

## Лидарное зондирование аэрозольных загрязнений в атмосфере по маршруту Санкт-Петербург – Воронежская область – Белгородская область

Д. А. Самуленков<sup>1</sup>, М. В. Сапунов<sup>1</sup>, И. Н. Мельникова

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет  
Санкт-Петербург, 199034, Россия  
E-mail: samulenkov\_da@mail.ru

В данной статье приводятся результаты измерений, выполненных мобильным и стационарным лидарными комплексами с 17 по 20 мая 2019 г. Проведено сравнение параметров аэрозольных загрязнений в разных регионах России: Белгородской обл., Воронежской обл., Санкт-Петербурге. Для отслеживания метеорологической ситуации перед измерениями аэрозольным лидаром проводились измерения скорости и направления ветра доплеровским лидаром. Выполнено сравнение коэффициентов обратного рассеяния и ослабления лидарного сигнала с целью определения верхней границы пылевого облака в разных регионах, проведена обработка полученных оптических данных для расчёта микрофизических параметров аэрозоля, приведены значения численной и объёмной концентрации аэрозольных частиц, посчитан средний радиус аэрозольных частиц. Отмечено, что наибольшая плотность аэрозольной шапки с концентрацией частиц около  $4500 \text{ л/см}^3$  зафиксирована над Санкт-Петербургом в приземном слое на высоте 300 м. Концентрация частиц плавно снижается с увеличением высоты. Минимальная концентрация аэрозольных частиц отмечается в Воронежской обл. с концентрацией  $2000 \text{ л/см}^3$  на высоте 300 м, остаётся такой же до высоты 1200 м и затем резко снижается. Для Белгородской обл. характерны различия в концентрации аэрозольных частиц в приземном слое: в точке Белгород 1 на высоте 300 м концентрация равна  $1800 \text{ л/см}^3$ , в точке Белгород 2 она примерно в два раза больше —  $3500 \text{ л/см}^3$ . Для обоих случаев отмечается повышение концентрации аэрозольных частиц на высоте 1400 м: точка Белгород 1 —  $2900 \text{ л/см}^3$ , Белгород 2 —  $4000 \text{ л/см}^3$ . Что, по всей видимости, связано с переносом с юго-запада, где в большом количестве расположены сельскохозяйственные территории. При расчёте диаметра аэрозольных частиц во всех точках измерений преобладали частицы со средним радиусом 0,1 мкм.

**Ключевые слова:** лидар, атмосферное загрязнение, аэрозоль

Одобрена к печати: 02.04.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-223-230

Пограничный слой атмосферы представляет особый интерес для исследований, ввиду того что там происходит активный обмен с поверхностью энергией и веществом. В городах это ведёт к возникновению шапки загрязнений, следствием чего является ухудшение здоровья населения (Гинзбург и др., 2017). Во всём мире активно используются и развиваются лидарные технологии, применяющиеся для мониторинга состояния окружающей среды: на основе лазеров Nd:YAG проводятся измерения нижних слоёв атмосферы на предмет содержания, переноса аэрозолей (Immler et al., 2006); выполняются измерения микроджоульными диодными лидарами, которые позволяют обнаруживать аэрозольные загрязнения на расстояниях до нескольких километров (Bunkin, Pershin, 2005; Pershin et al., 2001) и ввиду малой мощности могут использоваться непосредственно в населённых пунктах; проводятся измерения лидарами дифференциального поглощения для отслеживания газовых компонент атмосферы (Goers, 1995; Ismail, Browell, 2015) и др. В большом количестве исследований, проведённых отечественными и зарубежными специалистами, отмечается, что аэрозольные загрязнения приводят к сердечно-сосудистым расстройствам, болезням глаз, органов дыхания, аллергиям. Постоянное воздействие аэрозолями приземного слоя приводит к появлению различных хронических заболеваний. Ввиду этого исследование распространения аэрозольных загрязнений в атмосфере является на сегодняшний день одной из актуальных научных задач (Brook

et al., 2011; Fischer et al., 2015; Mallone et al., 2011). Кроме того, атмосферные аэрозоли взаимодействуют с солнечной радиацией и сильно влияют на радиационный режим атмосферы. Подробную информацию, посвящённую дистанционным исследованиям окружающей среды, с основами физики, необходимыми для понимания принципов работы лидаров, можно найти в монографиях (Bunkin, Voliak, 2001; Measures, 1985).

