

УДК 551.510 : 551.521

Сибирская дымная мгла над европейской территорией России в июле 2016 г. Загрязнение атмосферы и радиационные эффекты

Е.Г. Семутникова, Г.И. Горчаков, С.А. Ситнов, В.М. Копейкин,
А.В. Карпов, И.А. Горчакова, Т.Я. Пономарева, А.А. Исаков,
Р.А. Гуцин, О.И. Даценко, Г.А. Курбатов, Г.А. Кузнецов*

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3*

Поступила в редакцию 13.06.2017 г.

Охарактеризовано крупномасштабное задымление европейской территории России (ЕТР) и прилегающих областей в июле 2016 г., обусловленное дальним переносом из охваченных лесными пожарами регионов Сибири, что подтверждается результатами расчетов обратных десятисуточных траекторий воздушных масс в города ЕТР от Архангельска до Ростова-на-Дону. Площадь задымления ЕТР с превышением АОТ 0,3 (при среднем значении 0,43 и максимальном 2,5) 25.07.2016 г. достигала 5 млн км², а суммарная масса дыма составляла ~1,2 млн т. Показано, что в Московском регионе в период с 24 по 27.07.2016 г. массовые среднесуточные концентрации аэрозоля с размерами частиц меньше 2,5 мкм превышали соответствующую предельно допустимую концентрацию. Оценено влияние местных источников на аэрозольное и газовое загрязнение атмосферного воздуха. Обнаружен дефицит угарного газа в дымной мгле 2016 г. по сравнению с задымлением 2010 г. Показано, что термическая и ветровая стратификация в пограничном слое атмосферы заметно влияла на уровень загрязнения в задымленной городской атмосфере. Получены оценки радиационных эффектов дымового аэрозоля. Средний аэрозольный радиационный форсинг на верхней и нижней границах задымленной атмосферы ЕТР 25.07.2016 г. составлял –29 и –53 Вт/м², а экстремальный достигал –112 и –215 Вт/м² соответственно.

Ключевые слова: крупномасштабная дымная мгла, дальний перенос, дымовой аэрозоль, массовая концентрация аэрозоля, дефицит угарного газа, аэрозольный радиационный форсинг, MODIS, AERONET; large-scale smoke haze, long-range transport, smoke aerosol, aerosol mass concentration, carbon monoxide deficiency, aerosol radiative forcing, MODIS, AERONET.

Введение

Дымная мгла на европейской территории России (ЕТР) и прилегающих регионах в июле 2016 г. уникальна, поскольку она возникла благодаря дальнему переносу дыма из охваченных лесными пожарами областей Сибири [1]. В настоящее время крупномасштабными задымлениями территории России и последствиями этих задымлений интересуется широкий круг специалистов [2–16]. На ЕТР крупномасштабные задымления происходили в 1972, 2002 и 2010 гг. [17–25]. Задымление 2016 г. было

обнаружено в Московском регионе 24 июля по повышенным значениям массовой концентрации аэрозоля с размерами частиц меньше 10 мкм (PM₁₀) на постах контроля качества атмосферного воздуха ГБПУ «Мосэкомониторинг» [26] и по данным измерений массовой концентрации субмикронного аэрозоля на Звенигородской научной станции (ЗНС) Института физики атмосферы РАН (ИФА), а также по данным мониторинга аэрозольной оптической толщины (АОТ) и уменьшению дальности видимости. О больших масштабах задымления свидетельствовали данные мониторинга АОТ спектро-радиометрами MODIS на спутниках Aqua и Terra.

Цель настоящей работы – количественная характеристика масштабов задымления и его радиационных эффектов на ЕТР и прилегающих территориях в июле 2016 г., а также оценка уровня аэрозольного и газового загрязнения задымленной атмосферы Московского региона.

Используемые данные

Для оценки масштабов задымления ЕТР и радиационных эффектов дымового аэрозоля (ДА) использовались данные мониторинга АОТ на длине

* Евгения Геннадьевна Семутникова (egsemutnikova@mail.ru); Геннадий Ильич Горчаков (gengor@ifaran.ru); Сергей Африканович Ситнов (ssitnov@mail.ru); Владимир Михайлович Копейкин (kopeikin@ifaran.ru); Алексей Владимирович Карпов (karpov@ifaran.ru); Ираида Александровна Горчакова (gorchakova@ifaran.ru); Татьяна Яковлевна Пономарева (ponomareva_tya@mail.ru); Андрей Александрович Исаков (A.A.Isakov@mail.ru); Роман Альбертович Гуцин (roma-max7@mail.ru); Олег Игоревич Даценко (datoleg@yandex.ru); Григорий Александрович Курбатов (kurbatov_ga@physics.msu.ru); Герман Алексеевич Кузнецов (german-710@yandex.ru).

волны 550 нм спектрометрией MODIS (платформы Aqua и Terra) [27–29]. Пространственные распределения АОТ MODIS (V6) с разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ (L3) получены с помощью системы анализа и визуализации данных Giovanni [30].

Оценка аэрозольного и газового загрязнения атмосферного воздуха в Московском регионе проводилась на основе результатов измерений массовой концентрации субмикронного аэрозоля на ЗНС ИФА, данных мониторинга массовой концентрации аэрозоля ($PM_{2.5}$ и PM_{10}) и массовых концентраций угарного газа и оксидов азота в г. Москве, а также вертикальных профилей (на телебашне Останкино) концентрации угарного газа сети автоматических постов контроля качества атмосферного воздуха ГБПУ «Мосэкомониторинг» (<http://www.mosecom.ru>).

Кроме того, использовались данные измерений АОТ (L1.0) на станциях AERONET [31] (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>) Екатеринбург, Москва, Звенигород и Минск для периода задымления, а также результаты восстановления [32] оптических и микрофизических характеристик аэрозоля (уровень L1.5) на постах Екатеринбург и Минск.

Проанализированы вертикальные профили температуры воздуха, измеренные на территории МГУ им. М.В. Ломоносова СВЧ-профилимером МТП-5 [33] и вертикальные профили скорости ветра на телебашне Останкино.

Обратные траектории воздушных масс рассчитаны по методике Гидрометцентра РФ [34].

Масштабы задымления европейской территории России в июле 2016 г.

О масштабах задымления ЕТР и прилегающих территорий в июле 2016 г. можно судить по данным мониторинга АОТ на длине волны 550 нм спектрометрами MODIS на спутниках Aqua и Terra. На рис. 1 показано пространственное распределение АОТ 25.07.2016 г. на территории, ограниченной координатами $45\text{--}70^\circ$ с.ш. и $20\text{--}60^\circ$ в.д. (спутник Aqua).

