

## Оценка аэрозольных загрязнений в Санкт-Петербурге и пос. Воейково по результатам синхронных лидарных измерений

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 синхронных лидарных измерений в пос. Воейково Ленинградской обл. и Санкт-Петербурге, выполненных с целью оценки изменчивости содержания аэрозоля в черте города и за его пределами. Измерения проводились мобильным и стационарным лидарными комплексами Ресурсного центра «Обсерватория экологической безопасности» Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета. Измерения выполнялись однократно в летний и осенний сезон в 2023 г. в дневное время суток и захватывали момент запуска метеозонда, что позволило контролировать направление ветра с применением двух методов: лидарных технологий и радиозонда. Значимое превышение содержания аэрозольных частиц в Санкт-Петербурге по сравнению с Воейково отмечается в летний сезон, когда содержание частиц в столбе воздуха почти в 2,5 раза выше над Санкт-Петербургом. Осенью различия незначительны, что связано с направлением движения воздушных масс и их скоростью. Анализ полученных данных — концентрации аэрозолей и направления ветра — позволяют сделать вывод, что основной вклад в загрязнение атмосферы аэрозольными частицами вносят источники, расположенные в Санкт-Петербурге и вблизи города.

**Ключевые слова:** аэрозоль, лидар, скорость ветра, атмосфера, загрязнение

Одобрена к печати: 26.03.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-325-335

### Введение

В настоящее время Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ) вместе с другими научными и образовательными организациями занимается проектированием мониторинговой площадки для определения углеродного состояния природных и антропогенных экосистем в пределах Санкт-Петербурга и Ленинградской обл. под предварительным названием «Ладога». Мониторинг будет включать в себя наблюдения за газовым составом атмосферы, продукционными и углеродсеквестрирующими процессами в растительном покрове, депонированием и стабилизацией органического вещества в фоновых и антропогенно-трансформированных почвах. Планируется создание водной площадки полигона на Ладоге или Финском зал.

Отсутствие полной информации о пространственно-временной изменчивости содержания аэрозолей в атмосфере создаёт неопределённость и трудности в оценке степени воздействия аэрозольных частиц на изменение состояния окружающей среды. Аэрозоли влияют на процессы образования осадков и облаков, а также на перенос солнечной и тепловой радиации в атмосфере, что ведёт к изменению температурного режима. Климатический эффект аэрозолей зависит от физических и химических свойств аэрозолей, их количества, а также от высоты нахождения аэрозольного слоя (Гинзбург и др., 2008; Ивлев, 2012; Kondratyev et al., 2005).

Оценка содержания аэрозолей в разных регионах земного шара, их воздействия на баланс углерода представляется важной и актуальной задачей, требующей детального изучения. Влияние аэрозолей на количество приходящей прямой и рассеянной солнечной радиации оказывает косвенное воздействие на круговорот углерода, что в дальнейшем приводит к изменению климатической системы посредством обратных связей «климат — углерод» (Friedlingstein et al., 2006).

Загрязнение аэрозольными частицами представляет серьёзную опасность для здоровья населения ([www.who.int/news-room/spotlight/how-air-pollution-is-destroying-our-health](http://www.who.int/news-room/spotlight/how-air-pollution-is-destroying-our-health)).

Установлено, что загрязнение аэрозолями ведёт к увеличению смертности на 40,3 % от инсульта, на 26,8 % — от ишемической болезни сердца, на 23,9 % — от рака лёгкого, на 18,7 % — от хронической обструктивной болезни лёгких (Салтыкова и др., 2019; Шабельник, 2020; Song et al., 2017). Нормативные требования к содержанию PM10 (*англ.* particulate matter, твёрдые частицы) и PM2,5 в атмосферном воздухе ужесточаются по всему миру (Bari, Kindzierski, 2018; Lisetskii, Borovlev, 2019).

Увеличение содержания загрязняющих веществ в атмосфере больших городов стало общеизвестной проблемой, которая напрямую связана с повышением уровня жизни и экономическим развитием государств. Большое количество аэрозолей в городской атмосфере влияет на процессы микрофизического и радиационного переноса, косвенно воздействуя на городскую климат (Schmid, Niyogi, 2017). Лидарные, спутниковые технологии активно применяются для определения источников загрязнений, состава загрязнителей в регионах с высокой антропогенной нагрузкой на окружающую среду (Liu et al., 2018), позволяют оценить перенос аэрозолей, их пространственное распределение в атмосфере, микрофизические характеристики аэрозольных образований (Yabuki et al., 2003).

Отсутствие переноса, слабый ветер ведут к накоплению антропогенного загрязнения и увеличению регионального загрязнения (Li et al., 2013; Liu et al., 2013). Туманная дымка с большим количеством аэрозолей антропогенного происхождения часто возникает в густонаселённых городах (Ma et al., 2010; Sun et al., 2006). Конечно, стоит учитывать особенности исследуемого региона, в загрязнение городов также могут вносить значительный вклад аэрозоли естественного происхождения (Filonchuk et al., 2024). При этом стоит отметить, что во время сильного загрязнения активно идут процессы образования вторичных загрязнителей.

Концентрации PM2,5 в атмосферном воздухе крупнейших загрязнённых промышленных регионов мира достигают более 150 мкг/м<sup>3</sup> (Wang et al., 2017). В состав PM2,5 больших городов входят водорастворимые ионы, такие как SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> и NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (Wang et al., 2006; Yang et al., 2017). Другой важной составляющей городских аэрозолей являются полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) — побочные продукты неполного сгорания всех типов органических веществ (Nisbet, LaGoy, 1992). Взаимодействие ПАУ и атмосферных окислителей, например NO<sub>x</sub> и O<sub>3</sub>, в результате газофазных реакций с гидроксильным радикалом OH приводит к образованию значительной части вторичного органического аэрозоля в городской атмосфере (Lee et al., 2018).

