

Аэрозольное загрязнение атмосферы по данным лидарного комплекса и солнечного фотометра

Д. А. Самуленков, М. В. Сапунов, А. Ю. Лянгузов

*Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург, 199178, Россия
E-mail: samulenkov_da@mail.ru*

В Санкт-Петербурге с 2014 г. по настоящее время проводятся исследования загрязнения атмосферы аэрозольными частицами с применением аэрозольного лазера Nd:YAG стационарного лидарного комплекса Ресурсного центра «Обсерватория экологической безопасности» Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета. Исследования носят важный прикладной характер, так как позволяют отслеживать изменение содержания аэрозольных загрязнителей над мегаполисом, которые оказывают прямое воздействие на здоровье, влияя на качество жизни проживающего на исследуемой территории населения. В настоящей работе авторами проведено сравнение аэрозольной оптической толщины, измеряемой стационарным лидарным комплексом и солнечным фотометром, с целью оценки сходств и различий в тенденциях данных, полученных лидаром и фотометром в разные сезоны в Санкт-Петербурге и Петергофе. Приборы расположены на удалении в 25,8 км. Исследование оптической толщины аэрозоля в столбе воздуха от нижней точки измерений до верхней части тропосферы проведено с 2014 до 2021 г., сравнивались данные измерений, полученные приборами в один и тот же день. Выполнено сравнение 56 измерений лидара и фотометра для канала 532 нм и 52 измерения для канала 355 нм. Аэрозольная толщина, измеряемая лидаром и фотометром, выше в весенние и летние дни. На длине волны 355 нм она составляет для спектрофотометра и лидара: весной — 0,15 и 0,12, летом — 0,26 и 0,16, осенью — 0,12 и 0,10, зимой — 0,12 и 0,08 соответственно. На длине волны 532 нм: весной — 0,09 и 0,05, летом — 0,14 и 0,06, осенью — 0,08 и 0,02, зимой — 0,08 и 0,02. Повышенное содержание аэрозолей весной и летом можно объяснить подъёмом аэрозольных частиц вместе с конвекционными потоками при прогревании планетарного пограничного слоя. Данные оптической толщины лидара и фотометра имеют удовлетворительную корреляцию.

Ключевые слова: лидар, аэрозоль, оптическая толщина, фотометр

Одобрена к печати: 05.04.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-273-280

Введение

Атмосферные загрязнения имеют неравномерный характер, играют важную роль в образовании облаков и осадков, в химических процессах, влияют на радиационный баланс, климатическую систему, качество воздуха и, следовательно, оказывают воздействие на здоровье населения (Silva et al., 2016). В настоящий момент среди основных источников антропогенного загрязнения атмосферы в Северо-Западном регионе можно выделить автомобильный транспорт, промышленные предприятия, а также продукты сгорания органического топлива. Также свой вклад вносят естественные источники загрязнения, формирование которых не зависит от деятельности человека. Это аэрозольные частицы естественного образования (Ивлев, 1982). Аэрозоли находятся разное время в атмосфере, имеют различные физические и химические свойства, переносятся на большие расстояния и могут оказывать воздействие на человека за сотни километров от места их образования. Поэтому измерение оптических свойств аэрозолей представляется интересной и важной задачей.

Лидарные комплексы находят применение в системах экологической безопасности, в том числе при создании глобальных и региональных измерительных сетей, предназначенных для мониторинга трансграничных переносов атмосферных загрязнений. Развитие лидарных технологий позволило перейти к режиму атмосферных наблюдений в реальном времени и сформировать ряд крупных континентальных лидарных сетей. Сеть NDACC (*англ.* Network for the Detection of Atmospheric Composition Change) (<https://www.ndsc.ncep.noaa.gov>), объединяю-

шая 16 лидарных станций, создана для глобального контроля озона, аэрозоля, температуры и влажности. Для мониторинга тропосферного аэрозоля под эгидой НАСА (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, *англ.* NASA — National Aeronautics and Space Administration) развивается лидарная сеть MPL-Net (*англ.* Micro-Pulse Lidar Network) (Welton et al., 2018).