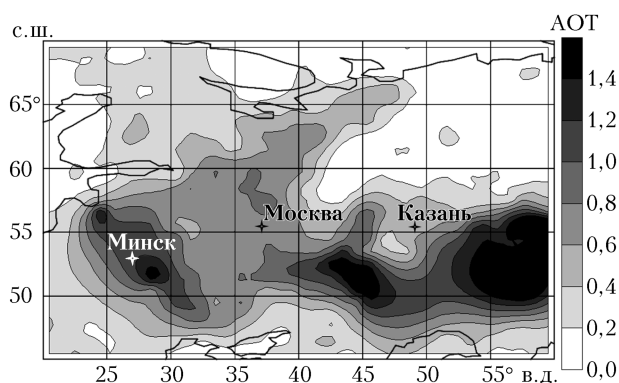


Рис. 1. Пространственное распределение аэрозольной оптической толщины для длины волны 550 нм 25.07.2016 г. по данным MODIS (спутник Aqua)

Среднее значение АОТ 25.07.2016 г. оказалось равным 0,43 при стандартном отклонении 0,37,

а максимальное значение $\sim 2,5$. Эмпирическая функция распределения (ЭФР) АОТ с удовлетворительной точностью аппроксимируется функцией $Ig w = -0,56AOT + 0,17$ или $Ig w = 1,47 \exp(1,28AOT)$. Из полученной ЭФР следует, что 25.07.2016 г. была задымлена ($AOT > 0,3$) территория площадью ~ 5 млн km^2 . Площадь задымленной территории с $AOT > 0,5$ составляла $\sim 2,5$ млн km^2 . В этот день повышенные значения АОТ наблюдались на Южном Урале, в Пензенской обл. и в Восточной Европе от Республики Молдова до стран Балтии.

В период задымления высокие значения АОТ фиксировались в Московском регионе (0,6–2,0). В частности, на станции AERONET Звенигород АОТ достигало 1,1. Выполненная по данным мониторинга на станции AERONET Минск в июле 2016 г. верификация спутниковых данных АОТ в задымленной атмосфере показала, что АОТ MODIS в среднем на 10% превышает АОТ AERONET.

Оптико-микрофизические характеристики ДА, образующегося при массовых пожарах в бореальных лесах России, определяются его тонкодисперсной (субмикронной) фракцией, что подтверждается в рассматриваемом нами случае представленными на сайте AERONET результатами восстановления (уровень L1.5) распределения частиц ДА по размерам на станциях Минск и Екатеринбург. Поэтому для оценки массового содержания ДА в толще атмосферы можно воспользоваться установленным ранее соотношением [23, 35, 36] $M = 0,25 AOT$ ($г/м^2$). Расчеты показали, что полная масса дыма ($AOT > 0,3$) на территории, ограниченной координатами $45\text{--}70^\circ$ с.ш. и $20\text{--}60^\circ$ в.д., составила около 1,2 млн т. Отметим, что во время крупномасштабного задымления ЕТР летом 2010 г. [9, 23] полная масса дыма достигла 1,06 млн т в период с 5 по 9 августа. Большая масса дыма в 2016 г. объясняется большим масштабом задымления.

Дальний перенос дыма из Сибири на ЕТР в июле 2016 г.

В [1] показано, что в третьей декаде июля 2016 г. на территории России наблюдалась необычная циркуляция в тропосфере — перенос воздушных масс с востока на запад. Поскольку во второй половине июля в Сибири были охвачены лесными пожарами огромные территории в Ямало-Ненецком округе, Красноярском крае и Иркутской обл., указанная выше циркуляция атмосферы обеспечила длительный дальний перенос ДА из Сибири на большую часть ЕТР и прилегающие территории. Наглядную информацию о переносе ДА из Сибири на ЕТР дают обратные траектории переноса воздушных масс [34]. На рис. 2 показаны обратные десятисуточные траектории переноса воздушных масс на уровне 850 гПа для Архангельска, Вологды, Москвы, Воронежа и Ростова-на-Дону 25.07.2016 г. (12:00 UTC). Нетрудно видеть, что эти траектории пересекают регионы Сибири, охваченные массовыми лесными пожарами. Аналогичные траектории выявлены для многих других городов на ЕТР.



Рис. 2. Обратные десятидневные траектории переноса воздушных масс в города Архангельск, Вологда, Москва, Воронеж и Ростов-на-Дону из Сибири для 25.07.2016 г.

Аэрозольное загрязнение приземного слоя задымленной атмосферы

Исследование аэрозольного загрязнения задымленной атмосферы необходимо для оценки экологических эффектов задымления [26, 37, 38].

Выше было отмечено, что задымление атмосферы в Московском регионе было обнаружено 24.07.2016 г. по данным мониторинга на постах ГБПУ «Мосэкомониторинг» и по данным измерений массовой концентрации субмикронного аэрозоля нефелометрическим методом на ЗНС ИФА. На рис. 3 показана временная изменчивость массовых концентраций аэрозоля PM_{10} (1) и $PM_{2.5}$ (2) в период с 21 по 30.07.2016 г., а также вариации среднесуточных величин PM_{10} (3) и $PM_{2.5}$ (4) на постах Вешняки (а) и Сухаревская пл. (б). Отмеченные уровни 5 и 6 (0,06 и 0,035 mg/m^3) соответствуют предельно допустимым среднесуточным значениям PM_{10} и $PM_{2.5}$ [39].

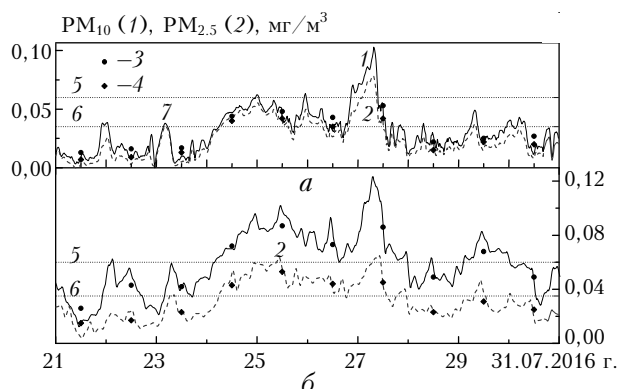


Рис. 3. Вариации массовых концентраций аэрозоля PM_{10} (1) и $PM_{2.5}$ (2) в г. Москве на постах Вешняки (а) и Сухаревская пл. (б) в период с 21.07 по 30.07.2016 г.; среднесуточные значения PM_{10} (3) и $PM_{2.5}$ (4); предельно допустимые среднесуточные концентрации PM_{10} (5) и $PM_{2.5}$ (6); максимум концентрации аэрозоля 23.07.2016 г. (7)

С целью сравнения вариаций массовой концентрации аэрозоля и концентраций газовых примесей в период задымления атмосферы на рис. 4 пред-

ставлены данные измерений PM_{10} на постах Зеленоград 11 (а), Останкино (б) на высоте 2 м, а также на вышеупомянутом посту Сухаревская пл. (в).

