

УДК 551.510.42

Анализ содержания и эволюции коричневого углерода в дымах сибирских лесных пожаров по данным измерений AERONET

Н.А. Головушкин¹, И.Н. Кузнецова², И.Б. Коновалов¹,
М.И. Нахаев², В.С. Козлов³, М. Beekmann^{4*}

¹Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46, Россия

²Гидрометцентр России
123242, г. Москва, Большой Предтеченский пер., 11-13, Россия

³Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1, Россия

⁴Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques, UMR CNRS 7583, Université Paris-Est
Créteil, Université de Paris, Faculté des Sciences et Technologie
61 Ave. du Général de Gaulle, 94010 Créteil Cedex, France

Поступила в редакцию 7.11.2019 г.

Выполнен анализ содержания и эволюции коричневого углерода в дымах сибирских лесных пожаров по данным измерений абсорбционной аэрозольной оптической толщи (AAOT) на трех российских станциях сети AERONET в Томске, Звенигороде и Екатеринбурге. Получены оценки относительного вклада мелко-дисперсного коричневого углерода в абсорбцию солнечного излучения на длине волны 440 нм (η_{BrC}), в том числе для ситуации аномального дальнего переноса дымов из Сибири в европейскую часть России летом 2016 г. Значительное содержание коричневого углерода обнаружено в дымах в Томске и Зеленограде (где значения η_{BrC} равны в среднем 15 и 18%). При этом значимых величин η_{BrC} в период прохождения дымов от сибирских пожаров над Екатеринбургом не обнаружено. Выявлено убывание η_{BrC} по мере старения аэрозоля в освещенных условиях с характерным временным масштабом ~30 ч. В то же время результаты измерений в Звенигороде свидетельствуют об увеличении абсорбирующих свойств органической составляющей компоненты дымового аэрозоля при гораздо более длительной эволюции.

Ключевые слова: дымовой аэрозоль, коричневый углерод, сибирские пожары, AERONET; biomass burning aerosol, brown carbon, Siberian fires, AERONET.

Введение

Ежегодно в мире, в том числе и в России, наблюдаются массовые природные пожары, одно из последствий которых — поступление в атмосферу частиц дымового аэрозоля, оказывающего влияние на радиационный баланс атмосферы в различных регионах мира и на климатическую систему в целом [1–4]. Этим определяется интерес к изучению и моделированию изменений оптических характеристик атмосферы вследствие задымления продуктами горения, в частности от лесных пожаров в Сибири. Хотя влияние природных пожаров на аэрозольную составляющую и оптические свойства атмосферы является предметом огромного количества научных исследований с применением данных наземных, самолетных и спутниковых измерений (например, [5–11]),

закономерности, касающиеся характеристик источников, а также процессов физических и химических преобразований ключевых компонент и структуры аэрозоля при переносе его в атмосфере изучены явно недостаточно. Это ограничивает точность модельных расчетов эволюции и радиационных эффектов углеродсодержащего аэрозоля [12–14].

Одна из ключевых компонент дымового аэрозоля — так называемый коричневый углерод (BrC), образуемый поглощающими свет органическими веществами [15]. По сравнению с другой другой важной поглощающей составляющей — черным углеродом (BC) [16] BrC характеризуется значительно более сильной зависимостью от длины волны удельного коэффициента абсорбции, достигающего максимальных значений в ближнем УФ-диапазоне. Модельные оценки [17–19] показывают, что коричневый углерод вносит значительный вклад как в глобальный, так и региональный аэрозольный радиационный форсинг. Вместе с тем такие оценки характеризуются большей неопределенностью [20] ввиду слабой изученности сложных процессов с участием BrC, что затрудняет учет эффектов, связанных с ним, в современных климатических моделях. Поэтому оценка

* Николай Александрович Головушкин (golovushkin@ipfran.ru); Ирина Николаевна Кузнецова (labmuza@mail.ru); Игорь Борисович Коновалов (konov@ipfran.ru); Мурат Ислемгалеевич Нахаев (muratmeteo@mail.ru); Валерий Степанович Козлов (vkozlov@iao.ru); Matthias Beekmann (Matthias.Beekmann@lisa.u-pec.fr).

содержания и изучение трансформаций коричневого углерода в процессе атмосферной эволюции (старения) составляют одно из активных направлений современных аэрозольных исследований.

И лабораторные эксперименты, и анализ данных натуральных измерений свидетельствуют о том, что содержание BrC в дымах характеризуется сильной изменчивостью [20–22]. В частности, в ходе лабораторных экспериментов в [20] показано, что BrC обеспечивает в несколько раз больший относительный вклад в абсорбцию света на длине волны $\lambda = 405$ нм свежими продуктами горения торфяников, а также сосновых лесов и рисовой соломы, чем продуктами горения травы. Уникальные самолетные измерения состава аэрозоля [22], выполненные в Северной Америке, показали, что BrC в дымовых шлейфах почти исчезает под действием солнечного излучения (т.е. по мере увеличения «фотохимического возраста» дымового аэрозоля) с характерным временным масштабом 10–20 ч. Фотохимическая нестабильность BrC в целом подтверждается лабораторными экспериментами, результаты которых также свидетельствуют о существенно различном времени жизни абсорбирующих органических соединений, составляющих BrC, а также о возможности образования BrC в составе вторичного органического аэрозоля [23–25].

