

Исследование динамики шапки аэрозольных загрязнений в Санкт-Петербурге при переносе с разных сторон света в период с 2014 по 2021 год

Д. А. Самуленков, М. В. Сапунов

*Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург, 199034, Россия
E-mail: samulenkova_da@mail.ru*

В статье приведены результаты многолетних натурных наблюдений с 2014 по 2021 г., выполненных с использованием стационарного лидарного комплекса РЦ «Обсерватория экологической безопасности» Научного парка СПбГУ. Измерения проведены на 10-й линии Васильевского острова, д. 33/35, в месте установки стационарного лидарного комплекса, географические координаты: 59,943° с. ш., 30,273° в. д. Удачное расположение комплекса позволяет проводить постоянные мониторинговые измерения в наиболее антропогенно нагруженной части города. Контроль метеорологических параметров осуществлялся с помощью доплеровского лидара, позволяющего измерять скорость и направление ветра на высотах до двух километров. Моделирование полученных оптических данных (коэффициентов обратного рассеяния и ослабления) лидарного сигнала позволило рассчитать микрофизические параметры аэрозоля, а именно численную концентрацию аэрозольных частиц над Санкт-Петербургом при движении ветра с разных сторон света. Результаты расчётов показали, что максимальный атмосферный перенос аэрозольных частиц над площадкой наблюдений отмечается при юго-восточном переносе: среднее содержание аэрозольных частиц составляет 3857 1/см³ в слое от 300 до 500 м и 2886 1/см³ — в слое от 500 до 700 м. При северо-восточном направлении ветра отмечается наиболее чистая атмосфера: на высотах от 300 до 500 м содержание аэрозолей в среднем составляет 2007 1/см³, в слое 500–700 м — 1684 1/см³. Преобладание переноса аэрозольных частиц с юго-восточного направления, по всей вероятности, связано с большим количеством производственных зон, расположенных на юго-востоке Санкт-Петербурга и Ленинградской обл., и интенсивным автотрафиком.

Ключевые слова: лидар, атмосферное загрязнение, аэрозоль, ветер, атмосферный перенос

Одобрена к печати: 10.03.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-277-284

Наблюдение переноса атмосферных аэрозолей представляет собой важную задачу ввиду прямого воздействия аэрозольных частиц на здоровье населения. Основной вклад в загрязнение аэрозолями в Санкт-Петербурге вносят промышленные предприятия, теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) и автомобильный транспорт, в процессе движения которого происходит истирание автомобильных шин, шипов покрышек, асфальта, дорожных реагентов, всё это вместе перемешивается с грязью, занесённой с прилегающих к дороге грунтов, смазочными маслами, ароматическими соединениями, тяжёлыми металлами, нитратами, окисленными органическими соединениями, что приводит к образованию вторичных, смешанных по составу частиц, которые поднимаются в воздух и наносят существенный вред здоровью жителей. В связи с этим возрастает количество обращений населения в медицинские учреждения с жалобами на сердечно-сосудистые заболевания, заболевания органов дыхания и глаз, аллергические реакции и др. (Health..., 2013; Schraufnagel et al., 2020; Silva et al., 2016; Wei et al., 2019; Zaheer et al., 2018).

Расположение лидарного комплекса Ресурсного центра (РЦ) «Обсерватория экологической безопасности» позволяет оценить содержание аэрозолей в столбе воздуха в центре Санкт-Петербурга над Васильевским островом (географические координаты: 59,943° с. ш., 30,273° в. д.) при ветре, дующем с разных сторон света. Очевидно, что Санкт-Петербург — мощный источник аэрозольных загрязнений, ввиду чего особый интерес представляют результаты содержания аэрозолей на различных высотах над мегаполисом с учётом разных направлений ветра. С севера, востока и юга воздушные массы проходят через территорию

Санкт-Петербурга, с запада станция граничит с Финским зал. Для сравнения использовались данные лидарных наблюдений, полученные при следующих метеоусловиях: небо от ясного до переменной облачности. Наблюдаемая скорость ветра составляла от 0,5 до 17 м/с. Измерения выполнялись преимущественно в весенне-летне-осенний сезон.

