$ — это функция сечения общего рассеяния [3].

Таким образом, возникающей задачей восстановления $v(r)$ является необходимость решения интегрального уравнения Фредгольма I рода. Это классическая обратная задача, которая относится к классу некорректных. Кроме того, в задаче ядро $k_g(\lambda, m, r)$ задано неточно, поскольку в общем случае параметр m неизвестен и должен быть оценен, так же как и $v(r)$. В операторном виде данная задача может быть переписана как

$$A_m v = g, \quad (4)$$

где A_m — оператор Фредгольмовского типа I рода с неточно заданным ядром, зависящим от параметра m .

Метод решения задачи. Решение некорректных задач типа (4) требует привлечения специальных методов. Эти методы основаны на построении регуляризирующих алгоритмов. При регуляризации по Тихонову рассматривается одноименный сглаживающий функционал [4]:

$$M(v) = \| A_m v - g \|^2 + \gamma \Omega[v], \quad (5)$$

где Ω — стабилизатор, а неотрицательный параметр γ определяет степень «стабилизации», или сглаживания, решения v . Минимизация функционала Тихонова при некотором параметре γ позволяет найти одно из решений — так называемое квазирешение задачи (4) по правилу

$$v = (A_m^* A_m + \gamma \Omega')^{-1} A_m^* g. \quad (6)$$

Здесь A_m^* — оператор, сопряженный оператору A_m ; Ω' — производная по Фреше функционала Ω [5].

Существуют различные подходы к нахождению оптимального параметра регуляризации γ^* [6]. К наиболее обоснованным и эффективным подходам относится использование метода невязки [4], в соответствии с которым параметр γ^* выбирают из условия равенства невязки измерительной погрешности δ :

$$\|A_m v_{\gamma^*} - g\|^2 = \delta^2, \quad (7)$$

где квазирешение v_{γ^*} находят по правилу (6). Однако при лидарном зондировании оценка измерительной погрешности вносит дополнительные сложности. В связи с этим автором был разработан подход, основанный на принципе минимума модифицированной невязки для оценки оптимального параметра регуляризации при отсутствии данных о значении δ [7]:

$$\|A_m/v_{\gamma} - g\|^2 \rightarrow \min_{\gamma > 0}. \quad (8)$$

При таком подходе используется информация о том, что всюду на области определения значение РАР является неотрицательным: $v \geq 0$. Поэтому, с одной стороны, знак модуля $|\dots|$ в выражении (8) не «меняет» свойств РАР, а с другой — позволяет идентифицировать осцилляции в v , возникающие вследствие плохой обусловленности оператора A и неустойчивости некорректной задачи к измерительным ошибкам в g .

Дополнительная стабилизация квазирешений достигается путем их усреднения в окрестности минимума модифицированной невязки (8) [8]. Параметры m из соответствующих интервалов (2), при которых были получены квазирешения в окрестности минимума модифицированной невязки, также усредняются. Усредненная функция v_{av} является окончательным решением задачи (4), а усредненный параметр m_{av} — искомая оценка КПП [9].

Данное решение получено на некоторой фиксированной высоте H и в фиксированный момент времени T , разрешения и диапазоны изменения которых определяются техническими характеристиками и продолжительностью работы лидара. Рассмотрение задачи (4) для всех имеющихся данных $g(H, T)$ позволяет восстановить характеристики v и m как функции высоты и времени [10].

Достоверность и точность представленного регуляризирующего метода обработки лидарных данных в целях восстановления физических параметров аэрозолей будут оценены далее.

