

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ  
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.510.41

## Сезонная и суточная изменчивость концентраций аэрозольных частиц вблизи Санкт-Петербурга

К.А. Волкова, С.С. Аникин, Е.Ф. Михайлов, Д.В. Ионов,  
С.С. Власенко, Т.И. Рышкевич\*

Санкт-Петербургский государственный университет  
198504, г. Санкт-Петербург, Петергоф, ул. Ульяновская, 1

Поступила в редакцию 4.02.2020 г.

Проведен анализ данных измерений массовых концентраций PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub> и PM<sub>10</sub> с помощью аэрозольного спектрометра GRIMM вблизи Санкт-Петербурга за 2016–2018 гг. Средние значения PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub> и PM<sub>10</sub> за весь период измерений составляют 4,5; 4,8 и 4,9 мкг/м<sup>3</sup> соответственно. Выполнено сравнение среднечасовых измерений концентраций PM<sub>10</sub> со значениями аэрозольной оптической толщи (АОТ) на длине волны 500 нм для разных сезонов. Выявлено, что наилучшая корреляция между концентрацией PM<sub>10</sub> и АОТ достигается осенью. Согласно распределению по направлениям ветра максимальные концентрации PM<sub>10</sub> соответствуют восточному направлению (со стороны Санкт-Петербурга). Проанализирована сезонная зависимость суточного хода массовой концентрации PM<sub>10</sub> от относительной влажности и высоты пограничного слоя атмосферы. Наиболее высокие концентрации PM<sub>10</sub> (в среднем около 8 мкг/м<sup>3</sup>) и максимальная амплитуда суточного хода наблюдаются в зимнее время.

*Ключевые слова:* массовая концентрация PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, аэрозольная оптическая толщина, аэрозольный спектрометр, GRIMM, AERONET; PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and PM<sub>10</sub> mass concentration, aerosol optical depth, aerosol spectrometer, GRIMM, AERONET.

### Введение

Долгопериодные изменения атмосферы влияют на окружающую среду, условия жизни человека и его социально-экономическую деятельность. Помимо естественных флуктуаций климатической системы существуют изменения, обусловленные антропогенным воздействием и приводящие к значимым последствиям, в том числе неблагоприятным и даже опасным для человеческой жизнедеятельности и состояния окружающей среды. Важную роль во многих атмосферных процессах играет аэрозоль [1–4]. Он оказывает прямое и косвенное влияние на приходящее солнечное и уходящее длинноволновое излучение, участвуя в процессах поглощения и рассеяния радиации, с одной стороны, и в облакообразовании – с другой [5–7].

Аэрозоли очень разнообразны по микроструктуре, оптическим свойствам и химическому составу, они могут давать как положительный, так и отрицательный вклад в глобальный радиационный форсинг [8]. Мелкодисперсные взвешенные частицы негативно воздействуют на здоровье человека, чему

посвящено большое количество медицинских исследований. Так, была доказана способность аэрозольных частиц проникать в ткани респираторной системы, а в случае наночастиц (диаметр < 0,1 мкм) – даже в кровотоки (например, [9–11]). Поэтому мониторингу оптических и микрофизических характеристик аэрозоля в последнее время уделяется особое внимание, а возможность их долгосрочного прогноза является важной составляющей минимизации вреда здоровью от экологических угроз.

В настоящее время атмосферный аэрозоль изучается с помощью различных наземных, самолетных и спутниковых методов и приборов. Благодаря предшествующим исследованиям собран большой объем данных об изменчивости аэрозоля как приземного, так и в толще атмосферы [12–21].

С 2001 г. на территории Санкт-Петербурга ведется непрерывный мониторинг качества воздуха. Он осуществляется средствами автоматизированной сети ФГУП «Минерал», состоящей из 24 стационарных станций, 2 метеорологических станций и 3 передвижных лабораторий, где в режиме реального времени регистрируются концентрации основных загрязняющих веществ в атмосферном воздухе [22, 23].

Наибольший вклад в загрязнение атмосферного воздуха Санкт-Петербурга вносят промышленные предприятия и автомобильный транспорт. Но состояние воздушного бассейна зависит также от метеорологических условий, влияющих на перенос,

\* Кристина Андреевна Волкова (volkova\_ka@list.ru); Сергей Сергеевич Аникин (iguanodon-13@mail.ru); Евгений Федорович Михайлов (eugene.mikhailov@spbu.ru); Дмитрий Викторович Ионов (d.ionov@spbu.ru); Сергей Сергеевич Власенко (s.vlasenko@spbu.ru); Татьяна Ивановна Рышкевич (tatyana.ryshkevich@spbu.ru).

рассеивание и трансформацию загрязняющих веществ. Согласно докладу Правительства Санкт-Петербурга об экологической ситуации в городе среднегодовые значения приземных концентраций основных загрязняющих веществ (диоксид азота, аммиак, озон, взвешенные вещества, формальдегид) снизились с 2001 по 2018 г. В частности, среднегодовые концентрации взвешенных частиц диаметром < 10 мкм (PM10) в целом по Санкт-Петербургу уменьшились с 66 до 12 мкг/м<sup>3</sup>. Напомним, что предельно допустимая среднесуточная концентрация (ПДК) PM10 = 60 мкг/м<sup>3</sup> [23].

С 2013 г. в СПбГУ выполняются измерения аэрозольной оптической толщи (АОТ) в Петергофе с использованием фотометра CIMEL CE-318 в рамках международной сети AERONET (AErosol RObotic NETwork). Сеть насчитывает более 600 станций по всему миру, что делает ее самой глобальной программой аэрозольного мониторинга [18]. Согласно исследованиям сезонного хода АОТ в Петергофе наблюдается ее рост в теплое время года, что связано с увеличением конвективного перемешивания и вкладом вторичного аэрозоля антропогенного происхождения [24].

