

УДК 551.510.41

Аэрозольные оптические характеристики по данным измерений солнечного фотометра CIMEL (AERONET) вблизи Санкт-Петербурга

К.А. Волкова¹, А.В. Поберовский¹, Ю.М. Тимофеев¹, Д.В. Ионов¹,
B.N. Holben², A. Smirnov², I. Slutsker^{2*}

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

² NASA/Goddard Space Flight Center
Greenbelt, MD 20771, USA

Поступила в редакцию 29.01.2018 г.

Проведен анализ измерений солнечного фотометра CIMEL CE 318 международной сети наблюдений AERONET вблизи Санкт-Петербурга. Определены типичные аэрозольные оптические характеристики в регионе — аэрозольная оптическая толщина, параметр Ангстрема и альbedo однократного рассеяния, а также масштаб их вариаций. Выявлены некоторые закономерности наблюдаемой временной изменчивости параметров аэрозоля в Северо-Западном регионе Российской Федерации. Информация дополнена анализом данных одновременных наблюдений ближайших станций AERONET в Эстонии и Финляндии, а также результатов спутниковых измерений и данных реанализа MERRA.

Ключевые слова: аэрозольная оптическая толщина, солнечный фотометр, параметр Ангстрема; aerosol optical depth, sun photometer, Angstrom exponent.

Введение

Атмосферный аэрозоль играет важную роль во многих атмосферных процессах (переносе излучения и радиационном балансе планеты, облакообразовании, фотохимии атмосферы и т.д.) и интенсивно исследуется уже многие десятилетия (см., например, [1, 2]). Обладая высокой пространственно-временной изменчивостью, атмосферный аэрозоль чрезвычайно разнообразен по микроструктуре и физико-химическим свойствам. Это обуславливает необходимость систематических наблюдений его оптических и микрофизических характеристик с большим пространственно-временным разрешением. В настоящее время изучение атмосферного аэрозоля осуществляется многими наземными, самолетными и спутниковыми приборами и методами. Одним из средств глобального аэрозольного мониторинга является наземная сеть автоматизированных фотометров AERONET (AErosol RObotic NETwork) [2], насчитывающая более 600 станций по всему миру. Данные регулярных измерений AERONET позволяют анализировать глобальные и локальные особенности формирования аэрозольного состава атмо-

сферы. На территории Российской Федерации функционирует 10 наблюдательных станций, эксплуатирующих солнечные фотометры CIMEL, которые являются стандартным оборудованием AERONET, в т.ч. в Москве, Красноярске, Якутске, Уссурийске и на Среднем Урале (район Екатеринбург) [3–7]. Кроме того, длительные исследования аэрозолей осуществляются в Томске с помощью как фотометра CIMEL, так и собственной оригинальной аппаратуры [8].

В Санкт-Петербурге подобные регулярные наблюдения аэрозолей проводились в 1970–1990-х гг. [1], а с использованием фотометра CIMEL с 2013 г. подобные наблюдения выполняются Санкт-Петербургским государственным университетом в Петергофе. В рамках международной программы AERONET результаты измерений интенсивности излучения интерпретируются по единой методике определения характеристик аэрозоля в Goddard Space Flight Center (GSFC, USA).

Накопленный за 2013–2016 гг. массив данных AERONET вблизи Санкт-Петербурга позволяет проанализировать типичные аэрозольные оптические характеристики в регионе, а также оценить масштаб их вариаций и выявить некоторые закономерности наблюдаемой временной изменчивости. Представленная уникальная для Северо-Западного региона Российской Федерации информация дополнена совместным анализом данных одновременных наблюдений ближайших станций AERONET в Эстонии и Финляндии, а также результатов спутниковых

* Кристина Андреевна Волкова (volkova_ka@list.ru); Анатолий Васильевич Поберовский (avpob@troll.phys.spbu.ru); Юрий Михайлович Тимофеев (tim@JT14934.spbu.ru); Дмитрий Викторович Ионов (ionov@troll.phys.spbu.ru); Brent Holben (brent.n.holben@nasa.gov); Alexander Smirnov (Alexander.Smirnov-1@nasa.gov); Ilya Slutsker (ilya.slutsker-1@nasa.gov).