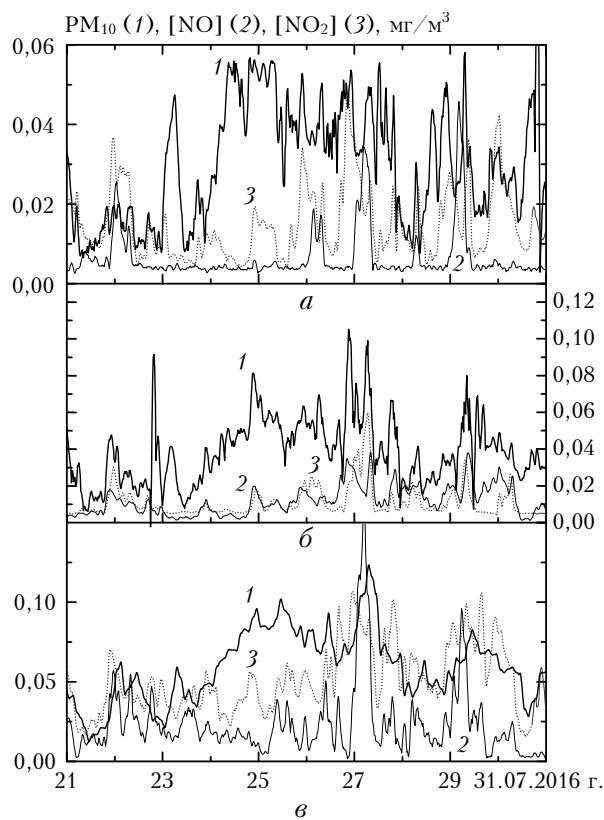


Рис. 4. Вариации PM_{10} (1), массовых концентраций оксида (2) и диоксида (3) азота в период с 21.07 по 30.07.2016 г. на постах Зеленоград 11 (а), Останкино (б) и Сухаревская пл. (в)

Следует отметить, что для удобства восприятия данные, представленные на рис. 3 и 4, получены методом скользящего сглаживания по 9 точкам (временное разрешение исходных данных – 20 мин), что позволило убрать высокочастотные вариации («помехи»). Видно, что задымление заметно повлияло на уровень аэрозольного загрязнения приземного воздуха Московского региона в период с 24 по 27.07.2016 г. На ряде постов, в том числе Вешняки (см. рис. 3, а), в период задымления среднесуточные концентрации $PM_{2.5}$ оказались близкими к среднесуточным концентрациям PM_{10} , что свидетельствует о преобладающем вкладе тонкодисперсной фракции в массовую концентрацию ДА. Это характерно для ДА, образующегося при крупномасштабных пожарах в бореальных лесах России [9, 19]. Легко видеть, что до «объявленного» задымления максимум (7 на рис. 3, а) аэрозольного загрязнения на постах Вешняки и некоторых других 23 июля, когда значения PM_{10} и $PM_{2.5}$ оказались близкими друг к другу (см., например, рис. 3, а), можно объяснить доминированием ДА в воздушном бассейне Москвы.

Отметим, что 25 июля массовая концентрация субмикронного аэрозоля на ЗНС ИФА достигала

примерно $0,06 \text{ мг/м}^3$, что в пределах точности измерений совпало с данными экологического мониторинга $\text{PM}_{2,5}$ на посту Звенигород.

На отдельных постах с повышенным аэрозольным загрязнением и, в частности, на посту Сухаревская пл. (см. рис. 3, б) среднесуточные концентрации $\text{PM}_{2,5}$ были заметно меньше соответствующих значений PM_{10} , что свидетельствует о большом вкладе грубодисперсной фракции в суммарную массу аэрозоля. По совокупности наблюдаемых фактов можно утверждать, что на таких постах в период с 21 по 27.07.2016 г. был велик вклад локальных антропогенных источников в аэрозольное загрязнение атмосферного воздуха. Согласно результатам анализа максимальный абсолютный вклад местных источников в аэрозольное загрязнение на большинстве постов наблюдался 27 июля (см. рис. 3 и 4). Минимальные помехи локальных источников аэрозольного загрязнения отмечены на посту Зеленоград 11 (рис. 4, а). Практически на всех постах в период с 24 по 27.07.2016 г. среднесуточные концентрации $\text{PM}_{2,5}$ превышали предельно допустимую концентрацию $0,035 \text{ мг/м}^3$. Предельно допустимая среднесуточная концентрация PM_{10} ($0,06 \text{ мг/м}^3$) превышалась только на посту Сухаревская пл. (см. рис. 3, б). В целом уровень аэрозольного загрязнения атмосферы Московского региона в июле 2016 г. был намного меньше, чем во время крупномасштабного задымления ЕТР летом 2010 г.

Представляет также большой интерес химический состав дымового аэрозоля [40] и, в том числе, наличие коричневого углерода в частицах ДА [41, 42].

Вариации газового состава задымленной атмосферы

В настоящее время много внимания уделяется исследованиям газового состава задымленной атмосферы [5, 14, 26], который может заметно отличаться от состава незадымленной атмосферы [43, 44].

В период задымления на многих постах экологического контроля фиксировалось повышение концентрации угарного газа. Типичные примеры ее временной изменчивости (при сглаживании с временным интервалом 3 ч) показаны на рис. 5 (кривые 1 и 3). На постах мониторинга, где заметно сказывается влияние локальных источников аэрозольного загрязнения, например на Сухаревской пл. (кривая 2 на рис. 5, а), средний за период с 22 по 30.07.2016 г. уровень концентрации угарного газа заметно выше, чем на постах, где это влияние сравнительно слабое, как, например, на посту Останкино (кривая 1 на рис. 5, а, высота 2 м). Следует отметить, что на территории Новой Москвы, например на посту Рогово (4 на рис. 5, б) и в Зеленограде на посту Зеленоград 11 (кривая 3 на рис. 5, б), концентрации угарного газа в среднем были заметно ниже, чем на территории старой Москвы. Отметим также, что на ряде постов в Новой Москве максимальные концентрации угарного газа наблюдались не 27, а 24, 25 и 26.07.2016 г. Отличие средних концентраций угарного газа на двух

вышеуказанных территориях может быть обусловлено, по крайней мере частично, пространственными неоднородностями состава задымленных воздушных масс.