В настоящей работе проводились сравнения аэрозольного загрязнения по результатам натуральных измерений с применением мобильного и стационарного лидарных комплексов (МЛК и СЛК) (рис. 1), входящих в состав ресурсного центра (РЦ) «Обсерватория экологической безопасности» Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета по маршруту Санкт-Петербург – Воронежская обл. – Белгородская обл. Лидарное зондирование атмосферных аэрозолей выполнялось с применением лазера Nd:YAG, работающего на трёх длинах волн: 355, 532 и 1064 нм. Характеристики аэрозольных лидаров МЛК и СЛК представлены в таблице. Для обеспечения безопасности измерения проводились строго в зенит. Измерения выполнялись в мае 2019 г. Площадки натуральных измерений с координатами представлены на рис. 2. Для понимания метеорологической ситуации и направления переносов аэрозольных частиц непосредственно перед измерениями аэрозольным лидаром проводились измерения вертикальной и горизонтальной составляющей ветра с помощью доплеровского гетеродинного лидара (рис. 3, см. с. 225) со следующими характеристиками: мощность импульса — 110 мкДж, частота повторения — 10 кГц, ширина линии генерации — 1,5–2 МГц, стабильность —  $\pm 0,8$  кГц.



а



б

Рис. 1. Внешний вид: а — мобильного лидарного комплекса; б — стационарного лидарного комплекса

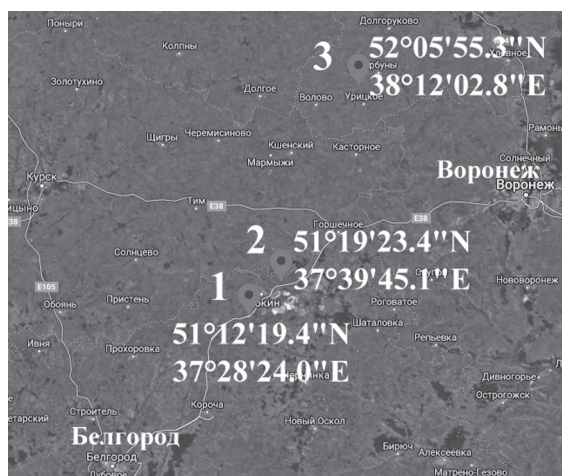


Рис. 2. Площадки проведения измерений: точки 1 и 2 — Белгородская обл.; точка 3 — Воронежская обл.; точка 4 — Санкт-Петербург, Васильевский остров, 10-я линия, д. 33/35