измерений и данных реанализа (усвоенных атмосферной моделью данных наблюдений).

1. Измерения солнечного фотометра CIMEL

Солнечный фотометр CIMEL CE 318 установлен на наблюдательной площадке ресурсного центра «Геомодель» Научного парка СПбГУ в Петергофе (59,88° с.ш., 29,83° в.д.), в 35 км к юго-западу от Санкт-Петербурга (высота площадки 58 м над ур. м.). CIMEL представляет собой многоканальный фотометр с углом зрения 1,2° и девятью интерференционными фильтрами с центрами на 340, 380, 440, 500, 675, 870, 940, 1020 и 1640 нм и полушириной ~2 нм в УФ-области спектра и ~10 нм в видимой и ближней инфракрасной областях. Зарегистрированные фотометром интенсивности прямой и рассеянной солнечной радиации интерпретируются стандартными алгоритмами в центре обработки AERONET (GSFC). В начале 2017 г. фотометр проходил стандартизованную процедуру калибровки AERONET в GSFC.

Алгоритм определения аэрозольных характеристик из результатов измерений солнечного фотометра состоит в анализе спектрального ослабления излучения атмосферой [9, 10]. Абсолютная погрешность определения спектральной аэрозольной оптической толщины (AOT) при условии регулярной калибровки фотометра составляет 0,01–0,02 [11–13]. Помимо AOT, стандартная интерпретация данных AERONET включает параметризацию спектральной зависимости AOT (параметр Ангстрема $\alpha = -\ln(AOT_\lambda)/\ln\lambda$) и спектрального альbedo однократного рассеяния [13]. Измерения прибора позволяют определять общее содержание водяного пара; анализ качества таких измерений в Петергофе был осуществлен в работе [14].

Определяемые на сети AERONET аэрозольные параметры имеют три уровня качества данных: 1.0,

1.5 и 2.0 [15]. Первичным результатам, полученным в режиме реального времени без применения каких-либо критериев отбраковки, присваивается уровень 1.0. Следующий уровень (1.5) соответствует данным, прошедшим автоматическую процедуру исключения облачности на основе оценки условий наблюдений по результатам анализа короткопериодных и дневных вариаций AOT. Уровень 2.0 присваивается данным уровня 1.5, скорректированным с учетом последней калибровки интерференционных фильтров фотометра и прошедшим дополнительный ручной контроль качества измерений. Кроме трех уровней качества данных, существуют также две версии обработки измерений AERONET: 2.0 и 3.0. Последняя версия учитывает множество мешающих факторов, включая перистые облака, смог, солнечные затмения, атмосферные температурные аномалии и слабую спектральную зависимость AOT. Качество данных AERONET уровня 1.5 версии обработки 3.0 не уступает результатам уровня 2.0 версии 2.0 [16]. В настоящей работе использовались данные уровня 1.5 версии 3.0.

Санкт-Петербург и его пригороды (включая Петергоф) находятся в зоне умеренного климата, переходного от морского к континентальному. Особенности региона являются частая смена воздушных масс с преобладанием ветров юго-западного и западного направлений. Типичные условия наблюдений вблизи Санкт-Петербурга характеризуются преимущественно пасмурной и ветреной погодой с высокой относительной влажностью и большим количеством осадков. С учетом необходимости измерений прямого солнечного излучения количество наблюдений фотометра в Петергофе существенно ограничено безоблачной погодой.