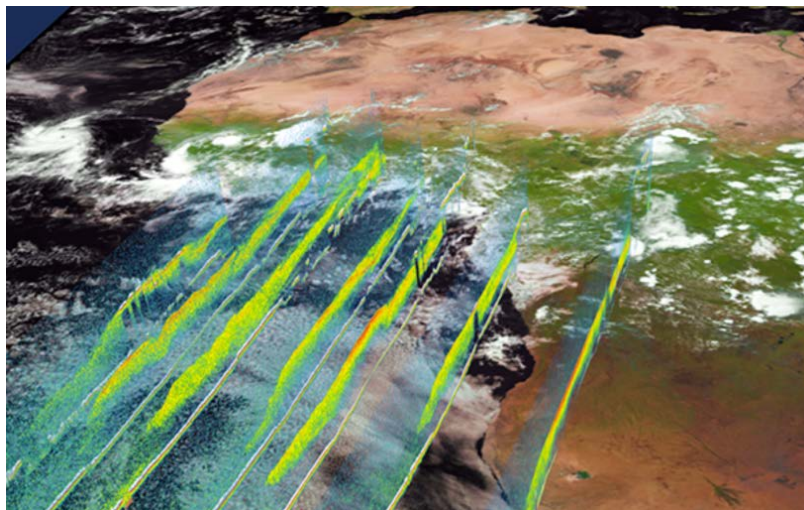


Рис. 1. Аэрозольные слои, наблюдаемые в ходе кампании ORACLES (<https://espoarchive.nasa.gov/archive/browse/oracles>)

Измерительная кампания ORACLES. ORACLES (ObseRvations of Aerosols above CLouds and their intEractionS) — это крупномасштабная кампания по наблюдению за облаками, аэрозолями, возникшими в результате горения продуктов биомассы в Африке, и их взаимодействиями. Кампания проводилась в 2016 г. над Атлантическим океаном недалеко от юго-западного побережья Африки (рис. 1). Наблюдения осуществлялись одновременно с помощью дистанционных методов зондирования и локального забора проб с борта самолета. На рис. 1 видны аэрозольные слои в верхней части тропосферы и подстилающий слой, образованный облаками.

Дистанционное зондирование с использованием ЛВСП авиационного базирования проводилось с разрешением 300 м по высоте H (вертикальное направление) и 1 мин по времени T или, с учетом номинальной скорости самолета, 6 км (горизонтальное направление). В ходе зондирования измерялись коэффициенты обратного рассеяния аэрозолей на длинах волн 355, 532 и 1064 нм, коэффициенты ослабления на длинах волн 355 и 532 нм (набор коэффициентов $3\beta + 2\alpha$).

Одновременно микрофизические и оптические свойства аэрозолей измерялись локальными методами с борта самолета, оборудованного изокинетическим, низкотурбулентным каналом для забора образцов частиц и аэрозольным спектрометром повышенной чувствительности [11]. Оборудование для ЛЗП обеспечивало измерение параметров аэрозолей с разрешением 1 с.

Полученные в ходе кампании ORACLES данные от 12, 20 и 24 сентября 2016 г. опубликованы и находятся в открытом доступе (<https://espoarchive.nasa.gov/archive/browse/oracles/>). На рис. 2, *a* пока-

заны результаты измерения с помощью ЛВСП коэффициента ослабления на длине волны 355 нм от 12 сентября 2016 г. в период между 500 мин (примерно 8:30 по местному времени) и 875 мин (15:00).

Анализ результатов. Данные о наборе коэффициентов $3\beta + 2\alpha$, полученные при лидарном зондировании 12, 20 и 24 сентября 2016 г., обрабатывались на основе описанного выше регуляризирующего алгоритма. На рис. 2, б–г показаны результаты восстановления эффективного радиуса (δ), количественной концентрации (ϵ) и РАР на высоте $H = 2,9$ км (красная сплошная кривая), 3,8 км (зеленая сплошная) и 4,7 км (синяя сплошная) в период между 852 и 871 мин (г) по лидарным данным от 12 сентября 2016 г. (см. рис. 2, а).

