

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 551.510.4

Комплексный аэрозольный эксперимент на Среднем Урале. Часть 1. Условия проведения и результаты фотометрических измерений

В.А. Поддубный¹, В.В. Польшкин², С.М. Сакерин²,
Л.П. Голобокова³, А.П. Лужецкая¹, Ю.И. Маркелов¹,
Е.С. Дубинкина¹, О.И. Хуриганова^{3*}

¹Институт промышленной экологии УрО РАН
620990, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20
²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1
³Лимнологический институт СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3

Поступила в редакцию 23.02.2016 г.

Обсуждаются результаты комплексного аэрозольного эксперимента, проведенного в 2014 г. в двух районах Среднего Урала: Екатеринбурге и Коуровской астрономической обсерватории (фоновый район). В измерениях характеристик аэрозоля использовались солнечные фотометры, фотоэлектрические счетчики частиц, аэталометры и заборники проб аэрозоля на фильтры. Анализируются различия оптических характеристик аэрозоля в двух районах, особенности их суточного хода, взаимосвязи параметров аэрозоля в столбе атмосферы и приземном слое. Приводятся оценки влияния на характеристики аэрозоля метеоусловий, включая обратные траектории воздушных масс. Отмечается, что в Екатеринбурге наблюдаются более высокие замутнения атмосферы в сравнении с фоновым районом, но статистическая значимость различий АОТ (от 0,01 до 0,04) зависит от продолжительности анализируемых периодов.

Ключевые слова: измерения, аэрозоль, аэрозольная оптическая толщина, концентрация, мелкодисперсная, грубодисперсная фракция, обратные траектории, Средний Урал; measurements, aerosol, aerosol optical depth, concentration, fine, coarse fractions, back trajectories, Middle Ural.

Введение

Аэрозоль является одним из ключевых компонентов атмосферы, участвующих в физико-химических процессах различных пространственных и временных масштабов. Свойства атмосферного аэрозоля значимы как для оценки качества вдыхаемого человеком воздуха на локальном уровне, так и для глобальных процессов изменения климата планеты. В отличие от оптически активных газовых примесей влияние характеристик аэрозоля на климат и его изменение обладает существенной неопределенностью [1]. Недостаточная изученность свойств атмосферного аэрозоля и природных процессов, в которые вовлечены

аэрозольные частицы, привела за последние два десятилетия к росту числа исследований и научных публикаций по аэрозольной тематике [2, 3], включая вопросы мониторинга характеристик аэрозоля.

Наиболее известной как по географическому охвату, так и по числу измеряемых и восстанавливаемых параметров аэрозоля является глобальная сеть AERONET ([4]; <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>), действующая на основе солнечных фотометров CIMEL CE 318. По данным фотометрических наблюдений прямой и рассеянной солнечной радиации определяются интегральные (для столба атмосферы) характеристики аэрозоля [4, 5]: аэрозольная оптическая толщина (АОТ) в нескольких участках спектра, объемные концентрации и эффективные радиусы двух фракций частиц, альbedo однократного рассеяния и другие параметры. Результаты исследований пространственно-временной изменчивости АОТ и климатического влияния аэрозоля по данным AERONET-наблюдений на территории СНГ обсуждались во многих работах (см. например, [6–11]) и для азиатской части России обобщены в монографии [12].

* Василий Алексеевич Поддубный (basil@ecko.uran.ru); Виктор Викторович Польшкин (victor@iao.ru); Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru); Людмила Петровна Голобокова (lg@lin.irk.ru); Анна Павловна Лужецкая (ann@ecko.uran.ru); Юрий Иванович Маркелов (markelov@ecko.uran.ru); Екатерина Сергеевна Дубинкина; Ольга Иннокентьевна Хуриганова.

Кроме климатического аспекта данные фотометрических наблюдений могут использоваться для оценки антропогенных загрязнений отдельных территорий путем сравнения АОТ, полученных в соседних районах, один из которых является фоновым, а другой отягощен промышленной деятельностью. Различие данных «город–фон» позволяет выделить антропогенную добавку АОТ относительно регионального фонового уровня. Результаты параллельных двухточечных измерений аэрозольного замутнения атмосферы в ряде регионов России уже обсуждались различными авторами [13–16]. В частности, эксперименты в районе Екатеринбурга показали [16] статистически значимое превышение АОТ в городе над фоновым уровнем, которое в основном обусловлено большим содержанием мелкодисперсного аэрозоля.

Аналогичные исследования аэрозольно-газовых загрязнений проводятся также на основе двух- или многоточечных измерений характеристик атмосферы в приземном слое [17–20]. Заметим, что в различии содержания атмосферных примесей, измеренных в двух районах («город–фон»), завуалирована не только величина дополнительной антропогенной эмиссии, но также особенности метеорологических условий и динамических процессов урбанизированной территории: турбулентные и конвективные движения воздуха, трансформация дисперсного и химического состава и др. Поэтому отличие характеристик в городском и фоновом районах, помимо средних значений, может проявляться, например, в суточном ходе и особенностях вертикального распределения.

Понятно, что наиболее полную информацию об антропогенном воздействии можно получить только на основе комплексных экспериментов, предусматривающих измерение оптических, микрофизических характеристик и химического состава аэрозоля. Поэтому при постановке нового двухточечного эксперимента в районе Екатеринбурга, в отличие от [16], мы постарались привлечь максимально возможное число соответствующих измерительных средств. Отметим также, что для получения корректных результатов в таких экспериментах важным является использование однотипных приборов и их интеркалибровка.