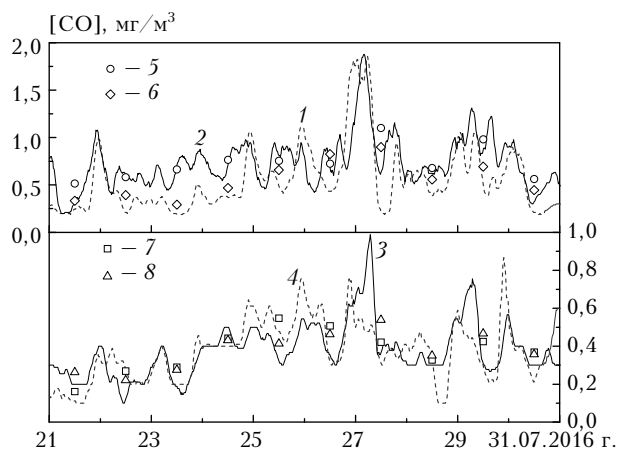


Рис. 5. Массовые концентрации угарного газа на постах Останкино (1), Сухаревская пл. (2), Зеленоград 11 (3) и Рогово (4) в период с 23 по 30.07.2016 г. и соответствующие среднесуточные концентрации (5, 6, 7 и 8)

В начальные дни заметного задымления Московского региона, а именно 24 и 25.07, на большинстве постов, на которых осуществляется мониторинг массовой концентрации аэрозоля, наблюдался «дефицит» концентрации угарного газа по сравнению с задымлением 2010 г., когда отношение концентрации угарного газа к PM_{10} было равно примерно 15 [9, 37]. Указанное отношение среднесуточных концентраций для группы из восьми постов 24 и 25.07.2016 г. было примерно равно 9,0 и 9,5. Максимальные значения этого отношения, в том числе на посту Сухаревская пл., при слабом задымлении с 21 по 23, 28 и 29.07 иногда превышали 25, что можно объяснить особенностями источников загрязнения воздушного бассейна Москвы. 27 июля отношение среднесуточных концентраций угарного газа и аэрозоля составило 16, что было обусловлено повышенным (по сравнению с 24 и 25 июля) вкладом городских антропогенных источников в суммарное загрязнение воздуха вследствие недельного цикла городского загрязнения [45, 46]. Уровни концентрации угарного газа при задымлении атмосферы Московского региона в июле 2016 г. оказались намного ниже соответствующих уровней во время задымления летом 2010 г.

Представляют интерес вариации концентраций оксида и диоксида азота в рассматриваемый период. В частности, на посту Зеленоград 11 (см. рис. 4, а) 23–25 июля суммарная концентрация оксидов азота (2 и 3) была очень мала, $\sim 0,05 \text{ мг/м}^3$, а 26 и 27 июля наблюдались очень высокие всплески, обусловленные действием местных источников при повышенной стабильности атмосферы. Суточный ход концентрации диоксида азота 23 и 24 июля свидетельствует о том, что в поступавшей в Московский регион задымленной воздушной массе суммарная концентрация

оксидов азота NO_x была довольно низкой, что должно объясняться (1) реакцией оксида азота с озоном во время переноса воздушной массы и (2) переходом диоксида азота в аэрозольную фазу в процессе химических и фотохимических превращений. Потери диоксида азота за счет сухого осаждения не могли быть решающими, поскольку оно не привело к радикальному снижению массовой концентрации ДА. Всплески концентрации диоксида азота (преимущественно ночные) на посту Зеленоград 11 можно объяснить местными источниками оксида азота и его окислением озоном [47]. На посту Сухаревская пл. (см. рис. 4, в) выбросы оксида азота были существенно больше, и поэтому, в частности, концентрации оксидов азота на этом посту в период задымления не снижались до нуля.

Угарный газ в пограничном слое атмосферы

Повышенные значения АОТ в период задымления свидетельствуют о заметном загрязнении тропосферы и, в том числе, пограничного слоя атмосферы, аэрозолями, угарным газом и оксидами азота [3, 5, 21, 26], а также другими газовыми примесями. Количественные оценки загрязнения пограничного слоя воздуха в Московском регионе можно получить по наблюдаемым вертикальным профилям концентрации угарного газа, которые измеряются на телебашне Останкино (уровни 2, 130, 248 и 348 м).

На рис. 6 показаны профили среднесуточных концентраций угарного газа по данным измерений 24 (1) и 25 июля (2) на телебашне Останкино. Отчетливо виден максимум концентрации угарного газа на уровне 248 м, который по-видимому, обусловлен переносом слоя задымленного воздуха на высотах примерно от 100 до 400 м. Различие концентраций в приземном слое атмосферы (высота 2 м) и на уровне 130 м объясняется выбросами городских источников (в основном автотранспорт).

Анализ вертикальных профилей температуры воздуха, измеренных с помощью СВЧ-профилемера МТП-5 [33, 48], говорит о том, что в период задымления в ночные часы в слое от нуля до 600 м наблюдались существенные отклонения профилей температуры воздуха (4, рис. 6) от адиабаты (5, рис. 6), свидетельствующие о повышении в ночные часы устойчивости пограничного слоя, что благоприятствует накоплению примесей в пограничном слое атмосферы.

Согласно данным измерений на телебашне Останкино 25.07.2016 г. скорость ветра в слое от нуля до 200–250 м быстро увеличивалась с высотой (см. 5, рис. 6), что приводило к снижению концентрации дымового аэрозоля и угарного газа выше ~100 м под влиянием динамической турбулентности.

Следует отметить, что концентрация угарного газа в пограничном слое задымленной атмосферы Московского региона в июле 2016 г. была намного меньше, чем при задымлении ЕТР летом 2010 г. [3, 37].

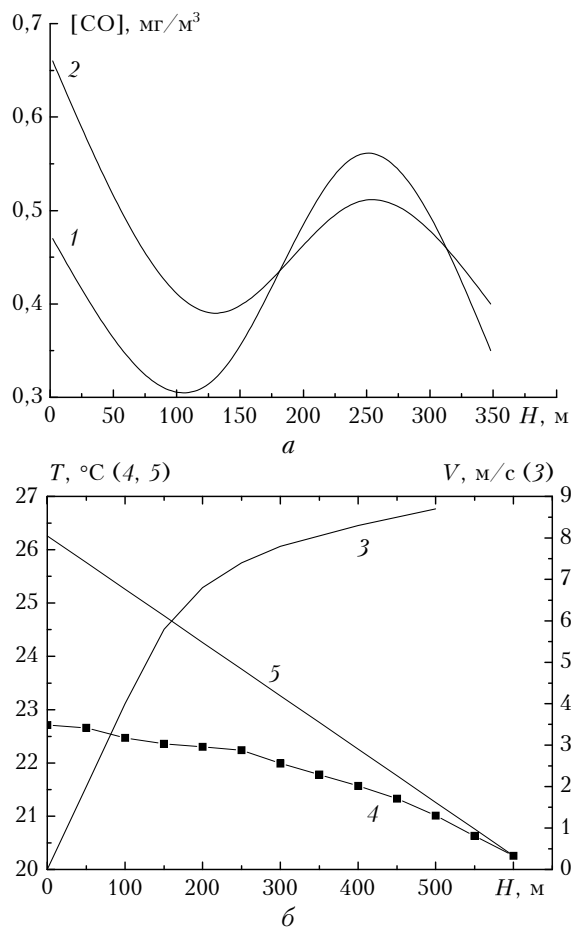


Рис. 6. Вертикальные профили среднесуточной массовой концентрации угарного газа 24 (1) и 25.07 (2) по данным измерений на телебашне Останкино (а); профили скорости ветра (3) в период с 0:00 до 1:00 на телебашне Останкино и температуры воздуха (4) в 0:00 25.07.2016 г. по данным СВЧ-профилемера МТП-5 (территория МГУ) и сухая адиабата (5) (б)