На рис. 1 представлено распределение количества единичных измерений фотометра по месяцам в данных AERONET уровня 1.5 версии 3.0. В среднем остается ~60% первичных измерений за год,

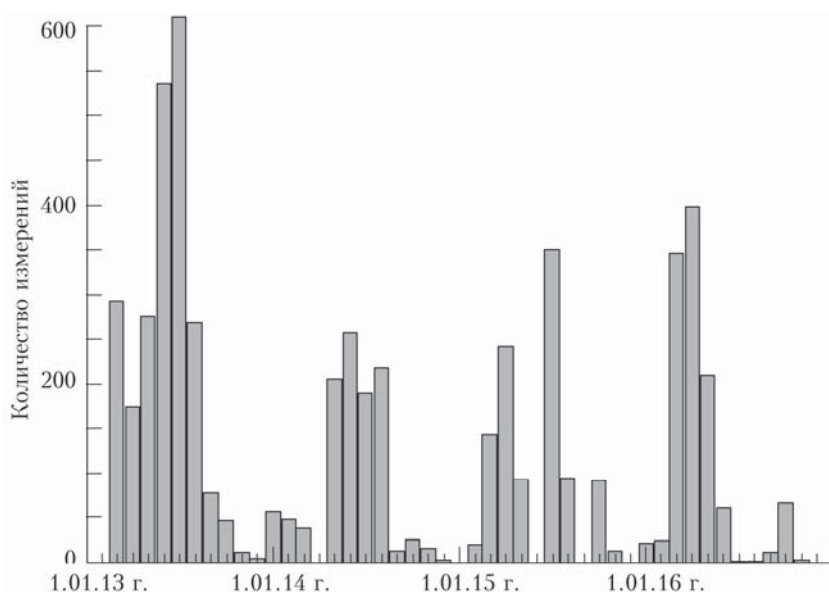


Рис. 1. Распределение по месяцам количества единичных измерений на ст. Петергоф в 2013–2016 гг. в данных AERONET уровня 1.5 версии 3.0

причем доля отбракованных данных была неизменна в 2013–2016 гг. Наибольшее количество измерений приходится на весенне-летний период с благоприятными погодными условиями наблюдений. Заметное сокращение объема данных в 2014–2016 гг. связано с периодическими сбоями в работе фотометра.

2. Анализ результатов измерений фотометра в 2013–2016 гг.

Одна из основных оптических характеристик аэрозоля — АОТ на длине волны 500 нм (далее просто АОТ), позволяющая оценить вклад аэрозольной составляющей в радиационный баланс атмосферы. В среднем за весь период измерений АОТ составляет $0,12 \pm 0,05$. Годовой ход АОТ в виде среднемесячных значений в период 2013–2016 гг. представлен на рис. 2, а. В среднем максимальные значения АОТ (0,14–0,19) наблюдаются летом (июль–август), а минимальные (0,05–0,06) — осенью и зимой (в октябре и декабре). Такая сезонная изменчивость АОТ обусловлена метеорологическими и климатическими особенностями региона наблюдений. Осенне-зимний период в районе Санкт-Петербурга характеризуется пасмурной погодой с максимальной повторяемостью осадков и высокой относительной влажностью воздуха. Подобные условия способствуют вымыванию аэрозольных частиц из атмосферы облаками, туманами и осадками, а также их влажному осаждению, что является основным механизмом стока природного и антропогенного аэрозолей. Весной и летом частота осадков меньше, благодаря чему вымывание и влажное осаждение атмосферного аэрозоля сокращается. Одновременно более интенсивный прогрев атмосферы и подстилающей поверхности приводит к образованию конвективных потоков воздуха, способствующих

более эффективному вертикальному перемешиванию и подъему различных аэрозольных частиц с поверхности в атмосферу, а также замедлению их седиментации, что проявляется в росте АОТ.