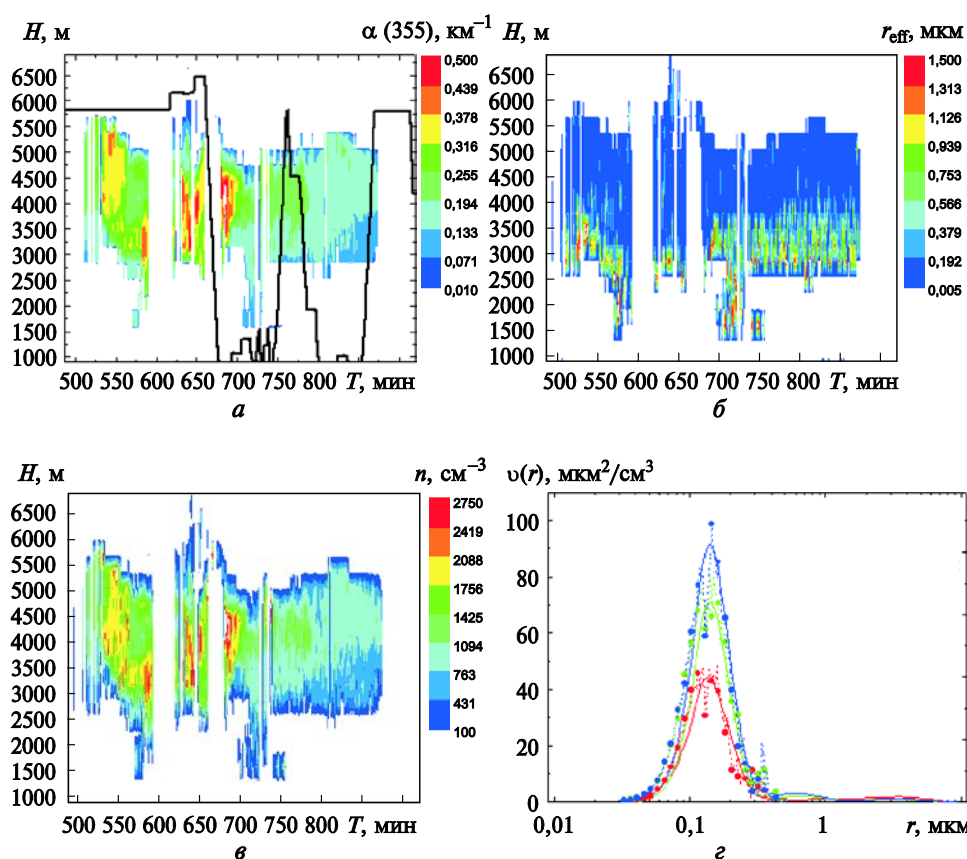


Рис. 2. Результаты измерений и обработки данных:

а — коэффициент ослабления, измеренный с помощью ЛВСП на длине волны 355 нм 12 сентября 2016 г., и траектория движения самолета, оборудованного инструментами для ЛЗП (черная кривая); б–г — результаты обработки данных лидарного зондирования $3\beta + 2\alpha$ от 12 сентября 2016 г. на основе регуляризирующего алгоритма: эффективный размер (δ), количественная концентрация (ϵ) и РАР на высоте $H = 2,9$ км (красная сплошная), 3,8 км (зеленая сплошная) и 4,7 км (синяя сплошная) в период между 852 и 871 мин (г). Точечные кривые на виде г — результат измерения РАР путем ЛЗП: —••— $H = 2,9$ км; —••— $H = 3,8$ км; —••— $H = 4,7$ км

На основе анализа результатов обработки данных лидарного зондирования можно сделать вывод, что 12 сентября 2016 г. в атмосфере находилось два ярко выраженных аэрозольных слоя. Нижний слой, высотой примерно до 3,5 км, характеризовался крупными частицами с эффективным размером более 0,4 мкм, тогда как верхний слой, формирующийся на высоте 3,5 км и выше, — более мелкими частицами с эффективным размером до 0,2 мкм. Дополнительный анализ показывает, что различие в размерах частиц верхнего и нижнего аэрозольных слоев обусловлено характером, или типом, РАР на этих высотах. Если в нижней части атмосферы РАР являются двухмодальными, т. е. содержащими частицы мелко- (около 0,15 мкм) и грубодисперсной (около 4 мкм) моды (красная сплошная кривая на рис. 2, *г*), то в верхней части атмосферы РАР — мономодальные и содержат преимущественно частицы мелкодисперсной моды (сплошные зеленая и синяя кривые на том же рисунке). Этот результат согласуется с «общей картиной» (см. рис. 1) и может объяснить динамику формирования облаков в подстилающем слое.