В 2000 г. сформирована Европейская аэрозольная лидарная научно-исследовательская сеть EARLINET (*англ.* European Aerosol Research Lidar NETwork), координирующая работу более чем 20 лидарных комплексов европейских стран по мониторингу крупномасштабного переноса аэрозольных примесей, в основном из района пустыни Сахара (https://www.earlinet.org/index.php?id=earlinet_homepage). В 2014 г. появилась первая станция EARLINET на территории России. Оборудование размещено в Ресурсном центре (РЦ) «Обсерватория экологической безопасности» Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ) на Васильевском острове в наиболее антропогенно нагруженной части Санкт-Петербурга. В РЦ проводятся работы по отслеживанию переноса аэрозолей в Северо-Западном регионе с 2014 г.

Лидарные исследования выноса пылевого аэрозоля с пустынной территории Китая выполняются в рамках функционирования Азиатской лидарной сети AD-Net (*англ.* Asian Dust Network) (Nishizawa et al., 2016). Создана Восточно-Американская лидарная мезосеть REALM (*англ.* Regional East Atmospheric Lidar Mesonet) (Hoff et al., 2002). Мониторинг атмосферного аэрозоля и озона в регионах СНГ начиная с 2006 г. регулярно осуществляется с использованием сети лидарных станций CIS-LiNet (*англ.* Commonwealth of Independent States Lidar Network), расположенных в России, Беларуси и Киргизии (Chaikovskiy et al., 2006).

Помимо сетей, в которых применяются активные методы детектирования аэрозоля с использованием лазерного излучения, была создана сеть AERONET (*англ.* AErosol RObotic NETwork, Аэрозольная роботизированная сеть), состоящая из наземных солнечных фотометров, которые измеряют свойства атмосферного аэрозоля. Измерительная система представляет собой спектральный радиометр Cimel Electronique 318A, который измеряет солнечное и небесное сияние на нескольких фиксированных длинах волн. AERONET обеспечивает непрерывные наблюдения аэрозольной оптической толщины (АОТ). В дальнейшем данные проходят специальную обработку, где отсеиваются полученные при неблагоприятных погодных условиях (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov>).

Использование лидаров и фотометров по всему миру говорит об их эффективности для отслеживания содержания аэрозолей в атмосферной толще (Calinoiu et al., 2018; Sugimoto et al., 2014; Wang et al., 2022; Xun et al., 2021). Лидар позволяет получать значения оптической толщины с разбивкой по высотам, фотометр же даёт интеграл АОТ всего атмосферного столба. В настоящем исследовании авторами проведено сравнение результатов измерений АОТ лидара и фотометра, которая показывает насыщение аэрозолями атмосферы в столбе воздуха. Данные, полученные лидарным комплексом, были проинтегрированы по всей высоте.

Высокая изменчивость аэрозольных частиц в атмосфере, оказываемое вредное воздействие на человека, влияние на атмосферные процессы определяют важность изучения оптических характеристик и изменчивости аэрозолей. Имеющиеся данные в Санкт-Петербурге и Петергофе позволяют сравнить оптические характеристики аэрозолей в мегаполисе и на некотором удалении от него. В Санкт-Петербурге с наступлением периода с плюсовыми температурами, после таяния снега, высыхания поверхности земли высвобождается большое количество аэрозольных частиц, накопленных и удерживаемых снежным покровом, ввиду чего наблюдаются пылевые бури из песка и реагентов, которыми обрабатываются дороги в зимний период. Часть этой пыли поднимается высоко в воздух и переносится на большие расстояния. Зимой в загрязнение атмосферы аэрозольными частицами дополнительный вклад вносят теплоэлектроцентрали, активно работающие в зимний период. Дополнительная информация о насыщении атмосферы аэрозольными частицами, полученная с применением двух методов, оценка сходимости результатов лидара и фотометра в разные сезоны над Санкт-Петербургом и Петергофом позволят получить более полную информацию о закономерностях распределения аэрозолей в исследуемом регионе.

Материалы и методы

В работе сравнивались данные, полученные с применением аэрозольного лидара Nd:YAG и солнечного фотометра Cimel CE 318 в светлое время суток при отсутствии облачности в атмосфере.

