

Распределение аэрозольных частиц в Ленинградской области по пути направления ветра от г. Санкт-Петербурга

Д. А. Самуленков, М. В. Сапунов, Е. В. Абакумов

Санкт-Петербургский государственный университет

Санкт-Петербург, 199034, Россия

E-mail: samulenkov_da@mail.ru

Представлены результаты лидарных измерений распределения аэрозольных частиц при удалении от Санкт-Петербурга по пути направления ветра с целью оценки переноса и рассеивания аэрозолей, образующихся над Санкт-Петербургом и сопредельными регионами. Измерения выполнялись мобильным лидарным комплексом ресурсного центра «Обсерватория экологической безопасности» Научного парка СПбГУ. Измерения проводились в дневное время в летний и осенний сезон в 2024 г. ветровым и аэрозольным лидаром, что позволило контролировать как направление ветра, так и содержание аэрозольной компоненты. Максимальное содержание аэрозольных частиц наблюдалось в пограничном слое атмосферы на высоте до 1 км. Максимальное количество аэрозольных частиц в столбе воздуха от 350 м до 2 км площадью 1 см² наблюдалось на площадках ближе всего расположенных к городу, с общим содержанием аэрозолей от 300 до 400 млн частиц. По мере удаления воздушной массы от города количество частиц в столбе воздуха уменьшается. Снижение концентрации аэрозольных частиц между площадками наблюдений находится в диапазоне от 0,5 до 3,3 млн частиц на километр. Уменьшение содержания аэрозолей говорит о рассеивании и осаждении аэрозольных частиц, а также об отсутствии значимых дополнительных источников выбросов по пути следования воздушной массы.

Ключевые слова: лидар, аэрозоль, ветер, распределение, концентрация

Одобрена к печати: 17.04.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-290-298

Введение

Плохое качество воздуха, связанное с повышенной аэрозольной нагрузкой, регистрируется по всему миру и становится серьёзной проблемой многих городов Европы, Азии, Южной и Северной Америки (Chudnovsky et al., 2012; van Donkelaar et al., 2015; Wang, Christopher, 2003; Zhdanova et al., 2020).

Из-за высокой плотности населения, быстрого экономического роста и резких темпов урбанизации аэрозольные загрязнения оказывают серьёзнейшее негативное воздействие в мегаполисах, примером могут служить города Индии и Китая, когда вследствие интенсивного развития промышленности многократно возросла аэрозольная нагрузка (Cash et al., 2023; Deng et al., 2008; Singh et al., 2022; Zhang et al., 2004). Загрязнение атмосферного воздуха аэрозолями является серьёзной проблемой в Европе, при этом проводимыми мероприятиями удаётся снизить уровень загрязнения твёрдыми частицами в странах ЕС (Sicard et al., 2021).

Основные источники аэрозольных загрязнений в Северо-Западном регионе: почвенная пыль, продукты горения, промышленные выбросы, биогенные выбросы, автомобильный транспорт, вторичные сульфаты, морская соль, строительные и дорожные работы (Ивлев, 1982, 2015). Воздействие автотранспорта и промышленности подтверждается исследованиями, проведёнными в COVID-период с 2018 по 2022 г. в г. Дебрецене, Венгрия. Исследования показали, что сокращение дорожного движения и промышленного производства в связи с COVID-ограничениями улучшило качество воздуха в городе на 20–25 % (Kertész et al., 2024).

Аэрозольные частицы, характеризующиеся малым аэродинамическим диаметром (менее 10 мкм — PM₁₀ (*англ.* particulate matter)), содержат опасные для окружающей среды компоненты, состав которых сильно меняется в зависимости от места забора проб. Как правило, исследования направлены на изучение высокой концентрации PM-частиц в мегаполисах.

При этом в отдельных работах (Southerland et al., 2022) отмечается, что сильное загрязнение аэрозолями характерно как раз для городов с населением менее 1 млн человек. В большинстве таких городов, как правило, отсутствуют станции наземного мониторинга аэрозольных частиц.

В России очень обширная территория, и уровень загрязнения аэрозолями сильно отличается в зависимости от местоположения. Превышение содержания аэрозольных частиц регистрируется в таких крупных городах, как Краснодар, Челябинск, Екатеринбург, Москва (Mogozova et al., 2022). В центральной части промышленных городов Сибири наблюдается повышенное содержание аэрозольных загрязнений по сравнению со значениями, регистрируемыми в отдалённых от центра города районах (Белан и др., 2007). Синхронные исследования аэрозольной оптической толщи, проведённые с помощью солнечных фотометров в г. Екатеринбурге и на фоновой площадке, расположенной в 65 км от города, показали наличие существенного влияния выбросов города на аэрозольную оптическую толщину, которая была над г. Екатеринбургом выше на 21–39 % по сравнению с фоновой площадкой (Лужецкая, 2018; Поддубный и др., 2012). В приземном слое г. Томска объёмная концентрация крупнодисперсного аэрозоля выше в 25 раз, чем в пригороде (Ужегова и др., 2011).

