

Гидрометеорология и экология. 2023. №73. С. 653—665.

Hydrometeorology and Ecology. 2023;(73):653—665.

Научная статья

УДК [551.510.4:54-138]:551.501.816(470.23-25)

doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-653-665

Исследование содержания аэрозолей лидарным методом в Выборгском районе Ленинградской области и г. Санкт-Петербург

Дмитрий Альбертович Самуленков, Максим Викторович Сапунов

СПбГУ, Научный парк, РЦ «Обсерватория экологической безопасности»,
Санкт-Петербург, e-mail: samulenkov_da@mail.ru

Аннотация. В статье приведены результаты однократных измерений содержания аэрозольных частиц в атмосфере Выборгского района Ленинградской области и Санкт-Петербурга с использованием лидарных технологий. Измерения проводились в октябре 2020 года при схожем направлении ветра. Полученные данные сравниваются с целью оценки вертикальной структуры аэрозолей в Санкт-Петербурге и Ленинградской области. Установлено, что в Санкт-Петербурге содержание аэрозолей более чем в 3,5 раза выше, нежели в Выборгском районе. Высота насыщенного аэрозолевым слоем в Выборгском районе прослеживается до уровня 1200 м, в Санкт-Петербурге — до 2000 м. Максимальная концентрация аэрозольных частиц в Выборгском районе зарегистрирована на нижней границе наблюдений — 300 м и составляет 1260 ± 274 частиц в см^3 , в Санкт-Петербурге содержание аэрозолей на высоте 350 м — 4657 ± 1045 частиц в см^3 .

Ключевые слова: аэрозоль, лидар, экологическая безопасность, лидарное зондирование, стационарный лидарный комплекс, мобильный лидарный комплекс.

Благодарности: Работа выполнена с использованием оборудования РЦ «Обсерватория экологической безопасности» Научного парка СПбГУ, исследование финансировалось Санкт-Петербургским государственным университетом, ID проекта: 101662710 (GZ_MDF-2023-1).

Для цитирования: Самуленков Д. А., Сапунов М. В. Исследование содержания аэрозолей лидарным методом в Выборгском районе Ленинградской области и г. Санкт-Петербург // Гидрометеорология и экология. 2023. № 73. С. 653—665. doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-653-665.

Original article

Results of lidar monitoring in the Vyborgsky district of the Leningrad region and St. Petersburg

Dmitry A. Samulenkov, Maxim V. Sapunov

St. Petersburg State University, Research Park, Research Center “Environmental Safety Observatory”, St. Petersburg, Russia, samulenkov_da@mail.ru

Summary. The paper presents the results of single measurements of aerosol particle content in the atmosphere of the Vyborgsky district of the Leningrad region and St. Petersburg using lidar technologies. The

measurements were carried out in October 2020, with similar wind direction. The obtained data are compared in order to estimate the vertical structure of aerosols. The aerosol optical thickness, complex refractive index, numerical and volumetric concentration of aerosol particles are calculated, and the Angstrom parameter is given. The height of the aerosol saturated layer can be traced up to a height of 1200 m in the Vyborg district and up to 2000 m in St. Petersburg. At the same time, the aerosol content in St. Petersburg is significantly higher than in the Vyborg district. The maximum concentration of aerosol particles in Vyborgsky district is registered at the lower boundary of observations at 300 m — 1260 ± 274 particles per cm^3 , in St. Petersburg the aerosol content at a height of 350 m is 4657 ± 1045 particles per cm^3 . The increased aerosol content above the metropolis leads to additional aerosol load on the areas adjacent to St. Petersburg and results in spatial inhomogeneity of UV radiation input in St. Petersburg and the Leningrad region. The Angstrom parameter in Vyborgsky District is equal to 1.44 ± 0.24 , in St. Petersburg 1.91 ± 0.56 , which indicates the predominance of fine aerosol over the metropolis, which is more dangerous to public health compared to the coarse fraction. The lower concentration of aerosols in the Vyborg region, compared to St. Petersburg, is apparently due to the absence of large industrial enterprises and intensive traffic near the observation site in the Vyborg region, as well as the direction of movement of air masses — along the coast of the Gulf of Finland from the territory of Finland.

Keywords: aerosol, lidar, environmental safety, lidar sensing, stationary lidar complex, mobile lidar complex.

Acknowledgments: The work was carried out using the equipment of the RC «Observatory of Environmental Safety» of the Scientific Park of St. Petersburg State University and the research was funded by St. Petersburg State University, project ID: 101662710 (GZ_MDF-2023-1).

For citation: Samulenkov D. A., Sapunov M. V. Results of lidar monitoring in the Vyborgsky district of the Leningrad region and St. Petersburg. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(73):653—665. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-653-665.

Введение

Негативные изменения состояния окружающей среды и климата, возрастающая антропогенная нагрузка на экосистемы обуславливают необходимость контроля загрязнений. Согласно данным ВОЗ, смертность от загрязнения атмосферного воздуха достигает 7 миллионов человек в год [1]. Аэрозоль является одним из основных компонентов, оказывающих комплексное воздействие на здоровье человека, животных [2—4], внешний вид и состояние зданий и сооружений [5].

Состав пыли зависит от природной и антропогенной обстановки в регионе. В пограничном слое атмосферы до двух километров происходит активный обмен с поверхностью энергией и веществом, что ведет к образованию шапки загрязнений над мегаполисами [6,7]. Уровень загрязнения зависит от времени года и метеорологических параметров [8]. Безветренная погода усугубляет ситуацию, концентрации атмосферных аэрозолей достигают своего максимума, что может приводить к серьезным последствиям для здоровья населения. Пылевые частицы вместе с воздушными потоками переносятся на большие расстояния и могут влиять на качество жизни населения, проживающего за десятки, сотни, а порой и тысячи км от места образования аэрозолей [9—12].