С 2013 г. в Петергофе также ведется мониторинг содержания органического (ОС) и элементарного углерода (ЕС) с помощью термооптического анализатора (Thermal/Optical-Transmittance Carbon Aerosol Analyzer, Sunset Laboratory Inc., USA) [25]. Анализ данных измерений показал, что большую часть времени условия наблюдений в Петергофе соответствуют загрязненной атмосфере ввиду близости станции измерений к мегаполису Санкт-Петербурга. В соотношении между фракциями ОС и ЕС наблюдается ярко выраженная сезонная изменчивость, связанная с существованием различных типов источников (техногенных и биогенных). В среднем доля ЕС максимальна зимой, что, по-видимому, обусловлено более интенсивным сжиганием различных видов ископаемого топлива в отопительный сезон [26].

С 2016 г. на петергофской станции с помощью спектрометра GRIMM Data Logger 1142.M5 начали выполняться измерения массовых концентраций аэрозольных частиц диаметром 0,25–1 (PM1), 0,25–2,5 (PM2.5) и 0,25–10 мкм (PM10).

Частицы PM10 являются очень важным показателем качества воздуха. Их первичными источниками могут служить как частицы пыли, сажи, асфальта, автомобильных покрышек, минеральных солей и тяжелых металлов, так и биоаэрозоли (споры, бактерии, вирусы). В условиях загрязненного воздушного бассейна существенно возрастает роль вторичных аэрозолей, образующихся в атмосфере в результате химических преобразований основных газообразных загрязнителей (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, неметановых летучих органических соединений).

Цель настоящей работы — анализ типичных микрофизических характеристик аэрозоля в регионе, а также оценка масштабов их вариаций и выявление закономерностей наблюдаемой временной изменчивости на основе накопленного за 2016–2018 гг. массива данных измерений вблизи Санкт-Петербурга.

Исследование временного хода массовых концентраций приземного аэрозоля в Петергофе было дополнено измерениями АОТ там же. Для имеющихся ансамблей одновременных данных были изучены взаимные корреляции, ранее выявлявшиеся в аналогичных работах [19–21].

Для интерпретации наблюдаемой изменчивости аэрозоля были также проанализированы вариации различных метеорологических параметров (температуры, давления, направления и скорости ветра и т.д.) в окрестности пункта измерений (Петергоф).

## Методика измерений

Измерения массовых концентраций приземного аэрозоля были выполнены на станции мониторинга атмосферы (59°53' с.ш., 29°49' в.д.), находящейся в г. Петергофе с численностью населения около 80 тыс. чел. Город располагается на юго-западной границе Санкт-Петербурга, население которого более 5 млн чел. При соответствующих направлениях ветра (северо-восток) происходит вынос загрязненных воздушных масс со стороны мегаполиса, что приводит к чередованию городских и фоновых условий [16].

Пробоотборник анализатора воздуха находится на мачте высотой 15 м над землей (или 35 м н.у.м.). По трубке из нержавеющей стали (внутренний диаметр 20 мм) воздух поступает в аэрозольный спектрометр GRIMM Data Logger 1142.M5. Скорость потока воздуха через прибор составляет 1,2 л/мин. Интервал времени, с которым проводился сбор и анализ проб воздуха, варьировался от 30 с до 30 мин. Спектрометр содержит оптический счетчик частиц Environmental Dust Monitor (EDM) 180, который используется для анализа аэрозольных фракций. В основе его работы лежит рассеяние света на единичной аэрозольной частице, где в качестве источника излучения используется полупроводниковый лазер ( $\lambda = 655$  нм) [17]. Прибор чувствителен к частицам диаметром от 0,25 до 32 мкм, с разделением на 31 размерный канал.

## Результаты

Для всего ансамбля данных измерений массовых концентраций PM1, PM2.5 и PM10 с 2016 по 2018 г. были рассчитаны их медианные суточные значения [21]. Полученный временной ряд приведен на рис. 1.

Несмотря на непрерывный режим измерений, в ряду данных имеются пропуски. Это связано с техническими неисправностями аппаратуры и сбоями в работе управляющего программного обеспечения.

Средние значения PM1, PM2.5 и PM10 за весь период измерений составляют 4,48; 4,75 и 4,94 мкг/м<sup>3</sup>. Малые отличия между значениями PM1, PM2.5 и PM10 говорят о том, что подавляющую массу аэрозолей составляют частицы диаметром < 1 мкм. Связано это, прежде всего, с тем, что скорость оседания мелких частиц мала, и в условиях невозмущенной атмосферы они могут находиться в атмо-