Для сравнения с результатами измерений в Петергофе на рис. 2, а приведены также среднемесячные значения АОТ, полученные по данным аналогичных измерений на трех ближайших станциях сети AERONET: Хельсинки и Куопио в Финляндии и Тыравере в Эстонии (см. таблицу и карту расположения станций на рис. 3). Расстояние от этих пунктов наблюдений до Петергофа составляет приблизительно от 260 (Тыравере) до 360 км (Куопио). Станция Хельсинки расположена в нескольких километрах от центра города с населением ~620 тыс. чел.; ст. Куопио и Тыравере находятся вблизи небольших городов с населением ~110 и ~90 тыс. чел. (г. Тарту) соответственно. Население Петергофа составляет ~80 тыс. чел., однако этот город расположен вблизи крупнейшего мегаполиса в Северо-Западном регионе (Санкт-Петербург) с населением ~5,3 млн чел. За период измерений в 2013–2016 гг. среднемесячная величина АОТ составила $0,11 \pm 0,05$ для ст. Тыравере и $0,10 \pm 0,03$ для ст. Куопио и Хельсинки. Для всех станций характерен сезонный ход с наиболее высокими значениями АОТ в летний период (максимум в июле, рис. 2, а). При этом лучше всего измерения АОТ в Петергофе согласуются с данными наблюдений в Тыравере; данные наблюдений в Куопио и Хельсинки близки между собой, но систематически ниже результатов измерений в Петергофе. Предположительно, более высокие значения АОТ в Петергофе относительно данных других станций обусловлены вкладом вторичного аэрозоля антропогенного происхождения (например, в присутствии повышенного содержания окислов азота NO_x ,

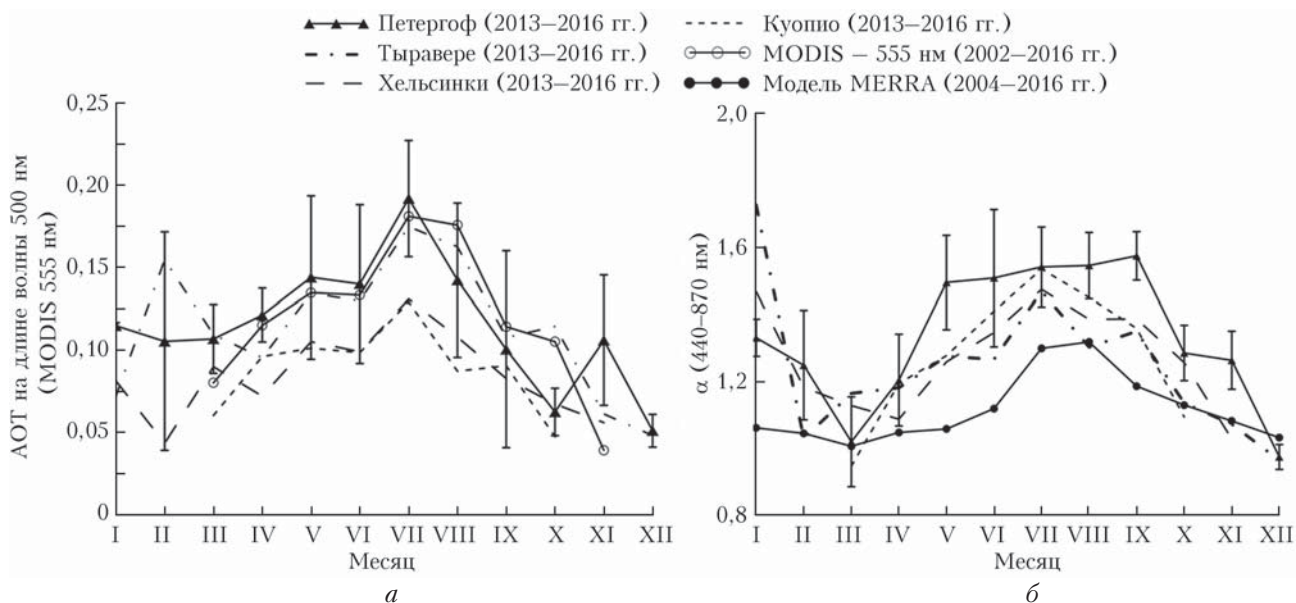


Рис. 2. Среднемесячные значения АОТ (а) по данным спектро радиометра MODIS и результатам измерений фотометра CIMEL на ст. Петергоф и на ближайших станциях AERONET (Хельсинки, Тыравере и Куопио); среднемесячные значения параметра Ангстрема α по результатам аналогичных измерений (б); вертикальные отрезки показывают СКО от среднемесячных значений