На Северо-Западе России основными источниками загрязнения выступают транспорт, промышленные предприятия, также свой вклад вносят аэрозоли естественного происхождения (Ивлев, 1982). В Санкт-Петербурге расположено большое количество промышленных предприятий, хорошо развита транспортная инфраструктура, наблюдается постоянная положительная динамика увеличения численности автотранспорта, в связи с чем отмечается повышенная антропогенная нагрузка на окружающую среду. Выбросы аэрозолей происходят при работе двигателей внутреннего сгорания, при движении автотранспорта, происходит истирание покрышек, шипов автомобильных шин, асфальта, почвы, реагентов, часть этой смеси поднимается в воздух, часть уходит в систему ливневых стоков (Романовская, Савин, 2021). Стационарные источники также вносят значительный вклад в загрязнение атмосферы ([www.cedipt.gov.spb.ru/monitoring-pokazatelej/analiz-socialno-ekonomicheskogo-razvitiya/itogi-socialno-ekonomicheskogo-razvitiya-sankt-peterburga](http://www.cedipt.gov.spb.ru/monitoring-pokazatelej/analiz-socialno-ekonomicheskogo-razvitiya/itogi-socialno-ekonomicheskogo-razvitiya-sankt-peterburga)).

В Российской Федерации исследования с применением лидарных технологий для отслеживания переноса аэрозолей проводятся во многих научно-исследовательских институтах (Балин и др., 2017; [www.iao.ru](http://www.iao.ru); [www.gpi.ru](http://www.gpi.ru); [www.lsystems.ru](http://www.lsystems.ru)). Успешность данного метода подтверждена большим количеством созданных научно-исследовательских сетей, использующих лидарное оборудование (Hoff et al., 2002; Nishizawa et al., 2016; Welton et al., 2018; [www.earlinet.org](http://www.earlinet.org)). Изучение содержания аэрозолей вблизи Санкт-Петербурга проводится с использованием солнечного фотометра станции AERONET (*англ.* Aerosol Robotic Network), расположенной в Петергофе в здании СПбГУ (Волкова и др., 2018). Полученная информация позволяет отслеживать изменения аэрозольной оптической толщины, особенности формирования аэрозолей.

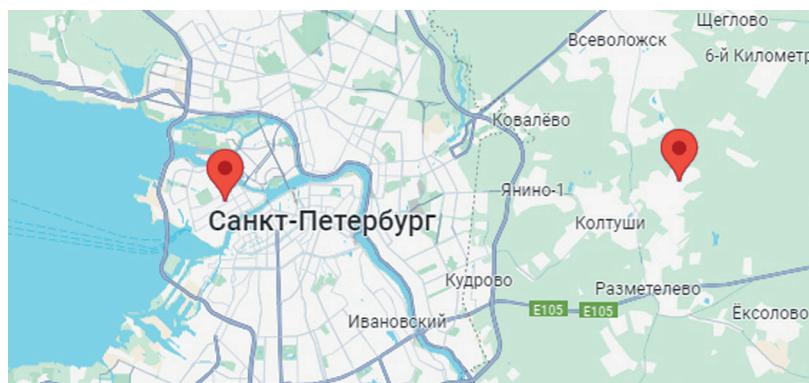


Рис. 1. Схема расположения площадок наблюдений

С учётом влияния аэрозолей на климатическую систему, углеродный баланс и здоровье населения были выполнены дневные синхронные лидарные измерения с использованием стационарного и мобильного лидарных комплексов в пределах Санкт-Петербурга и вблизи пос. Воейково (рис. 1) с целью оценки содержания аэрозолей в пограничном слое атмосферы.

## Материалы и методы

Мобильный и стационарный лидарные комплексы позволяют проводить натурные измерения аэрозолей. Для исследований используется Nd:YAG-лазер (англ. neodymium-doped yttrium aluminum garnet, твёрдотельный неодимовый лазер на алюмо-иттриевом гранате) и доплеровский гетеродинный лидар.

Лазер Nd:YAG работает на трёх длинах волн: 355, 532 и 1064 нм. Использование лазера с тремя гармониками позволяет восстановить функцию распределения частиц по размерам. Слепая зона лидара составляет 300 м и связана с расположением оптических элементов. Ветровой лидар позволяет измерять скорость и направление ветра с высоты 40 м. В импульсном доплеровском ветровом лидаре используется длина волны 1557 нм. Подробно характеристики мобильного и стационарного лидарных комплексов приведены в статье (Самуленков, Сапунов, 2023).

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;  $\int_0^z \alpha(z') dz'$  — аэрозольная оптическая толщина.

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

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

где  $r$  — радиус частицы;  $m$  — комплексный показатель преломления;  $\lambda_i$  — длины волн, используемые в зондировании;  $K_{\alpha}(m, r, \lambda_i)$  и  $K_{\beta}(m, r, \lambda_i)$  — ядра интегрального уравнения для случая сферических частиц, вычисляемые на основе теории Ми;  $f(r)$  — распределение частиц по размерам.

Уравнения (1) не имеют аналитического решения. Одним из методов, используемых при рассмотрении данной обратной задачи, является метод регуляризации, предложенный А. Н. Тихоновым (Веселовский, 2005).

Расчёт оптических параметров выполнялся по методу Клетта (Ивлев, 2011; Klett, 1985) с погрешностью до 20 %, которая зависит от состояния атмосферы, содержания и типа аэрозоля (Розенберг, 1968). Способ расчёта коэффициентов ослабления и обратного рассеяния аэрозоля по данным лидарного зондирования представлен в работе (Зуев и др., 1982).

Данные, полученные аэрозольным лидаром, были обработаны с использованием программного обеспечения DataProcessing ООО «Оптосистемы», разработанного для СПбГУ. Программа предназначена для обработки данных многоволнового лидарного зондирования, сохранённых в файлах формата Licel или в текстовом формате.

Однократные наблюдения проводились в течение 2–3 ч и впоследствии были усреднены. После основных наблюдений аэрозольным лидаром выполнялись однократные измерения вертикального профиля параметров ветра с помощью доплеровского лидара.