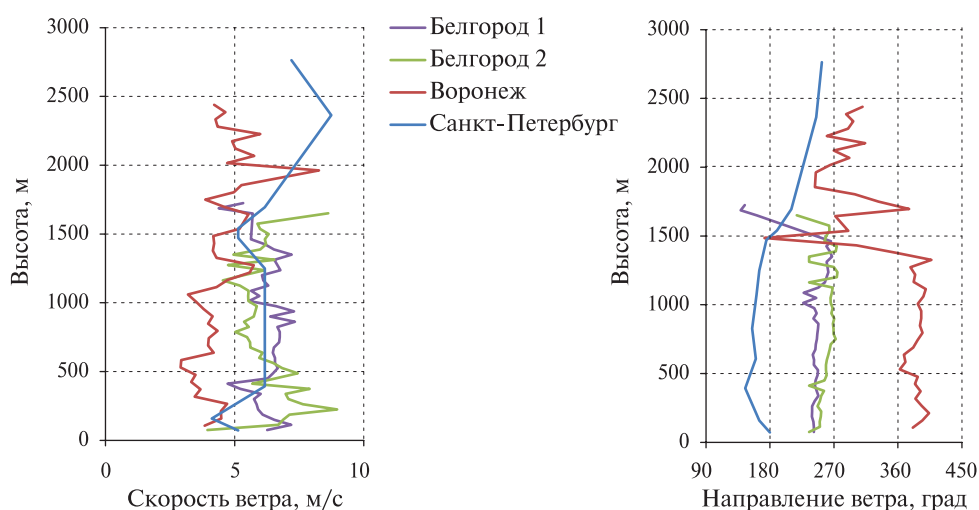


Рис. 3. Измерения скорости и направления ветра: фиолетовая линия — точка 1, 51° 12' 19" с. ш. и 37° 28' 24" в. д., Белгородская обл.; зелёная — точка 2, 51° 19' 23" с. ш. и 37° 39' 45" в. д., Белгородская обл.; красная — точка 3, 51° 19' 23" с. ш. и 37° 39' 45" в. д., Воронежская обл.; синяя линия — точка 4, 59° 56' 33,9" с. ш. и 30° 16' 22,4" в. д., Санкт-Петербург

Измерительное оборудование — аэрозольный лидар и доплеровский лидар — располагается в закрытом кузове автомобиля. Питание предусмотрено как от электрической сети, так и от дизельного генератора. Комплекс полностью автономен и позволяет проводить измерения в любой точке в зоне проходимости шасси. При необходимости собранные данные могут передаваться в ситуационный центр для оперативной обработки. Для вывода излучения из кузова в комплексе установлен 350-мм 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.

Характеристики аэрозольных лидаров мобильного и стационарного лидарных комплексов

Длина волны, нм	МЛК	СЛК
Максимальная энергия импульса, мДж		
1064	850	420
532	450	160
355	150	100
Длительность импульса, нс		
	10–14	5–8
Максимальная плотность энергии на выходной апертуре лидара, мДж/см <sup>2</sup>		
1064	88,3	43,7
532	46,8	16,6
355	15,6	10,4

Подробная информация о методах расчёта и обработки результатов оптических измерений изложена в статье (Самуленков и др., 2017).

Измерения мобильным лидарным комплексом проводились в Белгородской обл. 17 мая 2019 г. в двух точках, расположенных на расстоянии 18 км; 18 мая измерения проходили в Воронежской обл., 20 мая — в Санкт-Петербурге с помощью стационарного лидарного комплекса.