Радиационные эффекты дымового аэрозоля

Крупномасштабное задымление в июле 2016 г. сильно повлияло на радиационный режим атмосферы на ЕТР и прилегающих территориях. Как известно, задымление атмосферы при крупномасштабных лесных пожарах приводит к значительному увеличению уходящей в космос коротковолновой радиации и уменьшению радиации, приходящей к подстилающей поверхности [9, 11, 20, 48]. Количественную оценку радиационных эффектов ДА будем характеризовать аэрозольными радиационными форсингами для коротковолновой солнечной радиации [49, 50] на верхней (R_1) и нижней (R_2) границах атмосферы. Радиационные форсинги R_1 и R_2 определяются как разности притоков радиации для безаэрозольной и задымленной атмосферы на соответствующих уровнях.

Для оценки аэрозольных радиационных форсингов необходимо знать радиационные характеристики ДА, включая аэрозольную оптическую тол-

пину ослабления, альbedo однократного рассеяния (АОР) и параметр асимметрии индикатрисы рассеяния, которые, в частности, измеряются на станциях AERONET. Для периода рассматриваемого задымления ЕТР информация о радиационных характеристиках на постах AERONET оказалась довольно скудной. Согласно данным мониторинга на постах Минск и Екатеринбург, АОР для длины волны 675 нм в среднем составляло 0,96–0,965, а соответствующий параметр асимметрии – ~0,63. По данным измерений АОР в приземном слое задымленной атмосферы г. Томска в июле 2016 г. достигало 0,96 [51]. Эти результаты хорошо согласуются с средними значениями АОР и параметра асимметрии, полученными для ДА на ЕТР летом 2010 г. (0,95 и 0,63 соответственно).

На рис. 7 показаны пространственные распределения (45–70° с.ш. и 20–60° в.д.) аэрозольных форсингов R_1 (а) и R_2 (б) для 25.07.2016 г., рассчитанные с помощью модели ИФА [20, 49] на основе полученных спектро радиометрами MODIS распределений АОТ на длине волны 550 нм. Видно, что 25 июля задымление распространилось не только на ЕТР, но и на страны Восточной Европы. Область максимальных (по модулю) значений R_1 и R_2 в этот день находилась в интервале широт примерно от 49 до 57° с.ш.

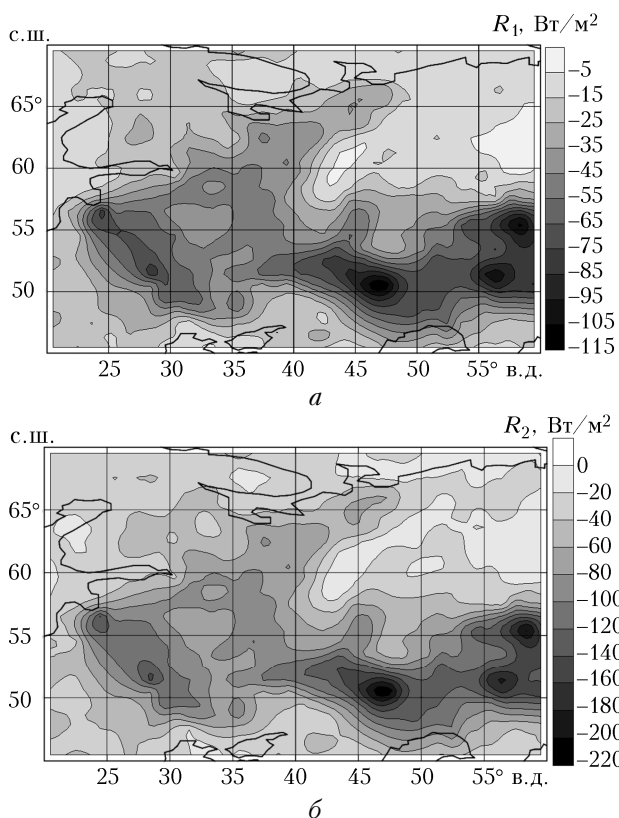


Рис. 7. Аэрозольные радиационные форсинги на верхней (а) и на нижней (б) границах атмосферы 25.07.2016 г. по данным мониторинга АОТ на спутниках Aqua и Terra

Средние значения R_1 и R_2 25.07.2016 г. были равны -29 и -53 Вт/м² соответственно, а стан-

дартные отклонения составляли 21 и 36 Вт/м². При этом экстремальные значения R_1 и R_2 достигали -112 и -215 Вт/м².

Эмпирические функции (W) распределения R_1 и R_2 (рис. 8) содержат моды со средними значениями примерно -13 и -40 Вт/м² для R_1 , -25 и -75 Вт/м² для R_2 соответственно.

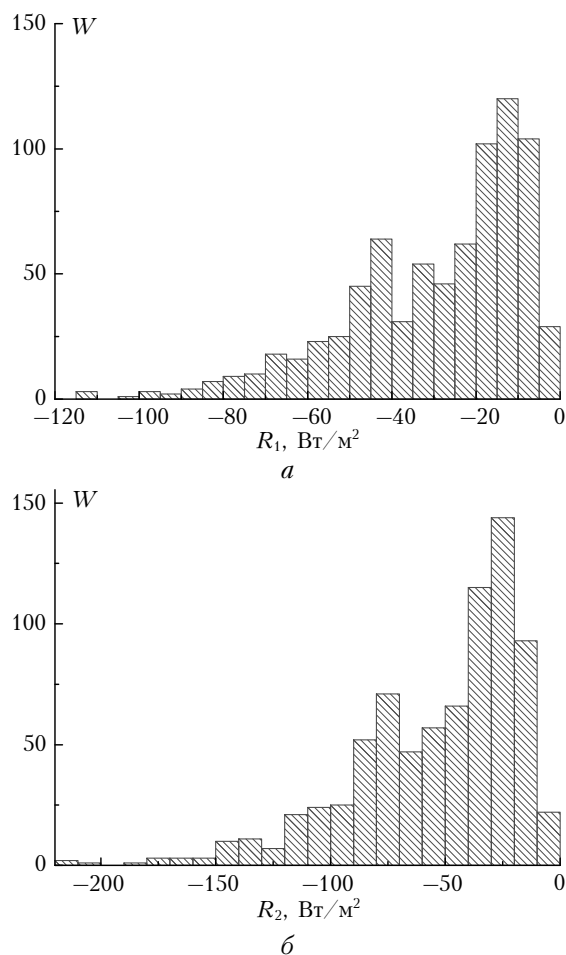


Рис. 8. Эмпирические функции распределения аэрозольного радиационного форсинга на верхней (а) и нижней (б) границах атмосферы

С целью сравнения напомним, что средние форсинги ДА на ЕТР летом 2010 г. (период интенсивного задымления с 5 по 9 августа) составляли -61 и -107 Вт/м², что существенно больше, чем 25.07.2016 г., а экстремальные достигали -128 и -269 Вт/м², что сопоставимо с рассматриваемым задымлением ЕТР в 2016 г.