Методы дистанционного контроля экологической безопасности окружающей среды позволяют оценивать содержание загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, своевременно обнаруживать негативные изменения окружающей среды и выявлять потенциально опасные явления [13—15].

Методы лидарной диагностики состояния атмосферы начали развиваться в Советском Союзе в конце 60-х годов XX в., когда в СССР начали применять лазеры для измерения высоты нахождения облаков и измерения прозрачности атмосферы [16]. С развитием технологий метод стал активно применяться для исследования свойств аэрозолей, трансграничного переноса аэрозольных загрязнений [17—20].

Лидарные наземные измерения являются важной составляющей наблюдения за переносом аэрозолей [21—24]. Метод лидарного зондирования дает возможность получить вертикальный профиль параметров аэрозоля, дальнейшее моделирование — восстановить микрофизические свойства аэрозолей [25—28].

Основная цель данной работы — оценка содержания аэрозолей на удалении от г. Санкт-Петербург в Ленинградской области и сравнение с результатами измерения аэрозоля в центре Санкт-Петербурга, которые были выполнены в одном месяце при одинаковом направлении ветра. Исследования выполнялись в дневное время суток. Результаты получены с использованием мобильного и стационарного лидарных комплексов РЦ «Обсерватория экологической безопасности» Научного парка СПбГУ. Выполненная работа позволила сравнить содержание аэрозолей в Ленинградской области и г. Санкт-Петербург в осенний сезон. Измерения выполнялись 17 октября 2020 г. в Выборгском районе и 10 октября 2020 г. в Санкт-Петербурге. Авторами определены аэрозольная оптическая толщина, комплексный показатель преломления, рассчитан показатель ангстрема, восстановлена численная концентрация и средний радиус аэрозольных частиц для двух площадок наблюдения.

Материалы и методы

Мобильный и стационарный лидарные комплексы (рис. 1) позволяют проводить натурные измерения аэрозолей и ветровых характеристик. В комплексах имеются аэрозольный и ветровой лидары. В основе аэрозольного лидара находится Nd:YAG лазер, который работает на длине волн: 355 нм, 532 нм и 1064 нм. Аэрозольный лидар имеет слепую зону высотой 300 м, связанную с особенностями оптического пути сигнала. Ветровой лидар позволяет измерять скорость и направление с 40 метров. В импульсном ветровом лидаре используется длина волны 1557 нм.

Для восстановления оптических параметров атмосферы использовалось 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.

Подробно характеристики мобильного и стационарного лидарных комплексов приведены в статье [29].



Рис. 1. Лидарные комплексы:

- а)* мобильный лидарный комплекс
б) стационарный лидарный комплекс на 10 линии Васильевского острова.

Fig. 1. Lidar complexes:

- a)* mobile lidar complex *b)* stationary lidar complex on the 10th line of Vasilievsky Island.

Методика исследования

Данные, полученные аэрозольным лидаром, были обработаны с использованием программного обеспечения Data Processing «ООО Оптосистемы», разработанного для СПбГУ. Программа предназначена для обработки данных многоволнового лидарного зондирования, сохраненных в файлах формата Licel или в текстовом формате. Программа позволяет управлять файлами, вычитать шум, вычислять профиль молекулярного рассеяния по заданным профилям давления и температуры, находить точку привязки, осреднять данные, вычислять оптические коэффициенты. Расчёт оптических параметров, выполненный по методу Клетта [30], позволяет восстановить параметры индустриального, морского и пустынного аэрозоля и продуктов горения биомассы с погрешностью до 20 процентов, которая зависит от состояния атмосферы, содержания и типа аэрозоля [31].

Способ расчета коэффициентов ослабления и обратного рассеяния аэрозоля по данным лидарного зондирования представлен в работе [32].

Результаты измерений

На рис. 2 приведен коэффициент ослабления, полученный на площадке наблюдений в Выборгском районе 17 октября 2020 г с 10.45 до 13.48, и в г. Санкт-Петербург, где измерения проводились 10 октября 2020 г. с 11.00 до 14.30. 10 и 17 октября 2020 года регистрировалось западное направление ветра.

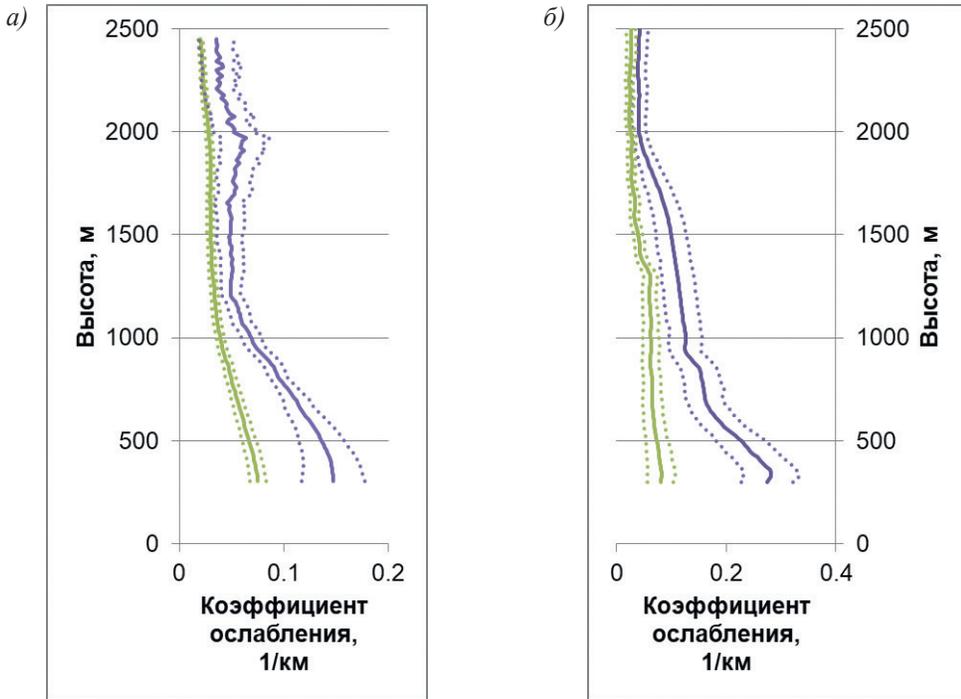


Рис. 2. Профили коэффициента ослабления на длинах волн 355 и 532 нм
 а) в Выборгском районе; б) в Санкт-Петербурге.