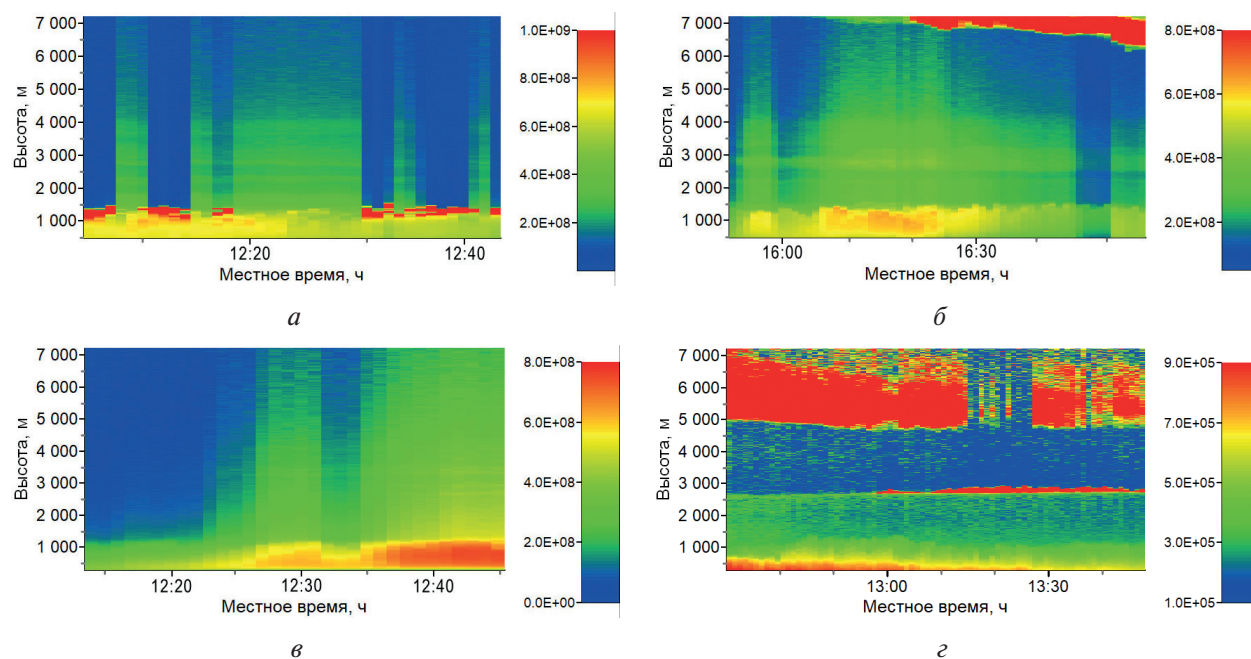
Основной целью данного исследования было сравнение параметров аэрозольного загрязнения в разных регионах России. Измерения МЛК проводились при схожих метеоусловиях, в Белгороде и Санкт-Петербурге наблюдались перисто-слоистые облака на высоте от 6,5 и 5–7 км соответственно, в Воронеже была ясная погода.

В рамках исследования выполнено сравнение коэффициентов обратного рассеяния и ослабления лидарного сигнала с целью определения верхней границы пылевого облака в разных регионах, проведена обработка полученных оптических данных для расчёта микрофизических параметров аэрозоля. Приводятся значения численной и объёмной концентрации аэрозольных частиц в разных географических точках с целью оценки изменчивости параметров аэрозольного облака при движении по маршруту Белгородская обл. – Санкт-Петербург.

## Результаты измерений

### Лидарное зондирование

На *рис. 4* представлен лидарный сигнал, скорректированный по расстоянию (сигнал, умноженный на квадрат расстояния) измерений на длине волны 532 нм для всех четырёх площадок наблюдения. По результатам многоволнового зондирования на трёх длинах волн 355, 532, 1064 нм установлено, что высота аэрозольной шапки максимальна над Санкт-Петербургом и составляет 2500 м. В Белгородской обл. высота аэрозольного слоя равна 1500 м, в Воронежской обл. — 1200 м.



*Рис. 4.* Скорректированный по расстоянию лидарный сигнал: *а* — площадка 1; *б* — площадка 2; *в* — площадка 3; *з* — площадка 4

### Микрофизические параметры

Решение лидарного уравнения осуществлялось методом Клетта (Донченко и др., 2013). Микрофизические параметры атмосферы рассчитывались с использованием программного обеспечения (ПО) Microphysics.exe, разработанного ООО «Оптосистемы». При моделировании в данном ПО применяется метод регуляризации Тихонова для решения обратной задачи многоволнового лидарного зондирования (Веселовский, 2005; Колготин, 2014). Полученная концентрация аэрозольных частиц на площадках измерений представлена на *рис. 5* (см. с. 227).