### Результаты исследования

Синхронные лидарные измерения с использованием мобильного и стационарного лидарных комплексов позволили оценить различия профилей аэрозолей в Санкт-Петербурге и Ленинградской обл. вблизи пос. Воейково. Измерения выполнены в летний и осенний сезон 2023 г. Измерения проводились в дневное время суток, захватывали момент запуска метеозонда в 15 ч, что позволило регистрировать скорость и направление ветра по данным ветрового лидара и метеозонда. Стоит отметить, что дискретность определения скорости и направления ветра с использованием имеющегося в ресурсном центре СПбГУ лидара составляет 37,5 м, а у метеозонда — сотни метров.

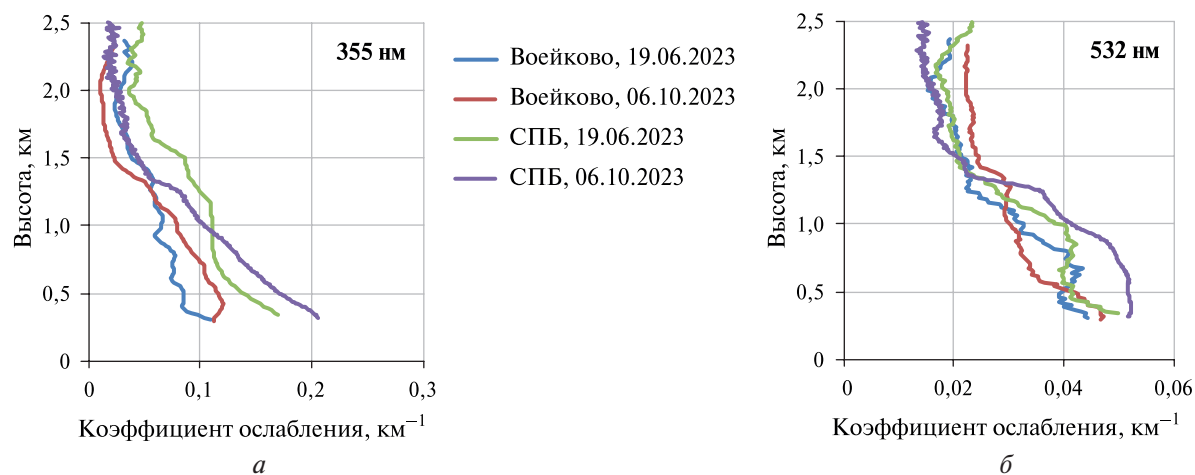


Рис. 2. Коэффициенты ослабления в Воейково и Санкт-Петербурге (СПБ) 19 июня и 6 октября на длине волны: *a* — 355 нм; *б* — 532 нм

Коэффициент ослабления в целом в Воейково меньше, чем в Санкт-Петербурге. Максимальные значения в городе не превышали  $0,21 \text{ км}^{-1}$  в ультрафиолетовом спектре. В видимом диапазоне спектра значения коэффициента ослабления находились в пределах от  $0,005$  до  $0,052 \text{ км}^{-1}$ . Как видно из графиков рис. 2 (см. с. 328), в момент проведения измерений наблюдалась нестабильная изменчивость параметров.

Оптическая толщина в слое от 0,35 до 2 км в среднем по двум измерениям составила в Воейково 0,099 и 0,049 на длине волны 355 и 532 нм соответственно, в Санкт-Петербурге — 0,157 и 0,054. Среднее значение параметра ангстрема в Воейково — 1,72, в Санкт-Петербурге — 2,62.

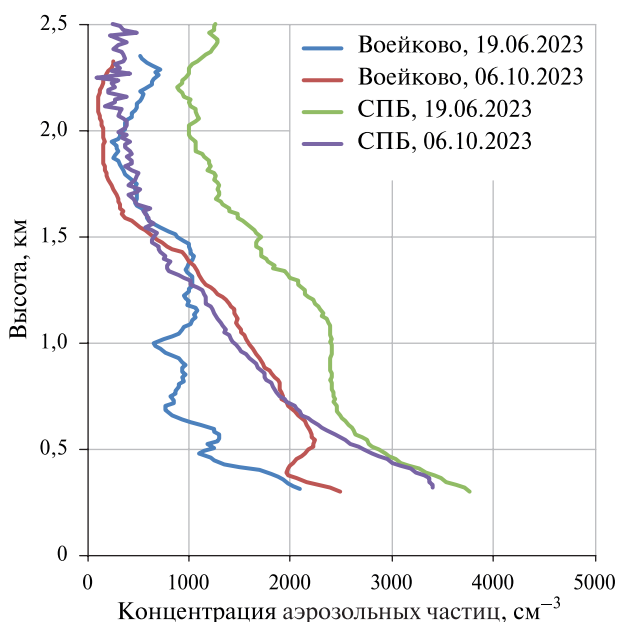


Рис. 3. Вертикальные профили концентрации аэрозольных частиц в Воейково и Санкт-Петербурге (СПБ) 19 июня и 6 октября

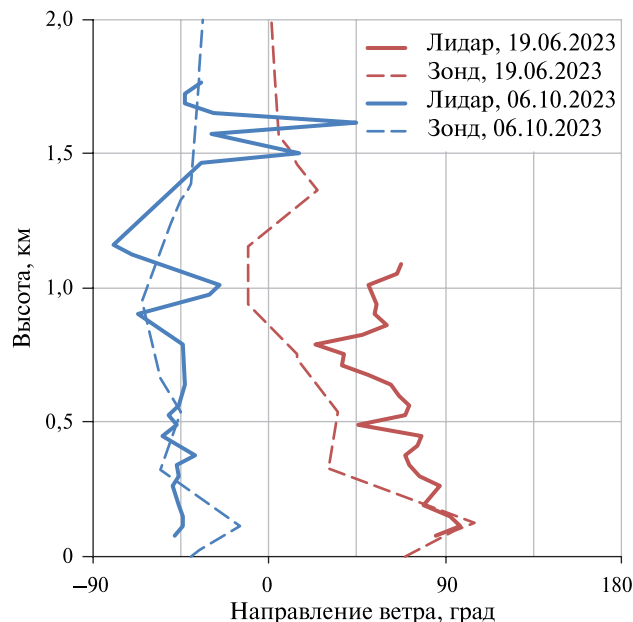


Рис. 4. Вертикальные профили направления ветра в Воейково и Санкт-Петербурге 19 июня и 6 октября