Повышенный уровень содержания аэрозолей связан как с локальными выбросами загрязняющих веществ, так и с адвекцией аэрозольных частиц из отдалённых районов.

Различия в содержании аэрозольных частиц в черте города обусловлено множеством факторов: расположением источников загрязнений, размерами выбрасываемых аэрозольных частиц, атмосферными условиями, рельефом и др.

Ветер играет ключевую роль в перемещении и рассеивании аэрозолей. Он переносит их на большие расстояния, влияет на концентрацию и распределение в атмосфере. Направление и скорость ветра определяют, как быстро и в каком направлении аэрозоли будут перемещаться. Сильный ветер поднимает пыль в атмосферный воздух, создавая условия для дальнейшего распространения аэрозолей. При высокой скорости ветра они уносятся на большое расстояние и рассеиваются на большую площадь, в то время как при низкой скорости ветра начинают преобладать процессы осаждения аэрозольных частиц. Турбулентные потоки способствуют более равномерному распределению аэрозолей. При повышенной влажности происходят процессы конденсации на аэрозольных частицах, что сильно влияет на процессы их рассеивания и осаждения. Стоит учитывать наличие естественных и искусственных преград, перепада высот, которые влияют на распространение аэрозолей.

Изменение содержания аэрозольных частиц в Санкт-Петербурге и Ленинградской обл. изучено слабо. Цель настоящей работы — оценка распределения аэрозольных частиц при удалении от Санкт-Петербурга по пути направления ветра.

Материалы и методы

Мобильный лидарный комплекс состоит из аэрозольного лидара на базе Nd:YAG-лазерного излучателя и ветрового доплеровского лидара.

Для восстановления оптических параметров атмосферы использовалось 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.

Расчёт оптических параметров, коэффициентов ослабления и обратного рассеяния выполнялся по методу Клетта. При обработке данных погрешность составляет до 20 % в зависимости от типа и содержания аэрозоля, а также состояния атмосферы (Althausen et al., 2000; Klett, 1985).

Задача восстановления распределения аэрозоля по размерам обычно формулируется в виде уравнений Фредгольма второго рода:

$$\beta_i = \int_0^{\infty} K_{\beta}(m, r, \lambda_i) f(r) dr, \quad (1)$$

$$\alpha_i = \int_0^{\infty} K_{\alpha}(m, r, \lambda_i) f(r) dr, \quad (2)$$

где α_i и β_i — коэффициенты обратного рассеяния и экстинкции аэрозоля; r — радиус частицы; $m = m_R - im_I$ — комплексный показатель преломления (действительная и мнимая часть); λ_i — длины волн, используемые в зондировании; $K_{\beta_i}(m, r, \lambda_i)$ и $K_{\alpha_i}(m, r, \lambda_i)$ — ядра интегрального уравнения, вычисляемые на основе теории Ми, для случая сферических частиц. Функция $f(r)$ есть искомое распределение частиц по размерам. Соотношения (1) и (2) могут быть записаны в обобщённом виде:

$$g_j(\lambda_i) = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} K_j(m, r, \lambda_i) f(r) dr, \quad (3)$$

где индекс j соответствует α или β ; $g_j(\lambda_i)$ — оптические данные на длине волны λ_i ; r_{\min} и r_{\max} — минимальный и максимальный размер рассматриваемых частиц.

Уравнение (3) не имеет аналитического решения. Одним из методов, используемых при рассмотрении данной обратной задачи, является метод регуляризации, предложенный Тихоновым (Веселовский, 2005).

При восстановлении микрофизических параметров для расчёта ошибки измерений использовался параметр невязки (Веселовский, 2005), который характеризует отклонение решения в пространстве оптических данных от исходных коэффициентов обратного рассеяния и ослабления. В выполненных исследованиях не применялись данные измерений, где невязка достигала более 25 %.

Слепая зона аэрозольного лидара составляет 300 м и связана с конфигурацией оптических элементов. Слепая зона ветрового лидара — 40 м. При проведении конусного сканирования с допущением горизонтальной однородности вектора ветра (Ахметьянов и др., 2013) вычисляются направление и скорость ветра, а также его вертикальная составляющая. Проведение лидарных наблюдений возможно при условии отсутствия осадков, тумана и дымки, плотной облачности нижнего и среднего яруса.

Для расположения мобильного лидарного комплекса необходимо ненаклонное (угол не более 5°) твёрдое покрытие. С учётом необходимого времени на передислокацию, развёртывание и сворачивание комплекса проводилось два-три измерения в зависимости удалённости от места выезда мобильного лидарного комплекса.