Аналогичный анализ был выполнен по результатам измерений от 20 и 24 сентября 2016 г. Для контроля точности и достоверности полученных данных автор использовал результаты ЛЗП. На рис. 2, *г* показаны измеренные таким образом РАР от 12 сентября 2016 г.

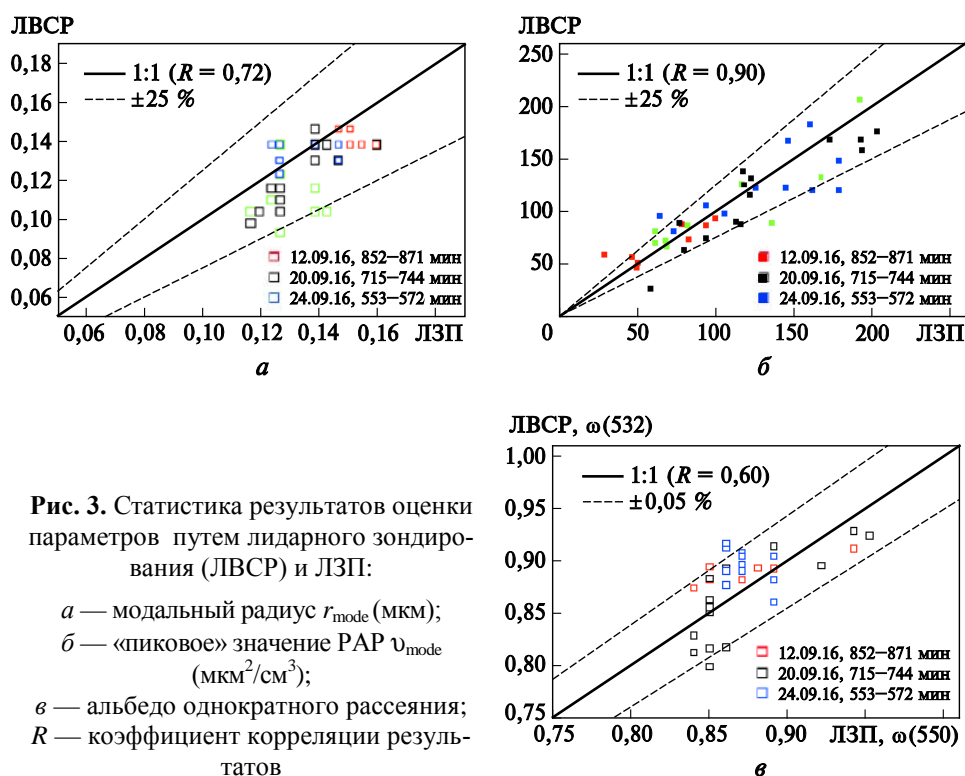


Рис. 3. Статистика результатов оценки параметров путем лидарного зондирования (ЛВСП) и ЛЗП:

a — модальный радиус r_{mode} (мкм);

b — «пиковое» значение РАР ν_{mode} (мкм²/см³);

v — альbedo однократного рассеяния;

R — коэффициент корреляции результатов

Локальные и дистанционные измерения были одновременно совмещены в пространстве (около 3...5 км над уровнем моря) и времени (852...871 мин). Как видно, РАР, восстановленные по регулизирующему алгоритму (ЛВСП) и измеренные путем ЛЗП, хорошо согласуются для мелкодисперсных частиц ($r < 0,5$ мкм). К сожалению, ЛЗП не проводился для грубодисперсных частиц ($r > 1$ мкм) в силу ограниченности характеристик используемых инструментов.