Установление свойств поглощающей органической фракции реального дымового аэрозоля от различных типов природных пожаров в конкретных регионах, особенно удаленных, затруднено из-за крайне ограниченного объема данных дорогостоящих прямых измерений, позволяющих надежно идентифицировать эти свойства. Однако в ряде работ [21, 26–28] было показано, что вклад BrC в абсорбцию солнечного излучения дымовым аэрозолем может быть оценен и исследован на основе анализа данных многоволнового оптического дистанционного зондирования аэрозоля на станциях международной сети AERONET. В настоящей работе с этой целью анализируются данные измерений на станции AERONET в Томске в 2012 и 2016 гг. Кроме того с использованием данных станций AERONET, расположенных в Екатеринбурге и вблизи Москвы, в Звенигороде, исследуется изменчивость содержания BrC в идентифицированном с помощью химико-транспортной модели (ХТМ) оптически плотном дымовом шлейфе лесных пожаров, который в июле 2016 г. перемещался из Западной Сибири через Урал на европейскую территорию России (ЕТР) [29, 30].

Краткое описание используемых данных

Анализ абсорбционных свойств аэрозоля в шлейфах сибирских пожаров проведен на основе значений абсорбирующей оптической толщины аэрозоля (AAOT), восстановленных из оптических измерений на $\lambda = 440, 675$ и 870 нм (τ_a^{440} , τ_a^{675} и τ_a^{870}) на трех станциях сети AERONET — Tomsk_22, Yekaterinburg и Zvenigorod — и полученных с сайта <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/> как 3-я версия дан-

ных 2-го уровня. Дополнительно были использованы значения полной (экстинкционной) аэрозольной оптической толщины (АОТ) на $\lambda = 500$ нм (τ_e^{500}), полученные из прямых оптических измерений на тех же станциях, а также из модельных расчетов, которые описываются ниже. Данные AAOT и АОТ со ст. Tomsk_22, характеризующие дымовой аэрозоль в сравнительной близости от источников, рассматривались для двух периодов: с 1 июня по 31 августа 2012 г. и с 1 июня по 20 августа 2016 г. Выбор периодов в основном определялся наличием эпизодов мощного задымления атмосферы и соответствующих данных модельных расчетов, частично выполненных ранее (например, в рамках работы [11]). Значения AAOT с двух других станций рассматривались только для периода 2016 г., включающего эпизод аномального переноса сибирских дымов на ЕТР.

Модельные расчеты были выполнены на основе ХТМ CHIMERE (v2017) [31], сопряженной с известной метеорологической моделью WRF, на регулярной сетке, охватывающей значительную часть Северной Евразии ($35,5^\circ$ в.д., $38,5^\circ$ с.ш.; $136,5^\circ$ в.д., $75,5^\circ$ с.ш.), с горизонтальным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ и 12 неэквидистантными уровнями, самый верхний из которых соответствует давлению 150 гПа. Во всех расчетах учитывались основные антропогенные и биогенные источники аэрозоля и малых газовых составляющих. Отдельные расчеты были выполнены с учетом и без учета эмиссий от пожаров; сравнение их результатов позволяет оценить вклад эмиссий от пожаров в загрязнение атмосферы. Эмиссии от пожаров вычислялись с использованием ранее разработанного метода [32] на основе значений мощности инфракрасного излучения, восстановленных из измерений спутниковыми инструментами MODIS. При расчетах АОТ рассматривались частицы аэрозоля диаметром от 10 нм до 40 мкм, распределенные по 10 группам в зависимости от их размера. В расчетах учитывались основные процессы, определяющие эволюцию дымового аэрозоля, включая коагуляцию, сухое и влажное осаждение, а также образование вторичного органического аэрозоля. Более подробно использованная в расчетах модельная конфигурация описана в [11].

В расчетах для периода 2016 г. использовалась та же модельная конфигурация, но, с целью лучшего выделения вклада сибирских лесных пожаров в АОТ над ЕТР, эмиссии от пожаров вне заранее выбранного достаточно обширного сибирского региона (73° в.д., 58° с.ш.; 103° в.д., 68° с.ш.), в котором в июле 2016 г. происходили мощные пожары, были положены равными нулю.

Аналогично [11, 12, 33] в настоящей работе ХТМ CHIMERE использовалась, в частности, для оценки фотохимического «возраста» аэрозоля (t_a), т.е. времени, в течение которого аэрозоль и его компоненты подвергались активному воздействию атмосферных фотохимических процессов. Для этого в модель были введены два «трассера», пространственно-временные поля эмиссии от пожаров для которых были заданы такими же, что и для органической