В настоящей статье (см. также Часть 2 [21]) обсуждаются результаты комплексного аэрозольного эксперимента «город–фон», впервые проведенного на Среднем Урале в 2014 г. Анализ касается следующих вопросов: 1) оценки различия оптических, микрофизических и химических (ионный состав, газообразные примеси) характеристик аэрозоля в двух районах; 2) особенности суточного хода характеристик аэрозоля в приземном слое; 3) взаимосвязи параметров аэрозоля в столбе атмосферы и приземном слое; 4) оценки влияния на характеристики аэрозоля метеоусловий, включая траектории движения воздушных масс. В организации и выполнении комплексного эксперимента участвовали специалисты Института оптики атмосферы и Лимнологического института СО РАН, Института промышленной экологии (ИПЭ) УрО РАН, Уральского федерального университета и Коуровской астрономической обсерватории (КАО).

Условия проведения эксперимента

В ходе комплексного эксперимента измерялись характеристики аэрозоля в двух пунктах: в г. Екатеринбурге на крыше ИПЭ УрО РАН и в фоновом районе на территории КАО, расположенной в лесистой местности северо-западнее города, на расстоянии от него около 65 км. В 2014 г. измерения и отбор проб в городе проводились на плоской крыше двухэтажного здания ИПЭ УрО РАН с высоты около 12 м. Измерения в фоновом районе осуществлялись с высоты 1,5 м на расстоянии около 5 м от кромки соснового леса, подстилающая поверхность — скошенная трава.

Наблюдения солнечными фотометрами выполнялись с мая по ноябрь включительно с интеркалибровочными измерениями в фоновом районе (КАО) с 2 по 7 июня. В Екатеринбурге измерения проводились фотометрами SP-9 и SPM [22], в Коуровской обсерватории — сетевым фотометром CIMEL CE 318, работающим по программе AERONET [4]. По результатам измерений фотометров определялись спектральные АОТ τ_λ в диапазоне спектра 0,34–2,14 мкм (SP-9, SPM) и 0,34–1,02 мкм (CE 318), а также влагосодержание атмосферы W (г/см²).

Измерения прямого солнечного излучения фотометром CE 318 осуществлялись в программно заданном режиме с периодичностью до 4 раз в час. Измерения фотометром SP-9 велись непрерывно, при отсутствии облачности на диске Солнца. В дальнейшем анализе использовались результаты измерений CE 318 уровня качества 2.0 (согласно классификации AERONET [4]). Результаты измерений фотометра SP-9 «очищались» с помощью специальной процедуры фильтрации данных от влияния полупрозрачной облачности [12].

В измерениях характеристик аэрозоля в приземном слое воздуха использовались два комплекта однотипных приборов: фотоэлектрические счетчики частиц АЗ-10 [23] и аэталометры МДА-02 [24, 25]. По результатам измерений этих приборов определялись: счетная концентрация частиц в шести интервалах радиусов $r = 0,15–5$ мкм с последующим расчетом общей концентрации N_A (см⁻³), мелкодисперсной N_f ($r = 0,15–0,5$ мкм) и грубодисперсной N_c ($r > 0,5$ мкм) фракций частиц; массовая концентрация аэрозоля M_A (мкг·м⁻³); массовая концентрация поглощающего вещества («сажи») в мелкодисперсном аэрозоле M_{BC} (мкг·м⁻³) (согласно классификации [26] — «equivalent black carbon»).

Измерения характеристик приземного аэрозоля выполнялись с 5 июля по 14 августа, круглосуточно, каждый час со временем экспозиции 10 мин. В отдельных случаях для оценок внутрисуточной изменчивости выполнялись серии из двух или четырех краткосрочных измерений так, чтобы общая экспозиция серии по-прежнему была равна 10 мин. При этом в первые двое суток осуществлялись интеркалибровочные измерения в фоновом районе (КАО), затем с 7 июля по 8 августа — параллельные измерения и отбор проб в двух разнесенных пунктах («город–фон»), и с 9 по 14 августа — еще один цикл

контрольных измерений всеми приборами в городе. Результаты интеркалибровочных (фон) и контрольных (город) измерений использовались в дальнейшем для коррекции полученных данных, чтобы обеспечить их сопоставимость в пределах неустрашимых аппаратурных погрешностей используемых приборов.

Для определения ионного состава аэрозоля и газообразных примесей в обоих пунктах проводился отбор проб воздуха на блок фильтров с последующим анализом в лабораторных условиях. Такой метод широко применяется в международных сетях мониторинга атмосферных выпадений [27]. Суть метода заключается в последовательной прокачке воздуха через тефлоновый фильтр (фильтр 1, PTFE) для отбора проб аэрозоля, затем через полиамидный (фильтр 2, Ultipor) и импрегнированные фильтры (Whatman) с щелочной (фильтр 3) и кислой основой (фильтр 4) для отбора газовых примесей. Продолжительность отбора (прокачки воздуха через фильтры) составляла 8–10 ч. По результатам химического анализа проб с использованием метода ионной хроматографии (подробнее см. [12]) определялись ионный состав аэрозоля (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Br^-) и содержание газообразных примесей (SO_2 , NH_3 , HCl , HNO_3), которые могут участвовать в процессах модификации аэрозольных частиц.

Метеорологическое обеспечение эксперимента осуществлялось с помощью двух современных ультразвуковых метеостанций: Vaisala WXT-520 – измерения в фоновых условиях, и Метео-2 (разработка ИОА СО РАН [28]) – измерения в городе. Измерения осуществлялись круглосуточно и непрерывно с последующим формированием рядов метеорологических параметров с трехсекундным усреднением.