Для упрощения анализа и сравнения всех результатов, полученных по измерениям от 12, 20 и 24 сентября 2016 г., рассматриваются модальные значения радиусов РАР r_{mode} и соответствующие «пиковые» значения $\nu_{\text{mode}} = \nu(r_{\text{mode}})$. Результаты локальных измерений КПП отсутствуют. Однако альбеда однократного рассеяния (АОР) является чувствительным параметром к вариациям КПП. Кроме того, АОР само по себе представляет интерес с точки зрения исследования свойств аэрозолей. Поэтому для анализа и сравнения результатов также рассматривается параметр $\omega(\lambda)$. Его «локальные» измерения проводились на длине волны $\lambda = 550$ нм, что достаточно близко к $\lambda = 532$ нм для ЛВСП.

Статистика результатов для трех параметров, полученных с помощью регулилирующего алгоритма по данным лидарного зондирования (ЛВСП) и путем ЛЗП, представлена на рис. 3, а–в. На рисунке показано, что используемые для сравнения соответствующие параметры r_{mode} (а), ν_{mode} (б) и ω (в) распределены вдоль прямой «1:1» (сплошная серая линия на рис. 3, а–в). Коэффициент корреляции R для них составляет 0,72, 0,90 и 0,6 соответственно, что свидетельствует о высокой «коррелированности» статистических данных, особенно для параметра ν_{mode} . В наименьшей степени коррелированы параметры ω .

Действительно, практика показывает, что точность оценки КПП и, как следствие, АОР по данным лидарного зондирования вызывает наибольшую сложность. Однако «разброс» статистических данных находится в пределах $\pm 0,05$ для АОР (пунктирная серая линия на рис. 3, в). Это может означать, что реальная часть КПП m_R оценивается с сопоставимой точностью $\pm 0,05$, а мнимая часть – с точностью около $\pm 0,005$. Точность оценки параметров r_{mode} и ν_{mode} не хуже ± 25 % (пунктирная серая линия на рис. 3, а, б). С учетом выражений (3) аналогичная точность возникает для эффективного размера, количественной концентрации и объема.

Если принять уровень коэффициента корреляции рассматриваемых статистических данных как меру достоверности результатов мониторинга аэрозольных загрязнений лидарным методом, можно сделать вывод, что она достигает 90 %. При этом следует подчеркнуть, в

предположении близости данных ЛЗП к «эталонным», что точность используемого регуляризирующего алгоритма восстановления микрофизических параметров аэрозолей, таких как эффективный размер, количественная концентрация, объем (или масса), составляет $\pm 25\%$, реальной и мнимой частей КПП — $\pm 0,05$ и $\pm 0,005$ соответственно.

Заключение. Выполнена обработка полученных в рамках кампании ORACLES 12, 20 и 24 сентября 2016 г. результатов лидарного зондирования, включающих набор коэффициентов $3\beta + 2\alpha$. Для обработки данных использовался специально разработанный регуляризирующий алгоритм, позволяющий восстанавливать распределение аэрозолей по размерам, эффективный размер, количественную концентрацию, комплексный показатель преломления и другие микрофизические и оптические параметры.

В рамках кампании ORACLES оптические и микрофизические параметры аэрозолей также определялись путем локального забора проб с борта самолета. Локальные и дистанционные (лидарные) измерения были одновременно совмещены в пространстве и времени. Полученные результаты локальных измерений использовались для контроля точности и достоверности результатов обработки данных лидарного зондирования на основе регуляризирующего алгоритма.