Неотъемлемой частью проведения исследования является направление ветра. Санкт-Петербург имеет неравномерное распределение направления ветра как в среднем за год, так и по сезонам (рис. 1, см. с. 293). Кроме того, следует учитывать, что приземное направление ветра, как правило, отличается от высотного.

Всего выполнено семь полевых исследований: два при северо-восточном ветре, два при юго-западном, два при западном и одно при южном (рис. 2, см. с. 293). Полевые исследования проводились в мае (17-го, 21-го), июне (5-го), июле (11-го, 23-го) и сентябре (6-го, 20-го).

Во время проведения измерений медианная по высоте скорость ветра в основном варьировалась в пределах от 3 до 7 м/с, за исключением второй точки наблюдений 20 сентября, когда она равнялась 9 м/с.

Площадки наблюдений вокруг города располагаются на приблизительно равноудалённом расстоянии в 25–35 км, за исключением западного направления ветра. Расстояние между ними отличается ввиду отсутствия возможности развернуть комплекс и провести измерение при наличии высотных сооружений, древостоя, локальных источников выбросов аэрозолей,

а также из-за присутствия естественных преград, таких как Ладожское оз., вследствие чего расстояние между площадками при западном направлении ветра минимально.

Большинство площадок наблюдений располагались на съездах автодорог как на грунтовой поверхности, так и в полях. При юго-восточном ветре места для проведения измерений выбирались на площадках для отдыха водителей на трассе «Скандинавия».

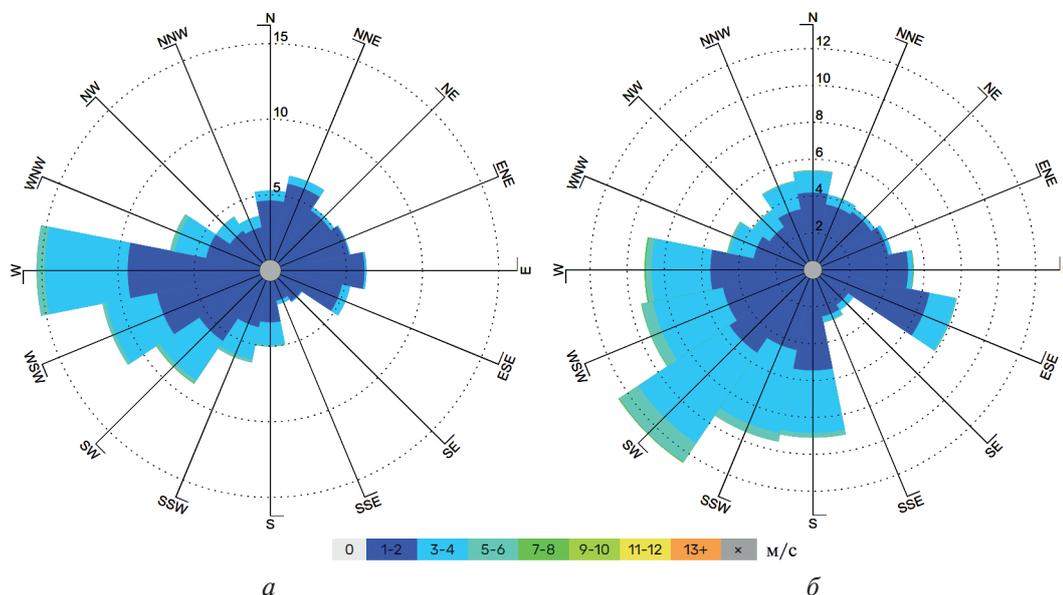


Рис. 1. Роза ветров Санкт-Петербурга летом (а) и осенью (б) (с 2008 по 2018 г.) (<https://lakka-sails.ru/winds/26063#all>)