Заключение

Оценены масштабы задымления ЕТР и прилегающих территорий в июле 2016 г., обусловленного дальним переносом дымной мглы из Сибири, уровень загрязнения задымленной атмосферы Московского региона и радиационные эффекты дымового аэрозоля.

Показано, что 25.07.2016 г. на территории, ограниченной координатами 45–70° с.ш. и 20–60° в.д.,

площадь задымления ($AOT > 0,3$) составила примерно 5 млн км². Среднее значение AOT было равно 0,43, а максимальное достигало 2,5. Предложена экспоненциальная аппроксимация ЭФР AOT. Полная масса ДА над ЕТР и прилегающими территориями 25.07.2016 г. составила примерно 1,2 млн т.

Выполнен анализ обратных траекторий переноса воздушных масс. Согласно приведенным в статье обратным десятисуточным траекториям во многих городах на ЕТР от Архангельска до Ростова-на-Дону имел место перенос задымленного воздуха из регионов Сибири, охваченных лесными пожарами.

По данным экологического мониторинга в г. Москве, проанализированы вариации массовых концентраций аэрозоля PM_{10} и $PM_{2,5}$ в период с 21 по 30.07.2016 г. Установлено, что воздействие задымления на уровень аэрозольного загрязнения приземного воздуха началось 23 июля. В период с 24 по 27.07.2016 г. среднесуточные значения $PM_{2,5}$ превышали соответствующую предельно допустимую концентрацию. На ряде постов заметный вклад в аэрозольное загрязнение приземного слоя атмосферы вносили локальные источники.

Проанализированы вариации концентрации угарного газа в задымленной атмосфере Московского региона. Обнаружен «дефицит» угарного газа: 24 и 25 июля 2016 г. отношение концентрации угарного газа к PM_{10} составляло 9,0–9,5 против 15 для дымной мглы 2010 г. Оценено влияние местных источников на уровень загрязнения приземного воздуха угарным газом в период задымления.

Зарегистрированы низкие уровни суммарной концентрации оксидов азота в задымленной атмосфере Московского региона (меньше 0,005 мг/м³). Указано, что всплески концентраций оксидов азота в задымленной атмосфере определяются локальными источниками.

Представлены результаты мониторинга угарного газа в пограничном слое атмосферы. Обнаружено повышение концентрации угарного газа с высотой, что может быть обусловлено дальним переносом воздушных масс. Показано, что на вертикальное распределение угарного газа в задымленном пограничном слое могли влиять повышение устойчивости в нижнем 600-метровом слое атмосферы и изменение скорости ветра с высотой.

Оценены аэрозольные радиационные форсинги ДА на ЕТР в июле 2016 г. Согласно данным расчетов с использованием модели ИФА, средние радиационные форсинги ДА на верхней и нижней границах атмосферы 25.07.2016 г. составляли –29 и –53 Вт/м², а экстремальные значения достигали –112 и –215 Вт/м² соответственно. Приведены эмпирические функции распределения радиационных форсингов.

Выполнено сопоставление масштабов задымления, уровней аэрозольного и газового загрязнения атмосферного воздуха в задымленной атмосфере и радиационных эффектов дымового аэрозоля на ЕТР в июле 2016 г. и летом 2010 г.

В работе использованы данные экологического мониторинга на сети автоматических постов кон-

троля качества атмосферного воздуха ГБПУ «Мосэкомониторинг».

Авторы благодарны команде AERONET и персонально А.П. Чайковскому, М.В. Панченко, С.М. Сакерину, М.А. Свириденкову и Н.Е. Чубаровой за возможность использования данных мониторинга.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант N 14-47-00049).

1. Ситнов С.А., Мохов И.И., Горчаков Г.И. Связь задымления атмосферы европейской территории России летом 2016 года с лесными пожарами в Сибири и аномалиями атмосферной циркуляции // Докл. АН. 2017. Т. 472, № 4. С. 456–461.
2. Бондур В.Г., Гинзбург А.С. Эмиссия углеродсодержащих газов и аэрозолей от природных пожаров на территории России по данным космического мониторинга // Докл. АН. 2016. Т. 466, № 4. С. 473–477.
3. Голицын Г.С., Горчаков Г.И., Гречко Е.И., Семутникова Е.Г., Ракитин В.С., Фокеева Е.В., Карпов А.В., Курбатов Г.А., Байкова Е.С., Сафрыгина Т.П. Экстремальное загрязнение угарным газом пограничного слоя атмосферы в Московском регионе летом 2010 г. // Докл. АН. 2011. Т. 441, № 4. С. 532–538.
4. Мохов И.И. Особенности формирования летней жары 2010 г. на европейской территории России в контексте общих измерений климата и его аномалий // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2011. Т. 47, № 6. С. 709–716.
5. Еланский Н.Ф., Мохов И.И., Беликов И.Б., Березина Е.В., Елохов А.С., Иванов В.А., Панкратова Н.В., Постыляков О.В., Сафронов А.Н., Скороход А.И., Шумский Р.А. Газовые примеси в атмосфере над Москвой летом 2010 г. // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2011. Т. 47, № 6. С. 729–738.
6. Панченко М.В., Журавлева Т.Б., Козлов В.С., Насртдинов И.М., Польшин В.В., Терпугова С.А., Чернов Д.Г. Оценка радиационных эффектов аэрозоля в дымовых и задымленных условиях атмосферы Сибири // Метеорол. и гидрол. 2016. № 2. С. 45–54.
7. Складнева Т.К., Йелев Г.А., Белан Б.Д., Аршинов М.Ю., Симоненков Д.В. Радиационный режим г. Томска в условиях дымной мглы // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 3. С. 215–222.
8. Горчаков Г.И., Аникин П.П., Волох А.А., Емиленко А.С., Исаков А.А., Копейкин В.М., Пономарева Т.Я., Семутникова Е.Г., Свириденков М.А., Шукуров К.А. Исследование состава задымленной атмосферы Москвы во время пожаров торфяников летом–осенью 2002 г. // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2004. Т. 40, № 3. С. 370–384.
9. Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Sviridenkov M.A., Semoutnikova E.G., Emilenko A.S., Isakov A.A., Kopeikin V.M., Karpov A.V., Gorchakova I.A., Verichev K.S., Kurbatov G.A., Ponomareva T.Ya. Satellite and ground-based monitoring of smoke in the atmosphere during the summer wildfires in European Russia in 2010 and Siberia in 2012 // Int. J. Remote Sens. 2014. V. 35, N 15. P. 5698–5721.
10. Van Donkelaar A., Martin R.V., Levy R.C., da Silva M.A., Krzyzanowski M., Chubarova N.E., Semutnikova E.G., Cohen A.J. Satellite-based estimates of ground-level fine particle matter during extreme events: A case study of the Moscow fires in 2010 // Atmos. Environ. 2011. V. 45. P. 6225–6232.
11. Chubarova N., Nezval' Y., Sviridenkov M., Smirnov A., Slutsker I. Smoke aerosol and its radiative effects