компоненты дымового аэрозоля. Один из трассеров (T_1) полагался химически инертным, а второй (T_2) исчезал в освещенных условиях с заданной постоянной скоростью $k_r = 4,6 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. Рассчитанные значения массового содержания трассеров, $[T_1]$ и $[T_2]$, в столбе атмосферы в произвольной ячейке модельной сетки позволяют получить оценку фотохимического возраста аэрозоля:

$$t_a = -k_r^{-1} \ln([T_2]/[T_1]). \quad (1)$$

Методика исследования

Анализ измерений ААОТ включал в себя три основных этапа. На первом – предварительном – производился отбор данных измерений, характеризующих преимущественно дымовой аэрозоль, с использованием двух взаимодополняющих критериев. Во-первых, аналогично [33] требовалось, чтобы соответствующее измеренное значение τ_e^{500} превышало 0,5. Кроме того, учитывая, что измеряемые на городских ст. Zvenigorod и Yekaterinburg значения ААОТ⁵⁰⁰ изредка превышают критическое значение τ_e^{500} вследствие антропогенного загрязнения, было поставлено дополнительное условие на основе рассчитанных значений τ_e^{500} , соответствующих времени и месту проводимых измерений: требовалось, чтобы ААОТ⁵⁰⁰, рассчитанное с учетом пожаров, минимум в 2 раза превышало «фоновое» значение ААОТ⁵⁰⁰ (без учета пожаров).

На втором этапе отобранные данные измерений ААОТ использовались для оценки относительного вклада коричневого углерода в абсорбцию дымовым аэрозолем солнечного излучения на $\lambda = 440 \text{ нм}$. Для этого применялся метод [28], который предполагает анализ абсорбционного показателя Ангстрема (α), рассчитываемого из отношения измеряемых значений ААОТ на выбранной паре длин волн. В основе метода лежит известный факт, что BrC обычно слабо поглощает солнечное излучение в ИК- и видимом диапазонах, но его поглощающая способность резко возрастает с уменьшением длины волны и становится значительной на границе видимого и УФ-диапазонов. Аналогичные методы были предложены и использованы в ряде других работ (например, [26, 27]). Примененный в данной работе метод включает в себя, в частности, получение дополнительной оценки абсорбционного показателя Ангстрема (α_{BrC}) в предположении, что единственным поглощающим веществом в составе аэрозоля является черный углерод:

$$\alpha_{\text{BrC}}^{440/870} = \alpha^{675/870} + \Delta\alpha_{\text{BrC}}. \quad (2)$$

Здесь верхние индексы указывают длины волн, которым соответствуют рассмотренные значения ААОТ; $\Delta\alpha_{\text{BrC}}$ – поправка, учитывающая зависимость α_{BrC} от длины волны. Диапазон вероятных значений $\Delta\alpha_{\text{BrC}}$ был предварительно рассчитан [28] на основе теории Ми в зависимости от $\alpha^{675/870}$ для широкого класса дисперсных характеристик частиц черного углерода,

в том числе при наличии рассеивающей оболочки. Оценки $\alpha_{\text{BrC}}^{440/870}$ и измерения τ_a^{870} позволяют, в свою очередь, легко оценить вклад черного углерода в ААОТ на $\lambda = 440 \text{ нм}$ ($\tau_{\text{a-BrC}}^{440}$), затем – аналогичный вклад коричневого углерода ($\tau_{\text{a-BrC}}^{440}$) как разность τ_a^{440} и $\tau_{\text{a-BrC}}^{440}$. В результате определяется относительный вклад коричневого углерода в поглощение солнечного излучения на $\lambda = 440 \text{ нм}$:

$$\eta_{\text{BrC}} = \tau_{\text{a-BrC}}^{440} / \tau_a^{440}. \quad (3)$$

В настоящей работе для получения наиболее вероятной оценки η_{BrC} мы использовали медианные значения $\Delta\alpha_{\text{BrC}}$, лежащие в интервале $[-0,2; -0,1]$, и полный разброс значений $\Delta\alpha_{\text{BrC}}$ (обычно не выходящих за интервал $[-0,3; 0,0]$) для определения вероятной ошибки оценок η_{BrC} .

На третьем этапе анализа рассматривалось соотношение между η_{BrC} и t_a , позволяющее охарактеризовать изменения содержания коричневого углерода в дымовом аэрозоле по мере его старения.

Результаты

На рис. 1 показаны временные ряды измеренных и рассчитанных τ_e^{500} , а также использование этих значений для отбора эпизодов прохождения дымовых шлейфов. Для измерений ААОТ, удовлетворяющих одновременно двум указанным выше критериям отбора данных, на рис. 1 показаны рассчитанные, согласно уравнению (1), значения фотохимического возраста дымового аэрозоля. Важно отметить наличие во всех представленных временных рядах сильных эпизодических «всплесков» значений τ_e^{500} , которые, согласно соответствующим модельным расчетам, вызваны дымовым аэрозолем. Они имели место не только на ст. Tomsk_22 (т.е. в сравнительной близости от мощных пожаров), но и на ст. Yekaterinburg и Zvenigorod, прохождение плотных сибирских дымовых шлейфов над которыми во второй половине июля находится в согласии с выводами [29, 30]. Отметим, что количественное воспроизведение моделью наблюдаемых значений τ_e^{500} не было целью настоящей работы, в рамках которой модельные данные играли лишь вспомогательную роль. Тем не менее можно отметить согласие в целом измерений и расчетов как в фоновых условиях, так и в условиях, при которых вклад дымового аэрозоля в ААОТ доминировал (согласно модельным данным). Количественные различия наблюдаемых и рассчитанных ААОТ – ожидаемое следствие относительно низкого пространственного и временного разрешения модельных расчетов, неизбежных неточностей в данных по эмиссиям аэрозоля и в модельном описании эволюции органической компоненты дымового аэрозоля [12, 14].