Определение атмосферных аэрозолей проводилось с помощью лазера Nd:YAG, работающего на трёх длинах волн: 355, 532 и 1064 нм. Характеристики аэрозольного лидара представлены в табл. 1. Для обеспечения безопасности измерения осуществлялись строго в зенит. Перед проведением измерений аэрозольным лидаром проводились замеры скорости и направления ветра с помощью доплеровского гетеродинного лидара со следующими характеристиками: мощность импульса — 110 мкДж, частота повторения — 10 кГц, ширина линии генерации — 1,5–2 МГц, стабильность — $\pm 0,8$ кГц. Особенности строения оптической системы лидара ограничивают нижнюю границу наблюдений высотой 300 м для аэрозольного лидара, ветровой лидар позволяет проводить измерения с 60 м от уровня земли.

Таблица 1. 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 вывода излучения в комплексе установлен 350-миллиметровый двухзеркальный сканер (Мельникова и др., 2014). Оборудование стационарного лидарного комплекса расположено на 10-й линии Васильевского острова, д. 33/35, в астрономической башне Института наук о Земле на высоте 23 м над землёй. Схематично стационарный лидарный комплекс представлен на рис. 1.

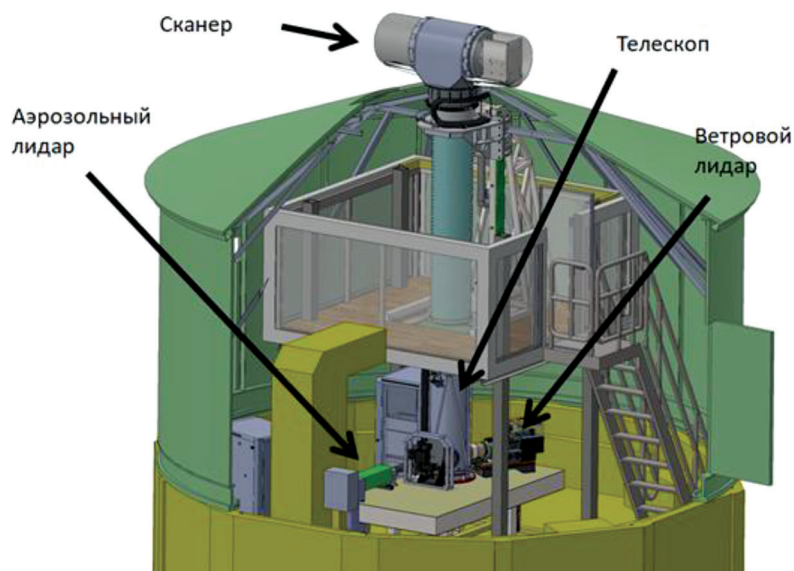


Рис. 1. Схема стационарного лидарного комплекса

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.

Решения обратной задачи лидарного зондирования (восстановление микрофизических параметров аэрозолей) осуществляется методом регуляризации Тихонова. Подробно о методах расчёта и обработки результатов оптических измерений изложено в работах (Веселовский, 2005; Колготин, 2014; Самуленков и др., 2017; Measures, 1985).

Лидарный метод позволяет восстановить вертикальный профиль аэрозольных частиц, оценить изменчивость аэрозольных слоёв во времени, что сделать детализировано другими методами проблематично. Расчёт оптических параметров — коэффициентов ослабления и обратного рассеяния, выполненный по методу Клетта, даёт погрешность до 20 % и зависит от содержания аэрозоля, его типа, а также от состояния атмосферы (Волков, 2013; Althausen et al., 2000; Klett, 1985). При восстановлении микрофизических параметров для понимания степени ошибки использовался параметр невязки (Веселовский, 2005), который характеризует отклонение решения в пространстве оптических данных от исходных коэффициентов обратного рассеяния и ослабления. В ходе анализа из выборки были исключены результаты, в которых параметр невязки превышал 40 %.