Показано, что достоверность результатов, полученных с помощью регуляризирующего алгоритма, достигает 90 %, точность оценки микрофизических параметров — $\pm 25\%$, реальной и мнимой частей КПП — $\pm 0,05$ и $\pm 0,005$ соответственно, альbedo однократного рассеяния $\pm 0,05$.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Mishchenko M.I., Cairns B., Kopp G., Schueler C.F., Fafaul B.A., Hansen J.E., Hooker R.J., Itchkawich T., Maring H.B., and Travis L.D. *Accurate Monitoring of Terrestrial Aerosols and Total Solar Irradiance. Introducing the Glory Mission*. American Meteorological Society, May 2007, pp. 677–691.
- [2] Müller D., Hostetler C.A., Ferrare R.A., Burton S.P., Chemyakin E., Kolgotin A., Hair J.W., Cook A.L., Harper D.B., Rogers R.R., Hare R.W., Cleckner C.S., Obland M.D., Tomlinson J., Berg L.K., Schmid B. Airborne Multiwavelength High Spectral Resolution Lidar (HSRL-2) observations during TCAP 2012: vertical profiles of optical and microphysical properties of a smoke/urban haze plume over the northeastern coast of the US. *Atmos. Meas. Tech.*, 2014, vol. 7, pp. 3487–3496.
- [3] Bohren F.B., Huffman D.R. *Absorption and scattering of light by small particles*. New York, John Wiley, 1983, 496 p.
- [4] Tikhonov A.N., Arsenin V.Y. *Solution of Ill-Posed Problems*. New York, 1977, Wiley, 224 p.
- [5] Twomey S. *Introduction to the Mathematics of Inversion in Remote Sensing and Direct Measurements*. New York, Elsevier, 1977, 243 p.

- [6] Müller D., Wandinger U., Ansmann A. Microphysical particle parameters from extinction and backscatter lidar data by inversion with regularization: theory. *Appl. Opt.*, 1999, vol. 38, pp. 2346–2357.
- [7] Алехнович В.И., Коренский М.Ю., Тюменцев С.Ю., Колготин А.В. Применение регуляризирующего алгоритма Тихонова для обработки многоволновых лидарных данных в условиях отсутствия информации об ошибке измерения. *Измерительная техника*, 2005, № 10, с. 8–14.
- [8] Колготин А.В., Алехнович В.И., Коренский М.Ю., Камша К.Н. Специальный принцип отбора решений при использовании регуляризирующего алгоритма Тихонова для обработки многоволновых лидарных данных. *Измерительная техника*, 2005, № 10, с. 14–19.
- [9] Колготин А.В. *Математическое моделирование процесса восстановления параметров аэрозолей по данным многоволнового лидарного зондирования*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2003, 150 с.
- [10] Колготин А.В. *Методика решения задач многоволнового лидарного зондирования в применении к глобальному мониторингу параметров атмосферных аэрозолей*: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Санкт-Петербург, 2014, 211 с.
- [11] Sawamura P., Moore R.H., Burton S.P., Chemyakin E., Müller D., Kolgotin A., Ferrare R.A., Hostetler C.A., Ziemba L.D., Beyersdorf A.J., Anderson B.E. HSRL-2 aerosol optical measurements and microphysical retrievals vs. airborne in situ measurements during DISCOVER-AQ 2013: an intercomparison study. *Atmos. Chem. Phys.*, 2017, vol. 17, pp. 7229–7243.

Статья поступила в редакцию 24.10.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Колготин А.В. Оценка достоверности мониторинга аэрозольных загрязнений в атмосфере путем сравнения результатов обработки данных лидарного зондирования и локального забора проб. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-11-1936>

Колготин Алексей Викторович — д-р физ.-мат. наук, начальник службы АО «ВПК «НПО машиностроения». Область научных интересов: математическое моделирование, обработка данных дистанционного зондирования атмосферы, разработка программно-математического обеспечения. e-mail: alexeift@yahoo.com

Validation of aerosol pollution monitoring in the atmosphere by means of comparison of the results retrieved from lidar data and measured in situ