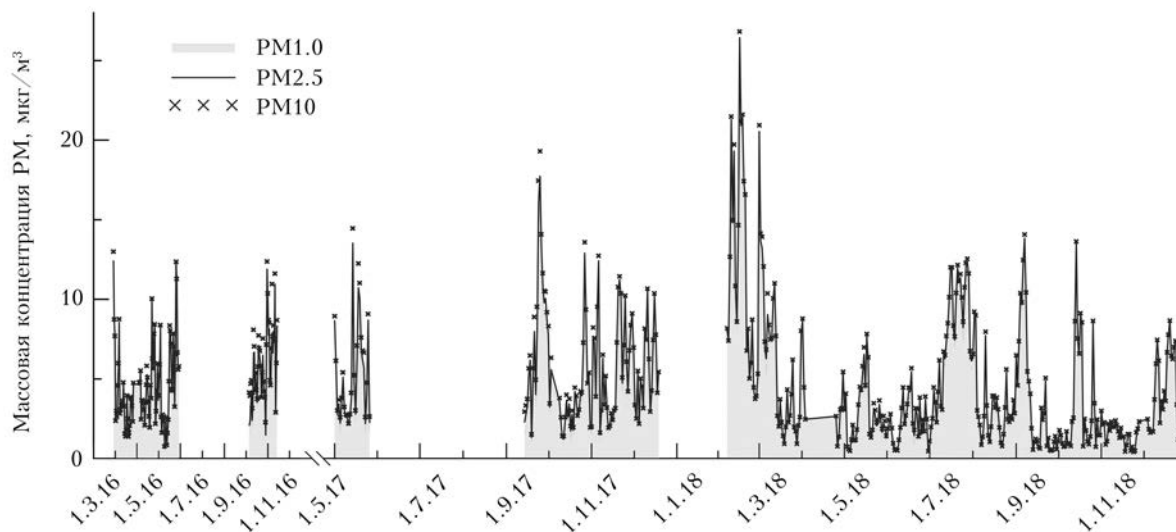


Рис. 1. Временной ход медианных суточных значений PM1, PM2.5 и PM10 на станции мониторинга в Петергофе с 2016 по 2018 г.

сфере до нескольких недель [22]. Из-за этого происходит либо их локальное накопление, либо перемещение с воздушными массами, либо трансформация во вторичные, более крупные частицы. Также малые концентрации крупного аэрозоля могут быть обусловлены тем, что измерительная станция не является городской, большинство источников загрязнений расположены достаточно далеко от нее и крупные частицы оседают раньше чем достигнут пункта наблюдений.

Как видно из рис. 1, наблюдается сильная межсуточная изменчивость массовых концентраций PM, что может указывать на сложное совместное влияние множества локальных источников загрязнений и метеорологических факторов. Неполнота и неравномерность во времени ряда измерений не позволяют достоверно выделить сезонный ход концентраций аэрозольных частиц. Наиболее частые подъемы концентраций PM наблюдались в феврале-марте 2018 г. (максимальная величина PM10 = 26,8 мкг/м<sup>3</sup>).

Измерения подобных характеристик состава атмосферы в рассматриваемой точке проводятся сравнительно недавно, и в качестве независимых источников информации были привлечены данные анализа фильтровых проб на той же станции [27] и результаты измерений сети мониторинга атмосферного воздуха ФГУП «Минерал», публикуемые на экологическом портале Санкт-Петербурга [23]. Ближайшая к Петергофу станция сети расположена в 2 км от пункта наблюдений на окраине г. Ломоносова с населением 43 тыс. чел. В открытом доступе представлены среднесуточные концентрации PM10 с 2017 г. Массовые концентрации PM определялись путем ежедневного отбора воздуха в пункте наблюдений на фильтры и сорбционные трубки с последующим анализом в системе автоматического пробоотбора взвешенных частиц в воздухе Derenda (требования к оборудованию в соответствии с ГОСТ Р 8.606-2004 и ГОСТ Р 50760-95). На стан-

ции в Петергофе смена кварцевых фильтров (диаметром 47 мм марки Tissuquartz™ 2500 QAT) осуществляется раз в 5–7 сут. Таким образом, массовая концентрация PM представлена в виде средней за некоторые периоды.

На рис. 2 приведен ход массовых концентраций по измерениям GRIMM (PM10), пробоотборника (PM) и Derenda (PM10) (ФГУП «Минерал») за 2016–2018 гг.

Следует отметить, что городские станции мониторинга качества атмосферного воздуха ориентированы на контроль превышения предельных уровней концентраций загрязняющих веществ, соответствующих законодательно принятым нормативам. Так, среднесуточная и среднегодовая ПДК PM10 для Санкт-Петербурга составляют 60 и 35 мкг/м<sup>3</sup> соответственно (согласно ГН 2.1.6.2604-10) [24]. Доступные для анализа данные имеют дискретность, равную 0,1 среднесуточной ПДК (или 6 мкг/м<sup>3</sup>). При этом межсуточные колебания концентраций PM10, согласно измерениям GRIMM, в половине случаев не превышают 1,5 мкг/м<sup>3</sup>. Поэтому, несмотря на периодически наблюдаемую качественную корреляцию между измерениями на станциях в Петергофе и Ломоносове при резких подъемах и спадах концентрации PM10, в среднем за год коэффициент корреляции  $R = 0,30$ . Коэффициент корреляции между массовыми концентрациями, полученными из фильтрового отбора, и результатами измерений GRIMM в Петергофе за три года составил 0,40 (наибольший в 2016 г. — 0,51). При этом средние значения PM для оптического прибора GRIMM за рассматриваемый период остались практически неизменными, а анализ фильтровых проб показал положительный тренд в 2018 г. (25%). Данные PM с 2017 по 2018 г. в Ломоносове также демонстрируют существенный рост концентрации. Амплитуда межпериодных колебаний увеличилась в 3 раза. Так, в октябре и декабре 2018 г. в этих данных наблюдались превышения среднесуточной ПДК.