Лидарные измерения

В статье представлены усреднённые данные численной концентрации аэрозольных частиц за многолетний период исследований. Суммарно отобрано 83 измерения, которые были разделены в зависимости от направления ветра (табл. 2). Для сравнения результатов использовалось медианное значение, ввиду того что распределение исследуемых показателей отличается от нормального (асимметричное), поэтому среднее значение завышает результат из-за повышенной чувствительности к выбросам и асимметрии. Медиана не использует предположений о нормальности распределения, поэтому её выбор более обоснован (устойчивость).

Малое количество измерений при северо-восточном и юго-восточном направлении ветра связано с особенностями розы ветров в Санкт-Петербурге (рис. 2) и погодными условиями при том или ином направлении ветра. Лидарные измерения выполняются в хорошую погоду при отсутствии осадков.

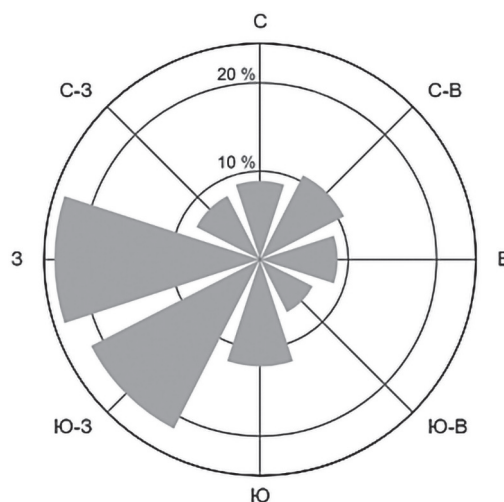


Рис. 2. Роза ветров Санкт-Петербурга (источник: https://world-weather.ru/archive/russia/saint_petersburg/)

Таблица 2. Количество наблюдений аэрозольным лидаром при разных направлениях ветра

Направление ветра	Северное	Северо-восточное	Восточное	Юго-восточное	Южное	Юго-западное	Западное	Северо-западное
Количество наблюдений	9	5	9	6	15	15	12	12

Микрофизические параметры аэрозолей

Результаты смоделированных расчётов средней численной концентрации аэрозольных частиц в слоях протяжённостью 200 м представлены на рис. 3 (см. с. 280).

Концентрация аэрозольных частиц ($1/\text{см}^3$) в слоях толщиной 200 м в зависимости от направления ветра

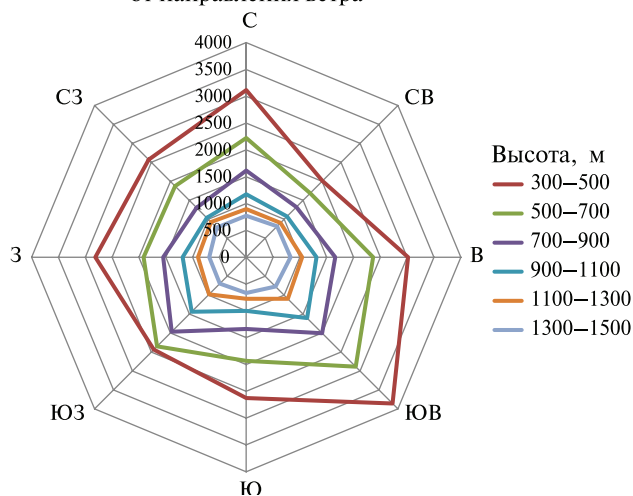


Рис. 3. Средняя численная концентрация аэрозольных частиц в слоях атмосферного воздуха над Санкт-Петербургом (2014–2021)