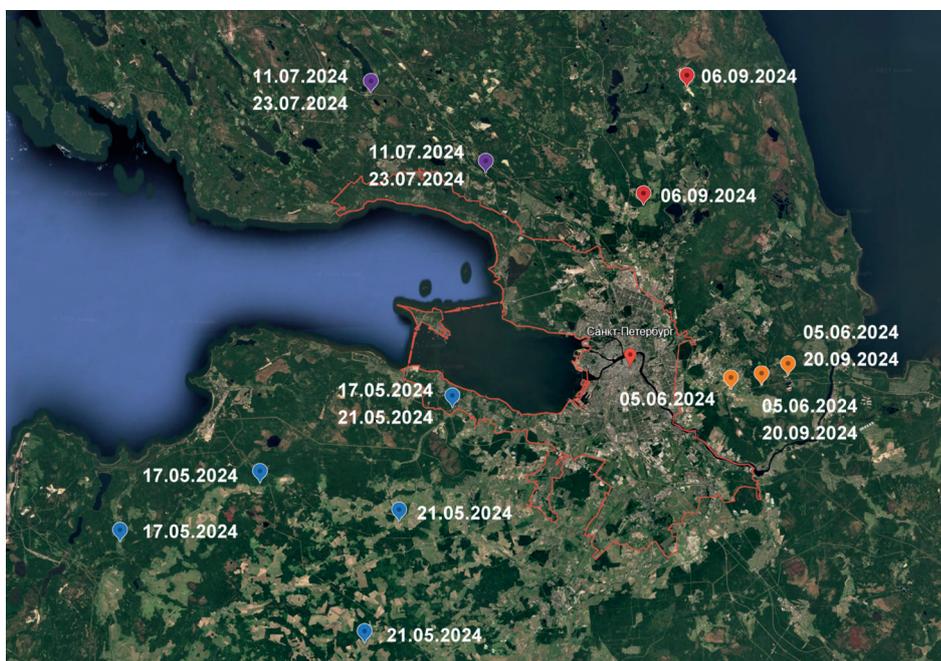


Рис. 2. Расположение площадок наблюдений (цветом обозначены площадки наблюдений, сгруппированные по направлению ветра: фиолетовый — северо-западное; красный — северо-северо-восточное; жёлтый — восточное; синий — юго-западное и юго-юго-западное)

Накопление данных осуществлялось в течение 45–60 мин на каждой площадке. Измерения ветровым лидаром проводились в течение 6 мин до и после измерений аэрозольным лидаром. В качестве итоговых профилей параметров ветра рассчитывались средние

значения направления и скорости ветрового потока, погрешность в измерении направления ветра составляет не более 15° , погрешность измерения скорости ветра — 1 м/с.

Результаты и обсуждение

Результаты восстановления профилей концентрации аэрозольных частиц в местах наблюдений приведены на *рис. 3*. Концентрация частиц в среднем падает с увеличением высоты. Максимальные значения концентрации аэрозольных частиц отмечаются на нижней границе наблюдений — от 2000 до 4000 шт./см³. Также в отдельные дни наблюдалась повышенная концентрация аэрозоля на различных высотах, связанная с перемещением аэрозольных масс.