© A.V. Kolgotin

JSC “MIC “NPO Mashinostroyeniya”, Reutov, 143966, Russia

Data measured with remote (lidar) sensing and in situ during ORACLES campaign in 2016 became publically accessible. Inversion of the data measured with lidar and including the aerosol backscatter coefficients at 355, 532 and 1064 nm and extinction coefficients at 355 and 532 nm is carried out in the study. Airborne high spectral resolution lidar was used in the measurements. Specially developed regularization algorithm is applied to invert the lidar data into aerosol optical and microphysical parameters. In frame of ORACLES campaign the aerosol optical and microphysical parameters were measured in situ as well. In situ and remote (lidar) measurements were spatially and temporarily co-located. In situ results are used to validate the inversion of lidar data with regularization algorithm. Uncertainties of $\pm 25\%$ for effective radius, number and volume concentrations, ± 0.05 and ± 0.005 for real and imaginary parts of complex refractive index respectively and ± 0.05 for single scattering albedo are validated with reliability 90%.

Keywords: lidar sounding, atmospheric aerosol, ill-posed problems, regularizing algorithms, software

REFERENCES

- [1] Mishchenko M.I., Cairns B., Kopp G., Schueler C.F., Fafaul B.A., Hansen J.E., Hooker R.J., Itchkawich T., Maring H.B., Travis L.D. *Accurate Monitoring of Terrestrial Aerosols and Total Solar Irradiance. Introducing the Glory Mission.* American Meteorological Society Publ., May 2007, pp. 677–691.
- [2] Müller D., Hostetler C.A., Ferrare R.A., Burton S.P., Chemyakin E., Kolgotin A., Hair J.W., Cook A.L., D. Harper B., Rogers R.R., Hare R.W., Cleckner C.S., Obland M.D., Tomlinson J., Berg L.K., Schmid B. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, vol. 7, pp. 3487–3496.
- [3] Bohren F.B., Huffman D.R. *Absorption and scattering of light by small particles.* New York, John Wiley Publ., 1983, 496 p.
- [4] Tikhonov A.N., Arsenin V.Y. *Solution of Ill-Posed Problems.* New York, John Wiley Publ., 1977, 224 p.
- [5] Twomey S. *Introduction to the Mathematics of Inversion in Remote Sensing and Direct Measurements.* New York, Elsevier Publ., 1977, 243 p.
- [6] Müller D., Wandinger U., Ansmann A. *Applied Optics*, 1999, vol. 38, pp. 2346–2357.
- [7] Alekhovich V.I., Korensky M.Yu, Tumentsev S.Yu., Kolgotin A.V. *Izmeritel'naya Tekhnika — Measurement Techniques*, 2005, no. 10, pp. 8–14.
- [8] Kolgotin A.V., Alekhovich V.I., Korensky M.Yu., Kamsha K.N. *Izmeritel'naya Tekhnika — Measurement Techniques*, 2005, no. 10, pp. 14–19.
- [9] Kolgotin A.V. *Matematicheskoe modelirovanie protsessa vosstanovleniya parametrov aerorozley po dannym mnogovolnovogolidarnogo zondirovaniya.* Diss. kand. tekhn. nauk [Mathematical modeling process of aerosol parameter

- recovery according to the data of multiwavelength lidar sensing. Cand. Sc. in engineering diss.]. Moscow, 2003, 150 p.
- [10] Kolgotin A.V. *Metodika resheniya zadach mnogovolnovo lidarnogo zondirovaniya v primenenii k globalnomu monitoringu parametrov atmosferykh aerorozley*. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Methods for solving problems of multiwavelength lidar sensing in application to global monitoring atmospheric aerosol parameters. Dr. Phys.-and-Math. Sc. diss.]. St. Petersburg, 2014, 211 p.
- [11] Sawamura P., Moore R.H., Burton S.P., Chemyakin E., Müller D., Kolgotin A., Ferrare R.A., Hostetler C.A., Ziemba L.D., Beyersdorf A.J., Anderson B.E. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, vol. 17, pp. 7229–7243.

Kolgotin A.V., Dr. Sc. (Phys.-and-Math.), JSC “MIC “NPO Mashinostroyenia”. Research interests: mathematical simulation, processing atmosphere remote sensing data, software development. e-mail: alexeift@yahoo.com