Согласно представленному графику, наибольшее усреднённое содержание аэрозольных частиц отмечалось над Санкт-Петербургом в слое от нижней границы наблюдений до 500 м при юго-восточном ($3857 1/\text{см}^3$), северном ($3116 1/\text{см}^3$), восточном ($3017 1/\text{см}^3$) и западном ($2813 1/\text{см}^3$) направлениях ветра. Эта закономерность сохраняется и для следующего слоя 500–700 м: максимальные значения отмечаются также при юго-восточном направлении ветра — $2886 1/\text{см}^3$, при восточном направлении

ветра составляют $2473 1/\text{см}^3$, при северном, юго-западном, западном направлениях значения концентрации приблизительно равны и составляют 2222, 2154, $1912 1/\text{см}^3$ соответственно. Минимальный перенос аэрозольных частиц отмечается при северо-восточном направлении ветра и составляет $2007 1/\text{см}^3$ в слое 300–500 м и $1684 1/\text{см}^3$ в слое 500–700 м. Наиболее яркие различия в численной концентрации аэрозолей фиксируются на нижней границе наблюдений, с увеличением высоты данные различия в концентрации аэрозолей сглаживаются, что естественно, так как основная масса аэрозолей перемещается в приземном слое атмосферы.

Для лучшей визуализации результатов проведённых исследований данные по средней численной концентрации аэрозольных частиц в слоях атмосферного воздуха при ветре, дующем с разных сторон света над Санкт-Петербургом, представлены в виде лепестковой диаграммы (рис. 4).

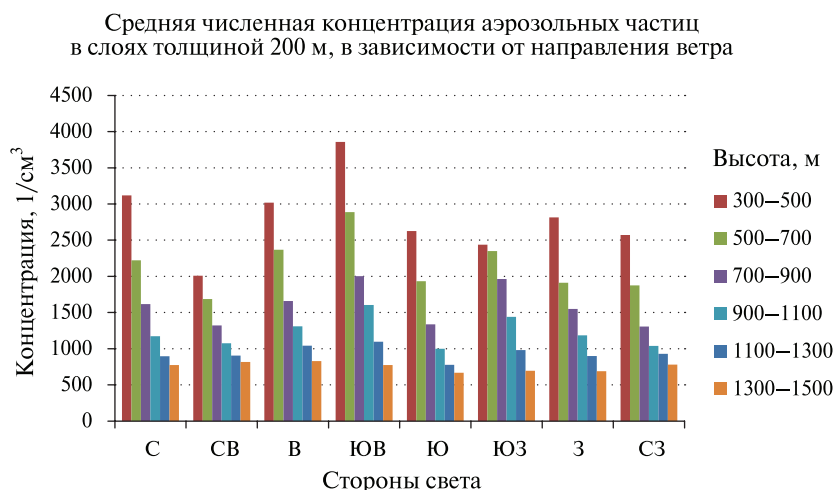


Рис. 4. Распределение численной концентрации аэрозольных частиц в слоях атмосферного воздуха над Санкт-Петербургом (2014–2021) при ветре, дующем с разных сторон света

Интегральное количество аэрозольных частиц в столбе воздуха от 300 до 1500 м представлено на рис. 5 (см. с. 281). Интегрирование содержания аэрозолей по всем высотам до 1500 м не поменяло общий характер направления преобладающего переноса, ввиду того что на высотах более 1000 м содержание аэрозолей значительно меньше, чем в нижележащих слоях, распределение по направлениям переноса с разных сторон света становится более симметричным.

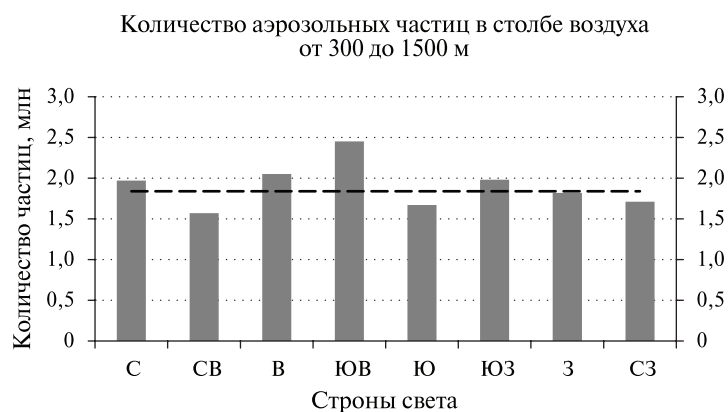


Рис. 5. Интегральное значение количества аэрозольных частиц в столбе воздуха от 300 до 1500 м площадью 1 см^2 ; пунктир — медианное значение