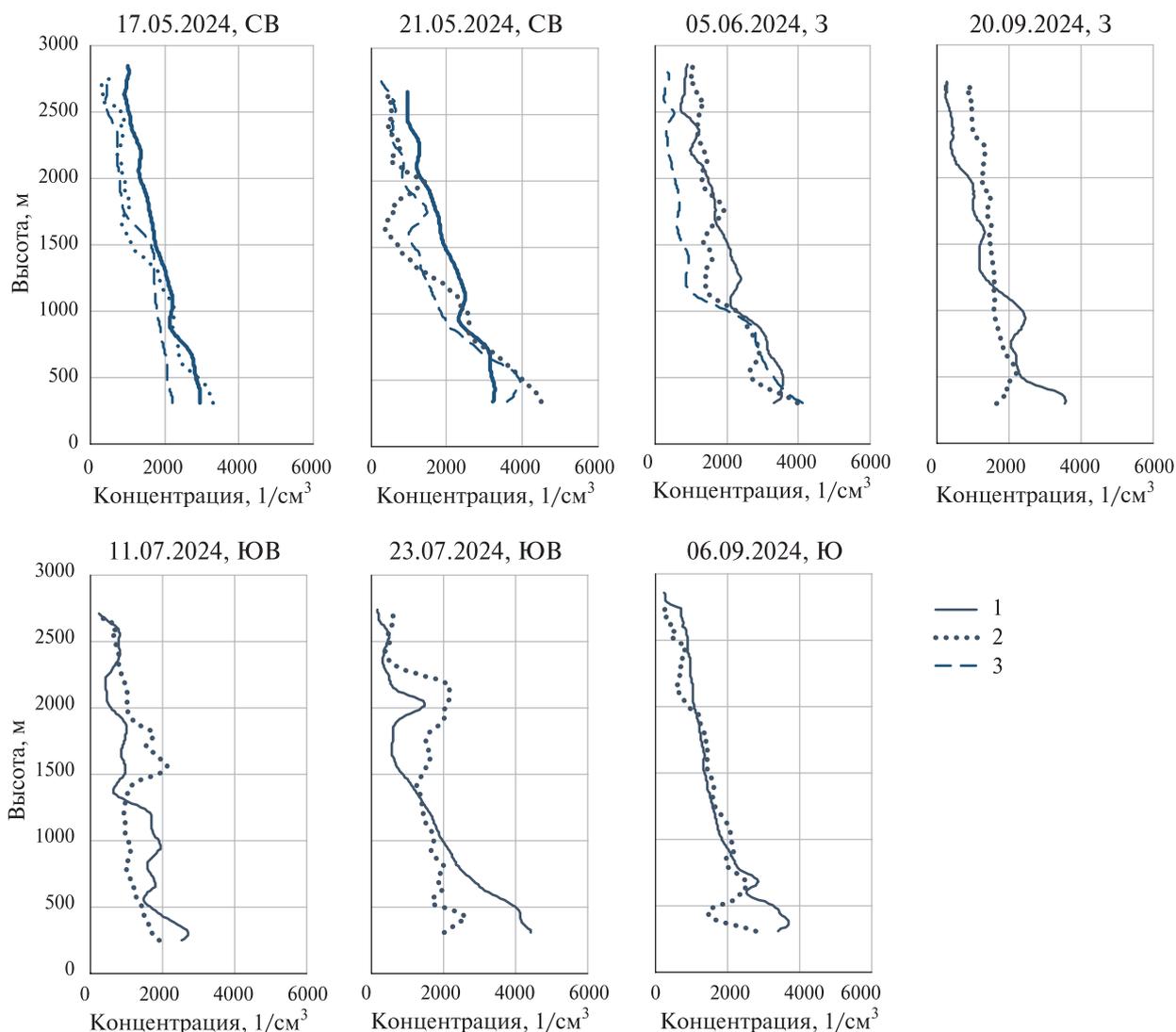


Рис. 3. Вертикальные профили концентрации аэрозольных частиц при удалении от города (1 — наиболее близкая к городу площадка; 2 — промежуточная площадка; 3 — наиболее удалённая от города площадка)

Для оценки суммарного содержания аэрозольных частиц в атмосфере на разных площадках использовался интеграл концентрации аэрозольных частиц в столбе воздуха от 350 м до 2 км и площадью 1 см² (*рис. 4*, см. с. 295). По мере удаления воздушной массы от города количество частиц в столбе воздуха уменьшается, что говорит о рассеивании и осаждении аэрозольных частиц, а также об отсутствии значимых дополнительных источников выбросов по пути следования воздушной массы. Снижение концентрации аэрозольных частиц

различается при разных направлениях ветра и зависит от расстояния между площадками наблюдений, скорости ветра, зарегистрированного в каждый конкретный день наблюдений. Максимальные значения численной концентрации частиц находятся в пределах от 300 до 400 млн частиц на площадках, ближе всего расположенных к городу.

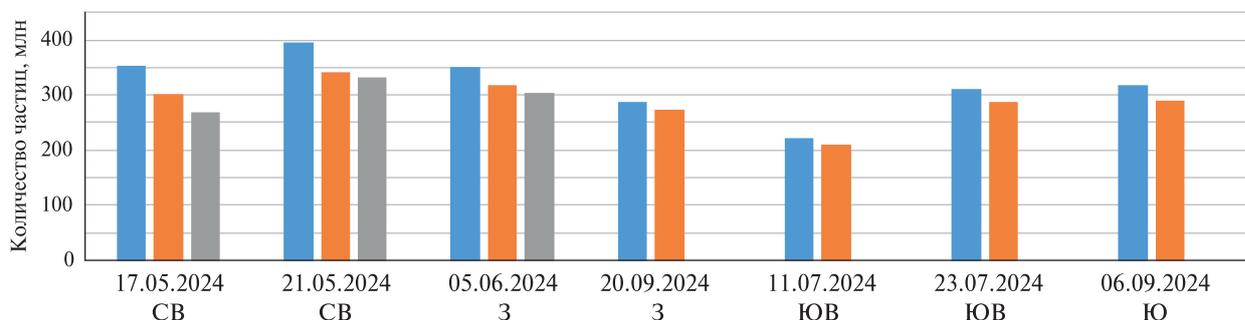


Рис. 4. Количество частиц в квадратном сантиметре на высотах от 350 м до 2 км на местах наблюдений с указанием направления ветра (синий — ближайшая точка к городу; жёлтый — на удалении от первой точки; серый — на наибольшем удалении от города)

17.05.2024 при северо-восточном направлении ветра снижение концентрации аэрозольных частиц между площадками 1 и 2 составляет 51 млн частиц, между площадками 2 и 3 — 34 млн частиц; 21.05.2024 уменьшение концентрации аэрозольных частиц между площадками 1 и 2 достигает 54 млн частиц, между площадками 2 и 3 — 9 млн частиц.

05.06.2024 при западном направлении ветра понижение концентрации аэрозольных частиц между площадками наблюдений 1 и 2 равно 33 млн частиц, между площадками 2 и 3 — 15 млн частиц; 20.09.2024 снижение концентрации аэрозольных частиц между площадками наблюдений 1 и 2 составляет 14 млн частиц.

11.07.2024 при юго-восточном направлении ветра уменьшение концентрации аэрозольных частиц между площадками наблюдений 1 и 2 достигает 12 млн частиц; 23.07.2024 снижение концентрации аэрозольных частиц между площадками наблюдений 1 и 2 равно 24 млн частиц.

06.09.2024 при южном направлении ветра понижение концентрации аэрозольных частиц между площадками наблюдений 1 и 2 составляет 27 млн частиц.