- during extreme fire event over Central Russia in summer 2010 // *Atmos. Meas. Tech.* 2012. V. 5. P. 557–568.
12. *Ситнов С.А.* Спутниковый мониторинг содержания газовых примесей атмосферы и оптических характеристик атмосферного аэрозоля над европейской территорией России в апреле–сентябре 2010 года // Докл. АН. 2011. Т. 437, № 1. С. 102–107.
 13. *Kozlov V.S., Yausheva 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.
 14. *Фокеева Е.В., Сафронов А.Н., Ракутин В.С., Юрганов Л.Н., Греко Е.И., Шумский Р.А.* Исследование влияния пожаров в июле–августе 2010 г. на загрязнение окисью углерода атмосферы Москвы и окрестностей // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2011. Т. 47, № 6. С. 739–756.
 15. *Ситнов С.А.* Анализ спутниковых наблюдений аэрозольных оптических характеристик и газовых примесей атмосферы над центральным районом Российской Федерации в период аномально высоких летних температур и массовых пожаров 2010 года // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 7. С. 572–581.
 16. *Кузнецова И.Н., Звягинцев А.М., Семутникова Е.Г.* Экологические последствия погодных аномалий летом 2010 года. Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года. М.: Триада, 2010. С. 58–64.
 17. *Чубарова Н.Е., Горбаренко Е.В., Незваль Е.И., Шиловецова О.А.* Аэрозольные и радиационные характеристики атмосферы во время лесных и торфяных пожаров в 1972, 2002 и 2010 гг. в Подмосковье // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2011. Т. 47, № 6. С. 74–789.
 18. *Горчаков Г.И., Аникин П.П., Волох А.А., Емиленко А.С., Исаков А.А., Копейкин В.М., Пономарева Т.Я., Семутникова Е.Г., Свириденков М.А., Шукуров К.А.* Исследование состава задымленной атмосферы Московского региона // Докл. АН. 2003. Т. 390, № 5. С. 251–254.
 19. *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 году // Докл. АН. 2011. Т. 437, № 5. С. 686–690.
 20. *Мохов И.И., Горчакова И.А.* Радиационный и температурный эффекты летних пожаров 2002 г. в Московском регионе // Докл. АН. 2005. Т. 400, № 4. С. 528–531.
 21. *Бондур В.Г.* Космический мониторинг эмиссий малых газовых компонент и аэрозолей при природных пожарах в России // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 6. С. 21–25.
 22. *Ситнов С.А.* Оптическая толщина аэрозоля и общее содержание оксида углерода над европейской территорией России в период массовых пожаров лета 2010 г.: взаимосвязь изменчивости загрязнений и метеорологических величин // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2011. Т. 47, № 6. С. 774–789.
 23. *Ситнов С.А., Горчаков Г.И., Свириденков М.А., Копейкин В.М., Пономарева Т.Я., Карпов А.В.* Влияние атмосферной циркуляции на эволюцию и радиационный форсинг дымового аэрозоля на европейской части России летом 2010 г. // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 2. С. 28–41.
 24. *Шакина Н.П., Иванова А.Р., Бирман Б.А., Скриптунова Е.Н.* Блокирование: условия лета 2010 года в контексте современных знаний. Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года. М.: Триада, 2010. С. 6–21.
 25. *Виноградова А.А., Смирнов Н.С., Коротков В.Н.* Аномальные пожары 2010 и 2012 гг. на территории России и поступление черного углерода в Арктику // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 6. С. 482–487; *Vinogradova A.A., Smirnov N.S., Korotkov V.N.* Anomalous wildfires in 2010 and 2012 on the Territory of Russia and supply of black carbon to the Arctic // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 6. P. 545–550.
 26. *Gorchakov G., Semoutnikova E., Karпов A., Lezina E.* Air pollution in Moscow Megacity // *Advanced topics in environmental health and air pollution case studies.* Rijeka: Intech, 2011. P. 211–236.
 27. *Salomonson V.V., Barnes W.L., Maymon P.W., Montgomery H.E., Ostrow H.* MODIS, advanced facility instrument for studies of the Earth as a system // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1989. V. 27. P. 145–153.
 28. *Kaufman Y.J., Tanré D., Gordon H.R., Vermote E.F., Chu A., Holben B.N.* Operational remote sensing of aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer // *J. Geophys. Res. D.* 1997. V. 102, N 14. P. 17051–17067.
 29. *Levy R.C., Remer L.A., Mattoo S., Vermote E.F., Kaufman Y.J.* Second-generation operational algorithm: retrieval of aerosol properties over land from inversion of moderate resolution imaging spectroradiometer spectral reflectance // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. D13211. DOI: 10.1029/2006JD007811.
 30. *Acker J.C., Leptoukh G.* Online analysis enhances use of NASA Earth Science Data // *EOS, Trans. Am. Geophys. Union.* 2007. V. 88. P. 14–17. DOI: 10.1029/2007EO020003.
 31. *Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima N., 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.
 32. *Dubovik O., King M.D.* A flexible inversion algorithm for the retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // *J. Geophys. Res. D.* 2000. V. 105, N 16. P. 20673–20696.
 33. *Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н.* Методические рекомендации по использованию данных дистанционных измерений профилей температуры в атмосферном пограничном слое микроволновыми профиломерами: теория и практика. Долгопрудный: Министерство природных ресурсов и экологии РФ, 2015. 171 с.
 34. *Белоусов С.Л., Пагава Т.С.,* Расчет траекторий воздушных частиц. Отраслевой фонд алгоритмов и программ «Гидрометеослужба» 1998. № 257244 8.00150–01 13.
 35. *Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Свириденков М.А.* Однопараметрическая модель приземного аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1981. Т. 17, № 1. С. 39–49.
 36. *Козлов В.С., Панченко М.В., Яушева Е.П.* Субмикронный аэрозоль и сажа приземного слоя в суточном ходе // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 7. С. 561–567; *Kozlov V.S., Panchenko M.V., Yausheva E.P.* Diurnal variations of the submicron aerosol and black carbon in the near-ground layer // *Atmos. Ocean. Opt.* 2011. V. 24, N 1. P. 30–38.
 37. *Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Исаков А.А., Копейкин В.М., Карпов А.В., Курбатов Г.А., Пономарева Т.Я., Соколов А.В.* Московская дымная мгла 2010 г. Экстремальное аэрозольное и газовое загрязнение воздушного бассейна Московского региона // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 6. С. 452–458.