Рис. 2 показывает соотношение между абсорбционными показателями Ангстрема, рассчитанными для различных пар длин волн для каждого из отобранных измерений ААОТ, а также демонстрирует соответствующие оценки η_{BrC} . Отметим, что лишь

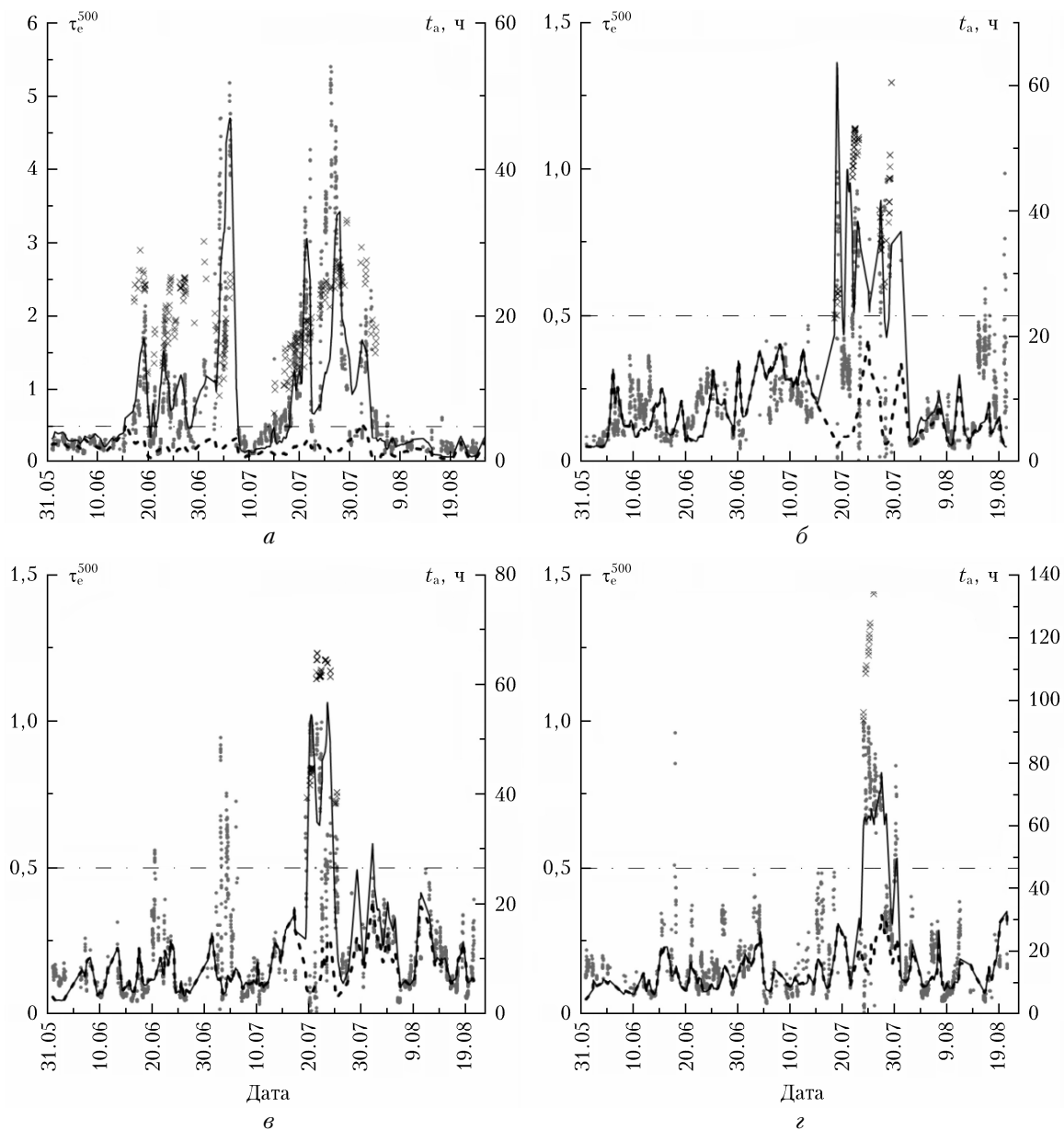


Рис. 1. Временные ряды τ_e^{500} в 2012 (*a*) и 2016 гг. (*б–г*) на станциях AERONET: *a, б* – Tomsk 22; *в* – Yekaterinburg; *г* – Zvenigorod, согласно данным измерений (серые точки) и модельным расчетам на XTM CHIMERE, выполненным с учетом (сплошная линия) и без учета (штриховая линия) эмиссий от пожаров; штрихпунктирная линия – пороговое значение τ_e^{500} , использованное в качестве одного из критериев для отбора эпизодов прохождения дымовых шлейфов; \times – модельные оценки фотохимического возраста дымового аэрозоля для отобранных данных измерений