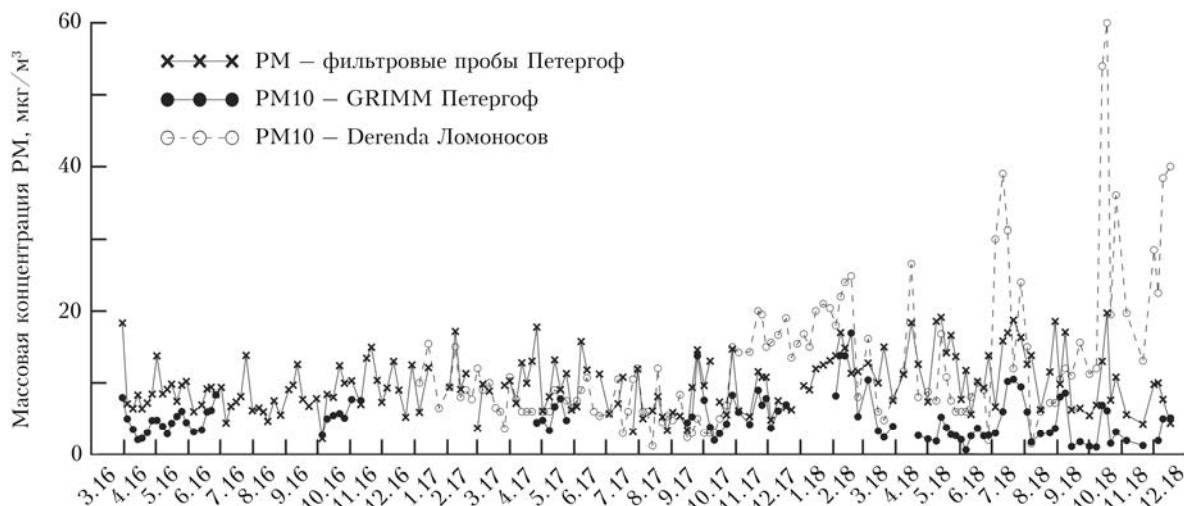


Рис. 2. Массовые концентрации PM по данным фильтровых проб в Петергофе (PM) и измерениям GRIMM (PM10) и Derenda (PM10) с 2016 по 2018 г., усредненным по периодам отбора проб на станции Петергофа

Причины существенно более высоких концентраций PM10, регистрируемых в г. Ломоносове, по сравнению с данными измерений в Петергофе, в настоящее время не ясны и требуют дополнительного исследования. Возможно, эти расхождения обусловлены различиями в высотах забора воздушных проб: 15 м над землей в Петергофе и 2,5 м – в Ломоносове (более крупные частицы оседают быстрее, поэтому более высокие их концентрации регистрируются в нижнем воздушном слое). Кроме того, свой вклад могут вносить и различия в самих методиках измерений искомых концентраций взвешенных частиц, например низкая чувствительность оптического счетчика GRIMM к частицам диаметром менее 0,3 мкм.

Также было проведено сравнение массовых концентраций твердых частиц со значениями АОТ на  $\lambda = 500$  нм, определяемыми по измерениям фотометра CIMEL CE-318 [25, 28–32]. Согласно [25] распределение частиц по размерам в данных петергофской станции бимодально. Максимумы средних значений функции распределения частиц по размерам в толще атмосферы приходятся на частицы радиусом  $\sim 0,15$  и 5 мкм. С учетом чувствительности солнечного фотометра к частицам радиусом от 0,05 до 15 мкм и особенностей распределения частиц по размерам в регионе для сопоставления с содержанием аэрозоля в толще атмосферы были использованы массовые концентрации PM10 [33].

На рис. 3 приведена зависимость АОТ на  $\lambda = 500$  нм от концентраций PM10. Для анализа были использованы данные, усредненные за час. Поскольку измерения солнечным фотометром существенно ограничены погодными условиями, а также ввиду прохождения прибором плановой калибровки с декабря 2016 по март 2017 г., количество измерений в зимний период оказалось недостаточным и эти данные были исключены из статистического анализа.

За рассматриваемый период на  $\lambda = 500$  нм среднее значение АОТ равно 0,11, максимальные величины приходятся на лето. При этом наибольшие средние массовые концентрации PM10 наблюдаются

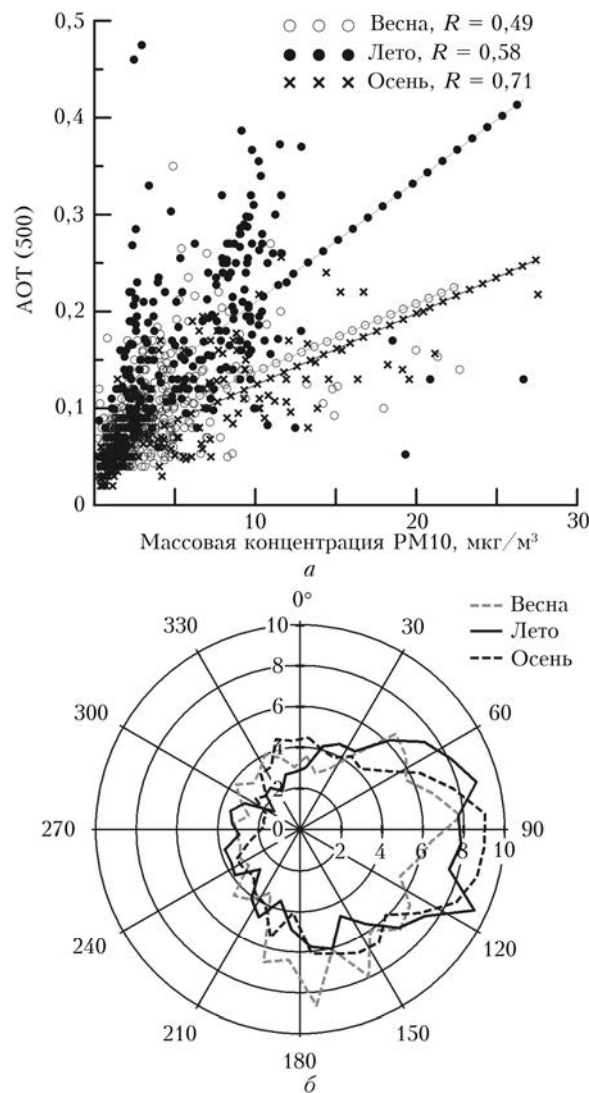


Рис. 3. Корреляция между среднечасовой массовой концентрацией PM10 и АОТ на  $\lambda = 500$  нм в 2016–2018 гг. (а); сезонное распределение средней концентрации PM10 по направлениям ветра согласно данным измерений в Петергофе за 2016–2018 гг. (б)