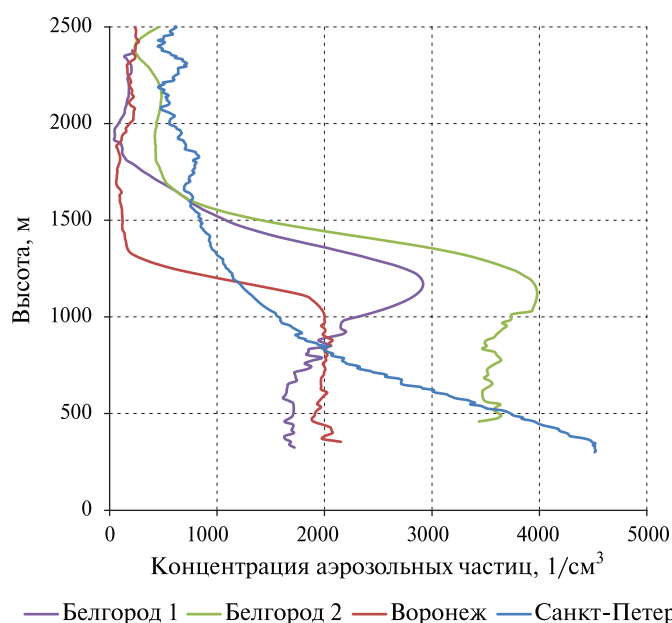


Рис. 5. Численная концентрация аэрозольных частиц: фиолетовая линия — площадка 1; зелёная — площадка 2; красная — площадка 3; синяя линия — площадка 4

Наибольшая плотность аэрозольной шапки с концентрацией частиц около  $4500 1/\text{см}^3$  отмечена над Санкт-Петербургом в приземном слое на высоте 300 м. Концентрация частиц плавно снижается с увеличением высоты, на высоте 1250 м уменьшается приблизительно в четыре раза и составляет  $1100 1/\text{см}^3$ . Максимальная численная концентрация аэрозольных частиц в приземном слое над Санкт-Петербургом отмечалась и в другие дни наблюдений (измерения с использованием аэрозольного лидара стационарного лидарного комплекса проводятся на постоянной основе при благоприятных метеоусловиях начиная с 2014 г.). Очевидно, что повышенная концентрация аэрозоля связана с тем, что Санкт-Петербург является развитым индустриальным городом с высокой загруженностью автомобильных дорог. Аэрозоль поднимается с восходящими потоками воздуха, постепенно рассеиваясь с увеличением высоты.

Минимальная концентрация аэрозольных частиц отмечается в Воронежской обл. —  $2000 1/\text{см}^3$  на высоте 300 м, остаётся такой же до высоты 1200 м, затем резко снижается. Для Белгородской обл. характерны различия в концентрации аэрозольных частиц в приземном слое: в точке Белгород 1 на высоте 300 м концентрация равна  $1800 1/\text{см}^3$ , в точке Белгород 2 она примерно в два раза больше —  $3500 1/\text{см}^3$ . Для обоих случаев отмечается повышение концентрации аэрозольных частиц на высоте 1400 м: точка Белгород 1 —  $2900 1/\text{см}^3$ , Белгород 2 —  $4000 1/\text{см}^3$ . Это, по всей видимости, связано с переносом с юго-запада, где в большом количестве расположены сельскохозяйственные территории.

При расчёте диаметра аэрозольных частиц во всех точках измерений преобладали частицы со средним радиусом  $0,1 \text{ мкм}$ .

## Заключение

Выполненные измерения показывают возможности применения мобильного лидарного комплекса (МЛК) для индикации переноса аэрозольных загрязнений между регионами. Такой комплекс позволяет проводить исследования в любой точке зоны проходимости мобильного носителя. Измерения с использованием МЛК позволили провести оценку оптических и микрофизических параметров аэрозолей, определить высоту их распространения, вертикальный профиль. Проведённые измерения показали, что в исследуемых регионах уровень аэрозольного загрязнения различается. Как и ожидалось, максимальные уровни оказались

в Санкт-Петербурге ввиду высокой интенсивности трафика автомобилей и большого количества промышленных предприятий. На нижней границе измерений численное содержание аэрозольных частиц в Санкт-Петербурге превышает более чем в два раза содержание таких в Воронежской и Белгородской областях (точка Белгород 1). На высотах выше 1 км на площадках измерений Белгород 1, Белгород 2, Воронеж наблюдаются максимумы профилей концентрации частиц. При этом отмечено повышение аэрозольного загрязнения в точке Белгород 2, что, по предположению авторов, с учётом данных, полученных с помощью ветрового лидара, связано с переносом аэрозоля с сельскохозяйственных территорий. Наиболее «чистым» в плане загрязнения аэрозольными частицами оказалась территория в зоне проведения измерений в Воронежской обл.