Синоптические условия на Среднем Урале летом 2014 г. в основном определялись устойчивыми блокирующими антициклонами в европейской части России, что препятствовало перемещению атлантических циклонов на восток, смещая траектории их движения севернее или южнее. В июле антициклонические процессы в Восточной Европе привели к преобладанию на Среднем Урале северо-западных и северных направлений ветра с неустойчивой дождливой погодой и сравнительно невысокими температурами воздуха [29].

С помощью программного обеспечения HYSPLIT_4 [30, 31] и специализированной (предназначенной для анализа результатов атмосферных измерений) библиотеки программ в среде R [32] было рассчитано множество обратных траекторий движения воздушных потоков, начинающихся в районе эксперимента на разных высотах в каждый час, когда выполнялись измерения. В качестве исходных данных использовались метеорологические поля из базы данных реанализа NOAA-NCEP/NCAR за 2014 г. (пространственное разрешение $2,5^\circ \times 2,5^\circ$, разрешение по времени 6 ч, 17 уровней по высоте) [33]. Длительность рассчитываемых обратных траекторий задавалась равной 96 ч. На рис. 1 (цв. вкладка) показаны выборки обратных траекторий, стартовавших

в городском пункте измерений в 00:00, 06:00, 12:00, 18:00 на высоте 500 м, что примерно соответствует середине высоты пограничного слоя атмосферы. Точками помечены места «завершения» обратных траекторий, т.е. места, откуда воздушные потоки приходили в район эксперимента.

Из рис. 1 видно, что общий характер переноса воздуха в июле и начале августа существенно различен. В июле воздушные потоки приходили по кратчайшему пути со стороны арктических морей, а другие направления представлены единичными траекториями. Такой необычный характер переноса объясняется длительным блокирующим действием европейских антициклонов. В августе направления переносов воздуха были разнообразны, но они приходили преимущественно над континентом: со стороны Скандинавии, полуострова Ямал, Обской губы и Гыданского полуострова, а также в группе «ближних» траекторий – из соседних районов. В нижней части рис. 1 показан «календарь» с результатами измерений среднесуточной счетной концентрации мелкодисперсного аэрозоля в Екатеринбурге, который иллюстрирует связь траекторий дальнего переноса воздушных потоков с датами изменений счетных концентраций частиц аэрозоля.

Аэрозольная оптическая толща атмосферы

В отличие от характеристик приземного аэрозоля [21], измеряемых непрерывно, количество измерений в столбе атмосферы гораздо меньше: за время комплексного эксперимента получено 118 среднечасовых значений АОТ в городе и 159 значений в фоновом районе. Это объясняется тем, что измерения солнечных фотометров проводятся только в условиях ясной или малооблачной погоды. По этой причине данные фотометрических наблюдений можно использовать преимущественно для оценки связи между АОТ и концентрацией аэрозоля в приземном слое воздуха, а для анализа различий АОТ в соседних районах («город–фон») желательны более продолжительные двухточечные измерения – за весь 2014 г. или более.

Тем не менее даже за относительно короткий период комплексного эксперимента среднее значение АОТ на длине волны 0,5 мкм для множества всех единичных измерений составило 0,18 в фоновом районе и 0,22 в городе. Разница 0,04 заметно превышает погрешности измерений АОТ солнечных фотометров, которые составляют от 0,01 до 0,02. Анализ с использованием непараметрического U -критерия Манна–Уитни показывает, что полученное различие статистически значимо ($p < 0,05$) для всех длин волн, кроме 0,34 мкм.

Если в выборке оставить только парные синхронные измерения, усредненные за каждый час в период проведения эксперимента, то размер выборки уменьшится до 63 значений и различия станут статистически незначимыми в коротковолновой части спектра – на длинах волн от 0,34 до 0,5 мкм (таблица).

Средние (\pm СКО) значения АОТ, измеренные в соседних районах («город–фон»)

Характеристика	Июль–август 2014 г.		Весь 2014 г.		Лето 2010 г. [16]	
	город	фон	город	фон	город	фон
$\tau_{0,34}$	0,35 \pm 0,19	0,34 \pm 0,17	0,25 \pm 0,13	0,22 \pm 0,13	0,18 \pm 0,07	0,13 \pm 0,07
$\tau_{0,38}$	0,33 \pm 0,17	0,30 \pm 0,15	0,23 \pm 0,12	0,19 \pm 0,12	0,16 \pm 0,07	0,11 \pm 0,06
$\tau_{0,44}$	0,27 \pm 0,14	0,24 \pm 0,13	0,18 \pm 0,10	0,16 \pm 0,10	0,15 \pm 0,04	0,09 \pm 0,05
$\tau_{0,5}$	0,23 \pm 0,12	0,21 \pm 0,11	0,16 \pm 0,08	0,14 \pm 0,08	0,12 \pm 0,05	0,08 \pm 0,05
$\tau_{0,675}$	0,14 \pm 0,07	0,12 \pm 0,07	0,11 \pm 0,05	0,08 \pm 0,06	0,05 \pm 0,03	0,05 \pm 0,03
$\tau_{0,87}$	0,10 \pm 0,05	0,08 \pm 0,04	0,09 \pm 0,04	0,06 \pm 0,04	0,05 \pm 0,03	0,04 \pm 0,03
$\tau_{1,02}$	0,07 \pm 0,04	0,06 \pm 0,03	0,07 \pm 0,04	0,06 \pm 0,04	0,04 \pm 0,03	0,03 \pm 0,02

Анализ результатов парных синхронных измерений, выполненных за весь 2014 г., показал, что среднечасовые значения АОТ во всем диапазоне спектра для города статистически значимы больше, чем в фоновом районе (см. таблицу). Значения АОТ, которые согласно непараметрическому U -критерию Манна–Уитни соответствуют статистически значимым различиям «город–фон», выделены жирным шрифтом.