летом и весной. Чаще всего эти подъемы не синхронны. Коэффициент корреляции между сравниваемыми характеристиками составляет 0,53; осенью он достигает максимума (0,71). В [34] были получены схожие значения коэффициента корреляции между АОТ и концентрацией PM<sub>2.5</sub> для района Тибетского плато. Вероятно, такие относительно малые корреляции обусловлены тем, что наблюдаемые в описанных регионах концентрации взвешенных частиц и их временные вариации были низкими: на станции г. Петергофа средняя концентрация PM<sub>10</sub> равна ~5 мкг/м<sup>3</sup>, а в [34] средняя концентрация PM<sub>2.5</sub> составляет 10 ± 6 мкг/м<sup>3</sup>. Следует также учитывать, что более корректное сопоставление результатов одновременных измерений АОТ и приземных концентраций РМ требует выполнения двух операций:

1) приведение АОТ к нормальной относительной влажности, соответствующей измерениям РМ (<35%), с учетом влияния относительной влажности на гигроскопический рост атмосферных частиц;

2) пересчет измеренной приземной концентрации РМ к содержанию в толще атмосферы с учетом высоты слоя перемешивания (пограничного слоя атмосферы). Такая коррекция сравниваемых между собой данных об АОТ и концентрации РМ выполнялась, например, в [21], но в настоящем исследовании не проводилась.

На рис. 3 также приведено распределение средних концентраций PM<sub>10</sub> по направлению ветра. В качестве метеорологической информации были использованы данные реанализа ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, <http://www.ecmwf.int>) с горизонтальным пространственным разрешением 0,75° широты × 0,75° долготы и шагом по времени 3 ч. Согласно распределению по направлениям ветра максимальные концентрации PM<sub>10</sub> соответствуют восточному направлению. Для воздушных масс, пришедших с востока (со стороны Санкт-Петербурга), характерны повышенные концентрации загрязняющих веществ. Аналогичная зависимость концентраций окислов азота от направления ветра наблюдалась в [35], что свидетельствовало о влиянии городских источников на воздух в пригороде (Петергоф).

На рис. 4 приведен суточный ход массовой концентрации PM<sub>10</sub> по данным наблюдений СПбГУ за период 2016–2018 гг., осредненный для четырех сезонов. На графиках также приведены средние суточные вариации относительной влажности и высоты пограничного слоя атмосферы, заимствованные из данных реанализа ECMWF в районе Санкт-Петербурга. Для единообразия с данными ECMWF все приведенные на рисунке параметры представлены среднечасовыми значениями с интервалом 3 ч. Наиболее высокие концентрации PM<sub>10</sub> наблюдаются

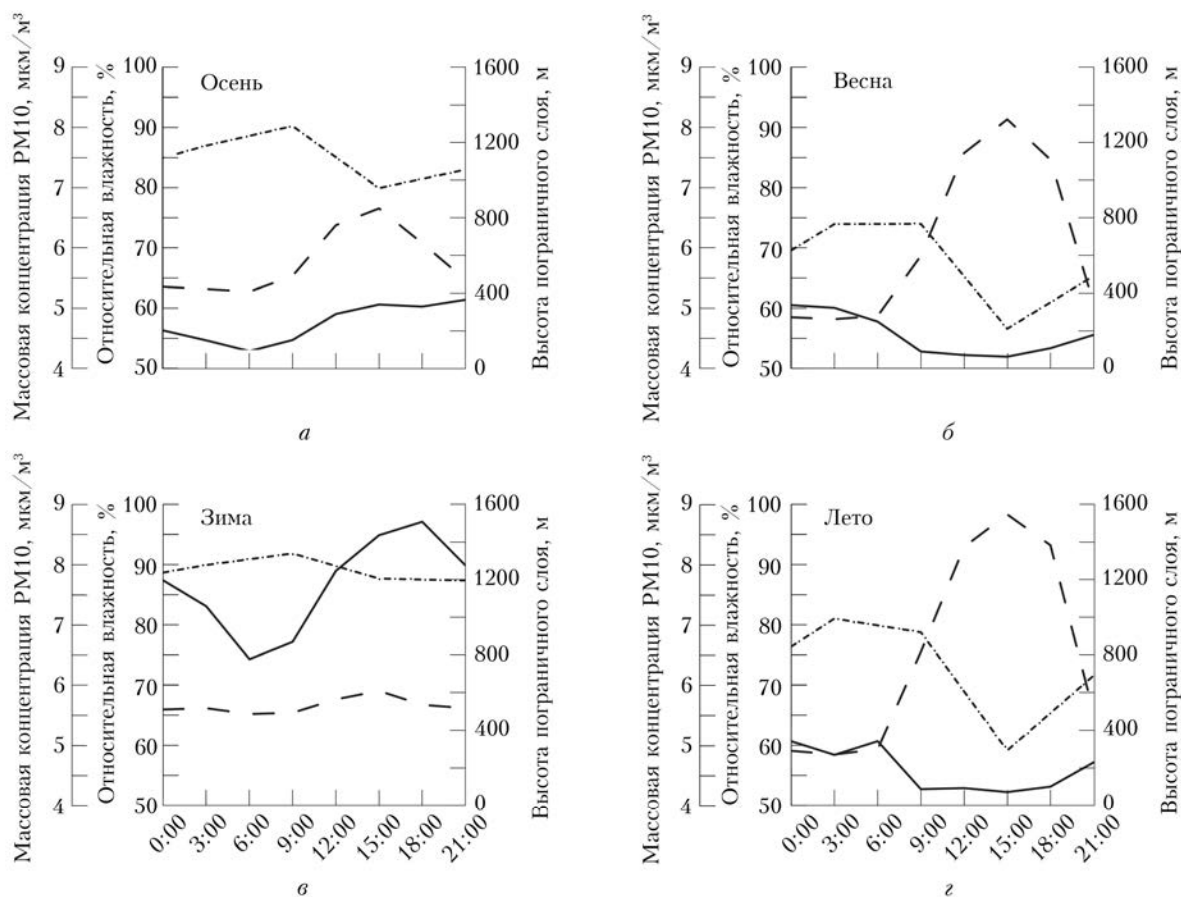


Рис. 4. Суточный ход массовой концентрации PM<sub>10</sub> (сплошные кривые), относительной влажности (штрихпунктирные кривые) и высоты пограничного слоя (штриховые кривые); данные усреднены за период 2016–2018 г.