Наибольшая концентрация аэрозольных частиц отмечалась над Санкт-Петербургом 19 июня (рис. 3). В Воейково в тот же день наблюдалось большое количество аэрозольных слоёв, что может означать наличие турбулентности в атмосфере. Разница в концентрации летом была более ярко выражена, чем осенью. Это можно объяснить тем, что перемещаемые над пунктами наблюдения воздушные массы имели различный путь. На рис. 4 изображены вертикальные профили направления ветра по данным ветрового лидара и аэрологического зондирования, проводимого в Воейково. Ветер в день выполнения измерений осенью был северо-западным, летом — преимущественно северо-восточным. Данные радиозондирования и лидара 19 июня имели расхождения по высоте, но схожий характер смещения направления на северное. Лидаром фиксировалась некоторая изменчивость направления ветра в столбе. Данные показывают, что летом в Воейково воздушная масса двигалась с Ладожского озера, а в западную часть города вошла, пройдя над его центром и близлежащими территориями, включающими как жилые, так и производственные районы. Осенью воздушная масса, детектируемая над Васильевским островом, прошла вдоль северного берега Финского зал. Над Воейково воздушная масса прошла над северными территориями Ленинградской обл., минуя город, что объясняет менее сильную разницу по концентрации частиц, чем летом.

Концентрация аэрозолей в столбе воздуха от 350 м до 2 км составляет в Воейково в летний период  $1,44 \cdot 10^{12} \text{ 1/м}^2$ , в Санкт-Петербурге —  $3,47 \cdot 10^{12} \text{ 1/м}^2$ ; в осенний период в Воейково —  $2,03 \cdot 10^{12} \text{ 1/м}^2$ , в Санкт-Петербурге —  $2,22 \cdot 10^{12} \text{ 1/м}^2$ . Результаты исследований представлены в таблице.

#### Результаты измерений

Параметр		Воейково	Санкт-Петербург
Оптическая толщина	355 нм	0,099	0,157
	532 нм	0,049	0,054
Ангстрем		1,72	2,62
Концентрация аэрозольных частиц в столбе воздуха от 350 м до 2 км, $\times 10^{12} \text{ 1/м}^2$	Лето	1,44	3,47
	Осень	2,03	2,22

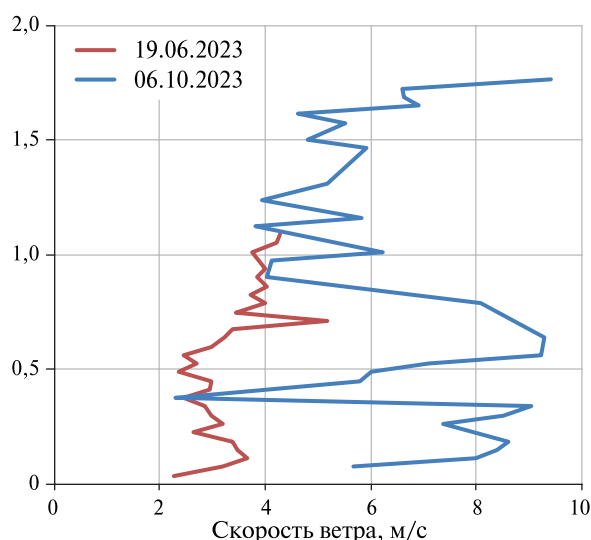
В осенний период содержание аэрозольных частиц между Санкт-Петербургом и пос. Воейково различается незначительно, с преобладанием аэрозолей над мегаполисом, что связано с направлением воздушных масс (см. *рис. 4*). Содержание аэрозольных частиц в Санкт-Петербурге при прохождении воздушной массы вдоль берега Финского зал. практически равно содержанию аэрозольных частиц в Воейково в осенний и летний сезоны, что подтверждает предположение, что основной вклад в загрязнение атмосферы аэрозольными частицами над Санкт-Петербургом вносят источники, располагающиеся в Санкт-Петербурге и поблизости от города. Результаты измерений, выполненных в пос. Воейково, хорошо соотносятся с результатами измерений, проведённых в Санкт-Петербурге и Ленинградской обл. в 2020 г. (Самуленков, Сапунов, 2023).

### Обсуждение результатов

Синхронные измерения с применением стационарного и мобильного лидарных комплексов позволили оценить вертикальное распределение аэрозолей в дневное время суток в мегаполисе и на некотором удалении от него. Осенью воздушная масса, детектируемая над Васильевским островом, прошла вдоль северного берега Финского зал. Над Воейково воздушная масса прошла над северными территориями Ленинградской обл., минуя город, что объясняет меньшую разницу в концентрации частиц между пунктами наблюдений осенью. Летом, когда воздушная масса, анализируемая над Воейково, прошла через территории, прилегающие к Ладожскому озеру, а над Васильевским островом — над северо-восточной частью города и его окрестностями, разница в концентрации аэрозольных частиц была более ярко выраженной.

Также стоит отметить, что содержание аэрозольных частиц в атмосфере в значительной степени зависит от метеорологических условий. Скорость ветра напрямую влияет на степень рассеивания примесей и процессы перемешивания в атмосфере. При достаточной силе ветра происходит уменьшение численной концентрации аэрозолей в атмосфере. В осенний сезон скорость ветра была в 2–3 раза выше (*рис. 5*, см. с. 330), чем в летний, что также оказало влияние на процессы накопления и рассеивания аэрозолей в атмосфере.