Расчёт тенденции снижения количества аэрозольных частиц при удалении от Санкт-Петербурга показал, что максимальное снижение наблюдалось 5 июня при западном ветре — 3,3 млн частиц на километр, наименьшее 11 июля при юго-восточном — 0,5 млн частиц на километр.

Заключение

Комбинированное применение аэрозольного и ветрового лидаров в едином комплексе позволило провести оценку пространственно-временного распределения аэрозолей по пути следования воздушных масс при направлении ветра от Санкт-Петербурга в Ленинградскую обл. Максимальное содержание аэрозольных частиц наблюдалось в пограничном слое атмосферы на высоте до 1 км. При удалении от города концентрация аэрозольных частиц в столбе воздуха снижается, что, по мнению авторов, может быть связано с меньшим образованием вторичного аэрозоля антропогенного происхождения в Ленинградской обл. по сравнению с Санкт-Петербургом, где аэрозоль образуется в большом количестве ввиду активного автотрафика и наличия большого количества промышленных предприятий. Максимальные значения численной концентрации частиц находятся в пределах от 300 до 400 млн частиц на площадках, ближе всего расположенных к городу, за исключением 20 сентября (288 млн частиц) при западном направлении ветра и 11 июля (222 млн частиц) при юго-восточном. Большие

объёмы аэрозолей, образующиеся над Санкт-Петербургом, осаждаются и рассеиваются по пути следования воздушной массы, что приводит к дополнительной нагрузке на граничащие с Санкт-Петербургом районы. Различие в содержании аэрозолей ведёт к отличиям в поступлении солнечной радиации, температурного режима и видимости.

Работа выполнена с использованием оборудования Ресурсного центра «Обсерватория экологической безопасности» Научного парка СПбГУ, исследование финансировалось Санкт-Петербургским государственным университетом в рамках исследовательского проекта 123042000071-8.

Литература

1. Ахметьянов В. Р., Васильев Д. Н., Коняев М. А., Мишина О. А., Пенкин М. С., Петров Г. А., Тезадов Я. А., Шаталов И. В., Ширяев И. Ф. Методы и алгоритмы обработки данных ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра с коническим сканированием // Журн. радиоэлектроники. 2013. № 10. 20 с.
2. Белан Б. Д., Ивлев Г. А., Козлов А. С., Маринайте И. И., Пененко В. В., Покровский Е. В., Симоненков Д. В., Фофанов А. В., Ходжер Т. В. Сравнительная оценка состава воздуха промышленных городов Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 5. С. 428–437.
3. 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.
4. Ивлев Л. С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1982. 368 с.
5. Ивлев Л. С. Свойства аэрозолей и аэрозолеобразующих примесей нижней атмосферы в Ленинградской области // Биосфера. 2015. Т. 7. № 4. С. 403–413.
6. Лужецкая А. П. Оптические и микрофизические характеристики атмосферного аэрозоля на Среднем Урале по данным многолетних спектральных фотометрических измерений: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2018. 23 с.
7. Поддубный В. А., Лужецкая А. П., Маркелов Ю. И., Кабанов Д. М. Оценка влияния города на аэрозольное замутнение по данным двухточечных измерений «фон – промышленный город» // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 4. С. 319–326.
8. Ужегова Н. В., Антохин П. Н., Белан Б. Д., Ивлев Г. А., Козлов А. В., Фофанов А. В. Выделение антропогенного вклада в изменение температуры, влажности, газового и аэрозольного состава городского воздуха // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 7. С. 589–596.
9. Althausen D., Müller D., Ansmann A. et al. Scanning 6-wavelength 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.
10. Cash J. M., Di Marco C., Langford B. et al. Response of organic aerosol to Delhi's pollution control measures over the period 2011–2018 // Atmospheric Environment. 2023. V. 315. Article 120123. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2023.120123.
11. Chudnovsky A. A., Lee H. J., Kostinski A. et al. Prediction of daily fine particulate matter concentrations using aerosol optical depth retrievals from the Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) // J. Air and Waste Management Association. 2012. V. 62. Iss. 9. P. 1022–1031. DOI: 10.1080/10962247.2012.695321.
12. Deng X., Tie X., Wu D. et al. Long-term trend of visibility and its characterizations in the Pearl River Delta (PRD) region, China // Atmospheric Environment. 2008. V. 42. Iss. 7. P. 1424–1435. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2007.11.025.
13. Kertész Z., Shafa A., Anikó A. et al. Characterization of urban aerosol pollution before and during the COVID-19 crisis in a central-eastern European urban environment // Atmospheric Environment. 2024. V. 318. Article 120267. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2023.120267.
14. Klett J. D. Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios // Applied Optics. 1985. V. 24. Iss. 11. P. 1638–1643. <https://doi.org/10.1364/AO.24.001638>.
15. Morozova A. E., Sizov O. S., Elagin P. O. et al. Integral assessment of atmospheric air quality in the largest cities of Russia based on TROPOMI (Sentinel-5P) data for 2019–2020 // Cosmic Research. 2022. V. 60. P. S57–S68. DOI: 10.1134/S0010952522700071.
16. Sicard P., Agathokleous E., De Marco A. et al. Urban population exposure to air pollution in Europe over the last decades // Environmental Sciences Europe. 2021. V. 33. Article 28. DOI: 10.1186/s12302-020-00450-2.