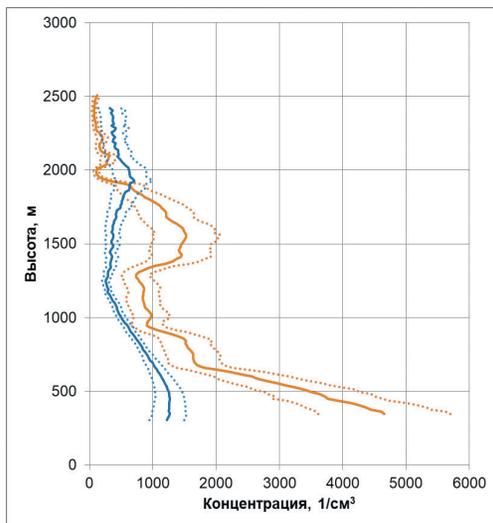
Fig. 2. Profiles of *a)* attenuation coefficient at wavelengths of 355 and 532 nm
 a) in the Vyborgsky district, b) in St. Petersburg

Восстановленные профили микрофизических параметров аэрозолей — численная, поверхностная и объемная концентрации частиц, действительная и мнимая части коэффициента преломления — представлены на рис. 3.

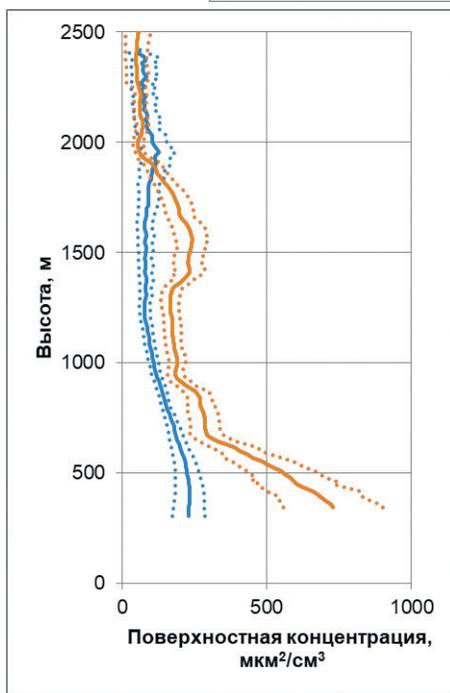
Коэффициент ослабления в Выборгском районе не превышал значений $0,15 \pm 0,03 \text{ км}^{-1}$ на длине волны 355 нм и $0,075 \pm 0,008 \text{ км}^{-1}$ на длине волны 532 нм. Повышенные значения коэффициента ослабления позволяют определить высоту нахождения насыщенного аэрозолем слоя. Максимальные значения отмечаются от нижней границы наблюдений на высоте 300 м до высоты 1200 м. Выше концентрация аэрозолей снижается. В тоже время в Санкт-Петербурге значения не превышали $0,28 \pm 0,05 \text{ км}^{-1}$ на длине волны 355 нм и $0,08 \pm 0,02 \text{ км}^{-1}$ на длине волны 532 нм. Максимальные значения коэффициента ослабления в Санкт-Петербурге зарегистрированы на высотах от 350 м до 2000 м.

Максимальное значение численной концентрации аэрозолей в Выборгском районе наблюдалось на нижней границе наблюдений — 300 м и составляло около 1260 ± 274 частиц в см^3 . На высотах от 1200 до 2400 м можно отметить наличие аэрозольного слоя с максимальной численной концентрацией на высоте 1900 м

a)



б)



в)

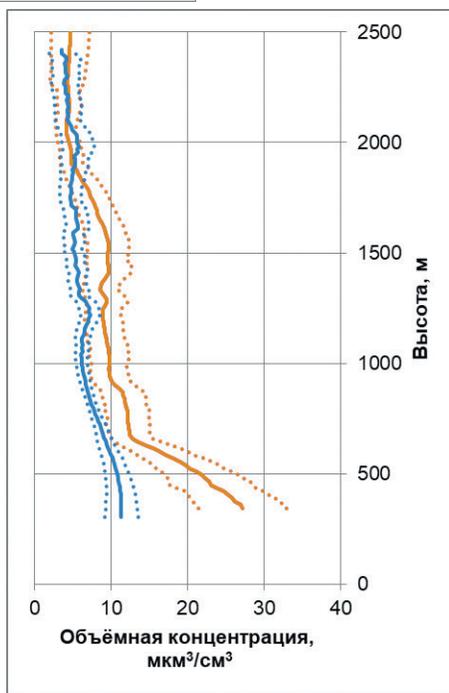


Рис. 3 (начало). Профили микрофизических параметров в Выборгском районе (синяя линия) и в Санкт-Петербурге (красная линия):
 a) численная концентрация; б) поверхностная концентрация; в) объёмная концентрация.

Fig. 3. Profiles of microphysical parameters in the Vyborgsky district (blue line) and in St. Petersburg (red line):

a) number concentration; b) surface concentration; c) volume concentration.