Для сравнения в таблице представлены также данные аналогичных («город–фон») измерений АОТ, выполненных на Среднем Урале летом 2010 г. [16]. Сопоставление трех типов экспериментов позволяет сделать вывод, что во всех случаях в Екатеринбурге наблюдаются более высокие значения АОТ, чем в КАО, но статистическая значимость различий зависит от продолжительности анализируемых периодов. Для коротких периодов из-за специфики погодных условий или погрешности измерений различия АОТ в том или ином участке спектра могут становиться незначимыми.

Поскольку городской аэрозоль имеет антропогенное происхождение, то его влияние может меняться в течение суток в зависимости от интенсивности техногенной деятельности. На рис. 2 показано сравнение дневного хода АОТ на длине волны 0,5 мкм для городских и фоновых условий. Верхняя и нижняя границы «боксов» соответствуют первому и третьему квартилям, горизонтальная полоса – медиане, скошенные «засечки» у медианы – грубая оценка 95%-го доверительного интервала для разницы медиан. Перекрытие скошенных «засечек» позволяет ожидать статистическую неразличимость медиан сравниваемых выборок. Максимальные значения в большинстве случаев выходят за рамку рисунка. Толщина «боксов» зависит от числа измерений в выборке, соответствующей определенному часу.

Из рис. 2 видно, что дневной ход АОТ в городских условиях проявляется более резко, чем в фоновых условиях – различия медиан АОТ для смежных часов в КАО статистически незначимы. В городе явно выделяются два максимума – утренний и вечерний (11:00 и 18:00), что, по-видимому, связано с интенсивностью движения городского транспорта. Медиана дневного минимума АОТ в 15:00 в фоновых условиях ниже, а в городских выше значения 0,1.

Представляет интерес рассмотреть особенности взаимосвязей АОТ и концентраций аэрозоля в приземном слое атмосферы в двух пунктах наблюдений.

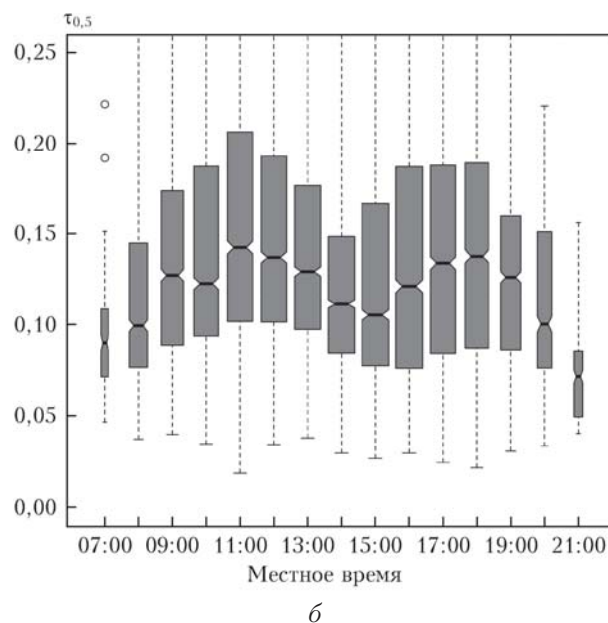
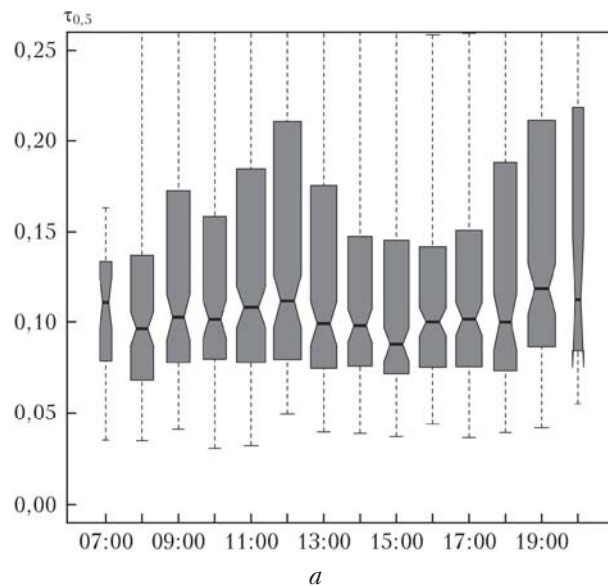


Рис. 2. Дневной ход $\tau_{0,5}$ по данным 2014 г.: а – измерения в КАО (фон); б – измерения в ИПЭ (город)

(Взаимосвязи других характеристик более подробно приведены во второй части [21].) На основе результатов измерений функций распределений частиц аэрозоля по размерам $f(r)$ по формуле

$V = (4/3) \cdot \pi \int f(r) \cdot r^3 dr \approx (4/3) \cdot \pi \cdot \sum N_i \cdot r_{i+1/2}^3$ были рассчитаны объемные концентрации для мелкодисперсной V_f ($r \leq 0,5$ мкм), грубодисперсной V_c ($r > 0,5$ мкм) фракций, а также их сумма V_A (мкм³/см³). В формуле использованы следующие обозначения: N_i — число частиц в интервале радиусов от r_i до r_{i+1} по данным счетчика частиц; $r_{i+1/2}$ — радиус частиц, соответствующий середине рассматриваемого интервала.