17. Singh J., Payra S., Mishra M. K., Verma S. An analysis of particulate pollution using urban aerosol pollution island intensity over Delhi, India // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2022. V. 194. Article 874. DOI: 10.1007/s10661-022-10573-z.
18. Southerland V.A., Brauer M., Mohegh A. et al. Global urban temporal trends in fine particulate matter (PM_{2.5}) and attributable health burdens: estimates from global datasets // *The Lancet Planet Health*. 2022. V. 6. Iss. 2. P. e139–e146. DOI: 10.1016/S2542-5196(21)00350-8.
19. van Donkelaar A., Martin R. V., Brauer M., Boys B. L. Use of satellite observations for long-term exposure assessment of global concentrations of fine particulate matter // *Environmental Health Perspectives*. 2015. V. 123. Iss. 2. P. 135–143. DOI: 10.1289/ehp.1408646.
20. Wang J., Christopher S.A. Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM_{2.5} mass: Implications for air quality studies // *Geophysical Research Letters*. 2003. V. 30. Iss. 21. Article 2095. DOI: 10.1029/2003GL018174.
21. Zhang Y., Zhu X., Slanina S. et al. Aerosol pollution in some Chinese cities (IUPAC Technical Report) // *Pure and Applied Chemistry*. 2004. V. 76. No. 6. P. 1227–1239. DOI: 10.1351/pac200476061227.
22. Zhdanova E. Y., Chubarova N. Y., Lyapustin A. I. Assessment of urban aerosol pollution over the Moscow megacity by the MAIAC aerosol product // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2020. V. 13. Iss. 2. P. 877–891. DOI: 10.5194/amt-13-877-2020.

Distribution of aerosol particles in Leningrad Region along the wind direction from Saint Petersburg

D. A. Samulenkov, M. V. Sapunov, E. V. Abakumov

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

The article presents the results of lidar measurements of the distribution of aerosol particles at a distance from Saint Petersburg along the path of wind direction in order to assess the transport and dispersion of aerosols formed over Saint Petersburg and adjacent regions. The measurements were carried out by the mobile lidar complex of the Observatory of Environmental Safety Resource Center of Saint Petersburg State University Science Park. The measurements were carried out with wind and aerosol lidar which made it possible to control both the wind direction and the content of the aerosol component. The measurements were carried out in the summer and autumn seasons in 2024, during daytime. The maximum content of aerosol particles was observed in the boundary layer of the atmosphere at an altitude of up to 1 km. The maximum amount of aerosol particles in an air column from 350 m to 2 km with an area of 1 cm² was observed at sites closest to the city, with a total aerosol content of 300 to 400 million particles. As the air mass moves away from the city, the number of particles in the air column decreases. The decrease in aerosol particle concentrations between observation sites is in the range of 0.5 to 3.3 million particles per kilometer. A decrease in the aerosol content indicates dispersion and precipitation of aerosol particles, as well as the absence of significant additional sources of emission along the path of the air mass.

Keywords: lidar, aerosol, wind, distribution, concentration

Accepted: 17.04.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-290-298

References

1. Ahmet'yanov V. R., Vasil'ev D. N., Konyaev M. A., Mishina O. A., Penkin M. S., Petrov G. A., Tezadov Ya. A., Shatalov I. V., Shiryaev I. F., Methods and data processing algorithms of wind coherent dopler lidar profilometer with conical scanning, *Zhurnal radioelektroniki*, 2013, No. 10, 20 p. (in Russian).
2. Belan B. D., Ivlev G. A., Kozlov A. S., Marinaite I. I., Penenko V. V., Pokrovskii E. V., Simonenkov D. V., Fofonov A. V., Khodzher T. V., Comparative estimate of air composition in industrial cities of Siberia, *Optika atmosfery i okeana*, 2007, V. 20, No. 5, pp. 428–437 (in Russian).