в зимнее время (в среднем  $\sim 8$  мкг/м<sup>3</sup>), когда высота пограничного слоя минимальна (в среднем  $\sim 500$  м); наименьшие же концентрации PM10 регистрируются весной и летом ( $\sim 4$ – $5$  мкг/м<sup>3</sup>), когда высота пограничного слоя максимальна (до  $\sim 1300$  м весной и до  $\sim 1500$  м летом). Большая высота пограничного слоя свидетельствует об усилении вертикального перемешивания атмосферы, приводящего к ускоренному рассеиванию воздушных примесей. В холодное время года (зимой и осенью) суточный ход концентрации PM10 характеризуется минимальными значениями ранним утром ( $\sim 6$  ч) с последующим ростом в течение всего дня. Утренний минимум обусловлен, по-видимому, заметным ночным сокращением эмиссии взвешенных частиц автомобильным транспортом, которая возрастает с началом светового дня. Еще одним фактором, способствующим очищению атмосферы в ночное время, являются процессы сухого осаждения взвешенных частиц на поверхность. Схожая суточная изменчивость характерна для концентраций PM2.5 в Москве зимой и представлена в [19]. Следует отметить, что для других сезонов вариации значений взвешенных частиц в течение суток в столице намного больше. В теплое время года (весной и летом) в Петергофе рост антропогенной эмиссии пыли компенсируется усилением вертикального конвективного перемешивания атмосферы в дневное время, что проявляется в минимальных концентрациях PM10 во второй половине дня ( $\sim 15$  ч).

Отсутствие конвекции в зимнее время, минимальная высота пограничного слоя и ее малые вариации в течение суток приводят к наибольшей амплитуде суточного хода средней концентрации PM10, обусловленной интенсивным накоплением антропогенных загрязнений в приземном слое атмосферы. Одновременное усиление процессов ночного осаждения гигроскопичных частиц в условиях повышенной относительной влажности (зимой она превышает в ночное время 90%) приводит к более выраженному утреннему минимуму концентрации PM10 в это время года. Летом и весной, когда относительная влажность в Петергофе в целом ниже, чем зимой и осенью, и достигает минимума в дневное время, гигроскопический рост взвешенных частиц приостанавливается, способствуя их большему рассеиванию в верхние слои атмосферы за счет вертикального перемешивания.

В работе с аналогичными исследованиями [36] для ряда европейских столиц, таких как Прага, Берлин, Варшава, также наблюдалось повышение уровня концентраций PM10 зимой до  $40$ – $50$  мкг/м<sup>3</sup>. При этом в Москве для зимнего времени года характерны минимальные значения PM10 ( $17$ – $21$  мкг/м<sup>3</sup>) [36].

## Заключение

Проведен анализ данных измерений массовых концентраций PM1, PM2.5 и PM10 с помощью аэрозольного спектрометра GRIMM вблизи Санкт-Петербурга за 2016–2018 гг. Выявлена сильная межсезонная изменчивость массовых концентраций PM,

при этом подавляющую массу аэрозолей составляют частицы диаметром меньше 1 мкм. Максимальные значения ( $26,8$  мкг/м<sup>3</sup>) наблюдались в феврале-марте 2018 г.

Сравнение среднечасовых измерений массовых концентраций PM10 со значениями АОТ на  $\lambda = 500$  нм, определяемыми по данным фотометра CIMEL CE-318, дало среднюю корреляцию  $0,53$  (максимум, равный  $0,71$ , – осенью). Согласно распределению по направлениям ветра максимальные концентрации PM10 соответствуют воздушным массам, пришедшим с востока (со стороны Санкт-Петербурга), что свидетельствует о преобладающем влиянии городских источников.

Выполнен анализ суточного хода массовой концентрации PM10 для различных сезонов и рассмотрена его зависимость от относительной влажности воздуха и высоты пограничного слоя атмосферы. Наиболее высокие концентрации PM10 (в среднем  $\sim 8$  мкг/м<sup>3</sup>) и максимальная амплитуда суточного хода наблюдаются зимой. Отсутствие конвекции в холодное время года, минимальная высота пограничного слоя и ее малые вариации в течение суток способствуют интенсивному накоплению антропогенных загрязнений в приземном слое атмосферы. Весной и летом, когда высота пограничного слоя максимальна (до  $\sim 1500$  м), а относительная влажность в целом ниже, гигроскопический рост взвешенных частиц приостанавливается, что приводит к их большему рассеиванию в верхние слои атмосферы за счет вертикального перемешивания.

В исследовании использовались данные измерений AERONET; авторы выражают благодарность А.В. Поберовскому за организацию и проведение этих наблюдений в Петергофе. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-17-00076) и ресурсного центра СПбГУ «Геомодель».