Лидарный комплекс расположен на 10-й линии Васильевского острова, дом 33/35 (географические координаты: 59,943° с. ш., 30,273° в. д.), в РЦ «Обсерватория экологической безопасности» Научного парка СПбГУ, в астрономической башне Института наук о Земле на высоте 23 м над землёй. Лидар при измерениях всегда направлен строго в зенит. Лидарное оборудование настраивается в соответствии с требованиями EARLINET, членом которой СПбГУ является с 2014 г. Характеристики комплекса представлены в *таблице*.

Характеристики аэрозольного лидара стационарного лидарного комплекса

Длина волны, нм	1064	532	355
Максимальная энергия импульса, мДж	420	160	100
Длительность импульса, нс	5–8		
Максимальная плотность энергии на выходной апертуре лидара, мДж·см ⁻²	43,7	16,6	10,4

Для восстановления оптических параметров атмосферы используется основное уравнение лидарного зондирования:

$$P(z) = A \frac{\beta(z)}{z^2} \exp \left[-2 \int_0^z \alpha(z') dz' \right],$$

где $P(z)$ — мощность детектируемого обратно рассеянного сигнала с высоты z ; A — аппаратная константа; $\beta(z)$ — коэффициент обратного рассеяния; $\alpha(z')$ — коэффициент ослабления.

Данные лидарного комплекса были обработаны с помощью программного обеспечения DataProcessing, разработанного компанией ООО «Оптосистемы». Расчёт оптических параметров выполнен по методу Клетта, который даёт погрешность до 20 % в зависимости от содержания аэрозоля, его типа, а также состояния атмосферы (Волков, 2013; Althausen et al., 2000; Klett, 1985). Также стоит отметить, что лидарное оборудование имеет слепую зону в 300 м, связанную с особенностями оптического пути сигнала.

Солнечный фотометр Cimel CE 318 установлен в Петергофе (59,88° с. ш., 29,83° в. д.) в РЦ «Геомодель», высота площадки — 58 м н. у. м. (над уровнем моря). Фотометр Cimel позволяет получить оптическую толщину атмосферного столба на следующих длинах волн: 340 нм, 380, 440, 500, 675, 870, 940, 1020 и 1640 нм (Волкова и др., 2018). Фотометр всегда направлен на солнце с помощью встроенного солнечного трекера. Расчётная неопределённость в вычисленной АОТ, в первую очередь из-за неопределённости калибровки, составляет 0,010–0,021. Авторами использовались данные второго уровня AERONET (версия обработки 3,0), данная версия позволяет исключать мешающие факторы, такие как облака, температурные аномалии, смог, слабую спектральную зависимость.

Расстояние между лидарным комплексом и фотометром Cimel составляет 25,8 км.

Проведено сравнение 56 измерений лидара и фотометра для канала 532 нм и 52 измерения для канала 355 нм с 2014 по 2021 г. (*рис. 1*), выполненных в один и тоже день. За 2022 г. данные спектрофотометра отсутствуют. Для приведения к соответствию каналов лидара и фотометра был проведён пересчёт данных. АОТ 355 нм для солнечного фотометра была получена из АОТ 380 и 340 нм, АОТ 532 нм получена из АОТ 500 и 675 нм использованием уравнений (Khor et al., 2014; Zhang et al., 2016):

$$a_{i-k} = - \left[\frac{\ln(AOD_i/AOD_k)}{\ln(\lambda_i/\lambda_k)} \right], \quad AOD_j = AOD_i \left(\frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right)^{-a_{i-k}},$$

где AOD (англ. Aerosol optical depth) — аэрозольная оптическая толщина; α — коэффициент Ангстрема; λ_j — длина волны, находящаяся между длинами волн λ_i и λ_k .

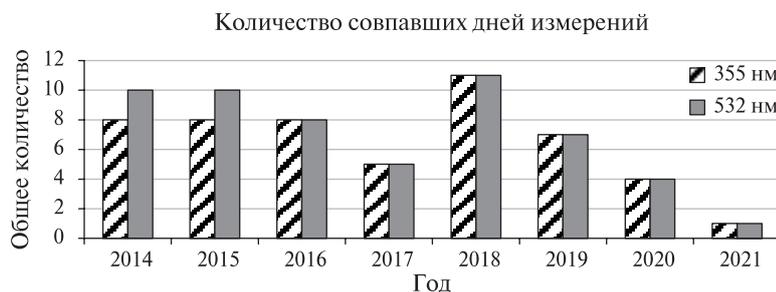


Рис. 1. Количество одновременных измерений лидаром и фотометром по годам

Стоит отметить, что на количество перемещаемого аэрозоля и, соответственно, на АОТ влияют: расстояние почти в 26 км, дополнительное включение аэрозолей от источников, расположенных между площадками наблюдений, наличие Финского зал., различие нижних слоёв атмосферы города и пригорода.

