

УДК 551. 510.42

Пространственное распределение потенциальных источников углеродсодержащих аэрозолей в Центральной Сибири

С.С. Власенко[✉], А.С. Михайлова, О.А. Иванова, Е.Ю. Небосько, Е.Ф. Михайлов, Т.И. Рышкевич*

*Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7–9*

Поступила в редакцию 11.07.2023;
после доработки 01.09.2023;
принята к печати 04.09.2023

Представлены результаты траекторного анализа данных многолетних измерений содержания органического (ОС) и элементарного (ЕС) углерода в аэрозолях, проводимых на ст. ZOTTO (пос. Зотино, Красноярский край). В качестве первичных данных использованы аэрозольные пробы, отобранные с высоты 300 м над уровнем земли на кварцевые фильтры. Содержание ЕС и ОС в пробах определялось термооптическим методом. С полученными рядами массовых концентраций аэрозольного углерода за период 2011–2021 гг. был сопоставлен массив обратных траекторий воздушных масс, исходящих из точки измерений, построенный с помощью модели HYSPLIT. В результате анализа этих данных методами концентрационно-взвешенных траекторий (CWT — concentration weighted trajectory) были определены значения CWT-функции на сетке 150×250 ячеек, покрывающей географическую область $30 \times 20^\circ$ с центром в пос. Зотино. Значения этих функций характеризуют интенсивность потенциальных источников углеродсодержащих аэрозолей в каждой ячейке. Полученные данные позволяют выделить области с наиболее сильными эмиссиями ОС и ЕС и оценить сезонную изменчивость этих эмиссий. В частности, в летний период основные источники ОС и ЕС расположены к востоку от Зотино, в регионе р. Подкаменной Тунгуски, и связаны, вероятнее всего, с лесными пожарами. В холодные сезоны большинство источников аэрозольного углерода находятся в юго-западной части анализируемой области, где расположены крупные города и сосредоточена основная часть населения. Показано, что регрессионный анализ CWT-функций органического и элементарного углерода позволяет в некоторых случаях определять доминирующий тип источников углеродсодержащих аэрозолей на изучаемой территории. Представленные результаты могут быть использованы для оценок аэрозольного радиационного форсинга в Сибирском регионе.

Ключевые слова: состав атмосферы, углеродсодержащий аэрозоль, траекторные методы, элементарный углерод, органический углерод; atmospheric composition, carbonaceous aerosol, trajectory method, elemental carbon, organic carbon.

Введение

Аэрозольные частицы являются существенным элементом климатической системы Земли, поскольку оказывают заметное влияние на свойства атмосферы, прежде всего радиационные (прямой и косвенный аэрозольный форсинг), а через них — на температурный и динамический режим атмосферы [1, 2]. Кроме того, важную роль играет взаимодействие атмосферного аэрозоля с биосферой планеты. С одной стороны, аэрозольные загрязнения влияют на условия существования биологических организмов, в том

числе и на здоровье людей, с другой — значительная часть аэрозольных частиц в нижней атмосфере имеет биологическое происхождение, т.е. производится биосферой [3]. К таковым относятся не только собственно биоаэрозоли (пыльца, споры, микроорганизмы и продукты их дефрагментации), но и вторичные аэрозоли, формируемые в результате конверсии летучих углеводородов, выделяемых хвойными лесами (изопрены) [4], дымовые частицы от лесных и степных пожаров и т.п.

Особое значение такое взаимодействие имеет для крупных лесных регионов, к которым относится зона бореальных лесов. В планетарном масштабе бореальные леса занимают около 8% суши, в Российской Федерации — примерно 40%. Поэтому исследование аэрозолей на этих территориях необходимо для оценки климатических изменений как в глобальном, так и в региональном масштабах.

* Сергей Сергеевич Власенко (s.vlasenko@spbu.ru); Анастасия Сергеевна Михайлова (st075797@student.spbu.ru); Ольга Александровна Иванова (junga2007@mail.ru); Евгений Юрьевич Небосько (Zhenia84@gmail.com); Евгений Федорович Михайлов (Eugene.mikhailov@spbu.ru); Татьяна Ивановна Рышкевич (ryshkevich_t@mail.ru).

Особенность лесных природных систем заключается в том, что наблюдаемые в них глобальные климатические изменения могут приводить к возникновению различных обратных связей, что, в свою очередь, может усиливать климатическую изменчивость [5, 6]. Так, повышение приземной температуры в Сибири может приводить к сокращению времени существования снежного покрова, увеличению длительности вегетационного периода, понижению влажности, что, в свою очередь, интенсифицирует продуцирование бореальными лесами вторичных органических аэрозолей и повышает вероятность лесных пожаров [7]. Как следствие, растет концентрация углеродсодержащих аэрозолей в воздушном бассейне Сибири, что за счет прямого и косвенного радиационного форсинга приводит к изменению приземной температуры.