для малой части прямых измерений АОТ, удовлетворяющих условиям отбора, имеются соответствующие значения ААОТ 2-го уровня. Рис. 2, *a*, свидетельствует о тесной, хотя и не вполне однозначной, связи значений абсорбционных показателей Ангстрема для двух различных пар длин волн. Согласно упомянутым расчетам [28] тот факт, что отношение $\alpha^{440/870}$ и $\alpha^{675/870}$ в основном превышает единицу (точки на рис. 2, *a* находятся выше штрихпунктирной линии), указывает на ненулевой вклад ВгС в поглощение солнечного излучения дымовым аэрозолем в большинстве рассмотренных случаев. Для оценок $\eta_{\text{ВгС}}$, соответствующих таким случаям,

на рис. 2, *б* указаны интервалы неопределенности. Отметим, что они не учитывают возможные ошибки восстановления ААОТ (которые трудно корректно оценить). В остальных случаях мы не можем утверждать, что в аэрозоле присутствует коричневый углерод. Значимые оценки $\eta_{\text{ВгС}}$ (как правило, превышающие 10%) получены для многих измерений в Томске и Звенигороде, но не для измерений в Екатеринбурге. Максимальное значение $\eta_{\text{ВгС}}$ (36%) в Томске соответствует сравнительно большому значению $\alpha^{675/875}$ ($> 1,5$), которое может свидетельствовать о существовании в частицах аэрозоля слабо поглощающей оболочки вокруг сильно поглощающего

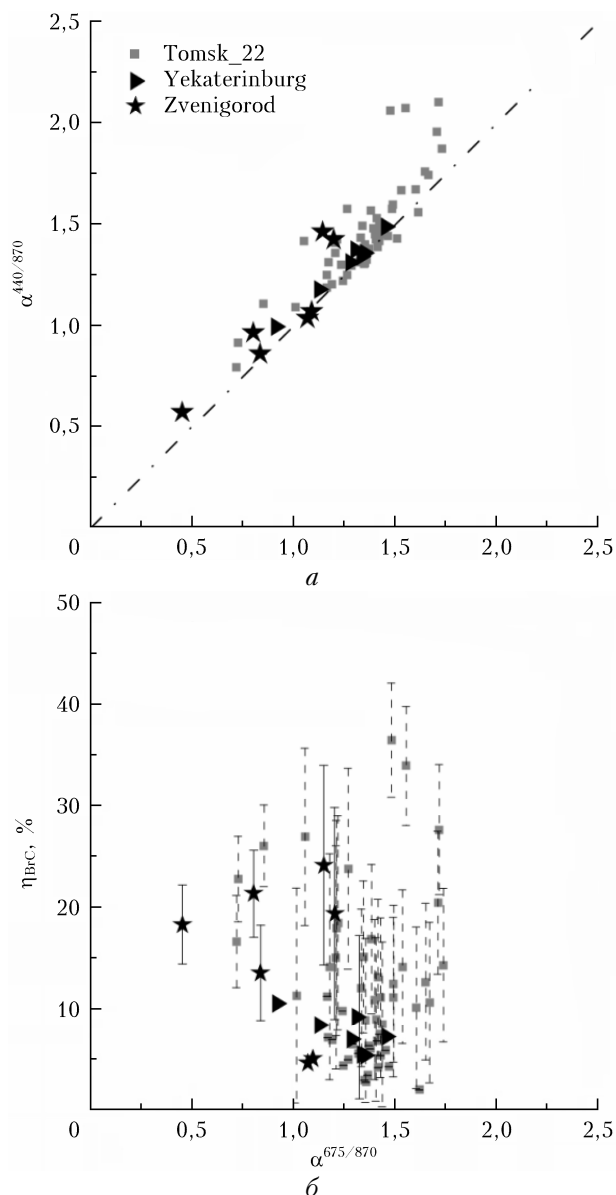


Рис. 2. Значения абсорбционного показателя Ангстрема, рассчитанные на основе измерений ААОТ на $\lambda = 440$ и 870 нм (а); оценки относительного вклада коричневого углерода в ААОТ на $\lambda = 440$ нм (б) в зависимости от значений абсорбционного показателя Ангстрема, рассчитанных на основе измерений ААОТ на $\lambda = 675$ и 870 нм; интервалы неопределенности указаны только для значимых оценок η_{BrC}

ядра [34]. Значения η_{BrC} , рассчитанные по усредненным (отдельно для каждого сайта) величинам ААОТ, составляют 15, 9, и 18% в Томске, Екатеринбурге и Звенигороде соответственно.

На рис. 3 приведено соотношение между η_{BrC} и t_a по данным всех трех станций. Как и следовало ожидать, измерения в Екатеринбурге и Звенигороде соответствуют в среднем более старому аэрозолю, чем измерения в Томске.