Оптическая толщина вычисляется исходя из спектрального ослабления луча на каждой длине волны при помощи закона Бугера. Релеевское рассеяние при расчёте АОТ, полученной лидарным комплексом, программно отбрасывается, что позволяет рассчитывать именно оптическую толщину аэрозоля.

Алгоритм инверсии аэрозолей AERONET версии 3 включает в себя подробную характеристику поглощения газа, которая не учитывалась во второй и предыдущих версиях. В дополнение к поглощению озона (O_3) третья версия также учитывает поглощение диоксида азота (NO_2) и водяного пара (H_2O), чтобы указать общее поглощение газа в атмосферном столбе (Sinyuk et al., 2020).

Результаты и обсуждение

Аэрозольная оптическая толщина обоих приборов выше в весенние и летние дни, что говорит о более высокой концентрации аэрозолей в весенне-летний период и объясняется прогреванием планетарного пограничного слоя и последующим увеличением распространения аэрозолей в весенне-летний период, ростом количества поднимаемого в воздух аэрозоля на автомобильных трассах и улицах городов, а именно реагентов, продуктов истирания автомобильных покрышек и асфальта, грязи, занесённой на проезжую часть вместе с конвективными потоками. Летом отмечается меньшее количество дней с суммарным значением выпавших осадков 1 мм или более (<http://www.meteo.nw.ru/articles/index.php?id=2>). Большое количество дней с дождливой, пасмурной погодой и высокой влажностью способствует повышенному самоочищению атмосферы от аэрозольных загрязнений.

При анализе данных АОТ фотометра и лидара видны одни и те же тренды, данные хорошо согласуются при распределении аэрозолей в разные сезоны. АОТ, получаемая фотометром, в большинстве случаев выше за счёт наличия слепой зоны у лидара до 300 м, а также из-за различий в верхней границе измерений у приборов.

У обоих приборов АОТ выше в весенние и летние дни (рис. 2, см. с. 277), на длине волны 355 нм составляют для спектрофотометра и лидара: весной — 0,15 и 0,12, летом — 0,26 и 0,16, осенью — 0,12 и 0,10, зимой — 0,12 и 0,08 соответственно. На длине волны 532 нм: весной — 0,09 и 0,05, летом — 0,14 и 0,06, осенью — 0,08 и 0,02, зимой — 0,08 и 0,02.

Зависимость данных стационарного лидарного комплекса от данных солнечного фотометра можно представить как $l = ap + b$, где a , b — коэффициенты линейной зависимости, $0 < a < 1$, $b > 0$; l — значения, полученные на лидаре; p — показания фотометра. Показания фотометра и лидара удовлетворительно линейно связаны (рис. 3, см. с. 277). Так, значе-

ния в видимом диапазоне могут быть описаны уравнением $l = 0,31p + 0,01$ ($r = 0,48$), где r — коэффициент корреляции. Для ультрафиолетовых значений применимо уравнение $l = 0,31p + 0,067$ ($r = 0,56$).