3. 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. ph.-math. sci. thesis), Moscow, 2005, 391 p. (in Russian).
4. Ivlev L. S., *Khimicheskii sostav i struktura atmosferynykh aehrozolei* (Chemical composition and structure of atmospheric aerosols), Leningrad: Izd. Leningradskogo universiteta, 1982, 368 p. (in Russian).
5. Ivlev L. S., The properties of aerosols and aerosol-forming contaminants of the lower atmosphere in Leningrad oblast, *Biosfera*, 2015, V. 7, No. 4, pp. 403–413 (in Russian).
6. Luzhechkaya A. P., *Opticheskie i mikrofizicheskie kharakteristiki atmosfernogo aehrozolya na Srednem Urale po dannym mnogoletnikh spectral'nykh fotometricheskikh izmerenii: Avtoref. diss. kand. fiz.-mat. nauk* (Optical and microphysical characteristics of atmospheric aerosol in the Middle Urals based on data of long-term spectral photometric measurements, Cand. ph.-math. sci. thesis abstract), Tomsk, 2018, 23 p. (in Russian).
7. Poddubny V. A., Luzhetskaya A. P., Markelov Yu. I., Kabanov D. M., Estimation of a city influence on atmospheric AOD from data of two-point measurements of the “background–industrial city” system, *Optika atmosfery i okeana*, 2012, V. 25, No. 4, pp. 319–326 (in Russian).
8. Uzhegova N. V., Antokhin P. N., Belan B. D., Ivlev G. A., Kozlov A. V., Fofonov A. V., Extraction of anthropogenic contribution to change of city’s air temperature, humidity, gas and aerosol composition, *Optika atmosfery i okeana*, 2011, V. 24, No. 7, pp. 589–596 (in Russian).
9. Althausen D., Müller D., Ansmann A. et al., Scanning 6-wavelength 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.
10. Cash J. M., Di Marco C., Langford B. et al., Response of organic aerosol to Delhi’s pollution control measures over the period 2011–2018, *Atmospheric Environment*, 2023, V. 315, Article 120123, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2023.120123.
11. Chudnovsky A. A., Lee H. J., Kostinski A. et al., Prediction of daily fine particulate matter concentrations using aerosol optical depth retrievals from the Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES), *J. Air and Waste Management Association*, 2012, V. 62, Iss. 9, pp. 1022–1031, DOI: 10.1080/10962247.2012.695321.
12. Deng X., Tie X., Wu D. et al., Long-term trend of visibility and its characterizations in the Pearl River Delta (PRD) region, China, *Atmospheric Environment*, 2008, V. 42, Iss. 7, pp. 1424–1435, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2007.11.025.
13. Kertész Z., Shafa A., Anikó A. et al., Characterization of urban aerosol pollution before and during the COVID-19 crisis in a central-eastern European urban environment, *Atmospheric Environment*, 2024, V. 318, Article 120267, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2023.120267.
14. Klett J. D., Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios, *Applied Optics*, 1985, V. 24, Iss. 11, pp. 1638–1643, <https://doi.org/10.1364/AO.24.001638>.
15. Morozova A. E., Sizov O. S., Elagin P. O. et al., Integral assessment of atmospheric air quality in the largest cities of Russia based on TROPOMI (Sentinel-5P) data for 2019–2020, *Cosmic Research*, 2022, V. 60, pp. S57–S68, DOI: 10.1134/S0010952522700071.
16. Sicard P., Agathokleous E., De Marco A. et al., Urban population exposure to air pollution in Europe over the last decades, *Environmental Sciences Europe*, 2021, V. 33, Article 28, DOI: 10.1186/s12302-020-00450-2.
17. Singh J., Payra S., Mishra M. K., Verma S., An analysis of particulate pollution using urban aerosol pollution island intensity over Delhi, India, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2022, V. 194, Article 874, DOI: 10.1007/s10661-022-10573-z.
18. Southerland V. A., Brauer M., Mohegh A. et al., Global urban temporal trends in fine particulate matter (PM_{2.5}) and attributable health burdens: estimates from global datasets, *The Lancet Planet Health*, 2022, V. 6, Iss. 2, pp. e139–e146, DOI: 10.1016/S2542-5196(21)00350-8.
19. van Donkelaar A., Martin R. V., Brauer M., Boys B. L., Use of satellite observations for long-term exposure assessment of global concentrations of fine particulate matter, *Environmental Health Perspectives*, 2015, V. 123, Iss. 2, pp. 135–143, DOI: 10.1289/ehp.1408646.
20. Wang J., Christopher S. A., Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM_{2.5} mass: Implications for air quality studies, *Geophysical Research Letters*, 2003, V. 30, Iss. 21, Article 2095, DOI: 10.1029/2003GL018174.
21. Zhang Y., Zhu X., Slanina S. et al., Aerosol pollution in some Chinese cities (IUPAC Technical Report), *Pure and Applied Chemistry*, 2004, V. 76, No. 6, pp. 1227–1239, DOI: 10.1351/pac200476061227.
22. Zhdanova E. Y., Chubarova N. Y., Lyapustin A. I., Assessment of urban aerosol pollution over the Moscow megacity by the MAIAC aerosol product, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, V. 13, Iss. 2, pp. 877–891, DOI: 10.5194/amt-13-877-2020.