Характеристики ближайших к Петергофу станций AERONET

Станция	Население, тыс. чел.	Координаты (°с.ш.; °в.д.)	Период измерений	Высота над ур. м., м	Расстояние до ст. Петергоф, км
Петергоф (Россия)	81	59,88; 29,83	2013 – н.в.	58	–
Тыравере (Эстония)	<1	58,27; 26,47	2002 – н.в.	70	263
Хельсинки (Финляндия)	621	60,20; 24,96	2008 – н.в.	53	275
Куопио (Финляндия)	112	62,89; 27,64	2008 – н.в.	105	355



Рис. 3. Карта расположения ближайших к Петергофу станций AERONET: Хельсинки и Куопио в Финляндии и Тыравере в Эстонии

характерного для крупных мегаполисов с интенсивным движением транспорта). Кроме того, во время отопительного сезона (осенью и зимой) возрастает эмиссия твердых загрязняющих веществ и углеродов городскими ТЭЦ [17].

В качестве независимого источника информации о сезонном ходе АОТ вблизи Санкт-Петербурга были использованы результаты измерений спутниковых приборов MODIS, которые представляют собой сканирующие спектрорадиометры среднего спектрального разрешения, размещенные на спутниках TERRA и AQUA (см., например, [18]). Для сопоставления с наземными измерениями были выбраны комбинированные данные спутниковых измерений АОТ на длине волны 555 нм, выполнявшиеся приборами MODIS (TERRA и AQUA) с пространственным разрешением 500 м. Данные измерений MODIS, осредненные по области (59,49–59,98° с.ш.,

29,14–29,88° в.д.) в 2002–2016 гг., демонстрируют сезонный ход, аналогичный наблюдаемому в данных наземных измерений, с летним максимумом АОТ (см. рис. 2, а).

Помимо АОТ на длине волны 500 нм (555 нм для MODIS), рассмотрим также параметр Ангстрема α , определяемый по спектральной зависимости АОТ в интервале длин волн 440–870 нм. Годовой ход среднемесячных значений α по данным измерений в Петергофе и ближайших станций AERONET в период 2013–2016 гг. представлен на рис. 2, б. Все наземные измерения демонстрируют схожую сезонную зависимость α : максимальные значения летом и осенью (в Петергофе – с мая по сентябрь) и минимальные – в начале зимы и в начале весны; кроме того, во всех данных отмечаются относительно высокие значения α в январе и феврале. В целом α изменяется от 1,0 до 1,6. Величина па-

раметра Ангстрема позволяет судить о характере распределения аэрозольных частиц по размеру: значения α ниже 1,0 указывают на преобладание крупных аэрозольных частиц радиусом от 0,5 мкм; величина α выше 2,0 свидетельствует о мелкодисперсном аэрозоле [19]. Таким образом, полученные нами значения параметра Ангстрема говорят о смешанном бимодальном распределении аэрозоля, при котором доля мелкодисперсной фракции может составлять от 20 до 60% [19]. Для сравнения на рис. 2, б приведены также среднемесячные значения α в районе Санкт-Петербурга, полученные по данным реанализа MERRA [20] в 2004–2016 гг., который позволяет получить информацию об аэрозольных параметрах с помощью численной модели атмосферы на основе ассимилированных данных разнообразных наземных и спутниковых измерений. Данные MERRA демонстрируют сезонный ход параметра Ангстрема, схожий с результатами анализа измерений на всех рассмотренных станциях AERONET — максимальные значения летом и минимальные зимой.