1. Anderson T.L., Charlson R.J., Schwartz S.E., Knutti R., Boucher O., Rodhe H., Heintzenberg J. Climate forcing by aerosols – a hazy picture // *Science*. 2003. V. 300, N 5622. P. 1103–1104. DOI: 10.1126/science.1084777.
2. Andreae M.O., Merlet P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning // *Glob. Biogeochem. Cycl.* 2001. V. 15, N 4. P. 955–966.
3. Ginzburg A.S., Gubanova D.P., Minashkin V.M. Influence of natural and anthropogenic aerosols on global and regional climate // *Rus. J. Gen. Chem.* 2009. V. 79, N 9. P. 2062–2070.
4. Кондратьев К.Я. Лесные пожары как компонент природной экодинамики // *Оптика атмосф. и океана*. 2004. Т. 17, № 4. С. 279–292.
5. Carslaw K.S., Lee L.A., Reddington C.L., Pringle K.J., Rap A., Forster P.M., Mann G.W., Spracklen D.V., Woodhouse M.T., Regayre L.A., Pierce J.R. Large contribution of natural aerosols to uncertainty in indirect forcing // *Nature*. 2013. V. 503, N 7. P. 67–71.
6. Hallquist M., Wenger J.C., Baltensperger U., Rudich Y., Simpson D., Claeys M., Dommen J., Donahue N.M., George C., Goldstein A.H., Hamilton J.F., Herrmann H., Hoffmann T., Iinuma Y., Jang M., Jenkin M.E., Jimenez J.L., Kiendler-Scharr A., Maenhaut W., McFig-

- gans G., Mentel Th.F., Monod A., Prévôt A.S.H., Seinfeld J.H., Surratt J.D., Szmigielski R., Wildt J.* The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: Current and emerging issues // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9, N 1. P. 5155–5236.
7. *Stier P., Seinfeld J.H., Kinne S., Boucher O.* Aerosol absorption and radiative forcing // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7, N 19. P. 5237–5261.
  8. *Плахина И.Н., Махоткина Е.Л.* Аэрозольно-радиационный форсинг в атмосфере. Обзор современных данных // *Ученые записки Рос. гос. гидрометеорол. ун-та.* 2008. № 6. С. 20–37.
  9. *Katsouyanni K., Touloumi G., Samoli E., Gryparis A., Le Tertre A., Monopoli Y., Rossi G., Zmirou D., Balaster F., Boumghar A., Anderson H.R., Wojtyniak B., Paldy A., Braunstein R., Pekkanen J., Schindler C., Schwartz J.* Confounding and effect modification in the short-term effects of ambient particles on total mortality: Results from 29 European cities within the APHEA2 project // *Epidemiology.* 2001. V. 12, N 5. P. 521–531.
  10. *Lu F., Xu D., Cheng Y., Dong S., Guo C., Jiang X.* Systematic review and meta-analysis of the adverse health effects of ambient PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> pollution in the Chinese population // *Environ. Res.* 2015. V. 136. P. 196–204.
  11. *Yi O., Hong Y.C., Kim H.* Seasonal effect of PM<sub>10</sub> concentrations on mortality and morbidity in Seoul, Korea: A temperature-matched case crossover analysis // *Environ. Res.* 2010. V. 110. P. 89–95.
  12. *Бартенева О.Д., Никитинская Н.И., Сакунов Г.Г., Веселова Л.К.* Прозрачность толщи атмосферы в видимой и ближней ИК-области спектра. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 224 с.
  13. *Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Турчинович С.А.* Солнечный фотометр для научного мониторинга (аппаратура, методики, алгоритмы) // *Оптика атмосфер. и океана.* 2001. Т. 14, № 12. С. 1162–1169.
  14. *Mikhailov E.F., Mironov G.N., Pöhlker C., Chi X., Krüger M.L., Shiraiwa M., Förster J.-D., Pöschl U., Vlasenko S.S., Ryschkevich T.I., Weigand M., Kilcoyne A.L.D., Andreae M.O.* Chemical composition, microstructure, and hygroscopic properties of aerosol particles at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO), Siberia, during a summer campaign // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. P. 8847–8869. DOI: 10.5194/acp15-8847-2015.
  15. *Chubarova N.Y.* Seasonal distribution of aerosol properties over Europe and their impact on UV irradiance // *Atmos. Meas. Tech.* 2009. V. 2. P. 593–608.
  16. *Поддубный В.А., Сакерин С.М., Лужецкая А.П., Наговицына Е.С., Береснев С.А., Маркелов Ю.И.* Исследования атмосферного аэрозоля на Среднем Урале методами спектральной солнечной фотометрии // *Вестн. УрО РАН.* 2013. Т. 2, № 44. С. 37–53.
  17. *Сакерин С.М., Береснев С.А., Кабанов Д.М., Корниенко Г.И., Николашкин С.В., Поддубный В.А., Тащилин М.А., Турчинович Ю.С., Holben B.N., Smirnov A.* Анализ подходов моделирования годового и спектрального хода аэрозольной оптической толщи атмосферы в регионах Сибири и Приморья // *Оптика атмосфер. и океана.* 2014. Т. 27, № 12. С. 1047–1058; *Sakerin S.M., Beresnev S.A., Kabanov D.M., Kornienko G.I., Nikolashkin S.V., Poddubny V.A., Tashchilin M.A., Turchinovich Yu.S., Holben B.N., Smirnov A.* Analysis of approaches to modeling the annual and spectral behaviors of atmospheric aerosol optical depth in Siberia and Primorye // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 2. P. 145–157.
  18. *Smirnov A., Holben B.N., Lyapustin A., Slutsker I., Eck T.F.* AERONET processing algorithms refinement. AERONET Workshop, May 10–14, El Arenosillo, Spain. 2004. 18 p.
  19. *Губанова Д.П., Беликов И.Б., Еланский Н.Ф., Скоороход А.И., Чубарова Н.Е.* Изменчивость приземной концентрации аэрозолей PM<sub>2.5</sub> в г. Москве по наблюдениям в Метеорологической обсерватории МГУ // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 12. С. 1033–1042; *Gubanova D.P., Belikov I.B., Elansky N.F., Skorokhod A.I., Chubarova N.E.* Variations in PM<sub>2.5</sub> Surface Concentration in Moscow according to Observations at MSU Meteorological Observatory // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 3. P. 290–299.
  20. *Jinyuan Xin, Chongshui Gong, Zirui Liu, Zhiyuan Cong, Wenkang Gao, Tao Song, Yuepeng Pan, Yang Sun, Dongsheng Ji, Lili Wang, Guiqian Tang, Yuesi Wang.* The observation-based relationships between PM<sub>2.5</sub> and AOD over China // *J. Geophys. Res.* 2016. V. 121, N 18. P. 10701–10716.
  21. *Zheng C., Zhao C., Zhu Y., Wang Y., Shi X., Wu X., Chen T., Wu F., Qiu Y.* Analysis of influential factors for the relationship between PM (2.5) and AOD in Beijing // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 17, N 21. P. 13473–13489. DOI: 10.5194/acp-17-13473-2017.
  22. *Ивлев Л.С., Довгало Ю.А.* Физика атмосферных аэрозольных систем. СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. 194 с.
  23. URL: <http://www.infoeco.ru> (last access: 4.12.2019).
  24. *Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2017 году* // И.А. Серебрицкий (ред.). СПб.: Сезам-принт, 2018. С. 158.
  25. *Волкова К.А., Поберовский А.В., Тимофеев Ю.М., Ионов Д.В., Holben B.N., Smirnov A., Slutsker I.* Аэрозольные оптические характеристики по данным измерений солнечного фотометра CIMEL (AERONET) вблизи Санкт-Петербурга // *Оптика атмосфер. и океана.* 2018. Т. 31, № 6. С. 425–431; *Volkova K.A., Poberovsky A.V., Timofeev Yu.M., Ionov D.V., Holben B.N., Smirnov A., Slutsker I.* Aerosol optical characteristics retrieved from CIMEL sun photometer measurements (AERONET) near St. Petersburg // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 6. P. 635–641.
  26. *Birch M.E., Cary R.A.* Elemental carbon-based method for monitoring occupational exposures to particulate diesel exhaust // *Aerosp. Sci. Technol.* 1996. V. 25, N 3. P. 221–241.
  27. *Власенко С.С., Волкова К.А., Ионов Д.В., Рышкевич Т.И., Иванова О.А., Михайлов Е.Ф.* Изменчивость углеродсодержащей фракции атмосферного аэрозоля вблизи Санкт-Петербурга // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2019. Т. 55, № 6. С. 147–156.
  28. *Holben B.N., Eck T.I., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A.* AERONET—A Federated instrument network and data archive for aerosol characterization // *Remote Sens. Environ.* 1998. V. 66, N 1. P. 1–16.
  29. *Dubovik O., King M.D.* A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // *J. Geophys. Res. D.* 2000. V. 105. P. 20673–20696.
  30. *Smirnov A., Holben B.N., Eck T.F., Dubovik O., Slutsker I.* Cloud-screening and quality control algorithms for the AERONET database // *Remote Sens. Environ.* 2000. V. 73. P. 337–349.
  31. *Giles D., Holben B.N., Smirnov A., Eck T.F., Slutsker I., Sorokin M., Schafer J., Sinyuk A.* Evaluation of AERONET AOD measurements in the Version 3 da-