В осенний период разница в загрязнении атмосферы в Санкт-Петербурге и пос. Воейково аэрозольными частицами незначительна, в отличие от летнего периода. При этом содержание аэрозолей осенью в Санкт-Петербурге при прохождении воздушной массы вдоль берега Финского зал. практически равно содержанию аэрозольных частиц в пос. Воейково летом и осенью. С учётом траектории движения воздушных масс это показывает, что основной вклад в загрязнение атмосферы аэрозольными частицами над Санкт-Петербургом идёт от источников, располагающихся в Санкт-Петербурге или вблизи города.



Оптические и микрофизические данные, полученные для Санкт-Петербурга и пригорода пос. Воейково с относительно чистой атмосферой, согласуются с аналогичными экспериментами, проводимыми с использованием спектрофотометров сети AERONET и данных спутникового радиометра VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), где оценивается содержание аэрозолей на территориях мегаполисов и вблизи них (Жданова, Чубарова, 2018; Chubarova et al., 2011; Taneja et al., 2017).

*Рис. 5.* Вертикальные профили скорости ветра, полученные с помощью лидара 19 июня и 6 октября

Большее содержание аэрозолей над Санкт-Петербургом по сравнению с пос. Воейково уменьшает количество прямой солнечной радиации и увеличивает долю рассеянной радиации. При относительно небольшом расстоянии между площадками наблюдений имеется пространственная неоднородность в поступлении солнечной радиации над мегаполисом и в Ленинградской обл. Полученные результаты также подтверждаются исследованием (Самуленков, Сапунов, 2023). Изменения и вариации содержания аэрозолей и, следовательно, поступления УФ-радиации в значительной степени зависят от метеорологической обстановки.

На снижение уровня содержания аэрозолей осенью по сравнению с летним сезоном влияет выдувание и вымывание большей части накопленных за зиму аэрозольных частиц. Один из основных процессов, ведущих к очищению атмосферы от загрязнений, — осадки.

## Выводы

Оптическая толщина в слое от 0,35 до 2 км в среднем по двум измерениям (летом и осенью) составила в Воейково 0,099 и 0,049 при длинах волн 355 и 532 нм соответственно, в Санкт-Петербурге — 0,157 и 0,054. Среднее значение параметра ангстрема в Воейково — 1,72, в Санкт-Петербурге — 2,62. В то время как в Воейково наблюдалась смесь мелко- и крупнодисперсного аэрозоля, в Санкт-Петербурге преобладал мелкодисперсный аэрозоль.

В летний период содержание аэрозольных частиц в столбе воздуха от 350 до 2000 м в Воейково составило  $1,44 \cdot 10^{12}$  1/м<sup>2</sup>, в Санкт-Петербурге —  $3,47 \cdot 10^{12}$  1/м<sup>2</sup>; в осенний период в Воейково —  $2,03 \cdot 10^{12}$  1/м<sup>2</sup>, в Санкт-Петербурге —  $2,22 \cdot 10^{12}$  1/м<sup>2</sup>. На станции Воейково, расположенной вне городской зоны, во все дни наблюдений фиксировалось меньшее содержание аэрозольных частиц. Разница в концентрации летом была более ярко выражена, чем осенью. Это можно объяснить тем, что перемещаемая над пунктами наблюдения воздушная масса имела разные пути.

Работа выполнена с использованием оборудования Ресурсного центра «Обсерватория экологической безопасности» Научного парка СПбГУ при поддержке СПбГУ, ID проекта: 93882802 (ЕГИСУ — 123042000071-8).

## Литература

1. *Балин Ю. С., Коханенко Г. П., Клемашева М. Г. и др.* «ЛОЗА-С» — базовый лидар российского сегмента лидарных станций сети СНГ (CIS LiNet) // *Оптика атмосферы и океана*. 2017. Т. 30. № 12. С. 1065–1068. DOI: 10.15372/AOO20171210.
2. *Веселовский И. А.* Дистанционная лазерная диагностика аэрозольных и газовых составляющих атмосферы методами романовского и упругого рассеяния: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2005. 39 с.
3. *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.
4. *Гинзбург А. С., Губанова Д. П., Минашки В. М.* Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // *Российский хим. журн.* 2008. Т. 52. № 5. С. 112–119.
5. *Жданова Е. Ю., Чубарова Н. Е.* Пространственная изменчивость аэрозольной оптической толщины на территории Московского региона по спутниковым и наземным данным // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 7. С. 236–248. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-236-248.
6. *Зуев В. Е., Макиенко Э. В., Наац И. Э.* Определение оптических свойств стратосферных аэрозолей наземными лидарами // *Докл. Акад. наук*. 1982. Т. 265. № 5. С. 1105–1107.
7. *Ивлев Л. С.* Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1982. 366 с.
8. *Ивлев Л. С.* Аэрозольное воздействие на климатические процессы // *Оптика атмосферы и океана*. 2011. Т. 24. № 5. С. 392–410.
9. *Ивлев Л. С.* Аэрозоли и глобальные изменения климата // *Общество. Среда. Развитие*. 2012. № 4. С. 238–244.