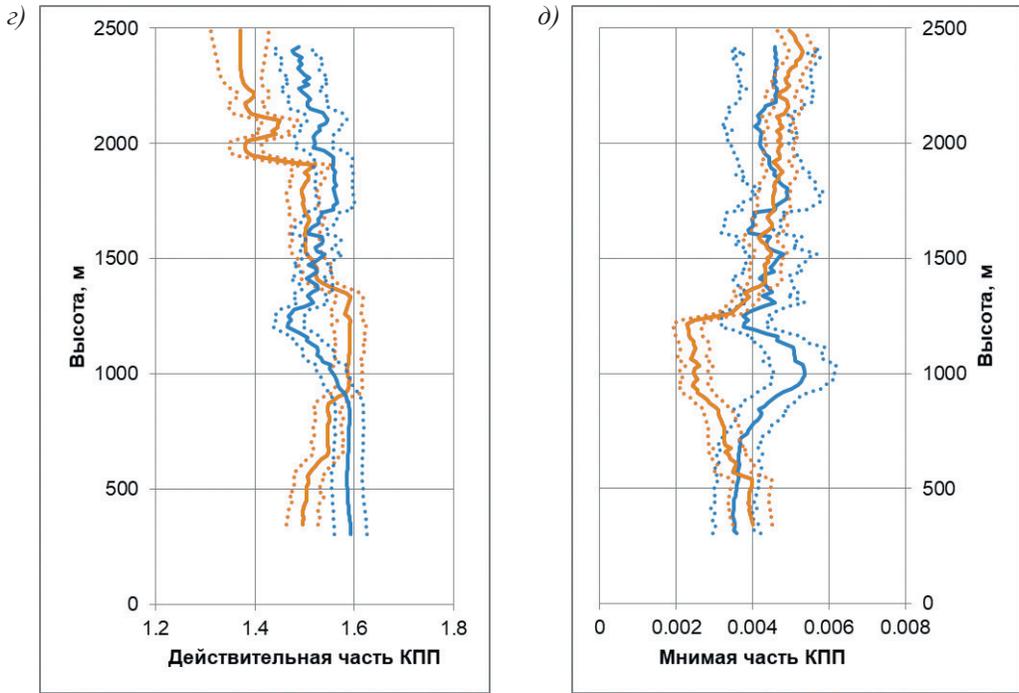


Рис. 3 (окончание). Профили микрофизических параметров в Выборгском районе (синяя линия) и в Санкт-Петербурге (красная линия):

з) действительная часть КПП; д) мнимая часть КПП.

Fig. 3. Profiles of microphysical parameters in the Vyborgsky district (blue line) and in St. Petersburg (red line):

z) the real part of the complex refractive index; e) the imaginary part of the complex refractive index.

равной 713 ± 283 частиц в см^3 , что вызвано изменением направления ветра на данных высотах. Аэрозольная оптическая толщина для слоя от 300 до 2500 м составила 0,15 и 0,08 для длин волн 355 и 532 нм соответственно. В Санкт-Петербурге максимальная концентрация составила 4657 ± 1045 частиц в см^3 на высоте 350 м, в слое 1300—1900 м со значением 1530 ± 529 на высоте 1560 м. Оптическая толщина в Санкт-Петербурге в слое от 300 до 2500 м составила 0,25 и 0,1 на длинах волн 355 и 532 нм соответственно.

Параметр Ангстрема позволяет сделать вывод о характере распределения частиц по размерам. Значение выше 2 указывает на преобладание мелкодисперсного аэрозоля, тогда как значение ниже 1 говорит о преобладании крупных аэрозольных частиц. В день проведения наблюдений в Выборгском районе параметр Ангстрема в среднем в столбе на всей высоте измерений соответствовал значению $1,44 \pm 0,24$. Это свидетельствует о смешанном распределении аэрозоля с наличием как мелко-, так и крупнодисперсной фракции с долей мелкодисперсного аэрозоля от 30 до 70 процентов. Параметр Ангстрема в день наблюдения в Санкт-Петербурге