В целом соотношение между η_{BrC} и t_a имеет ожидаемо нерегулярный характер, который подтверждает упомянутые данные [20] о сильной измен-

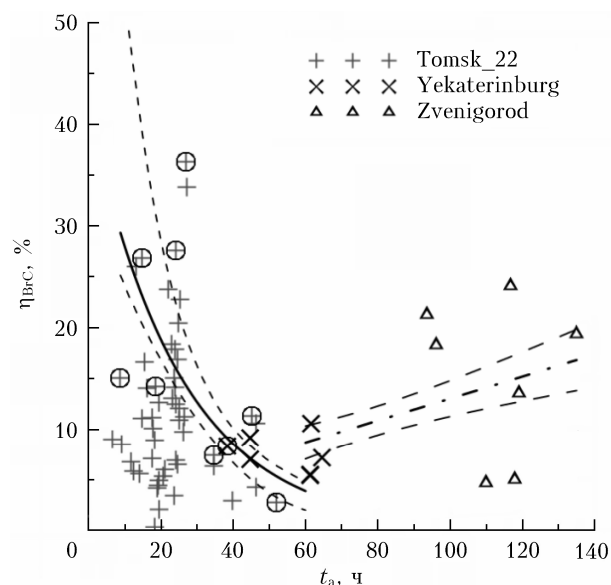


Рис. 3. Соотношение между относительным вкладом коричневого углерода в ААОТ на $\lambda = 440$ нм и фотохимическим возрастом аэрозоля; сплошная линия – экспоненциальная аппроксимация максимальных значений η_{BrC} (кружки) в последовательных пятичасовых интервалах значений t_a , не превышающих 60 ч; штрихпунктирные линии – линейная аппроксимация всех значений η_{BrC} с $t_a > 60$ ч; доверительные интервалы аппроксимаций соответствуют стандартному отклонению их параметров

чивости содержания коричневого углерода в свежем дымовом аэрозоле. Однако если исходить из гипотезы, что по мере старения аэрозоля BrC исчезает (либо вследствие разрушения хромофоров непосредственно под воздействием солнечного излучения, либо в результате их гетерогенного окисления), то зависимость η_{BrC} от возраста должна проявиться, прежде всего, в тех измерениях, которые соответствуют максимальным (для этого возраста) значениям η_{BrC} . Учитывая ограниченный объем данных, такие максимальные значения были найдены для последовательных пятичасовых интервалов значений t_a . Оказалось, что найденные максимумы (выделенные на рис. 3 кружками), могут быть аппроксимированы статистически значимой экспоненциальной зависимостью, параметры которой позволяют оценить время жизни BrC (26 ± 11 ч). Эта оценка согласуется с отмеченным выше фактом, что значимых величин η_{BrC} по данным измерений в Екатеринбурге, где возраст аэрозоля превышал 40 ч, не найдено.

Такая зависимость и полученная оценка времени жизни BrC также хорошо согласуются с известными результатами анализа самолетных измерений коричневого углерода в дымах от пожаров в Северной Америке [22]. Вместе с тем наши оценки η_{BrC} по более длительным периодам пребывания дымового аэрозоля в освещенной атмосфере (которые пока не изучались в натуральных экспериментах или лабораториях) говорят о том, что в определенных условиях при дальнейшем старении дымового аэрозоля поглощающая способность его органической компоненты может в значительной мере восстанав-

ливаться. Можно предположить, что это увеличение абсорбции связано либо с известными процессами автополимеризации органических соединений в составе аэрозоля [35] и пожелтением полимеров под воздействием УФ-излучения [36], либо с формированием BrC в процессе фотохимических реакций внутри обводненных частиц аэрозоля [37]. Однако рассмотренные данные измерений на ст. Zvenigorod не позволяют полностью исключить возможность влияния на полученные оценки η_{BrC} каких-либо локальных источников сильно поглощающего аэрозоля, не приводящих к существенному увеличению полной АОТ относительно фонового уровня. Полученные результаты указывают на то, что для понимания эволюции абсорбционных свойств органической компоненты дымового аэрозоля в процессе длительного пребывания в атмосфере требуются дальнейшие исследования.

Заключение

В результате анализа ААОТ, восстановленной из измерений на трех российских станциях сети AERONET в Томске, Звенигороде и Екатеринбурге в выбранные периоды 2012 и 2016 гг., получены оценки относительного вклада коричневого углерода в абсорбцию солнечного излучения на длине волны 440 нм (η_{BrC}) дымами сибирских лесных пожаров. Значительное содержание коричневого углерода обнаружено в дымах в Томске и Звенигороде (где наибольшие значения η_{BrC} равны 36 и 21% соответственно), а в Екатеринбурге значимых величин η_{BrC} в период прохождения над городом дымов сибирских пожаров не выявлено. При использовании оценок фотохимического возраста дымового аэрозоля, полученных с помощью ХТМ CHIMERE, выявлено убывание η_{BrC} по мере старения аэрозоля в освещенных условиях с характерным временным масштабом ~30 ч. Полученные результаты свидетельствуют о возможности увеличения абсорбирующих свойств органических составляющих дымового аэрозоля при длительной эволюции в течение нескольких дней.

Исследование выполнено за счет гранта РФФ (проект № 19-77-20109). Модельные расчеты для рассмотренного периода 2012 г. выполнены при поддержке РФФИ (грант № 18-05-00911).