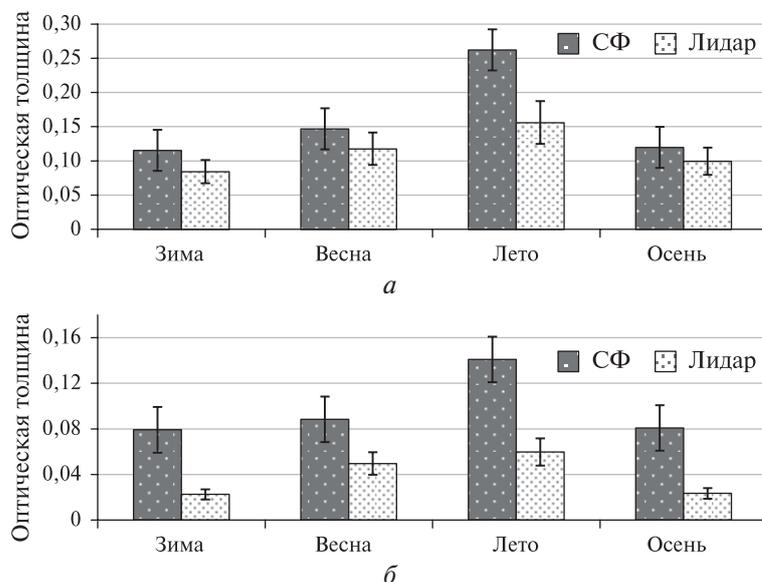


Рис. 2. Сезонная динамика среднего значения оптической толщины в совпавшие дни измерений в ультрафиолетовом (а) и видимом спектре (б) с погрешностями

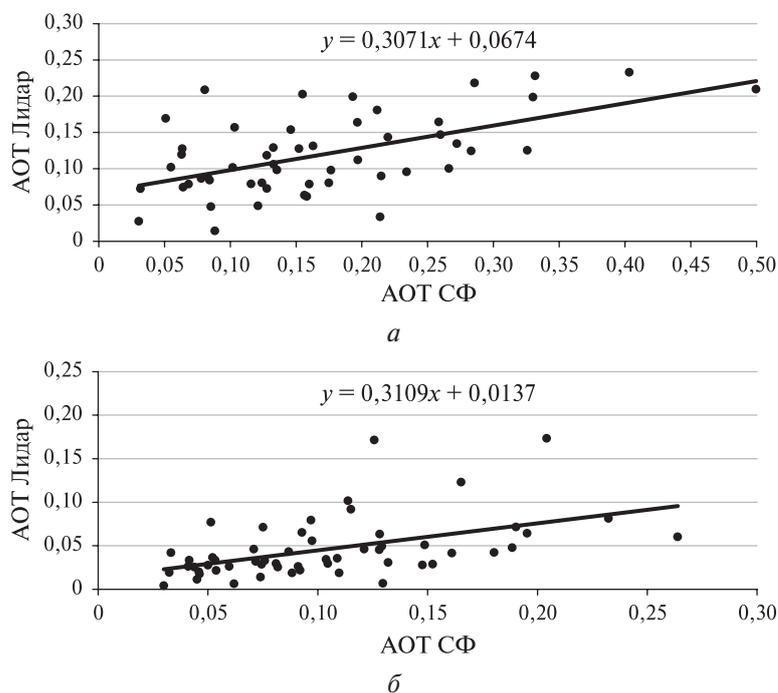


Рис. 3. Разброс данных лидара и солнечного фотометра на длинах волн 355 нм (а) и 532 нм (б)

Выводы

Проведено сравнение измерений, полученных с помощью солнечного фотометра и лидарного комплекса, находящихся на расстоянии 25,8 км. АОТ обоих приборов выше в весенние и летние дни, на длине волны 355 нм составляют для спектрофотометра и лидара: весной — 0,15 и 0,12, летом — 0,26 и 0,16, осенью — 0,12 и 0,10, зимой — 0,12 и 0,08 соответственно.

На длине волны 532 нм: весной — 0,09 и 0,05, летом — 0,14 и 0,06, осенью — 0,08 и 0,02, зимой — 0,08 и 0,02. Повышенное содержание аэрозолей весной и летом объясняется подъёмом аэрозольных частиц вместе с конвекционными потоками при прогревании планетарного пограничного слоя. В некоторых случаях отмечается превышение АОТ, полученной лидарным комплексом, над АОТ фотометра, даже несмотря на наличие слепой зоны лидара. По всей видимости, это связано с дополнительным поступлением в атмосферу аэрозольных частиц от антропогенных источников, расположенных на территории Санкт-Петербурга. Что ещё раз подчёркивает необходимость и важность мониторинговых наблюдений аэрозольных загрязнений именно в городской черте.

Сравниваемые данные оптической толщины лидара и фотометра, расположенных на расстоянии 25,8 км, имеют удовлетворительную корреляцию. Интересной представляется задача проведения измерений мобильным лидарным комплексом в непосредственной близости от станции AERONET для улучшения постановки обратной задачи при восстановлении параметров аэрозоля и получения более детальной информации о загрязнении атмосферы аэрозольными частицами.