## 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. *Гинзбург А. С., Мельникова И. Н., Новиков С. С., Фролькис В. А.* Простая радиационная модель безоблачной и облачной атмосферы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 1. С. 226–244. URL: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-1-226-244>.
3. *Донченко В. К., Самуленков Д. А., Мельникова И. Н., Борейшо А. С., Чугреев А. В.* 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.
4. *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.
5. *Мельникова И. Н., Донченко В. К., Самуленков Д. А., Сапунов М. В., Борейшо А. С., Васильев Д. Н., Коняев М. А., Чугреев А. В., Двинянина О. В., Миляев В. Б., Короленко Л. И., Цибульский В. В.* Новые возможности мониторинга атмосферных загрязнений в Северо-Западном регионе РФ // Инновации. 2014. № 11. С. 2–7.
6. *Самуленков Д. А., Мельникова И. Н., Донченко В. К., Сапунов М. В.* Исследование загрязнений атмосферы с помощью лидарного мониторинга // Ученые записки Российского гос. гидрометеоролог. ун-та. 2017. № 48. С. 266–280.
7. *Brook R. D., Shin H. H., Bard R. L., Burnett R. T., Vette A., Croghan C., Thornburg J., Rodes C., Williams R.* Exploration of the Rapid Effects of Personal Fine Particulate Matter Exposure on Arterial Hemodynamics and Vascular Function during the Same Day // Environmental Health Perspectives. 2011. V. 119. No. 5. P. 432–444. URL: <https://doi.org/10.1289/ehp.1002107>.
8. *Bunkin A. F., Pershin S. M.* Lidar measurement of dynamics of spatial characteristics of aerosol in boundary atmospheric layer under urban conditions // Physics of Wave Phenomena. 2005. V. 13. No. 1. P. 37–43.
9. *Bunkin A. F., Voliak K. I.* Laser Remote Sensing of the Ocean: Methods and Applications. N. Y.; Chichester; Weinheim; Brisbane; Singapore; Toronto: John Wiley and Sons, 2001. 244 p.
10. *Fischer P. H., Marra M., Ameling C. B., Gerard H., Beelen R., de Hoogh K., Breugelmans O., Kruize H., Janssen N. A. H., Houthuijs D.* Environmental Health Perspective Air Pollution and Mortality in Seven Million Adults: The Dutch Environmental Longitudinal Study (DUELS) // Environmental Health Perspectives. 2015. V. 123. No. 7. P. 697–704. URL: <https://doi.org/10.1289/ehp.1408254>.
11. *Goers U. B.* Laser remote sensing of sulfur dioxide and ozone with the mobile differential absorption lidar ARGOS // Optical Engineering. 1995. V. 34. No. 11. P. 3097–3102. URL: <https://doi.org/10.1117/12.213584>.
12. *Immler F., Beninga I., Ruhe W., Stein B., Mielke B., Rutz S., Terli Ö., Schrems O.* A new LIDAR system for the detection of Cloud and aerosol backscatter, depolarization, extinction, and fluorescence // Proc. 23<sup>rd</sup> Intern. Laser Radar Conf. (ILRC 2006). 2006. P. 35–38.
13. *Ismail S., Browell E. V.* Lidar: Differential Absorption Lidar // Encyclopedia of Atmospheric Sciences. 2<sup>nd</sup> ed. 2015. V. 3. P. 277–288.
14. *Mallone S., Stafoggia M., Faustini A., Gobbi G. P., Marconi A., Forastiere F.* Saharan Dust and Associations between Particulate Matter and Daily Mortality in Rome, Italy // Environmental Health Perspectives. 2011. V. 119. No. 10. P. 875–888. URL: <https://doi.org/10.1097/01.ede.0000362907.77717.07>.
15. *Measures R. M.* Laser Remote Sensing. Fundamentals and Applications. N. Y.; Toronto; Singapore: John Wiley and Sons, 1985. 524 p.
16. *Pershin S., Lyash A., Makarov V.* Atmosphere remote sensing by microjoule pulses of diode-laser // Physics of Vibration. 2001. V. 9. No. 4. P. 256–260.