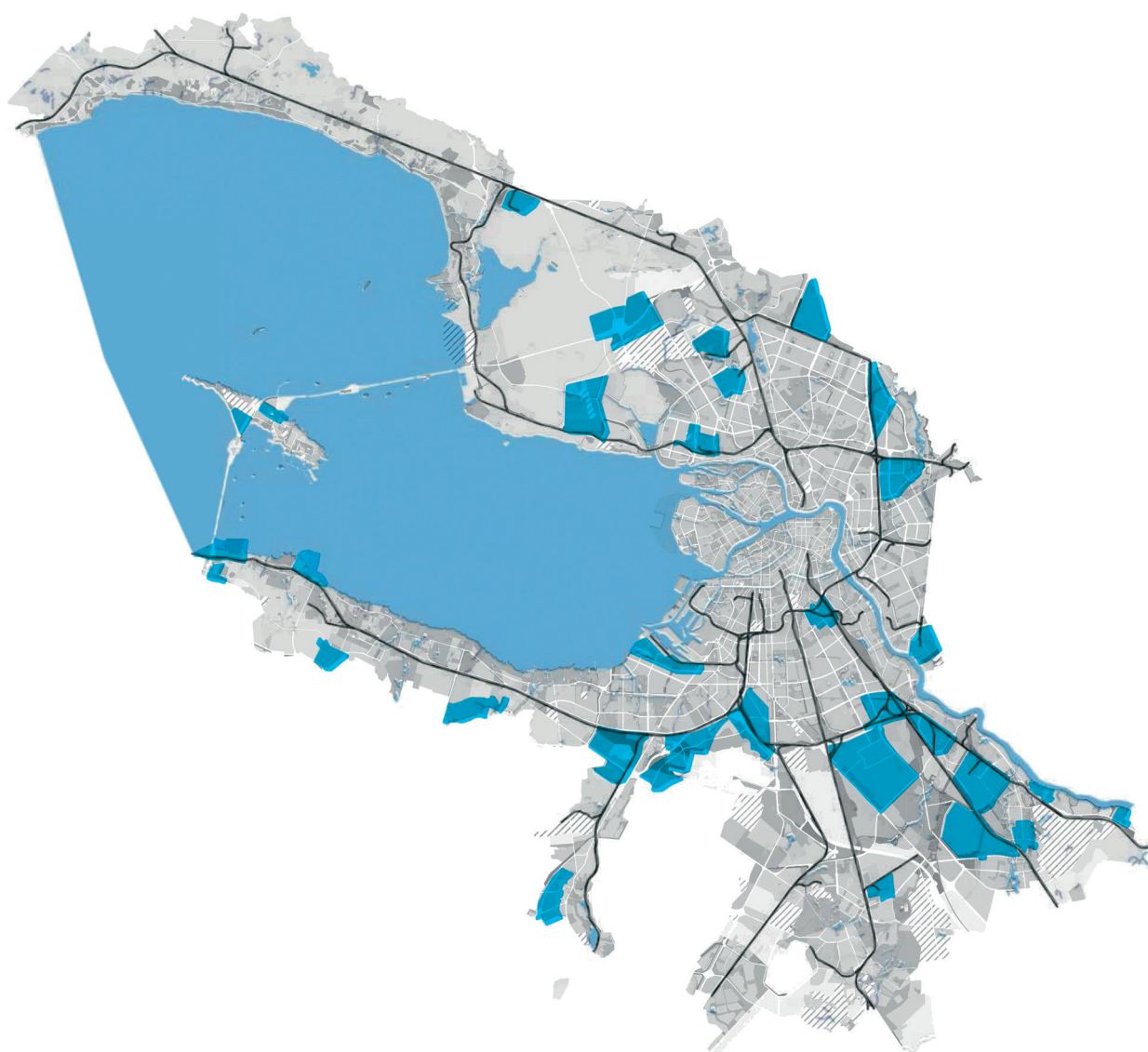


Рис. 6. Территории промышленных зон (источник: Паспорт промышленных зон Санкт-Петербурга. 5-е изд. / Комитет по промышленной политике и инновациям Санкт-Петербурга. 2017. 4 с.)

Как видно из *рис. 5*, для северного, южного, юго-западного, западного и северо-западного направлений ветра отклонения значений концентрации аэрозольных частиц от медианного значения незначительны (менее 10 %), для юго-восточного, восточного и северо-восточного переноса отклонение от медианного значения составило 33,8; 14,7 и 14,4 % соответственно.

По всей вероятности, преобладающий перенос с юго-восточного направления связан с большой плотностью производственных предприятий, расположенных на юго-востоке Санкт-Петербурга, Ленинградской обл. (*рис. 6*, см. с. 281), а также работой Южной ТЭЦ и выбросами автотранспорта.

При обработке результатов лидарных измерений над Санкт-Петербургом авторами статьи отмечено наличие атмосферных инверсий, которые приводят к снижению способности атмосферы рассеивать загрязняющие вещества. Возникновение инверсий наблюдалось преимущественно на высотах до 2 км, что приводило к возникновению запирающих слоёв с повышенным скоплением аэрозольных частиц. В исследовании (Крюкова, 2015), посвящённом изучению инверсий, отмечается, что количество приподнятых и приземных инверсий над городом значительно различается в зависимости от времени года. Так, в 2010 г. количество приземных инверсий составило: 59,7 % летом, 24,5 % зимой, 53,5 % весной и 40,7 % осенью. Приподнятых инверсий: 40,3 % летом, 75,5 % зимой, 46,5 % весной и 59,3 % осенью. В настоящее время авторы статьи проводят обработку результатов, которые позволят оценить, насколько увеличивается численность аэрозольных частиц при наличии запирающего слоя. Результаты проведённых исследований планируется представить в следующих публикациях.