Работа выполнена с использованием оборудования Ресурсного центра «Обсерватория экологической безопасности» Научного парка СПбГУ.

Литература

1. Волков Н. Н. Многоволновая лидарная система для определения физических параметров тропосферного аэрозоля: методика расчета параметров и анализа данных: дис. ... канд. техн. наук. М.: МИИГАиК, 2013. 135 с.
2. Волкова К. А., Поберовский А. В., Тимофеев Ю. М., Ионов Д. В., Holben B. N., Smirnov A., Slutsker I. Аэрозольные оптические характеристики по данным измерений солнечного фотометра CIMEL (AERONET) вблизи Санкт-Петербурга // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 6. С. 425–431. DOI: 10.15372/AOO20180601.
3. Ивлев Л. С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1982. 366 с.
4. Althausen D., Müller D., Ansmann A., Wandinger U., Hube H., Clauer E., Zörner S. Scanning 6-wave length 11-channel aerosol lidar // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2000. No. 17. P. 1469–1482. DOI: 10.1175/1520-0426(2000)017<1469:SWCAL>2.0.CO;2.
5. Caloiu D. G., Trif-tordai G., Ionel I., Cioabla A. E. Sun Photometer — Remote Sensing For Aerosol assessment // J. Environmental Protection and Ecology. 2018. V. 19. Iss. 2. P. 462–470.
6. Chaikovskiy A., Ivanov A., Balin Yu., Elnikov A., Tulinov G., Plusnin I., Bukin O., Chen B. Lidar network CIS-LiNet for monitoring aerosol and ozone in CIS regions // Proc. SPIE — The Intern. Society for Optical Engineering. 2006. V. 6160. Art. No. 616035. DOI: 10.1117/12.675920.
7. Hoff R. M., McCann K. J., Demoz B., Reichard J., Whiteman D. N., McGee T., McCormick M. P., Philbrick C. R., Strawbridge K., Moshary F., Gross B., Ahmed S., Venable D., Joseph E. Regional East Atmospheric Lidar Mesonet: REALM / ILRC, European Space Agency. 2002. P. 1–4.
8. Khor W. Y., Hee W. Sh., Tan F., Lim H. S., Jafri M. Z. M., Holben B. Comparison of Aerosol optical depth (AOD) derived from AERONET sunphotometer and Lidar system // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. 2014. V. 20. Art. No. 012058. DOI: 10.1088/1755-1315/20/1/012058.
9. Klett J. D. Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios // Applied Optics. 1985. V. 24. P. 1638–1643. <https://doi.org/10.1364/AO.24.001638>.
10. Nishizawa T., Sugimoto N., Matsui I., Shimizu A., Higurashi A., Jin Y. The Asian Dust and Aerosol Lidar Observation Network (AD-NET): Strategy and Progress // EPJ Web Conf. 2016. V. 119. Art. No. 19001. DOI: 10.1051/epjconf/201611919001.
11. Silva R. A., Adelman Z., Fry M. M., West J. J. The impact of individual anthropogenic emissions sectors on the global burden of human mortality due to ambient air pollution // Environmental Health Perspectives. 2016. V. 124. P. 1776–1784. DOI: 10.1289/EHP177.
12. Sinyuk A., Holben B. N., Eck T. F., Giles D. M., Slutsker I., Korokin S., Schafer J. S., Smirnov A., Sorokin M., Lyapustin A. The AERONET Version 3 aerosol retrieval algorithm, associated uncertainties and comparisons to Version 2 // Atmospheric Measurement Techniques. 2020. V. 13. Iss. 6. P. 3375–3411. DOI: 10.5194/amt-13-3375-2020.