Отличие данных реанализа от результатов измерений AERONET состоит в систематическом занижении параметра Ангстрема (в среднем на ~20%) и в отсутствии относительно высоких его значений в январе и феврале в MERRA. В целом высокие летние значения α , наблюдаемые во всех представленных данных, указывают на увеличение в это время года доли мелкодисперсного вторичного аэрозоля, генерируемого за счет газофазных фотохимических реакций в присутствии интенсивной солнечной радиации и продолжительного светового дня. Зимнее увеличение концентрации мелкодисперсного аэрозоля, наблюдаемое в данных AERONET (высокие значения α в январе и феврале), может быть связано с эпизодически повышенным антропогенным загрязнением атмосферы в условиях зимних антициклонов с низкой температурой воздуха и штилевой погодой. По-видимому, эти локальные максимумы параметра Ангстрема не воспроизводятся в данных MERRA, поскольку последние сильно сглажены по пространству (разрешение данных: $0,5^\circ$ широты \times $0,625^\circ$ долготы).

Еще одной важной аэрозольной характеристикой, определяемой из результатов измерений фотометра, является альbedo однократного рассеяния (АОР). Близость этой величины к единице означает присутствие в аэрозоле преимущественно рассеивающих частиц, а более низкие значения (ближе к нулю) указывают на преобладание поглощающих частиц. Для анализа использовались данные с применением дополнительного критерия отбраковки: выборка только значений АОР, когда АОТ на длине волны 440 нм больше 0,2 [12]. Спектральный ход средних за весь период наблюдений значений АОР для Петергофа и близлежащих станций AERONET представлен на рис. 4.

Приведенные кривые построены по значениям АОР на четырех длинах волн: 440, 670, 870 и 1020 нм. Сезонный ход АОР для ст. Петергоф

отражен в величине СКО от среднегодовых значений: максимальные значения характерны для летних месяцев, минимальные — для зимних. Средние значения АОР на ст. Петергоф и Тыравере имеют наиболее низкие значения по сравнению с другими станциями (0,88–0,94 и 0,90–0,95 соответственно), что говорит о присутствии поглощающей фракции в аэрозоле. Как правило, такими оптическими свойствами обладают частицы антропогенных выбросов (транспорт и промышленность).

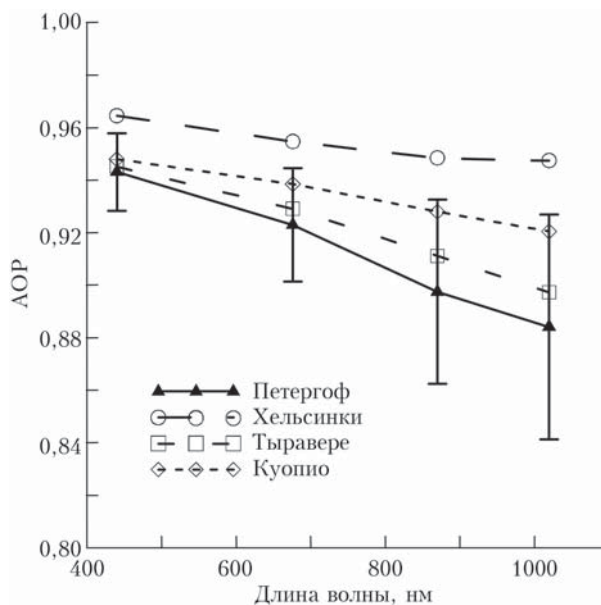


Рис. 4. Спектральный ход средних за период наблюдений (2013–2016 гг.) значений АОР на длинах волн 440, 670, 870 и 1020 нм для Петергофа и близлежащих станций AERONET; вертикальные отрезки показывают СКО от среднегодовых значений