1. Van der Werf G.R., Randerson J.T., Giglio L., van Leeuwen T.T., Chen Y., Rogers B.M., Mu M., van Marle M.J.E., Morton D.C., Collatz G.J., Yokelson R.J., Kasibhatla P.S. Global fire emissions estimates during 1997–2016 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2017. V. 9, N 2. P. 697–720.
2. Бондур В.Г., Гордо К.А., Кладов В.Л. Пространственно-временные распределения площадей природных пожаров и эмиссий углеродсодержащих газов и аэрозолей на территории Северной Евразии по данным космического мониторинга // *Исследование Земли из космоса*. 2016. № 6. С. 3–20.
3. Sand M., Berntsen T., von Salzen K., Flanner M., Langner J., Victor D. Response of Arctic temperature to changes in emissions of short-lived climate forcers // *Nat. Clim. Change*. 2015. N 6. P. 286–289.

4. Bond T.C., Doherty S.J., Fahey D.W. et al. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2013. V. 118, N 11. P. 5380–5552.
5. Kozlov V.S., Panchenko M.V., Yausheva E.P. Mass fraction of Black Carbon in submicrometer aerosol as an indicator of influence of smokes from remote forest fires in Siberia // *Atmos. Environ.* 2008. V. 42, N 11. P. 2611–2620.
6. Chubarova N., Nezval' Ye., Sviridenkov I., 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, N 3. P. 557–568.
7. 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.
8. Zhuravleva T.B., Kabanov D.M., Nasrtdinov I.M., Rusakova T.V., Sakerin S.M., Smirnov A., Holben B.N. Radiative characteristics of aerosol during extreme fire event over Siberia in summer 2012 // *Atmos. Meas. Tech.* 2017. V. 10, N 1. P. 179–198.
9. Kozlov V.S., Yausheva E.P., Panchenko M.V., Shmargunov V.P. Annual behavior of Angstrom exponent of the aerosol absorption coefficients in the visible wavelength range upon the results of measurements at the Aerosol station of IAO SB RAS // *Proc. SPIE*. 2018. V. 10833.
10. Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Y., Belan B.D., Belan S.B., Davydov D.K., Iolev G.A., Fofonov A.V., Kozlov A.V., Paris J.-D., Nedelec P., Raschazhnikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadnueva T.K., Tolmachev G.N. Distribution of trace gases and aerosols in the troposphere over Siberia during wildfires of summer 2012 // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2018. V. 123. P. 2285–2297.
11. Konovalov I.B., Lvova D.A., Beekmann M., Jethva H., Mikhailov E.F., Paris J.-D., Belan B.D., Kozlov V.S., Ciaia P., Andreae M.O. Estimation of black carbon emissions from Siberian fires using satellite observations of absorption and extinction optical depths // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18, N 20. P. 14889–14924.
12. Konovalov I.B., Beekmann M., Berezin E.V., Formenti P., Andreae M.O. Probing into the aging dynamics of biomass burning aerosol by using satellite measurements of aerosol optical depth and carbon monoxide // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 17, N 7. P. 4513–4537.
13. Tsigaridis K., Kanakidou M. The present and future of secondary organic aerosol direct forcing on climate // *Cur. Clim. Change Rep.* 2018. V. 4, N 2. P. 84–98.
14. Konovalov I.B., Beekmann M., Golovushkin N.A., Andreae M.O. Nonlinear behavior of organic aerosol in biomass burning plumes: A microphysical model analysis // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. V. 19, N 19. P. 2091–12119.
15. Andreae M.O., Gelencsér A. Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols // *Atmos. Chem. Phys.* 2006. V. 6, N 10. P. 3131–3148.
16. 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. 26, № 6. С. 482–487; Виноградова А.А., Смирнов Н.С., Коротков В.Н. 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.
17. Brown H., Liu X., Feng Y., Jiang Y., Wu M., Lu Z., Wu C., Murphy S., Pokhrel R. Radiative effect and climate impacts of brown carbon with the Community