На основе этих данных для городского и фоновых районов были найдены уравнения линейной регрессии, связывающие значения среднечасовых объемных концентраций аэрозоля в приземном слое со значением АОТ атмосферы на длине волны 0,5 мкм. Для городских условий эти уравнения имеют вид: $V_f = 16,67 \cdot \tau_{0,5}$ ($R = 0,70$), $V_c = 6,65 \cdot \tau_{0,5}$ ($R = 0,58$), $V_A = 23,31 \cdot \tau_{0,5}$ ($R = 0,69$). Для фоновых условий: $V_f = 12,17 \cdot \tau_{0,5}$ ($R = 0,62$), $V_c = 1,65 \cdot \tau_{0,5} + 0,30$ ($R = 0,47$) и $V_A = 13,82 \cdot \tau_{0,5}$ ($R = 0,63$). Соответствующие диаграммы рассеяния приведены на рис. 3.

Видно, что регрессия «АОТ– V » для города имеет несколько более высокие значения коэф-

фициентов корреляции. Кроме того, статистическая связь АОТ лучше проявляется с объемной концентрацией мелкодисперсного аэрозоля. Анализ аналогичных регрессионных зависимостей для других длин волн показал, что наиболее сильные корреляции наблюдаются между АОТ в коротковолновой части спектра и объемными концентрациями мелкодисперсной фракции аэрозоля. Например, коэффициент корреляции $\tau_{0,34}$ и V_f составляет 0,74, а между $\tau_{2,13}$ и V_f уменьшается до 0,48. Для грубодисперсного аэрозоля зависимость коэффициента корреляции V_c от длины волны АОТ в фоновых условиях практически отсутствует (он изменяется от 0,49 до 0,45), тогда как в городских условиях изменение более существенное (от 0,58 до 0,38).

Зависимости такого рода могут быть использованы для грубой оценки приземных концентраций аэрозоля по данным фотометрических наблюдений (наземных или спутниковых) для сходных метеорологических условий.

Поскольку в информационной системе AERONET наряду с другими параметрами восстанавливается также объемное содержание мелкодисперсной C_{V_f}

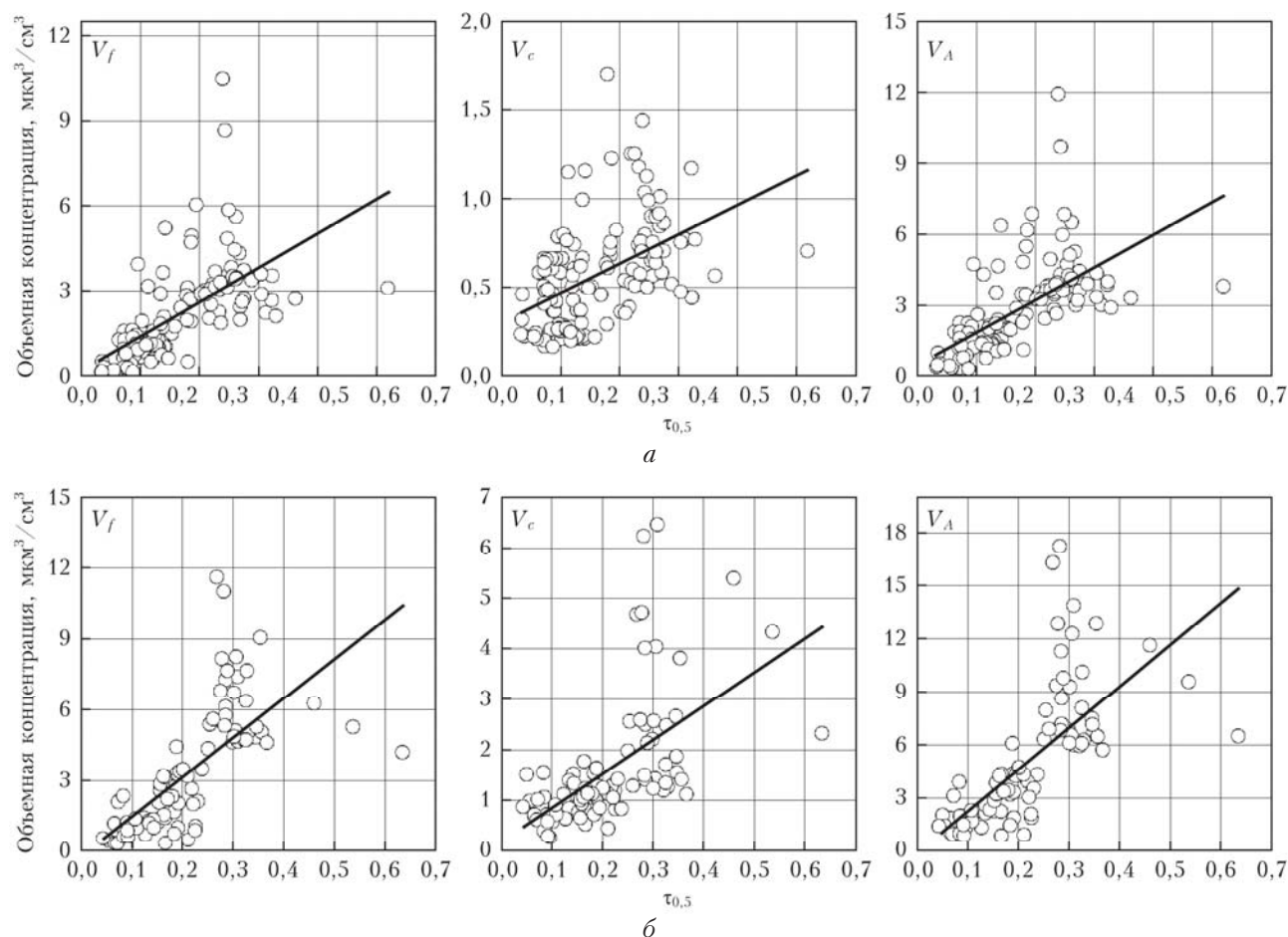


Рис. 3. Диаграммы рассеяния среднечасовых АОТ на длине волны 0,5 мкм и приземных объемных концентраций аэрозоля V_f , V_c , V_A : а — измерения в КАО (фон); б — измерения в ИПЭ (город)