- tabase // 10th Ann. Yoram Kaufman Memorial Sympos. 2016. 20 p.
32. Schuster G.L., Dubovik O., Holben B.N. Angstrom exponent and bimodal aerosol size distributions // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. P. D07207.
  33. Dubovik O., Smirnov A., Holben B., King M., Kaufman Y., Eck T., Slutsker I. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements // J. Geophys. Res. D. 2000. V. 105, N 8. P. 9791–9806.
  34. Xin J., Gong C., Liu Z., Cong Z., Gao W., Song T., Pan Y., Sun Y., Ji D., Wang L. The observation-based relationships between PM<sub>2.5</sub> and AOD over China // J. Geophys. Res.: Atmos. 2016. V. 121. DOI: 10.1002/2015JD024655.
  35. Ионов Д.В., Поберовский А.В. Изменчивость содержания оксидов азота в приземном слое по данным наблюдений в Петергофе // Метеорол. и гидрол. (в печати)
  36. Кузнецова И.Н., Глазкова А.А., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И., Архангельская А.А., Звягинцев А.М., Семутникова Е.Г., Захарова П.В., Лезина Е.А. Сезонная и суточная изменчивость концентраций взвешенных частиц в приземном воздухе жилых районов Москвы // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 6. С. 473–482.

*K.A. Volkova, S.S. Anikin, E.F. Mihailov, D.V. Ionov, S.S. Vlasenko, T.I. Ryshkevich.* **Seasonal and daily variability of aerosol particle concentrations near St. Petersburg.**

The measurements of mass concentrations of PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> (2016–2018) using the aerosol spectrometer GRIMM carried out near Saint-Petersburg are analysed. The average concentrations of PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and PM<sub>10</sub> for the entire measurement period are 4.5, 4.8, and 4.9 µg/m<sup>3</sup>, respectively. The hourly average PM<sub>10</sub> concentrations were compared with the aerosol optical thickness (AOT) at a wavelength of 500 nm for different seasons. It was found that the best correlation between the concentration of PM<sub>10</sub> and AOT is achieved in autumn. According to the distribution of wind directions, the maximal concentrations of PM<sub>10</sub> correspond to the eastern direction (from St. Petersburg). The seasonal dependence of the daily variation in PM<sub>10</sub> mass concentration on relative humidity and the height of the atmospheric boundary layer is analyzed. The highest concentrations of PM<sub>10</sub> (about 8 µg/m<sup>3</sup> on the average) and the maximal amplitude of the daily variation are observed in winter.