10. Розенберг Г. В. Оптические исследования атмосферного аэрозоля // Успехи физ. наук. 1968. Т. 95. № 1. С. 159–208.
11. Романовская А. Ю., Савин И. Ю. Аэрозольная пыль почвенного происхождения в атмосфере: источники, количества, свойства (обзор) // Бюл. Почвенного ин-та имени В. В. Докучаева. 2021. Вып. 109. С. 36–95. DOI: 10.19047/0136-1694-2021-109-36-95.
12. Салтыкова М. М., Бобровницкий И. П., Федичкина Т. П., Балакаева А. В., Яковлев М. Ю. Влияние загрязнения атмосферного воздуха на структуру смертности населения // Международ. журн. прикладн. и фундам. исслед. 2019. № 6. С. 96–100.
13. 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
14. Шабельник Е. С. Исследование влияния воздушного аэрозоля на состояние и внешний облик зданий и сооружений // Перспективные технологии в строительстве и техносферной безопасности: сб. науч. тр. Шахты: ИСОиП ДГТУ, 2020. С. 94–101.
15. Bari Md.A., Kindzierski W.B. Characterization of air quality and fine particulate matter sources in the town of Hinton, Alberta // Atmospheric Pollution Research. 2018. V. 9. Iss. 1. P. 84–94. DOI: 10.1016/j.apr.2017.07.003.
16. Chubarova N. Y., Sviridenkov M. A., Smirnov A., Holben B. N. Assessments of urban aerosol pollution in Moscow and its radiative effects // Atmospheric Measurement Techniques. 2011. V. 4. No. 2. P. 367–378. DOI: 10.5194/amt-4-367-2011.
17. Filonchik M., Peterson M. P., Zhang L., Yan H. An analysis of air pollution associated with the 2023 sand and dust storms over China: Aerosol properties and PM10 variability // Geoscience Frontiers. 2024. V. 15. Iss. 2. Article 101762. DOI: 10.1016/j.gsf.2023.101762.
18. Friedlingstein P., Cox P., Betts R. et al. Climate-carbon cycle feedback analysis: Results from the C4MIP Model Intercomparison // J. Climate. 2006. V. 19. Iss. 14. P. 3337–3353. DOI: 10.1175/jcli3800.1
19. Hoff R. M., McCann K. J., Demoz B., Reichard J., Whiteman D. N., McGee T., McCormick M. P., Philbrick C. R., Strawbridge K., Moshary F., Gross B., Ahmed S., Venable D., Joseph E. Regional East Atmospheric Lidar Mesonet: REALM / ILRC, European Space Agency. 2002. P. 1–4.
20. Klett J. D. Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios // Applied Optics. 1985. V. 24. P. 1638–1643.
21. Kondratyev K. Ya., Ivlev L. S., Krapivin V. F., Varotsos C. A. Atmospheric Aerosol Properties, Formation, Processes and Impacts. Chichester, UK: Springer Publ. Praxis, 2005. 572 p.
22. Lee H. H., Choi N. R., Lim H. B. et al. Characteristics of oxygenated PAHs in PM10 at Seoul, Korea // Atmospheric Pollution Research. 2018. V. 9. Iss. 1. P. 112–118. DOI: 10.1016/j.apr.2017.07.007.
23. Li J., Wang Z., Huang H. et al. Assessing the effects of trans-boundary aerosol transport between various city clusters on regional haze episodes in spring over East China // Tellus B. 2013. V. 65. Iss. 1. Article 20052. DOI: 10.3402/tellusb.v65i0.20052.
24. Lisetskii F., Borovlev A. Monitoring of Emission of Particulate Matters and Air Pollution using Lidar, Belgorod, Russia // Aerosol and Air Quality Research. 2019. V. 19. P. 504–515. DOI: 10.4209/aaqr.2017.12.0593.
25. Liu B., Ma Y., Gong W. et al. Study of continuous air pollution in winter over Wuhan based on ground-based and satellite observations // Atmospheric Pollution Research. 2018. V. 9. Iss. 1. P. 156–165. DOI: 10.1016/j.apr.2017.08.004.
26. Liu X. G., Li J., Qu Y. et al. Formation and evolution mechanism of regional haze: a case study in the megacity Beijing, China // Atmospheric Chemistry and Physics. 2013. V. 13. Iss. 9. P. 4501–4514. DOI: 10.5194/acp-13-4501-2013.
27. Ma J., Chen Y., Wang W. et al. Strong air pollution causes widespread hazeclouds over China // J. Geophysical Research. 2010. V. 115. Iss. D18. Article 204. DOI: 10.1029/2009JD013065.
28. Nisbet I. C., LaGoy P. K. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) // Regulatory Toxicology and Pharmacology. 1992. V. 16. Iss. 3. P. 290–300. DOI: 10.1016/0273-2300(92)90009-x.
29. Nishizawa T., Sugimoto N., Matsui I. et al. The Asian Dust and Aerosol Lidar Observation Network (AD-NET): Strategy and Progress // EPJ Web Conf. 2016. V. 119. Article 19001. DOI: 10.1051/epjconf/201611919001.
30. Schmid P. E., Niyogi D. Modeling urban precipitation modification by spatially heterogeneous aerosols // J. Applied Meteorology and Climatology. 2017. V. 56. Iss. 8. P. 2141–2153. DOI: 10.1175/JAMC-D-16-0320.1.
31. Song C., He J., Wu L. et al. Health burden attributable to ambient PM2.5 in China // Environmental Pollution. 2017. V. 223. P. 575–586. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.01.060.
32. Sun Y., Zhuang G., Tang A. et al. Chemical characteristics of PM2.5 and PM10 in haze-fog episodes in Beijing // Environmental Science and Technology. 2006. V. 40. Iss. 10. P. 3148–3155. DOI: 10.1021/es051533g



33. Taneja K., Attri S. D., Ahmad Sh. et al. Comparative assessment of aerosol optical properties over a mega city and an adjacent urban area in India // *Mausam*. 2017. V. 68. P. 673–688. DOI: 10.54302/mausam.v68i4.767.
34. Wang J., Zhao B., Wang S. et al. Particulate matter pollution over China and the effects of control policies // *Science of the Total Environment*. 2017. V. 584–585. P. 426–447. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.027.
35. Wang Y., Zhuang G., Sun Y., An Zh. The variation of characteristics and formation mechanisms of aerosols in dust, haze, and clear days in Beijing // *Atmospheric Environment*. 2006. V. 40. Iss. 34. P. 6579–6591. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.05.066.
36. Welton E., Stewart S., Lewis J. et al. Status of the NASA Micro Pulse Lidar Network (MPLNET): overview of the network and future plans, new version 3 data products, and the polarized MPL // *EPJ Web Conf*. 2018. V. 176. Article 09003. DOI: 10.1051/epjconf/201817609003.
37. Yabuki M., Kuze H., Lagrosas N. et al. Determination of Vertical Distributions of Aerosol Optical Parameters by Use of Multi-Wavelength Lidar Data // *Japanese J. Applied Physics*. 2003. V. 42. Pt. 1. No. 2A. Article 296. DOI: 10.1109/CLEOPR.2003.1274753.
38. Yang X., Cheng S., Li J. et al. Characterization of chemical composition in PM<sub>2.5</sub> in Beijing before, during, and after a large-scale international event // *Aerosol and Air Quality Research*. 2017. V. 17. Iss. 4. P. 896–907. DOI: 10.4209/aaqr.2016.07.0321.