Заключение

Многолетние измерения с использованием стационарного лидарного комплекса, расположенного в центре Санкт-Петербурга, позволили провести моделирование численной концентрации атмосферных аэрозолей в столбе воздуха от 300 до 1500 м и выявить, что при юго-восточном направлении ветра содержание аэрозолей над городом (площадкой наблюдений) максимально. Наибольшие различия в численной концентрации переносимых аэрозольных частиц наблюдаются на высоте 300 м, с высотой различия в концентрации аэрозолей при переносе с разных частей света сглаживаются. При северо-восточном направлении ветра отмечается наиболее чистая атмосфера над площадкой наблюдения: на высотах от 300 до 500 м содержание аэрозолей в среднем составляет 2007 л/см^3 , в слое 500–700 м — 1684 л/см^3 . Максимальное количество аэрозолей над Санкт-Петербургом отмечается при юго-восточном переносе: среднее содержание аэрозолей составляет 3857 л/см^3 в слое от 300 до 500 м и 2886 л/см^3 в слое от 500 до 700 м, что, по предположению авторов статьи, связано с расположением производственных предприятий города и Ленинградской обл., а также Южной ТЭЦ по пути следования потоков воздуха; кроме того, существенный вклад вносит автомобильный транспорт. Следует отметить, что в Санкт-Петербурге отмечается большое количество инверсий, связанных с термической стратификацией, в результате которых образуются слои с увеличенной численной концентрацией аэрозольных частиц («шапкой» загрязнений) в нижних слоях атмосферы, что приводит к дополнительному воздействию на здоровье проживающих на территории города жителей.