и грубодисперсной C_V фракций аэрозоля в столбе атмосферы, имелась возможность сравнить эти величины с концентрациями мелкодисперсного и грубодисперсного аэрозоля в приземном слое воздуха. Количество синхронных парных измерений такого типа составило 21. Обнаружено, что содержание мелкодисперсного аэрозоля в столбе атмосферы C_{V_f} (и, как следствие, C_{V_A}) хорошо коррелирует с приземной объемной концентрацией V_f : $R = 0,79$. На рис. 4 показан разброс экспериментальных точек около линии регрессии для мелкодисперсной и полной концентраций аэрозоля. Полученный результат говорит о хорошей согласованности независимых измерений приземной концентрации и метода восстановления объемной функции распределения аэрозольных частиц в столбе атмосферы по данным солнечной фотометрии. Кроме того, эти результаты хорошо согласуются с предположением о существенном влиянии приземного аэрозоля на характеристики аэрозоля в столбе атмосферы, сформулированным по данным измерений «город–фон». При этом связь грубодисперсной фракции аэрозоля в столбе

атмосферы C_V и в приземном слое V_c статистически незначима. Это можно объяснить локальным характером вертикальных и горизонтальных переносов грубодисперсного аэрозоля и, соответственно, небольшим радиусом его пространственной корреляции. Мелкодисперсный аэрозоль, в отличие от грубодисперсного, в значительной степени имеет региональное значение. Поэтому его вариации как в столбе атмосферы, так и в приземном слое коррелируют с изменением синоптических условий в регионе и суточными ритмами метеопараметров.

Во второй части статьи будет продолжен сравнительный анализ характеристик аэрозоля, измеренных в приземном слое атмосферы городского и фоновых районов: концентрации аэрозоля и «сажи», особенности их суточного хода, ионный и элементный состав водорастворимой фракции аэрозоля, а также взаимосвязи различных характеристик в период проведения двухточечного комплексного эксперимента.

Авторы работы выражают благодарность С.А. Бересневу, С.Ю. Горде (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия); П.Е. Захаровой, Д.В. Гламазде (Коуровская астрономическая обсерватория, Россия), М.В. Панченко, Д.М. Кабанову (Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск, Россия); B.N. Holben, A.V. Smirnov (Центр космических полетов Годдарда (GSFC/NASA), Greenbelt, USA).

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта фундаментальных исследований ИПЭ УрО РАН № 15-ИПЭ-03 и проекта № 14-921-1-10 фундаментальных и поисковых научных исследований, выполняемого в рамках соглашения о сотрудничестве УрФУ и УрО РАН, «Моделирование процессов переноса атмосферного аэрозоля», проекта № 15.4 Программы президиума РАН и ЦКП «Ультрамикрoанализ».

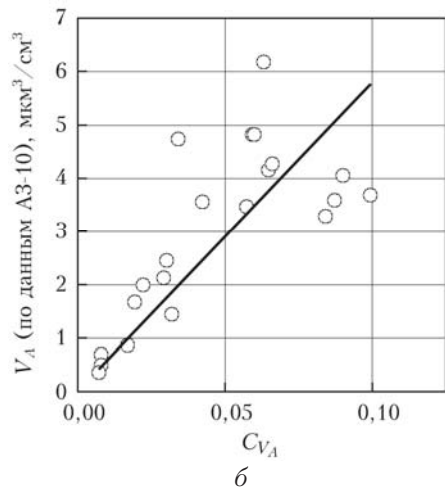
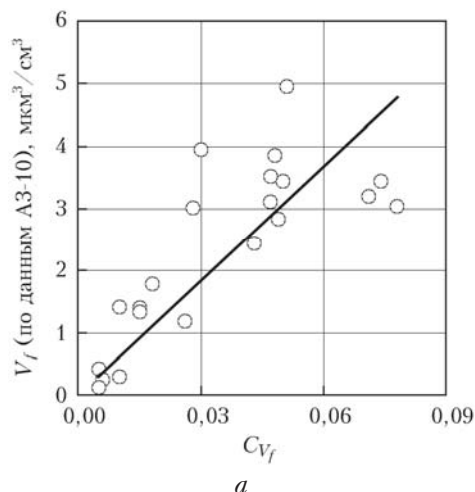


Рис. 4. Диаграммы рассеяния среднесуточных объемных концентраций аэрозоля, измеренных в столбе атмосферы и приземном слое: а – для мелкодисперсной фракции (C_{V_f} и V_f); б – для общего содержания аэрозоля (C_{V_A} и V_A)