## Lidar sounding of aerosol pollution in atmosphere along the route Saint Petersburg – Voronezh Region – Belgorod Region

D. A. Samulenkov<sup>1</sup>, M. V. Sapunov<sup>1</sup>, I. N. Melnikova

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia  
E-mail: samulenkov\_da@mail.ru

The paper presents the results of measurements performed by a mobile and stationary lidar complex from May 17 to 20, 2019. Based on the measurement results, the parameters of aerosol pollution were compared in different regions of Russia: Belgorod Region, Voronezh Region, Saint Petersburg. To monitor the meteorological situation, measurements of the wind speed and direction by Doppler lidar were made before measurements with an aerosol lidar. The coefficients of backscattering and attenuation of the lidar signal were compared to determine the upper boundary of the dust cloud in different regions, the optical data were processed to calculate the aerosol microphysical parameters, the values of the numerical and volume concentrations of aerosol particles were given, and the average radius of aerosol particles was calculated. It was noted that the highest density of the aerosol cap, with a particle concentration of about 4500 1/cm<sup>3</sup>, was noted over Saint Petersburg, in the surface layer at an altitude of 300 m. The concentration of particles gradually decreased with increasing height. The minimum concentration of aerosol particles was observed in Voronezh Region with a concentration of 2000 1/cm<sup>3</sup> at an altitude of 300 m, remained the same to an altitude of 1200 m, and then sharply decreased. In Belgorod Region, differences in the concentration of aerosol particles were characteristic of the surface layer: at a height of 300 m at point Belgorod 1 the concentration was 1800 1/cm<sup>3</sup>, at point Belgorod 2 it was approximately two times higher — 3500 1/cm<sup>3</sup>. In both cases, there was an increase in concentration of aerosol particles at an altitude of 1400 m, point Belgorod 1 — 2900 1/cm<sup>3</sup>, point Belgorod 2 — 4000 1/cm<sup>3</sup>. That, apparently, was associated with the transfer from the south-west, where agricultural areas are located in large numbers. When calculating the diameter of aerosol particles, particles with an average radius of 0.1 μm prevailed at all measurement points.

**Keywords:** lidar, atmospheric pollution, aerosol

Accepted: 02.04.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-223-230

### References

1. Veselovskii I. A., *Distantsionnaya 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.
2. Ginzburg A. S., Melnikova I. N., Novikov S. S., Frolkis V. A., Prostaya radiatsionnaya model' bezoblachnoi i oblachnoi atmosfery (Spatial radiation model of clear sky and cloudy atmosphere), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 1, pp. 226–244, available at: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-1-226-244>.
3. Donchenko V. K., Samulenkov D. A., Melnikova I. N., Boreisho A. S., Chugreyev A. V., Lazernye sistemy Resursnogo Tsentra SPbGU. Vozmozhnosti, postanovka zadach i pervye rezul'taty (Laser systems of the SPSU Resource Center. Potentials, problem definitions, and first results), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 3, pp. 122–132.
4. Kolgotin A. V., *Metodika resheniya zadach mnogovolnogo lidarnogo zondirovaniya v primenenii k global'nomu monitoringu parametrov atmosferykh aerazolei: 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.
5. Melnikova I. N., Donchenko V. K., Samulenkov D. A., Sapunov M. V., Boreisho A. S., Vasil'ev D. N., Konyayev M. A., Chugreev A. V., Dvinyanina O. V., Milyaev V. B., Korolenko L. I., Tsibulskii V. V., Noveye vozmozhnosti monitoringa atmosferykh zagryaznenii v Severo-Zapadnom regione RF (New opportunities for monitoring atmospheric pollution in the North-West region of the Russian Federation), *Innovatsii*, 2014, No. 11, pp. 2–7.
6. Samulenkov D. A., Melnikova I. N., Donchenko V. K., Sapunov M. V., Issledovanie zagryaznenii atmosfery s pomoshch'yu lidarnogo monitoringa (The study of atmospheric pollution using lidar monitoring), *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2017, No. 48, pp. 266–280.