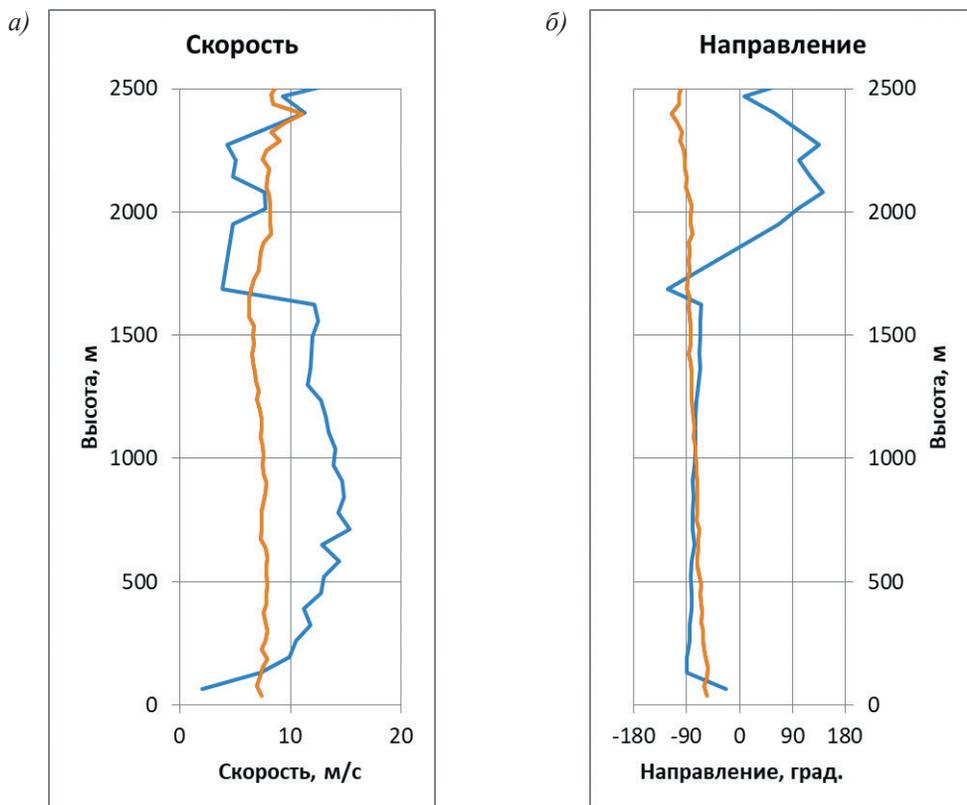


Рис. 4. Профили ветровых характеристик в Выборгском районе (синяя линия) и в Санкт-Петербурге (красная линия):

a) скорость; *б)* направление (± 180 — южное, -90 — западное, 0 — северное, 90 — восточное).

Fig. 4. Profiles of wind characteristics in the Vyborgsky district (blue line) and in St. Petersburg (red line):

a) speed; *b)* direction (± 180 — south, -90 — west, 0 — north, 90 — east).

составил $1,91 \pm 0,56$ и обусловлен преобладанием мелкодисперсного аэрозоля над мегаполисом.

Параметр Ангстрема (440—870 нм) в Петергофе с 2013 г. по 2016 г., по данным AERONET [33], изменяется по месяцам от 1,0 до 1,6 с максимальными значениями в теплое время года. Осенью в некоторые дни наблюдений он достигает 1,9. Принимая во внимание расстояние между местами наблюдений, возможен дополнительный вклад вторичного мелкодисперсного аэрозоля антропогенного происхождения в Санкт-Петербурге, что дает более высокие значения параметра Ангстрема.

Действительная и мнимая часть КПП в Выборгском районе находились в пределах 1,47—1,59 и 0,0035—0,0053, в Санкт-Петербурге — в пределах 1,37—1,59

и 0,0023—0,0052. Имеющиеся показатели говорят о присутствии в атмосфере Санкт-Петербурга и Выборгского района индустриального и морского аэрозоля.

Динамика воздушной массы представлена в виде вертикальных профилей скорости и направления ветра на рис. 4.

Направление ветра в дни наблюдений в Санкт-Петербурге и Выборгском районе Ленинградской области было западным (со стороны Финляндии). В Выборгском районе скорость ветра на всех высотах наблюдений не превышала 16 м/с. Во время проведения измерений в Санкт-Петербурге скорость ветра составляла 7—8 м/с.

Выводы

Пространственное распределение аэрозолей в Санкт-Петербурге и Ленинградской области было исследовано на основании полученных оптических данных с применением многоволновых лидарных систем. Проведенные измерения позволили определить различия содержания аэрозольной компоненты в Санкт-Петербурге и Выборгском районе Ленинградской области, оценить долю вторичного аэрозоля в загрязнении атмосферы в мегаполисе. Показано, что численная концентрация частиц по лидарным данным на высоте 350 м в Санкт-Петербурге более чем в 3,5 раза превышает численную концентрацию частиц в Выборгском районе, что, по мнению авторов, связано с долей вторичного аэрозоля антропогенного происхождения. Меньшее содержание аэрозольных частиц в Выборгском районе, как и следовало ожидать, вызвано отсутствием крупных промышленных предприятий вблизи площадки наблюдения, а также западным направлением переноса (со стороны Финляндии вдоль побережья Финского залива), зарегистрированным в дни наблюдений, который препятствовал заносу аэрозолей из г. Санкт-Петербург. Зарегистрированное направление ветра позволило оценить роль мегаполиса в загрязнении атмосферы.

Высота насыщенного аэрозодем слоя в Санкт-Петербурге ограничена высотой 2000 м, в Выборгском районе — 1200 м. Концентрация аэрозолей, зарегистрированная в Выборгском районе, на всей высоте лидарного зондирования до 2000 м значительно ниже, чем в Санкт-Петербурге. Содержание аэрозолей выше 2000 м не имеет значительных различий между Санкт-Петербургом и Выборгским районом. В атмосфере г. Санкт-Петербург аэрозольная компонента представлена более мелкодисперсной фракцией аэрозоля, чем в Выборгском районе. Данный тип аэрозоля несет большую опасность для здоровья населения по сравнению с крупнодисперсной фракцией.

Повышенное содержание аэрозолей над мегаполисом ведет к дополнительной нагрузке на прилегающие к Санкт-Петербургу районы, которая в значительной степени определяется метеорологической обстановкой. Также повышенное содержание аэрозолей ведет к уменьшению прозрачности атмосферы и приводит к пространственной неоднородности поступления УФ радиации в Санкт-Петербурге и Ленинградской области. Ввиду изменчивости пространственного распределения аэрозолей в пограничном слое атмосферы необходимо проведение

непрерывного мониторинга состояния атмосферы с применением лидарных технологий.

В дальнейшем авторами планируется выполнить синхронные измерения мобильным и стационарным лидарными комплексами в Санкт-Петербурге и Ленинградской области при разных направлениях ветра.