13. Sugimoto N., Nishizawa T., Shimizu A., Matsui I. Aerosol characterization with lidar methods // Proc. SPIE — The Intern. Society for Optical Engineering. 2014. V. 9232. P. 117–122. DOI: 10.1117/12.2064957.
14. Wang L., Macak M. B., Stanic S., Bergant K., Gregoric A., Drinovec L., Mocnik G., Yin Z., Yi Y., Müller D., Wang X. Investigation of Aerosol Types and Vertical Distributions Using Polarization Raman Lidar over Vipava Valley // Remote Sensing. 2022. V. 14. Iss. 14. Art. No. 3482. DOI: 10.3390/rs14143482.
15. Welton E., Stewart S., Lewis J., Belcher L., Campbell J., Lolli S. Status of the NASA Micro Pulse Lidar Network (MPLNET): overview of the network and future plans, new version 3 data products, and the polarized MPL // EPJ Web Conf. 2018. V. 176. Art. No. 09003. DOI: 10.1051/epjconf/201817609003.
16. Xun L., Lu H., Qian C., Zhang Y., Lyu S., Li X. Analysis of Aerosol Optical Depth from Sun Photometer at Shouxian, China // Atmosphere. 2021. V. 12. Iss. 9. Art. No. 1226. DOI: 10.3390/atmos12091226.
17. Zhang W., Gu X., Xu H., Yu T., Zheng F. Assessment of OMI near-UV aerosol optical depth over Central and East Asia // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2016. V. 121. P. 382–398. DOI: 10.1002/2015JD024103.

Aerosol pollution of the atmosphere according to the data of a lidar complex and a solar photometer

D. A. Samulenkov, M. V. Sapunov, A. Yu. Lyanguzov

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199178, Russia
E-mail: samulenkov_da@mail.ru

In St. Petersburg, from 2014 to the present, studies of atmospheric pollution by aerosol particles have been carried out using an aerosol Nd:YAG laser of a stationary lidar complex of the Resource Center “Observatory of Ecological Safety”, Science Park, St. Petersburg State University. The studies are of an important applied nature, as they allow tracking changes in the content of aerosol pollutants over a metropolis, which have a direct impact on health and the quality of life of the population living in the study area. In this paper, the authors compared the aerosol optical depth measured by the stationary lidar complex and a solar photometer in order to assess the similarities and differences in the trends in the data obtained by the lidar and the photometer in different seasons in St. Petersburg and Peterhof. The devices are located at a distance of 25.8 km. The study of aerosol optical depth in the air column from the lower measurement point to the upper part of the troposphere was carried out from 2014 to 2021, the measurement data obtained by the instruments on the same day were compared. Comparison of 56 lidar and photometer measurements for the 532 nm channel and 52 measurements for the 355 nm channel was performed. The aerosol thickness measured by the lidar and the photometer is higher on spring and summer days. At a wavelength of 355 nm, it is: 0.15 and 0.12 in spring, 0.26 and 0.16 in summer, 0.12 and 0.10 in autumn, 0.12 and 0.08 in winter for the spectrophotometer and the lidar, respectively. At a wavelength of 532 nm, it is 0.09 and 0.05 in spring, 0.14 and 0.06 in summer, 0.08 and 0.02 in autumn, 0.08 and 0.02 in winter. The increased content of aerosols in spring and summer can be explained by the rise of aerosol particles together with convection currents during the heating of the planetary boundary layer. The optical depth data of the lidar and photometer are in a satisfactory agreement.

Keywords: lidar, aerosol, optical depth, photometer

Accepted: 05.04.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-273-280

References

1. Volkov N. N., *Mnogovolnovaya lidarnaya sistema dlya opredeleniya fizicheskikh parametrov troposfernogo aerolya: metodika rascheta parametrov i analiza dannykh: Dis. kand. tekhn. nauk* (Multiwavelength lidar system for measuring the physical properties of tropospheric aerosol: a technique for calculating parameters and analyzing data, Cand. tech. sci. thesis), Moscow: MIIGAIK, 2013, 135 p. (in Russian).