7. Brook R. D., Shin H. H., Bard R. L., Burnett R. T., Vette A., Croghan C., Thornburg J., Rodes C., Williams R., Exploration of the Rapid Effects of Personal Fine Particulate Matter Exposure on Arterial Hemodynamics and Vascular Function during the Same Day, *Environmental Health Perspectives*, 2011, Vol. 119, No. 5, pp. 432–444, available at: <https://doi.org/10.1289/ehp.1002107>.
8. Bunkin A. F., Pershin S. M., Lidar measurement of dynamics of spatial characteristics of aerosol in boundary atmospheric layer under urban conditions, *Physics of Wave Phenomena*, 2005, Vol. 13, No. 1, pp. 37–43.
9. Bunkin A. F., Voliak K. I., *Laser Remote Sensing of the Ocean: Methods and Applications*, New York; Chichester; Weinheim; Brisbane; Singapore; Toronto: John Wiley and Sons, 2001, 244 p.
10. Fischer P. H., Marra M., Ameling C. B., Gerard H., Beelen R., de Hoogh K., Breugelmans O., Kruize H., Janssen N. A. H., Houthuijs D., Environmental Health Perspective Air Pollution and Mortality in Seven Million Adults: The Dutch Environmental Longitudinal Study (DUELS), *Environmental Health Perspectives*, 2015, Vol. 123, No. 7, pp. 697–704, available at: <https://doi.org/10.1289/ehp.1408254>.
11. Goers U. B., Laser remote sensing of sulfur dioxide and ozone with the mobile differential absorption lidar ARGOS, *Optical Engineering*, 1995, Vol. 34, No. 11, pp. 3097–3102, available at: <https://doi.org/10.1117/12.213584>.
12. Immler F., Beninga I., Ruhe W., Stein B., Mielke B., Rutz S., Terli Ö., Schrems O., A new LIDAR system for the detection of Cloud and aerosol backscatter, depolarization, extinction, and fluorescence, *Proc. 23<sup>rd</sup> Intern. Laser Radar Conf. (ILRC 2006)*, 2006, pp. 35–38.
13. Ismail S., Browell E. V., Lidar: Differential Absorption Lidar, *Encyclopedia of Atmospheric Sciences (Second Edition)*, 2015, Vol. 3, pp. 277–288.
14. Mallone S., Stafoggia M., Faustini A., Gobbi G. P., Marconi A., Forastiere F., Saharan Dust and Associations between Particulate Matter and Daily Mortality in Rome, Italy, *Environmental Health Perspectives*, 2011, Vol. 119, No. 10, pp. 875–888, available at: <https://doi.org/10.1097/01.ede.0000362907.77717.07>.
15. Measures R. M., *Laser Remote Sensing, Fundamentals and Applications*, New York; Toronto; Singapore: John Wiley and Sons, 1985, 524 p.
16. Pershin S., Lyash A., Makarov V., Atmosphere remote sensing by microjoule pulses of diode-laser, *Physics of Vibration*, 2001, Vol. 9, No. 4, pp. 256–260.