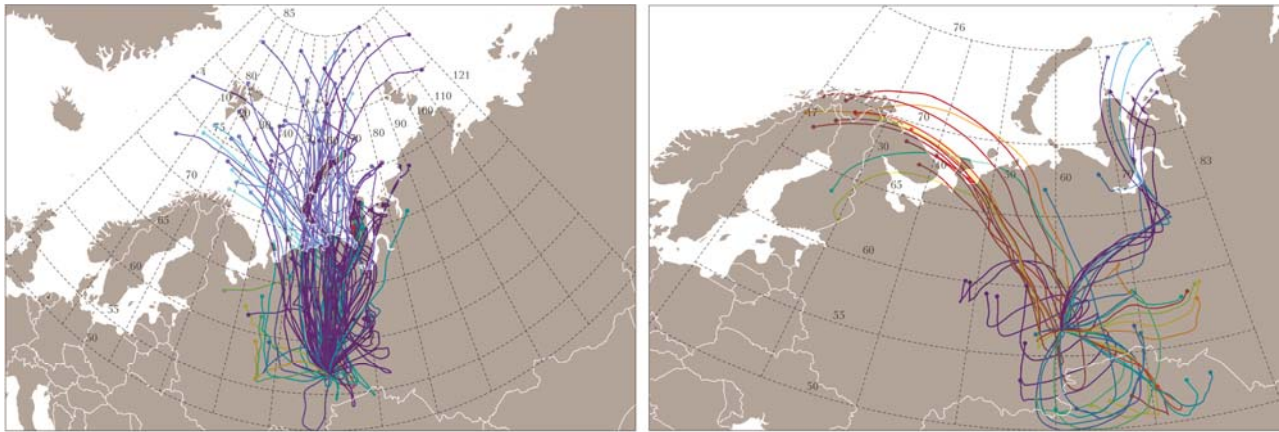
1. Myhre G., Shindell D., Bréon F.-M., Collins W., Fuglestvedt J., Huang J., Koch D., Lamarque J.-F., Lee D., Mendoza B., Nakajima T., Robock A., Stephens G., Takemura T., Zhang H. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing // Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2013. P. 659–740.
2. Fuzzi S., Baltensperger U., Carslaw K., Decesari S., Denier van der Gon H., Facchini M.C., Fowler D., Koren I., Langford B., Lohmann U., Nemitz E., Pandis S., Riipinen I., Rudich Y., Schaap M., Slowik J.G., Spracklen D.V., Vignati E., Wild M., Williams M., Gilardoni S. Particulate matter, air quality and climate: Lessons learned and future needs // Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15, N 14. P. 8217–8299. DOI: 10.5194/acp-15-8217-2015.
3. Ивлев Л.С. Аэрозольное воздействие на климатические процессы // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 5. С. 392–410.
4. Holben B.N., Eck T.F., 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. Env. 1998. V. 66, N 1. P. 1–16.