Литература

1. *Веселовский И. А.* Дистанционная лазерная диагностика аэрозольных и газовых составляющих атмосферы методами романовского и упругого рассеяния: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2005. 391 с.
2. *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.
3. *Колготин А. В.* Методика решения задач многоволнового лидарного зондирования в применении к глобальному мониторингу параметров атмосферных аэрозолей: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. СПб., 2014. 211 с.

4. Крюкова С. В., Симакина Т. Е. Анализ температурных инверсий в Санкт-Петербурге // Ученые записки Российского гос. гидрометеорол. ун-та. 2015. № 40. С. 150–159.
5. Самуленков Д. А., Мельникова И. Н., Донченко В. К., Сапунов М. В. Исследование загрязнений атмосферы с помощью лидарного мониторинга // Ученые записки Российского гос. гидрометеорол. ун-та. 2017. № 48. С. 266–280.
6. Althausen D., Müller D., Ansmann A., Wandinger U., Hübner H., Clauder E., Zörner S. Scanning 6-wavelength 11-channel aerosol lidar // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2000. No. 17. P. 1469–1482. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2000\)017<1469:SWCAL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2000)017<1469:SWCAL>2.0.CO;2).
7. Health effects of particulate matter. Policy implications for countries in Eastern Europe, Caucasus and central Asia / World Health Organization. 2013. 20 p.
8. Klett J. D. Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios // Applied Optics. 1985. V. 24. pp. 1638–1643.
9. Measures R. M. Laser Remote Sensing. Fundamentals and Applications. N.Y.; Toronto; Singapore: John Wiley and Sons, 1985. 524 p.
10. Schraufnagel D. E. The health effects of ultrafine particles // Experimental and Molecular Medicine. 2020. V. 52. P. 311–317. <https://doi.org/10.1038/s12276-020-0403-3>.
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.
12. Wei Y., Wang Y., Di Q., Choirat C., Wang Y., Koutrakis P., Zanobetti A., Dominici F., Schwartz J. D. Short term exposure to fine particulate matter and hospital admission risks and costs in the Medicare population: time stratified, case crossover study // British Medical J. 2019. V. 367. Iss. 8442. DOI: 10.1136/bmj.l6258.
13. Zaheer J., Jeon J., Lee S.-B., Kim J. S. Effect of Particulate Matter on Human Health, Prevention, and Imaging Using PET or SPECT // Progress in Medical Physics. 2018. V. 29. No. 3. DOI: 10.14316/pmp.2018.29.3.81.

Study of the dynamics of aerosol pollution cap in Saint Petersburg during the transfer from different cardinal directions in the period from 2014 to 2021

D. A. Samulenkov, M. V. Sapunov

*Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia
E-mail: samulenkov_da@mail.ru*

The article presents the results of long-term observations from 2014 to 2021, carried out using the stationary lidar complex (SLC) of the RC «Observatory of Environmental Safety» of the Saint Petersburg State University Science Park. Measurements were carried out on Line 10 of Vasilyevsky Island, 33/35, the location of the SLC with geographic coordinates: 59.943 N, 30.273 E. The favorable location of the SLC allows continuous monitoring measurements in the most anthropogenically loaded part of the city. Meteorological parameters were monitored using a Doppler lidar, which allows measuring wind speed and direction at altitudes up to two kilometers. Modeling the obtained optical data (backscattering and extinction coefficients) of the lidar signal made it possible to calculate the microphysical parameters of the aerosol, namely, the numerical concentration of aerosol particles over Saint Petersburg when the wind moves from different directions. The calculation results showed that the maximum atmospheric transport of aerosol particles was noted during the southeastern wind, the average content of aerosol particles was 3857 1/cm³ in the layer from 300 to 500 m and 2886 1/cm³ in the layer from 500 to 700 m. At the northeast wind direction, the cleanest atmosphere is observed: the aerosol content averages 2007 1/cm³ at altitudes from 300 to 500 m, and 1684 1/cm³ in the 500–700 m layer. The predominance of aerosol particles transfer from the southeast direction is most likely associated with a large number of industrial zones located in the southeast of Saint Petersburg and the Leningrad Region, and intense auto traffic.