Наиболее высокие значения АОР, близкие к единице (0,95–0,96), наблюдаются на ст. Хельсинки. Она расположена на самом берегу Финского залива и ближе всех к открытой части Балтийского моря (см. рис. 3), поэтому среди наблюдаемых здесь аэрозольных частиц можно ожидать преобладания морского рассеивающего аэрозоля. В отличие от Хельсинки ст. Петергоф находится вблизи самого устья залива, в 2 км от береговой линии и на высоте 58 м над ур. м. (ст. Хельсинки расположена ближе к берегу и ниже, на высоте 53 м). Кроме того, близость к мегаполису Санкт-Петербург с населением свыше 5 млн чел. оказывает существенное влияние на состав и характеристики аэрозоля, наблюдаемого на ст. Петергоф.

Заключение

Проведен анализ измерений солнечного фотометра CIMEL CE 318 международной сети наблюдений AERONET вблизи Санкт-Петербурга за 2013–2016 гг. Максимальные значения АОТ (0,14–0,19) наблюдаются летом (июль–август), а минимальные (0,05–0,06) — осенью и зимой (в октябре

и декабре). Сравнения с результатами измерений на трех ближайших станциях сети AERONET: Хельсинки и Куопио в Финляндии и Тыравере в Эстонии — показали наличие такого же сезонного хода, но в среднем меньшие значения АОТ. Предположительно, более высокие значения АОТ в Петергофе относительно данных других станций обусловлены вкладом вторичного аэрозоля антропогенного происхождения. Аналогичный сезонный ход АОТ показывают и спутниковые наблюдения приборов MODIS TERRA и MODIS AQUA. Все наземные измерения демонстрируют схожую сезонную зависимость параметра Ангстрема α : максимальные значения летом и осенью (в Петергофе — с мая по сентябрь) и минимальные в начале зимы и в начале весны; кроме того, во всех данных отмечаются относительно высокие значения α в январе и феврале. Отличие данных реанализа MERRA от результатов измерений AERONET состоит в систематическом занижении параметра Ангстрема в MERRA (в среднем на ~20%), а также в отсутствии в данных реанализа относительно высоких значений α в январе и феврале.

Сезонный ход АОР для петергофской станции показывает максимальные значения для летних месяцев и минимальные для зимних. Средние значения АОР на ст. Петергоф — наиболее низкие, по сравнению с другими станциями (0,88–0,94), что говорит о присутствии поглощающей фракции в аэрозоле, вероятно, антропогенного происхождения.

Выражаем благодарность Dr. Aun Margit, Prof. Gerrit de Leeuw и Dr. Antti Arola за организацию и проведение измерений AERONET на ст. Тыравере, Хельсинки и Куопио.

Работа выполнена при поддержке Научного парка СПбГУ с использованием оборудования ресурсного центра «Геомодель».