5. Dubovik O.T., King M. A flexible inversion algorithm for retrieval aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // J. Geophys. Res. D. 2000. V. 105, N 16. P. 20673–20696.
6. Улюмджиева Н.Н., Чубарова Н.Е., Смирнов А.Н. Характеристики атмосферного аэрозоля в Москве по данным солнечного фотометра CIMEL // Метеорол. и гидрол. 2005. № 1. С. 48–57.
7. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Панченко М.В., Польшкин В.В., Холбен Б.Н., Смирнов А.В., Береснев С.А., Горда С.Ю., Корниченко Г.И., Николашкин С.В., Поддубный В.А., Тацилин М.А. Результаты мониторинга атмосферного аэрозоля в азиатской части России по программе AEROSIBNET в 2004 г. // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 11. С. 968–975.
8. Горчаков Г.И., Свириденков М.А., Семутникова Е.Г., Чубарова Н.Е., Холбен Б.Н., Смирнов А.В., Емиленко А.С., Исаков А.А., Копейкин В.М., Карпов А.В., Лезина Е.А., Задорожная О.С. Оптические и микрофизические характеристики аэрозоля задымленной атмосферы московского региона в 2010 г. // Докл. АН. 2011. Т. 437, № 5. С. 686–690.
9. Поддубный В.А., Лужецкая А.П., Маркелов Ю.И., Береснев С.А., Горда С.Ю., Сакерин С.М. Особенности оптических характеристик атмосферного аэрозоля на Среднем Урале // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2013. Т. 49, № 3. С. 314–322.
10. Бедарева Т.В., Журавлева Т.Б. Оценка аэрозольного поглощения в летних условиях Западной Сибири по данным солнечной фотометрии // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 12. С. 1023–1030; Bedareva T.V., Zhuravleva T.B. Estimation of aerosol absorption under summer conditions of Western Siberia from sun photometer data // Atmos. Ocean. Opt. 2012. V. 25, N 3. P. 216–223.
11. Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Назаров Б.И. Сезонные изменения параметров атмосферы по данным AERONET // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 1. С. 76–85.
12. Исследование радиационных характеристик аэрозоля в азиатской части России / Под ред. С.М. Сакерина. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2012. 484 с.
13. Горбаренко Е.В. Аэрозольная составляющая оптической толщины атмосферы как характеристика антропогенного загрязнения воздуха над промышленными центрами // Метеорол. и гидрол. 1997. № 3. С. 12–18.
14. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Насртдинов И.М., Турчинович С.А., Турчинович Ю.С. Результаты двухточечных экспериментов по оценке антропогенного воздействия города на характеристики прозрачности атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 12. С. 1108–1113; Sakerin S.M., Kabanov D.M., Nasrtdinov I.M., Turchinovich S.A., Turchinovich Yu.S. The results of two-point experiments on the estimation of the urban anthropogenic effect on the characteristics of atmospheric transparency // Atmos. Ocean. Opt. 2010. V. 23, N 2. P. 88–94.
15. Chubarova N.Y., Sviridenkov M.A., Smirnov A., Holben B.N. Assessments of urban aerosol pollution in Moscow and its radiative effects // Atmos. Measur. Technol. 2011. V. 4. P. 367–378.
16. Поддубный В.А., Лужецкая А.П., Маркелов Ю.И., Кабанов Д.М. Оценка влияния города на аэрозольное замутнение атмосферы по данным двухточечных измерений «фон – промышленный город» // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 4. С. 319–326; Poddubny V.A., Luzhetskaya A.P., Markelov Yu.I., Kabanov D.M. Estimate of the urban effect on aerosol turbidity of the atmosphere according to data of two-point “background–industrial city” measurements // Atmos. Ocean. Opt. 2012. V. 25, N 5. P. 364–371.
17. Ужегова Н.В., Антохин П.Н., Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Фофанов А.В. Выделение антропогенного вклада в изменение температуры, влажности, газового и аэрозольного состава городского воздуха // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 7. С. 589–596.
18. Яушева Е.П., Панченко М.В., Козлов В.С., Терпугова С.А., Чернов Д.Г. Влияние города на аэрозольные характеристики атмосферы Академгородка г. Томска в переходные сезоны // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 11. С. 981–988.
19. 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 атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 6. С. 473–482.
20. Хуриганова О.И., Оболкин В.А., Потемкин В.Л., Ходжер Т.В., Артемьева О.В., Голобокова Л.П. Концентрация озона в приземном слое тропосферы в урбанизированных, сельских и фоновых районах Восточной Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 6. С. 579–584.
21. Поддубный В.А., Польшкин В.В., Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Лужецкая А.П., Маркелов Ю.И., Дубинкина Е.С., Хуриганова О.И. Комплексный аэрозольный эксперимент на Среднем Урале. Часть 2. Характеристики аэрозоля в приземном слое атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 12. С. 1011–1022.
22. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ростов А.П., Турчинович С.А., Князев В.В. Солнечные фотометры для измерений спектральной прозрачности атмосферы в стационарных и мобильных условиях // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1112–1117; Sakerin S.M., Kabanov D.M., Rostov A.P., Turchinovich S.A., Knyazev V.V. Sun photometers for measuring spectral air transparency in stationary and mobile conditions // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 4. P. 352–356.
23. Счетчик аэрозольных частиц АЗ-10. Руководство по эксплуатации. ЭКИТ 7.830.000 РЭ. Москва, 2010. 13 с.
24. Козлов В.С., Шмаргунов В.П., Польшкин В.В. Спектрофотометры для исследования характеристик поглощения света аэрозольными частицами // Приборы и техн. эксперим. 2008. № 5. С. 155–157.
25. Kozlov V.S., Yaushcheva E.P., Terpugova S.A., Panchenko M.V., Chernov D.G., Shmargunov V.P. Optical-microphysical properties of smoke haze from Siberian forest fires in summer 2012 // Int. J. Remote Sens. 2014. V. 35, N 15. P. 5722–5741.
26. Lack D.A., Moosmüller H., McMeeking G.R., Chakrabarty R.K., Baumgardner D. Characterizing elemental, equivalent black, and refractory black carbon aerosol particles: A review of techniques, their limitations and uncertainties // Anal. Bioanal. Chem. 2014. V. 406. P. 99–122. DOI: 10.1007/s00216-013-7402-3.
27. Manual for sampling and chemical analysis, EMEP Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe, NILU: EMEP/CCC-Report 1/95, Reference: 0-7726. EMEP, 1996. 176 p.
28. Гладких В.А., Макиенко А.Э. Цифровая ультразвуковая метеостанция // Приборы. 2009. № 7(109). С. 21–25.
29. URL: <http://kpfu.ru/meteorologicheskie-itogi-2014-goda-v-gkazani-po.html>
30. URL: <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>

31. *Draxler R.R., Hess G.D.* An overview of the HYSPLIT-4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition // Austral. Meteorol. Magazine. 1998. V. 47. P. 295–308.
32. *Carslaw D.C., Ropkins K.* Openair – an R package for air quality data analysis // Environ. Modell. Software. 2012. V. 27–28. P. 52–61.
33. URL: <http://arlftp.arl.noaa.gov/archives/reanalysis/>

V.A. Poddubnyi, V.V. Pol'kin, S.M. Sakerin, L.P. Golobokova, A.P. Luhzetskaya, Yu.I. Markelov, E.S. Dubinkina, O.I. Khuriganova. **Complex aerosol experiment at the Middle Urals. Part 1. Experimental conditions and results of photometric measurements.**

We discuss the results of complex aerosol experiment, performed during 2014 in two Middle Ural regions: Yekaterinburg and Kourovka astronomical observatory (background region). The measurements of aerosol characteristics were conducted using sun photometers, photoelectric particle counters, aethalometers, and devices collecting aerosol samples on filters. We analyze the differences in the optical characteristics of aerosol between the two regions and specific features of its diurnal behavior, as well as interrelation between aerosol parameters in atmospheric column and near-ground layer. Estimates of how aerosol characteristics depend on meteorological conditions, including air mass back trajectories, are presented. We note that higher atmospheric turbidities are observed in Yekaterinburg than in background region, but the statistical significance of AOD differences (from 0.01 to 0.04) depends on the length of periods analyzed.



a

б



в

Рис. 1. Выборки обратных траекторий движения воздушных потоков, начинающихся в пункте мониторинга в г. Екатеринбург в 00:00; 06:00; 12:00; 18:00 на высоте 500 м, продолжительностью 96 ч: *a* – за июль; *б* – за август; *в* – соответствующие им среднесуточные счетные концентрации приземного мелкодисперсного аэрозоля (показаны цветом) в период проведения эксперимента