Список литературы

1. How air pollution is destroying our health: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.who.int/news-room/spotlight/how-air-pollution-is-destroying-our-health> (дата обращения: 26.06.2023).
2. Marchwinska-Wyrwal E., Dziubanek G., Hajok I. et al. The Impact of Air Pollution on Health, Economy, Environment and Agricultural Sources. Rijeka.: IntechOpen, 2011. DOI: 10.5772/17906.
3. Park M., Joo H. S., Lee K. et al. Differential toxicities of fine particulate matters from various sources // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8. art. 17007. DOI: 10.1038/s41598-018-35398-0.
4. Thangavel P., Park D., Lee Y.-C. Recent Insights into Particulate Matter (PM_{2.5})-Mediated Toxicity in Humans: An Overview // *Int J Environ Res Public Health*. 2022. Vol. 19. No. 12. Iss. 12 P. 22. DOI: 10.3390/ijerph19127511.
5. Шабельник Е. С. Исследование влияния воздушного аэрозоля на состояние и внешний облик зданий и сооружений // *Перспективные технологии в строительстве и техносферной безопасности*, ИСОиП ДГТУ в г. Шахты. 2020. С. 94—101.
6. Берлянд М. Е., Кондратьев К. Я. Города и климат планеты. Ленинград: Гидрометеиздат, 1972. 40 с.
7. Боков В. Н., Воробьев В. Н., Сарвинова Е. В. Влияние изменчивости ветра на внутригодовое распределение атмосферных примесей в Санкт-Петербурге // *Ученые записки РГГМУ*. 2006. № 3. С. 95-103.
8. Крюкова С. В., Симакина Т. Е. Оценка влияния метеорологических параметров на концентрации загрязняющих веществ в атмосфере Санкт-Петербурга // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2015. № 5—2. С. 299—305.
9. Martins L. D., Hallak R., Alves R. C. et al. Long-range Transport of Aerosols from Biomass Burning over Southeastern South America and their Implications on Air Quality // *Aerosol Air Qual. Res*. 2018. Vol. 8. P. 1734—1745. DOI: 10.4209/aaqr.2017.11.0545.
10. Bagtasa G., Cayetano M. G., Yuan C.-S. et al. Long-range transport of aerosols from East and Southeast Asia to northern Philippines and its direct radiative forcing effect // *Atmospheric Environment*. 2019. Vol. 218. art. 117007. DOI:10.1016/j.atmosenv.2019.117007.
11. Lin C.-Y., Liu S. C., Chou C. C.-K. et al. Long-range transport of aerosols and their impact on the air quality of Taiwan // *Atmospheric Environment*. 2005. Vol. 39. Iss. 33. P. 6066—6076. DOI:10.1016/j.atmosenv.2005.06.046.
12. Mallone S., Stafoggia M., Faustini A. et al. Saharan Dust and Associations between Particulate Matter and Daily Mortality in Rome, Italy // *Environmental Health Perspectives*. 2011. Vol. 119. No. 10. P. 1409—1414. DOI: 10.1289/ehp.1003026.
13. Liang Y., Che H., Wang H. et al. Aerosols Direct Radiative Effects Combined Ground-Based Lidar and Sun-Photometer Observations: Cases Comparison between Haze and Dust Events in Beijing // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. No. 2. 18 p. art. 266. DOI: 10.3390/rs14020266.
14. Ma X., Wang C., Han G. et al. Regional Atmospheric Aerosol Pollution Detection Based on LiDAR Remote Sensing // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11. No. 20. art. 2339. DOI:10.3390/rs11202339.
15. Liu B., Ma Y., Gong W. et al. Comparison of AOD from CALIPSO, MODIS, and Sun Photometer under Different Conditions over Central China // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8. art. 10066. DOI: 10.1038/s41598-018-28417-7.
16. Розенберг Г. В. Оптические исследования атмосферного аэрозоля // *Успехи физических наук*. 1968. Т. 95. № 1. С. 159—208.
17. Зуев В. Е., Макиенко Э. В., Наац И. Э. Определение оптических свойств стратосферных аэрозолей наземными лидарами // *Доклады Академии наук*. 1982, Т. 265. № 5. С. 1105—1107.

18. Захаров В. М., Костко О. К., Хмелевцов С. С. Лидары и исследование климата. Ленинград: Гидрометеиздат, 1990. 320 с.
19. Иванов А. П., Чайковский А. П., Зеге Э. П. и др. Исследование трансграничного переноса загрязнений в атмосфере в регионе Беларуси // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 12. С. 1048—1058.
20. Зуев В. Е., Зуев В. В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1992. 232 с.
21. Adam M., Nicolae D., Belegante L. et al. Biomass Burning Measurements in Earlinet // EPJ Web Conf. 2020. Vol. 237. art. 05005. DOI: 10.1051/epjconf/202023705005.
22. Adam M., Fragkos K., Solomos S. et al. Methodology for Lidar Monitoring of Biomass Burning Smoke in Connection with the Land Cover // Remote Sensing. 2022 Vol. 14. No. 19. art. 4734. DOI: 10.3390/rs14194734.
23. Mona L., Papagiannopoulos N., Basart S. et al. EARLINET dust observations vs. BSC-DREAM8b modeled profiles: 12-year-long systematic comparison at Potenza, Italy // Atmospheric Chemistry and Physics. 2014. Vol. 14. No. 16. P. 8781—8793. DOI:10.5194/acp-14-8781-2014.
24. Ross J. L., Waggoner A. P., Hobbs P. V., Ferek R. J. Airborne Lidar Measurements of a Smoke Plume Produced by a Controlled Burn of Crude Oil on the Ocean // Journal Air Waste Manag. Assoc. 1996. Vol. 46. No. 4. P. 327—334. DOI: 10.1080/10473289.1996.10467467.
25. Yabuki M., Kuze H., Lagrosas N. et al. Determination of Vertical Distributions of Aerosol Optical Parameters by Use of Multi-Wavelength Lidar Data // Japanese Journal of Applied Physics. 2003. Vol. 42. Part 1. No. 2A. art. 296. DOI: 10.1109/CLEOPR.2003.1274753.
26. Saha S., Sharma S., Kumar K. N. et al. A case study on the vertical distribution and characteristics of aerosols using ground-based raman lidar, satellite and model over Western India // International Journal of Remote Sensing. 2021. Vol. 42. Iss. 17. P. 6417—6432. DOI: 10.1080/01431161.2021.1938737.
27. Molero F., Pujadas M., Artiñano B. Study of the Effect of Aerosol Vertical Profile on Microphysical Properties Using GRASP Code with Sun/Sky Photometer and Multiwavelength Lidar Measurements // Remote Sens. 2020. Vol. 12. No. 24. art. 4072. DOI: 10.3390/rs12244072.
28. Osterloh L., Pérez C., Böhme D. et al. Parallel software for retrieval of aerosol distribution from LIDAR data in the framework of EARLINET-ASOS // Computer Physics Communications. 2009. Vol. 180. Iss. 11. P. 2095—2102. DOI: 10.1016/j.cpc.2009.06.011.
29. Донченко В. К., Самуленков Д. А., Мельникова И. Н. и др. Лазерные системы Ресурсного центра СПбГУ. Возможности, постановка задач и первые результаты // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 122—132.
30. Klett J. D. Lidar Inversion with Variable Backscatter/Extinction Ratios // Applied Optics. 1985. Vol. 24. Iss. 11. P. 1638—1643. DOI: 10.1364/AO.24.001638.
31. Волков Н. Н. Многоволновая лидарная система для определения физических параметров тропосферного аэрозоля: методика расчета параметров и анализа данных / Дисс. канд. технических наук. МИИГАиК. М. 2013. 135 с.
32. Veselovskii I., Whiteman D. N., Kolgotin A. et al. Demonstration of aerosol property profiling by multi-wavelength lidar under varying relative humidity conditions // J. of Atmospheric and Oceanic Tech. 2009. Vol. 26. P. 1543—1557.
33. Волкова К. А., Поберовский А. В., Тимофеев Ю. М. и др. 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.