## Assessment of aerosol pollution in Saint Petersburg and Voeykovo based on the results of synchronous lidar measurements

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 synchronous lidar measurements in the village of Voeykovo, Leningrad Region, and the city of Saint Petersburg conducted to assess the variability of aerosol content within the city and beyond. The measurements were carried out by mobile and stationary lidar complexes of the “Observatory of Environmental Safety” Resource Center of the Science Park of Saint Petersburg State University. The measurements were taken once in the summer and autumn seasons of 2023 during daytime and captured the moment the weather balloon was launched, which made it possible to control the wind direction using two methods: lidar technology and a radiosonde. A significant excess in the content of aerosol particles in Saint Petersburg compared to Voeykovo is observed in the summer season when the content of particles in the air column is almost 2.5 times higher over Saint Petersburg. In autumn, the differences are insignificant, which is due to the direction of movement of air masses and their speed. Analysis of the data obtained — aerosol concentrations and wind directions — allows us to conclude that the main contribution to atmospheric pollution by aerosol particles is due to sources located in Saint Petersburg and near the city.

**Keywords:** aerosol, lidar, wind speed, atmosphere, pollution

Accepted: 26.03.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-325-335

## References

1. Balin Yu. S., Kokhanenko G. P., Klemasheva M. G. et al., “LOSA-S” — a basic lidar of the Russian segment of CIS-LiNet, *Optika atmosfery i okeana*, 2017, Vol. 30, No. 12, pp. 1065–1068 (in Russian), DOI: 10.15372/AOO20171210.
2. 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. (in Russian).

3. Volkova K. A., Poberovsky A. V., Timofeev Yu. M. et al., Aerosol optical characteristics retrieved from measurements of CIMEL sun photometer (AERONET) near Saint Petersburg, *Optika atmosfery i okeana*, 2018, Vol. 31, No. 6, pp. 425–431 (in Russian), DOI: 10.15372/AOO20180601.
4. Ginzburg A. S., Gubanov D. P., Minashki V. M., The influence of natural and anthropogenic aerosols on global and regional climate, *Rossiiskii khimicheskii zhurnal*, 2008, Vol. 52, No. 5, pp. 112–119 (in Russian).
5. Zhdanova E. Yu., Chubarova N. E., Spatial variability of aerosol optical thickness on the territory of Moscow and Moscow Region by satellite and ground based data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018. Vol. 15, No. 7, pp. 236–248 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-236-248.
6. Zuev V. E., Makienko E. V., Naats I. E., Determination of optical properties of stratospheric aerosols using ground-based lidars, *Doklady Akademii nauk*, 1982, Vol. 265, No. 5, pp. 1105–1107 (in Russian).
7. Ivlev L. S., *Khimicheskii sostav i struktura atmosferynykh aerorozolei* (Chemical composition and structure of atmospheric aerosols), Leningrad: Izd. Leningradskogo universiteta, 1982, 366 p. (in Russian).
8. Ivlev L. S., Aerosol forcing in climate processes, *Optika atmosfery i okeana*, 2011, Vol. 24, No. 5, pp. 392–410 (in Russian).
9. Ivlev L. S., Aerosols and global climate change, *Obshchestvo. Sreda. Razvitie*, 2012, No. 4, pp. 238–244 (in Russian).
10. Rozenberg G. V., Optical studies of atmospheric aerosol, *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1968, Vol. 95, No. 1, pp. 159–208 (in Russian).
11. Romanovskaya A. Yu., Savin I. Yu., Soil dust aerosol in the atmosphere: sources, quantities, properties (overview), *Byulleten' Pochvennogo instituta imeni V. V. Dokuchaeva*, 2021, Issue 109, pp. 36–95 (in Russian), DOI: 10.19047/0136-1694-2021-109-36-95.
12. Saltykova M. M., Bobrovniksky I. P., Fedichkina T. P., Balakaeva A. V., Yakovlev M. Yu., Impact of ambient air pollution on the mortality structure, *Intern. J. Applied and Fundamental Research*, 2019, No. 6, pp. 96–100 (in Russian).
13. Samulenkov D. A., Sapunov M. V., Results of lidar monitoring in the Vyborgsky district of the Leningrad region and St. Petersburg, *Hydrometeorology and Ecology*, 2023, No. 73, pp. 653–665 (in Russian), DOI: 10.33933/2713-3001-2023-73-653-665.
14. Shabelnik E. S., Study of the effect of air aerosol on the condition and appearance of buildings and structures, *Perspektivnye tekhnologii v stroitel'stve i tekhnosfernoi bezopasnosti: Proc.*, Shakhty: ISOiP DGTU, 2020, pp. 94–101 (in Russian).
15. Bari Md. A., Kindziarski W. B., Characterization of air quality and fine particulate matter sources in the town of Hinton, Alberta, *Atmospheric Pollution Research*, 2018, Vol. 9, Issue 1, pp. 84–94, DOI: 10.1016/j.apr.2017.07.003.
16. Chubarova N. Y., Sviridenkov M. A., Smirnov A., Holben B. N., Assessments of urban aerosol pollution in Moscow and its radiative effects, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, Vol. 4, No. 2, pp. 367–378, DOI: 10.5194/amt-4-367-2011.
17. Filonchik M., Peterson M. P., Zhang L., Yan H., An analysis of air pollution associated with the 2023 sand and dust storms over China: Aerosol properties and PM10 variability, *Geoscience Frontiers*, 2024, Vol. 15, Issue 2, Article 101762, DOI: 10.1016/j.gsf.2023.101762.
18. Friedlingstein P., Cox P., Betts R. et al., Climate-carbon cycle feedback analysis: Results from the C4MIP Model Intercomparison, *J. Climate*, 2006, Vol. 19, Issue 14, pp. 3337–3353, DOI: 10.1175/jcli3800.1.
19. Hoff R. M., McCann K. J., Demoz B., Reichard J., Whiteman D. N., McGee T., McCormick M. P., Philbrick C. R., Strawbridge K., Moshary F., Gross B., Ahmed S., Venable D., Joseph E., *Regional East Atmospheric Lidar Mesonet: REALM*, ILRC, European Space Agency, 2002, pp. 1–4.
20. Klett J. D., Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios, *Applied Optics*, 1985, Vol. 24, pp. 1638–1643.
21. Kondratyev K. Ya., Ivlev L. S., Krapivin V. F., Varotsos C. A., *Atmospheric Aerosol Properties, Formation, Processes and Impacts*, Chichester, UK: Springer Publ. Praxis, 2005, 572 p.
22. Lee H. H., Choi N. R., Lim H. B. et al., Characteristics of oxygenated PAHs in PM10 at Seoul, Korea, *Atmospheric Pollution Research*, 2018, Vol. 9, Issue 1, pp. 112–118, DOI: 10.1016/j.apr.2017.07.007.
23. Li J., Wang Z., Huang H. et al., Assessing the effects of trans-boundary aerosol transport between various city clusters on regional haze episodes in spring over East China, *Tellus B*, 2013, Vol. 65, Issue 1, Article 20052, DOI: 10.3402/tellusb.v65i0.20052.
24. Lisetskii F., Borovlev A., Monitoring of Emission of Particulate Matters and Air Pollution using Lidar, Belgorod, Russia, *Aerosol and Air Quality Research*, 2019, Vol. 19, pp. 504–515, DOI: 10.4209/aaqr.2017.12.0593.
25. Liu B., Ma Y., Gong W. et al., Study of continuous air pollution in winter over Wuhan based on ground-based and satellite observations, *Atmospheric Pollution Research*, 2018, Vol. 9, Issue 1, pp. 156–165, DOI: 10.1016/j.apr.2017.08.004.