Keywords: lidar, atmospheric pollution, aerosol, wind, atmospheric transport

Accepted: 10.03.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-277-284

References

1. Veselovskii I. A., *Distantionnaya lazernaya diagnostika aerazol'nykh i gazovykh sostavlyayushchikh atmosfery metodami romanovskogo i uprugogo rasseyaniya: Diss. dokt. fiz.-mat. nauk* (Remote laser diagnostics of aerosol and gas constituents of the atmosphere by Roman and elastic scattering methods, Dr. phys. math. sci. thesis), Moscow, 2005, 391 p. (in Russian).
2. Volkov N. N., *Mnogovolnovaya lidarnaya sistema dlya opredeleniya fizicheskikh parametrov troposfernogo aerolya: metodika rascheta parametrov i analiza dannykh: Diss. kand. tekhn. nauk* (Multi-wave lidar system for obtaining physical parameters of tropospheric aerosols: approach for parameters calculation and data analysis, Cand. techn. sci. thesis, Moscow: MII GAIK, 2013, 135 p. (in Russian).
3. Kolgotin A. V., *Metodika resheniya zadach mnogovolnovogo lidarnogo zondirovaniya v primeneni k global'nomu monitoringu parametrov atmosferykh aerolyei: Diss. dokt. fiz.-mat. nauk* (A technique for solving the problems of multi-wavelength sensing leadership as applied to global monitoring of atmospheric aerosol parameters: dissertation, Dr. phys. math. sci. thesis), Saint Petersburg, 2014, 211 p. (in Russian).
4. Kryukova S. V., Simakina T. E., Temperature Inversions Analysis in Saint Petersburg, *Uchenye zapiski Rossiiskogo Gosudarstvennogo gydrometeorologicheskogo universiteta*, 2015, No. 40, pp. 150–159 (in Russian).
5. Samulenkova D. A., Melnikova I. N., Donchenko V. K., Sapunov M. V., Studying Pollution of the Atmosphere with Lidar Monitoring, *Uchenye zapiski Rossiiskogo Gosudarstvennogo gydrometeorologicheskogo universiteta*, 2017, No. 48, pp. 266–280 (in Russian).
6. Althausen D., Müller D., Ansmann A., Wandinger U., Hübner H., Clauer E., Zörner S., Scanning 6-wave-length 11-channel aerosol lidar, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000, No. 17, pp. 1469–1482, [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2000\)017<1469:SWCAL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2000)017<1469:SWCAL>2.0.CO;2).
7. *Health effects of particulate matter, Policy implications for countries in Eastern Europe, Caucasus and central Asia*, World Health Organization, 2013, 20 p.
8. Klett J. D., Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios, *Applied Optics*, 1985, Vol. 24, pp. 1638–1643.
9. Measures R. M., *Laser Remote Sensing. Fundamentals and Applications*, New York; Toronto; Singapore: John Wiley and Sons, 1985, 524 p.
10. Schraufnagel D. E., The health effects of ultrafine particles, *Experimental and Molecular Medicine*, 2020, Vol. 52, pp. 311–317, <https://doi.org/10.1038/s12276-020-0403-3>.
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, Vol. 124, pp. 1776–1784.
12. Wei Y., Wang Y., Di Q., Choirat C., Wang Y., Koutrakis P., Zanobetti A., Dominici F., Schwartz J. D., Short term exposure to fine particulate matter and hospital admission risks and costs in the Medicare population: time stratified, case crossover study, *British Medical J.*, 2019, Vol. 367, Issue 8442, DOI: 10.1136/bmj.l6258.
13. Zaheer J., Jeon J., Lee Se.-B., Kim J. S., Effect of Particulate Matter on Human Health, Prevention, and Imaging Using PET or SPECT, *Progress in Medical Physics*, 2018, Vol. 29, No. 3, DOI: 10.14316/pmp.2018.29.3.81.