2. Volkova K. A., Poberovsky A. V., Timofeev Yu. M., Ionov D. V., Holben B. N., Smirnov A., Slutsker I., Aerosol optical characteristics retrieved from measurements of CIMEL sun photometer (AERONET) near Saint Petersburg, *Optika atmosfery i okeana*, 2018, Vol. 31, No. 6, pp. 425–431 (in Russian), DOI: 10.15372/AOO20180601.
3. Ivlev L. S., *Khimicheskii sostav i struktura atmosferykh aerozolei* (Chemical composition and structure of atmospheric aerosols), Leningrad: Izd. Leningradskogo universiteta, 1982, 366 p. (in Russian).
4. Althausen D., Müller D., Ansmann A., Wandinger U., Hube H., Clauer E., Zoerner S., Scanning 6-wave length 11-channel aerosol lidar, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000, No. 17, pp. 1469–1482, DOI: 10.1175/1520-0426(2000)017<1469:SWCAL>2.0.CO;2.
5. Calinoiu D. G., Trif-tordai G., Ionel I., Cioabla A. E., Sun Photometer — Remote Sensing For Aerosol assessment, *J. Environmental Protection and Ecology*, 2018, Vol. 19, Issue 2, pp. 462–470.
6. Chaikovskiy A., Ivanov A., Balin Yu., Elnikov A., Tulinov G., Plusnin I., Bukin O., Chen B., Lidar network CIS-LiNet for monitoring aerosol and ozone in CIS regions, *Proc. SPIE — The Intern. Society for Optical Engineering*, 2006, Vol. 6160, Art. No. 616035, DOI: 10.1117/12.675920.
7. Hoff R. M., McCann K. J., Demoz B., Reichard J., Whiteman D. N., McGee T., McCormick M. P., Philbrick C. R., Strawbridge K., Moshary F., Gross B., Ahmed S., Venable D., Joseph E., *Regional East Atmospheric Lidar Mesonet: REALM*, ILRC, European Space Agency, 2002, pp. 1–4.
8. Khor W. Y., Hee W. Sh., Tan F., Lim H. S., Jafri M. Z. M., Holben B., Comparison of Aerosol optical depth (AOD) derived from AERONET sunphotometer and Lidar system, *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science*, 2014, Vol. 20, Art. No. 012058, DOI: 10.1088/1755-1315/20/1/012058.
9. Klett J. D., Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios, *Applied Optics*, 1985, Vol. 24, pp. 1638–1643, <https://doi.org/10.1364/AO.24.001638>.
10. Nishizawa T., Sugimoto N., Matsui I., Shimizu A., Higurashi A., Jin Y., The Asian Dust and Aerosol Lidar Observation Network (AD-NET): Strategy and Progress, *EPJ Web Conf.*, 2016, Vol. 119, Art. No. 19001, DOI: 10.1051/epjconf/201611919001.
11. Silva R. A., Adelman Z., Fry M. M., West J. J., The impact of individual anthropogenic emissions sectors on the global burden of human mortality due to ambient air pollution, *Environmental Health Perspective*, 2016, Vol. 124, pp. 1776–1784. DOI: 10.1289/EHP177.
12. Sinyuk A., Holben B. N., Eck T. F., Giles D. M., Slutsker I., Korkin S., Schafer J. S., Smirnov A., Sorokin M., Lyapustin A., The AERONET Version 3 aerosol retrieval algorithm, associated uncertainties and comparisons to Version 2, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, Vol. 13, Issue 6, pp. 3375–3411, DOI: 10.5194/amt-13-3375-2020.
13. Sugimoto N., Nishizawa T., Shimizu A., Matsui I., Aerosol characterization with lidar methods, *Proc. SPIE — The Intern. Society for Optical Engineering*, 2014, Vol. 9232, pp. 117–122, DOI: 10.1117/12.2064957.
14. Wang L., Macak M. B., Stanic S., Bergant K., Gregoric A., Drinovec L., Mocnik G., Yin Z., Yi Y., Müller D., Wang X., Investigation of Aerosol Types and Vertical Distributions Using Polarization Raman Lidar over Vipava Valley, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, Issue 14, Art. No. 3482, DOI: 10.3390/rs14143482.
15. Welton E., Stewart S., Lewis J., Belcher L., Campbell J., Lolli S., Status of the NASA Micro Pulse Lidar Network (MPLNET): overview of the network and future plans, new version 3 data products, and the polarized MPL, *EPJ Web Conf.*, 2018, Vol. 176, Art. No. 09003, DOI: 10.1051/epjconf/201817609003.
16. Xun L., Lu H., Qian C., Zhang Y., Lyu S., Li X., Analysis of Aerosol Optical Depth from Sun Photometer at Shouxian, China, *Atmosphere*, 2021, Vol. 12, Issue 9, Art. No. 1226, DOI: 10.3390/atmos12091226.
17. Zhang W., Gu X., Xu H., Yu T., Zheng F., Assessment of OMI near-UV aerosol optical depth over Central and East Asia, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, Vol. 121, pp. 382–398, DOI: 10.1002/2015JD024103.