26. Liu X.G., Li J., Qu Y. et al., Formation and evolution mechanism of regional haze: a case study in the megacity Beijing, China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, Vol. 13, Issue 9, pp. 4501–4514, DOI: 10.5194/acp-13-4501-2013.
27. Ma J., Chen Y., Wang W. et al., Strong air pollution causes widespread hazeclouds over China, *J. Geophysical Research*, 2010, Vol. 115, Issue D18, Article 204, DOI: 10.1029/2009JD013065.
28. Nisbet I.C., LaGoy P.K., Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 1992, Vol. 16, Issue 3, pp. 290–300, DOI: 10.1016/0273-2300(92)90009-x.
29. Nishizawa T., Sugimoto N., Matsui I. et al., The Asian Dust and Aerosol Lidar Observation Network (AD-NET): Strategy and Progress, *EPJ Web Conf.*, 2016, Vol. 119, Article 19001, DOI: 10.1051/epjconf/201611919001.
30. Schmid P.E., Niyogi D., Modeling urban precipitation modification by spatially heterogeneous aerosols, *J. Applied Meteorology and Climatology*, 2017, Vol. 56, Issue 8, pp. 2141–2153, DOI: 10.1175/JAMC-D-16-0320.1.
31. Song C., He J., Wu L. et al., Health burden attributable to ambient PM<sub>2.5</sub> in China, *Environmental Pollution*, 2017, Vol. 223, pp. 575–586, DOI: 10.1016/j.envpol.2017.01.060.
32. Sun Y., Zhuang G., Tang A. et al., Chemical characteristics of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in haze-fog episodes in Beijing, *Environmental Science and Technology*, 2006, Vol. 40, Issue 10, pp. 3148–3155, DOI:10.1021/es051533g.
33. Taneja K., Attri S.D., Ahmad Sh. et al., Comparative assessment of aerosol optical properties over a mega city and an adjacent urban area in India, *Mausam*, 2017, Vol. 68, pp. 673–688, DOI: 10.54302/mausam.v68i4.767.
34. Wang J., Zhao B., Wang S. et al., Particulate matter pollution over China and the effects of control policies, *Science of the Total Environment*, 2017, Vol. 584–585, pp. 426–447, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.027.
35. Wang Y., Zhuang G., Sun Y., An Zh., The variation of characteristics and formation mechanisms of aerosols in dust, haze, and clear days in Beijing, *Atmospheric Environment*, 2006, Vol. 40, Issue 34, pp. 6579–6591, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.05.066.
36. Welton E., Stewart S., Lewis J. et al., Status of the NASA Micro Pulse Lidar Network (MPLNET): overview of the network and future plans, new version 3 data products, and the polarized MPL, *EPJ Web Conf.*, 2018, Vol. 176, Article 09003, DOI: 10.1051/epjconf/201817609003.
37. Yabuki M., Kuze H., Lagrosas N. et al., Determination of Vertical Distributions of Aerosol Optical Parameters by Use of Multi-Wavelength Lidar Data, *Japanese J. Applied Physics*, 2003, Vol. 42, Pt. 1, No. 2A, Article 296, DOI: 10.1109/CLEOPR.2003.1274753.
38. Yang X., Cheng S., Li J. et al., Characterization of chemical composition in PM<sub>2.5</sub> in Beijing before, during, and after a large-scale international event, *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, Vol. 17, Issue 4, pp. 896–907, DOI: 10.4209/aaqr.2016.07.0321.