1. Бартенева О.Д., Никитинская Н.И., Сакунов Г.Г., Веселова Л.К. Прозрачность толщи атмосферы в видимой и ближней ИК-области спектра. Л.: Гидрометеониздат, 1991. 224 с.
2. Holben B.N., Eck T.L., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima T., Lavenue 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.
3. 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.
4. 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.
5. Сакерин С.М., Береснев С.А., Кабанов Д.М., Корниенко Г.И., Николашкин С.В., Поддубный В.А., Ташчилин 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.
6. Сакерин С.М., Андреев С.Ю., Кабанов Д.М., Николашкин С.В., Прахов А.Н., Радионов В.Ф., Турчинович Ю.С., Чернов Д.Г., Holben B.N., Smirnov A., Sorokin M.G. О результатах исследований аэрозольной оптической толщи атмосферы в арктических районах // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 5. С. 413–423; Sakerin S.M., Andreev S.Yu., Kabanov D.M., Nikolashkin S.V., Prakhov A.N., Radionov V.F., Turchinovich Yu.S., Chernov D.G., Holben B.N., Smirnov A., Sorokin M.G. On results of studies of atmospheric aerosol optical depth in Arctic regions // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 6. P. 517–528.
7. Chubarova N.Y., Poliukhov A.A., Gorlova I.D. Long-term variability of aerosol optical thickness in Eastern Europe over 2001–2014 according to the measurements at the Moscow MSU MO AERONET site with additional cloud and NO₂ correction // Atmos. Meas. Tech. 2016. V. 9. P. 313–334.
8. 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.
9. Smirnov A., Holben B.N., Lyapustin A., Slutsker I., Eck T.F. AERONET processing algorithms refinement // AERONET Workshop. 10–14 May, 2004. El Arenosillo, Spain.
10. Dubovik O., King M.D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // J. Geophys. Res. 2000. V. 105, N D16. P. 20673–20696.
11. Holben B.N., Tanre D., Smirnov A., Eck T.F., Slutsker I., Abuhassan N., Newcomb W.W., Schafer J., Chatenet B., Lavenue F., Kaufman Y.J., Vande Castle J., Setzer A., Markham B., Clark D., Frouin R., Halthore R., Karneli A., O'Neill N.T., Pietras C., Pinker R.T., Voss K., Zibordi G. An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET // J. Geophys. Res. 2001. V. 106, N D16. P. 12067–12097.
12. 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. 2000. V. 105, N D8. P. 9791–9806.
13. Eck T.F., Holben B.N., Reid J.S., Dubovik O., Smirnov A., O'Neill N.T., Slutsker I., Kinne S. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban and desert dust aerosols // J. Geophys. Res. 1999. V. 104, N D24. P. 31333–31350.
14. Березин И.А., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А., Французова И.С., Волкова К.А., Поберовский А.В., Холбен Б.Н., Смирнов А., Слущкер И. Анализ погрешностей измерения интегрального влагосодержания атмосферы фотометром CIMEL // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2017. Т. 53, № 1. С. 66–73.
15. 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.

16. 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 database // 10th Anniversary Yoram Kaufman Memorial Symposium. 22 June, 2016.
17. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2014 году / под ред. И.А. Серебрицкого. СПб.: ООО «ДИТОН», 2015. 180 с.
18. Remer L.A., Kaufman Y.J., Tanré D., Mattoo S., Chu D.A., Martins J.V., Li R.R., Ichoku C., Levy R.C., Kleidman R.G., Eck T.F., Vermote E., Holben B.N. The MODIS aerosol algorithm, products and validation // J. Atmos. Sci. 2005. V. 62. P. 947–973.
19. Schuster G.L., Dubovik O., Holben B.N. Angstrom exponent and bimodal aerosol size distributions // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. P. D07207.
20. Rienecker M.M., Suarez M.J., Gelaro R., Todling R., Bacmeister J., Liu E., Bosilovich M., Schubert S.D., Takacs L., Kim G.-K., Bloom S., Chen J., Collins D., Conaty A., da Silva A.M., Gu W., Joiner J., Koster R.D., Lucchesi R., Molod A., Owens T., Pawsion S., Pegion P., Redder C.R., Reichle R., Robertson F.R., Ruddick A.G., Sienkiewicz M., Woollen J. MERRA-NASA's modern-era retrospective analysis for research applications // J. Clim. 2011. V. 24, N 14. P. 3624–3648.

K.A. Volkova, A.V. Poberovsky, Yu.M. Timofeev, D.V. Ionov, B.N. Holben, A. Smirnov, I. Slutsker.
Aerosol optical characteristics retrieved from measurements of CIMEL sun photometer (AERONET) near Saint Petersburg.

The measurements of CIMEL CE 318 sun photometer near Saint Petersburg within the International monitoring AERONET network are analysed. Typical regional aerosol optical characteristics (aerosol optical depth, Angstrom exponent, and single scattered albedo) and their variations are determined. Some regularities in variations in the aerosol parameters over the North-West region of the Russian Federation are revealed. The study is supplemented by the joint analysis of data from the nearby AERONET observation sites in Finland and Estonia, satellite measurements, and MERRA reanalysis data.