References

1. How air pollution is destroying our health. Available at: <https://www.who.int/news-room/spotlight/how-air-pollution-is-destroying-our-health> (accessed on: 26.06.2023).
2. Marchwinska-Wyrwal E., Dziubanek G., Hajok I. et al. *The Impact of Air Pollution on Health, Economy, Environment and Agricultural Sources*. Rijeka.: IntechOpen, 2011: 458 p. DOI: 10.5772/17906.
3. Park M., Joo H. S., Lee K. et al. Differential toxicities of fine particulate matters from various sources. *Scientific Reports*. 2018; (8):17007. DOI: 10.1038/s41598-018-35398-0.

4. Thangavel P., Park D., Lee Y.-C. Recent Insights into Particulate Matter (PM_{2.5})-Mediated Toxicity in Humans: An Overview. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2022; 19(12):22. DOI: 10.3390/ijerph19127511.
5. Shabelnik E. S. Study of the influence of air aerosol on the condition and appearance of buildings and structures. *Perspektivnye tekhnologii v stroitel'stve i tekhnosfernoj bezopasnosti ISOiP DGTU v g. Shahty = Perspective technologies in construction and technospheric safety*. ISOiP DGTU in Shahty. 2020: (94—101). (In Russ.).
6. Berlyand M. E., Kondratiev K. Ya. *Goroda i klimat planet = Cities and climate of the planet*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972: 40 p. (In Russ.).
7. Bokov V. N., Vorobev V. N., Sarvirova E. V. The influence of wind variability on the intra-annual distribution of atmospheric pollutants in St. Petersburg. *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific notes of the RSHU*. 2006; (3):(95—103). (In Russ.).
8. Kryukova S. V., Simakina T.E. Assessment of the influence of meteorological parameters on the concentrations of pollutants in the atmosphere of St. Petersburg. *Aktua'nye problemy gumanitarnyh i estestvennyh nauk = Current problems of the humanities and natural sciences*. 2015; 5(2):(299—305). (In Russ.).
9. Martins L. D., Hallak R., Alves R. C. et al. Long-range Transport of Aerosols from Biomass Burning over Southeastern South America and their Implications on Air Quality. *Aerosol Air Qual. Res.* 2018; (8):1734—1745. DOI: 10.4209/aaqr.2017.11.0545.
10. Bagtasa G., Cayetano M. G., Yuan C.-S. et al. Long-range transport of aerosols from East and Southeast Asia to northern Philippines and its direct radiative forcing effect. *Atmospheric Environment*. 2019; (218):17007. DOI:10.1016/j.atmosenv.2019.117007.
11. Lin C.-Y., Liu S.C., Chou C.C.-K. et al. Long-range transport of aerosols and their impact on the air quality of Taiwan. *Atmospheric Environment*. 2005; 39(33):6066—6076. DOI:10.1016/j.atmosenv.2005.06.046.
12. Mallone S., Stafoggia M., Faustini A. et al. Saharan Dust and Associations between Particulate Matter and Daily Mortality in Rome, Italy. *Environmental Health Perspectives*. 2011; 119(10):1409—1414. DOI: 10.1289/ehp.1003026.
13. Liang Y., Che H., Wang H. et al. Aerosols Direct Radiative Effects Combined Ground-Based Lidar and Sun-Photometer Observations: Cases Comparison between Haze and Dust Events in Beijing. *Remote Sensing*. 2022; 14(2):266. DOI: 10.3390/rs14020266.
14. Ma X., Wang C., Han G. et al. Regional Atmospheric Aerosol Pollution Detection Based on LiDAR Remote Sensing. *Remote Sensing*. 2019; 11(20):2339. DOI:10.3390/rs11202339.
15. Liu B., Ma Y., Gong W. et al. Comparison of AOD from CALIPSO, MODIS, and Sun Photometer under Different Conditions over Central China. *Scientific Reports*. 2018; (8):10066. DOI: 10.1038/s41598-018-28417-7.
16. Rosenberg G. V. Optical studies of atmospheric aerosol. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Advances in Physical Sciences*. 1968; 95(1):(159—208). (In Russ.).
17. Zuev V. E., Makienco E. V., Naats I. E. Determination of the optical properties of stratospheric aerosols by ground-based lidar. *Dokladi akademii nauk = Reports of the Academy of Sciences*. 1982; 265(5):(1105—1107). (In Russ.).
18. Zakharov V. M., Kostko O. K., Khmelevtsov S.S. *Lidary i issledovanie klimata = Lidars and climate research*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990: 320 p. (In Russ.).
19. Ivanov A. P., Tchaikovsky A. P., Zege E. P. et al. Study of transboundary transport pollution in the atmosphere in the region of Belarus. *Optika atmosfery I okeana = Atmospheric and ocean optics*. 2007; 20(12):(1048—1058). (In Russ.).
20. Zuev V. E., Zuev V. V. *Distancionnoe opticheskoe zondirovanie atmosfery = Remote optical sensing of the atmosphere*. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992: 232 p. (In Russ.).
21. Adam M., Nicolae D., Belegante L. et al. Biomass Burning Measurements in Earlinet. *EPJ Web Conf*. 2020; (237):05005. DOI: 10.1051/epjconf/202023705005.
22. Adam M., Fragkos K., Solomos S. et al. Methodology for Lidar Monitoring of Biomass Burning Smoke in Connection with the Land Cover. *Remote Sensing*. 2022; 14(19):4734. DOI: 10.3390/rs14194734.
23. Mona L., Papagiannopoulos N., Basart S. et al. EARLINET dust observations vs. BSC-DREAM8b modeled profiles: 12-year-long systematic comparison at Potenza, Italy. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2014; 14(16):8781—8793. DOI:10.5194/acp-14-8781-2014.