38. Горчаков Г.И., Копейкин В.М., Ситнов С.А., Семутникова Е.Г., Свириденков М.А., Карпов А.В., Лезина Е.А., Емиленко А.С., Исаков А.А., Кузнецов Г.А., Пономарева Т.Я. Московская дымная мгла в октябре 2014 г. Вариации массовой концентрации аэрозоля // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 10. С. 872–878; Gorchakov G.I., Kopeikin V.M., Sitnov S.A., Semoutnikova E.G., Sviridenkov M.A., Karpov A.V., Lezina E.A., Emilenko A.S., Isakov A.A., Kuznetsov G.A., Ponomareva T.Ya. Moscow smoke haze in October 2014. Variations in the aerosol mass concentration // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 1. P. 5–11.
39. Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.2604. Дополнение № 8 к ГН 3.1.6.1338-03. Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. URL: <http://rospotrebnadzor.ru/documents/postanov/28308/print/> (дата обращения: 17.08.2017).
40. Поповичева О.Б., Козлов В.С., Рахимов Р.Ф., Шмаргунов В.П., Киреева Е.Д., Персианцева Н.М., Тимофеев М.А., Engling G., Elephteriadis K., Diapouli L., Панченко М.В., Zimmermann R., Schnelle-Kreis J. Оптико-микрофизические и физико-химические характеристики дымов горения сибирских биомасс: эксперименты в аэрозольной камере // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 4. С. 323–331; Popovicheva O.B., Kozlov V.S., Rakhimov R.F., Shmargunov V.P., Kireeva E.D., Persiantseva N.M., Timofeev M.A., Engling G., Elephteriadis K., Diapouli L., Panchenko M.V., Zimmermann R., Schnelle-Kreis J. Optical-microphysical and physical-chemical characteristics of smokes from siberian biomass burning: Experiments in aerosol chamber // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 6. P. 492–500.
41. Горчаков Г.И., Васильев А.В., Веричев К.С., Семутникова Е.Г., Карпов А.В. Тонкодисперсный коричневый углерод в задымленной атмосфере // Докл. АН. 2016. Т. 471, № 1. С. 91–97.
42. Горчаков Г.И., Карпов А.В., Панкратова Н.В., Семутникова Е.Г., Васильев А.В., Горчакова И.А. Коричневый и черный углерод в задымленной атмосфере при пожарах в бореальных лесах // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 3. С. 11–21.
43. Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Аношин Б.А., Карпов А.В., Колесникова А.Б. Углеводороды в городской атмосфере // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2009. Т. 45, № 3. С. 337–347.
44. Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Глядков П.С., Карпов А.В., Колесникова А.Б., Лезина Е.А. Вертикальные профили концентраций угарного газа и оксидов азота в пограничном слое городской атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 8. С. 787–794; Gorchakov G.I., Semoutnikova E.G., Glyadkov P.S., Karpov A.V., Kolesnikova A.B., Lezina E.A. Vertical profiles of concentrations of carbonmonoxide and nitrogen oxides in the urban atmospheric boundary layer // Atmos. Ocean. Opt. 2009. V. 22, N 6. P. 617–625.
45. Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Байкова Е.С., Карпов А.В. Недельный цикл суточного хода концентрации угарного газа в приземном и пограничном слоях городской атмосферы // Докл. АН. 2014. Т. 455, № 4. С. 459–463.
46. Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Карпов А.В., Колесникова А.Б., Байкова Е.С., Задорожная О.С. Недельный цикл загрязнения воздуха в г. Москве: количественные характеристики и уточнение методики статистического прогноза концентраций примесей // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 9. С. 784–792.
47. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric chemistry and physics. New York: Wiley Intersci. Publ., 1998. 1326 p.
48. Горчаков Г.И., Кадыгров Е.Н., Куницын В.Е., Захаров В.И., Семутникова Е.Г., Карпов А.В., Курбатов Г.А., Миллер Е.А., Ситанский С.И. Московский остров тепла в блокирующем антициклоне летом 2010 г. // Докл. АН. 2014. Т. 456, № 5. С. 591–595.
49. Горчакова И.А., Мохов И.И. Радиационный и температурный эффекты дымового аэрозоля в Московском регионе в период летних пожаров 2010 г. // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2012. Т. 48, № 5. С. 558–565.
50. Sokolik I.N., Golitsyn G. Investigation of optical and radiative properties of atmospheric dust aerosol // Atmos. Environ. 1993. V. 27A, N 16. P. 2509–2517.
51. Яушева Е.П., Козлов В.С., Панченко М.В., Шмаргунов В.П. Влияние дымов лесных пожаров на оптико-микрофизические характеристики субмикронного аэрозоля и сажи в Томском регионе летом 2016 г. // Аэрозоли Сибири. XXIII: Тез. докл. Томск: ИОА СО РАН, 2016. С. 9.

E.G. Semoutnikova, G.I. Gorchakov, S.A. Sitnov, V.M. Kopeikin, A.V. Karpov, I.A. Gorchakova, T.Ya. Ponomareva, A.A. Isakov, R.A. Gushchin, O.I. Datsenko, G.A. Kurbatov, G.A. Kuznetsov. Siberian smoke haze over European part of Russia in July 2016. Air pollution and radiative impact.

Unique large-scale smoke haze over European part of Russia (EPR) and adjacent territories in July 2017 was caused by long-range smoke transport from the forest fires in Siberia, which is supported by 10-day back trajectories of air mass transfer in cities at EPR, from Archangelsk to Rostov-on-Don. The territory with AOD > 0.3 (average value is 0.43 and extreme is 2.5) bounded by the coordinates 45–70°N and 20–60°E reached about 5 million km² 25.07.2016, and the total smoke mass over EPR comprised ~1.2 million tons. It is shown that the daily average mass concentration of aerosol with particles smaller than 2.5 μm exceeded the maximum permissible concentration at the majority of ecological monitoring stations in Moscow during 24.07–27.07.2016. The influence of local sources of carbon monoxide, nitrogen oxides, and aerosol on the air pollution was estimated. Carbon monoxide deficiency in smoke haze 2016 as compared with smoke haze 2010 was ascertained. It is shown that temperature and wind stratification may markedly influence the pollution level in the smoky urban atmosphere. Smoke aerosol radiative impact was evaluated. On July 25, 2016, the average aerosol radiative forcings over EPR at the top and the bottom of the atmosphere were equal to –29 and –53 W/m² and extreme forcings reached –112 and –215 W/m², respectively.