- Atmosphere Model (CAM5) // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18, N 24. P. 7745–17768.
18. Saleh R., Marks M., Heo J., Adams P.J., Donahue N.M., Robinson A.L. Contribution of brown carbon and lensing to the direct radiative effect of carbonaceous aerosols from biomass and biofuel burning emissions // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2015. V. 120, N 19. P. 10285–10296.
 19. Wang X., Heald C.L., Liu J., Weber R.J., Campuzano-Jost P., Jimenez J.L., Schwarz J.P., Perring A.E. Exploring the observational constraints on the simulation of brown carbon // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18, N 2. P. 635–653.
 20. Pöhlner R.P., Beamesderfer E.R., Wagner N.L., Langridge J.M., Lack D.A., Jayarathne T., Stone E.A., Stockwell C.E., Yokelson R.J., Murphy S.M. Relative importance of black carbon, brown carbon, and absorption enhancement from clear coatings in biomass burning emissions // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 17, N 8. P. 5063–5078.
 21. 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 // Исследование Земли из космоса. 2017. № 3. С. 11–21.
 22. Forrister H., Liu J., Scheuer E., Dibb., Ziemba L., Thornhill K.L., Anderson B., Diskin G., Perring A.E., Schwarz J.P., Campuzano-Jost P., Day D.A., Palm B.B., Jimenez J.L., Nenes A., Weber R.J. Evolution of brown carbon in wildfire plumes // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42, N 11. P. 4623–4630.
 23. Zhong M., Jang M. Dynamic light absorption of biomass-burning organic carbon photochemically aged under natural sunlight // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14, N 3. P. 1517–1525.
 24. Wong J.P.S., Nenes A., Weber R.J. Changes in light absorptivity of molecular weight separated brown carbon due to photolytic aging // *Environ. Sci. Technol.* 2017. V. 51, N 15. P. 8414–8421.
 25. Fan X., Yu X., Wang Y., Xiao X., Li F., Xie Y., Wei S., Song J., Peng P. The aging behaviors of chromophoric biomass burning brown carbon during dark aqueous hydroxyl radical oxidation processes in laboratory studies // *Atmos. Environ.* 2019. V. 205. P. 9–18.
 26. Bahadur R., Praveen P.S., Xu Y., Ramanathan V. Solar absorption by elemental and brown carbon determined from spectral observations // *Proc. Nat.: Acad. Sci. USA.* 2012. V. 109, N 43. P. 17366–17371.
 27. 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.
 28. Wang X., Heald C.L., Sedlacek A.J., de Sá S.S., Martin S.T., Alexander M.L., Watson T.B., Aiken A.C., Springston S.R., Artaxo P. Deriving brown carbon from multiwavelength absorption measurements: Method and application to AERONET and aethalometer observations // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, N 19. P. 12733–12752.
 29. 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.
 30. Семутникова Е.Г., Горчаков Г.И., Ситнов С.А., Копейкин В.М., Карпов А.В., Горчакова И.А., Пономарева Т.Я., Исаков А.А., Гуцин Р.А., Даценко О.И., Курбатов Г.А., Кузнецов Г.А. Сибирская дымная мгла над европейской территорией России в июле 2016 г. Загрязнение атмосферы и радиационные эффекты // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 11. С. 962–970; Semoutnikova E.G., Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Kopeikin V.M., Karpov A.V., Gorchakova I.A., Ponomareva T.Ya., Isakov A.A., Gushchin R.A., Datsenko O.I., Kurbatov G.A., Kuznetsov G.A. Siberian smoke haze over European territory of Russia in July 2016: Atmospheric pollution and radiative effects // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 2. P. 171–180.
 31. Mailler S., Menut L., Khvorostyanov D., Valari M., Couvidat F., Siour G., Turquetty S., Briant R., Tuccella P., Bessagnet B., Colette A., Letinois L., Markakis K., Mereux F. CHIMERE-2017: From urban to hemispheric chemistry transport modeling // *Geosci. Model Dev.* 2017. V. 10, N 6. P. 2397–2423.
 32. Konovalov I.B., Berezin E.V., Ciais P., Broquet G., Beekmann M., Hadji-Lazaro J., Clerbaux C., Andreae M.O., Kaiser J.W., Schulze E.-D. Constraining CO₂ emissions from open biomass burning by satellite observations of co-emitted species: A method and its application to wildfires in Siberia // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14, N 19. P. 10383–10410.
 33. Konovalov I.B., Lvova D.A., Beekmann M. Estimation of the elemental to organic carbon ratio in biomass burning aerosol using AERONET retrievals // *Atmosphere.* 2017. V. 8, N 7. P. 122.
 34. Wu C., Wu D., Yu J.Z. Quantifying black carbon light absorption enhancement with a novel statistical approach // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18, N 1. P. 289–309.
 35. Barsanti K.C., Pankow J.F. Thermodynamics of the formation of atmospheric organic particulate matter by accretion reactions – Part 1: Aldehydes and ketones // *Atmos. Environ.* 2004. V. 8, N 26. P. 4371–4382.
 36. Yousif E., Haddad R. Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: Review // Springerplus. 2013. V. 2. P. 398.
 37. Tang H., Thompson J.E. Light-absorbing products form during the aqueous phase reaction of phenolic compounds in the presence of nitrate and nitrite with UV illumination // *Open J. Air Pollut.* 2012. V. 1, N 2. P. 13–21.

N.A. Golovushkin, I.N. Kuznetsova, I.B. Konovalov, M.I. Nahaev, V.S. Kozlov, M. Beekmann. Analysis of brown carbon content and evolution in Siberian biomass burning smoke plumes using AERONET data.

The content and evolution of brown carbon (BrC) in biomass burning smokes from Siberian forest fires were analyzed using measurements of the absorption aerosol optical thickness at three AERONET stations situated in Tomsk (in Siberia), Zvenigorod (near Moscow), and Yekaterinburg (at the Ural). The analysis resulted in estimates of the relative contribution of BrC in fine aerosol particles to the absorption of solar radiation at a wavelength of 440 nm (η_{BrC}), in particular, for an anomalous episode of the long-range transport of biomass burning smoke from Siberia into the European part of Russia in summer 2016. A considerable fraction of BrC is found in smoke aerosol over Tomsk and Zvenigorod (where η_{BrC} is estimated to be about 15 and 18% on average), while the estimates of η_{BrC} for Yekaterinburg are found to be insignificant. The analysis also revealed a decrease in η_{BrC} in the process of aerosol aging under the illuminated conditions on the time scale of about 30 h. At the same time, the measurements in Zvenigorod indicate an increase in the absorption properties of the organic fraction of biomass burning aerosol after much longer atmospheric evolution.