24. Ross J.L., Waggoner A. P., Hobbs P. V., Ferek R. J. Airborne Lidar Measurements of a Smoke Plume Produced by a Controlled Burn of Crude Oil on the Ocean. *Journal Air Waste Manag. Assoc.* 1996; 46(4):327—334. DOI: 10.1080/10473289.1996.10467467.
25. Yabuki M., Kuze H., Lagrosas N. et al. Determination of Vertical Distributions of Aerosol Optical Parameters by Use of Multi-Wavelength Lidar Data. *Japanese Journal of Applied Physics.* 2003; (42):(2A):296. DOI: 10.1109/CLEOPR.2003.1274753.
26. Saha S., Sharma S., Kumar K. N. et al. A case study on the vertical distribution and characteristics of aerosols using ground-based raman lidar, satellite and model over Western India. *International Journal of Remote Sensing.* 2021; 42(17):6417—6432. DOI: 10.1080/01431161.2021.1938737.
27. Molero F., Pujadas M. and Artiñano B. Study of the Effect of Aerosol Vertical Profile on Microphysical Properties Using GRASP Code with Sun/Sky Photometer and Multiwavelength Lidar Measurements. *Remote Sens.* 2020; 12(24):4072. DOI: 10.3390/rs12244072.
28. Osterloh L., Pérez C., Böhme D. et al. Parallel software for retrieval of aerosol distribution from LIDAR data in the framework of EARLINET-ASOS. *Computer Physics Communications.* 2009; 180(11):2095—2102. DOI: 10.1016/j.cpc.2009.06.011.
29. Donchenko V. K., Samulenkov D. A., Mel'nikova I.N. et al. Laser systems of the Resource Center of St. Petersburg State University. Opportunities, goal setting and first results. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space.* 2013; 10(3):(122—132). (In Russ.).
30. Klett J. D. Lidar Inversion with Variable Backscatter/Extinction Ratios. *Applied Optics.* 1985; 24(11):1638—1643. DOI: 10.1364/AO.24.001638.
31. Volkov N. N. Mnogovolnovaya lidarnaya sistema dlya opredeleniya fizicheskikh parametrov troposfernogo aerolya: metodika rascheta parametrov i analiza dannyh. Diss. Kand. tekhnicheskikh nauk. MIIGAiK. M. 2013:135 p. (In Russ.).
32. Veselovskii I., Whiteman D. N., Kolgotin A. et al. Demonstration of aerosol property profiling by multi-wavelength lidar under varying relative humidity conditions. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.* 2009; (26):1543—1557.
33. Volkova K. A., Poberovsky A. V., Timofeev Yu. M. et al. Aerosol Optical Characteristics Retrieved from CIMEL Sun Photometer Measurements (AERONET) near St. Petersburg. *Atmospheric and Oceanic Optics.* 2018; 31(6):(425—431). (In Russ.). DOI: 10.15372/AOO20180601.

Информация об авторах

Дмитрий Альбертович Самуленков, СПбГУ, Научный парк, РЦ «Обсерватория экологической безопасности», директор, e-mail: samulenkov_da@mail.ru.

Максим Викторович Сапунув, СПбГУ, Научный парк, РЦ «Обсерватория экологической безопасности», инженер, e-mail: mikecf@mail.ru.

Information about authors

Dmitrii Albertovich Samulenkov, SPbU, Research Park, Research Center “Environmental Safety Observatory”, director, e-mail: samulenkov_da@mail.ru.

Maksim Viktorovich Sapunov, SPbU, Research Park, Research Center “Environmental Safety Observatory”, engineer, e-mail: mikecf@mail.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 27.06.2023

Принята к печати после доработки 28.10.2023

The article was received on 27.06.2023

The article was accepted after revision on 28.10.2023