Проблема состоит в том, что положительный или отрицательный характер подобных обратных связей определяется оптическими и гигроскопическими свойствами аэрозолей, которые зависят от химического и дисперсного состава частиц. Недостаток информации о физико-химических параметрах аэрозольных частиц является одним из основных источников неопределенности климатических изменений [8]. Поэтому для улучшения точности оценок аэрозольных климатических эффектов необходимы систематические наблюдения за вариациями состава и концентрации аэродисперсных частиц, а также изучение расположения и продуктивности источников атмосферных аэрозолей.

Известно много работ, посвященных таким наблюдениям, проводимым и в Сибирском регионе [9–11], но, как правило, вблизи крупных городов. В 2006 г. в Центральной Сибири была создана международная фоновая наблюдательная станция ZOTTO (Zotino Tall Tower Observatory) с целью долгосрочного мониторинга газового и аэрозольного состава атмосферы и анализа состояния лесных экосистем. Удаленность станции от локальных источников антропогенных загрязнений (ближайший крупный город — Красноярск — находится на расстоянии 600 км от станции) создает уникальные условия для изучения состава фоновых аэрозолей бореальных лесов. С 2010 г. на станции проводятся регулярные фильтровые измерения содержания органического (ОС) и элементарного (ЕС) углерода в атмосферных аэрозолях. Полученные данные позволили выделить сезонные вариации и долгосрочные тренды концентрации указанных компонент [12].

В последнее время при анализе атмосферных данных широко используются рецепторные модели (source-receptor models), которые позволяют по локальным измерениям концентрации какого-либо компонента в одной точке получать информацию о пространственном распределении потенциальных источников этого компонента [13]. Наибольшее распространение при решении подобных задач получили траекторные методы, основанные на анализе массива обратных траекторий воздушных масс, исходящих из точки измерений. В литературе описано

достаточно много таких методик, применимых для анализа как газовых [14], так и аэрозольных [15] составляющих атмосферы.

Цель настоящей работы — с помощью метода концентрационно-взвешенных траекторий получить информацию о пространственном распределении и относительной интенсивности источников углеродсодержащих аэрозолей в Центральной Сибири по данным локальных измерений концентраций ЕС и ОС, проводимых на ст. ZOTTO в течение 2010–2021 гг., а также классифицировать эти источники.

1. Методика измерений и первичные данные

Массовые концентрации ОС и ЕС в атмосферном аэрозоле определялись по результатам анализа аэрозольных проб, отобранных на кварцевые фильтры на ст. ZOTTO, расположенной вблизи пос. Зотино в Красноярском крае (60° с.ш., 90° в.д.). На станции установлена мачта высотой 300 м, с которой производится отбор воздуха для прокачки через фильтры [16], объемный расход воздуха при этом составлял 19 л/мин, смена фильтров осуществлялась раз в 5–7 сут. Таким образом, суммарный объем воздуха, прокачиваемый через один фильтр, составлял 150–200 м³, при этом масса осаждаемого аэрозоля на фильтре варьировалась в пределах от 0,4 до 12 мг в зависимости от уровня загрязненности воздуха. Всего за рассматриваемый период было получено и проанализировано 705 аэрозольных проб.

Количество ОС и ЕС в аэрозольных пробах определялось термооптическим методом с помощью коммерческого анализатора (Thermal/Optical-Transmittance Carbon Aerosol Analyzer; Sunset Laboratory Inc., USA). В данном методе кварцевый фильтр с исследуемым аэрозолем подвергается программируемому нагреву в потоке инертного газа до температуры 870 °С. По мере роста температуры с фильтра испаряются все менее летучие фракции органических соединений, а при самых высоких температурах возгоняется элементарный углерод. Весь углерод, входящий в состав различных испарившихся соединений, каталитически конвертируется в СО₂, затем газовый поток смешивается с водородом и поступает в печь-метанатор, где углекислый газ превращается в метан. Концентрация метана измеряется плазменно-ионизационным детектором. Таким образом по содержанию метана можно определить массу углерода на фильтре. Чувствительность (предел обнаружения) такого метода составляет 0,2 мкг углерода с 1 см² фильтра, случайная погрешность не превышает 6% от массы углеродного материала на фильтре. Методика анализа фильтровых проб более подробно описана в работе [12]. Массовая концентрация аэрозольного углерода в воздухе определялась отношением полученной так массы ОС и ЕС на фильтре к объему прокачанного за время отбора пробы через фильтр воздуха.

Динамика массовых концентраций ОС и ЕС в атмосферных аэрозолях показана на рис. 1. Очевидна сильная изменчивость содержания как органического, так и элементарного углерода, максимальные и минимальные концентрации каждого компонента различаются более чем на два порядка. Данная изменчивость обусловлена прежде всего наличием мощных нестационарных источников углеродсодержащих аэрозольных частиц в регионе. В таких ситуациях принято различать периоды с высоким («загрязненные») и низким («чистые» или «фоновые») содержанием атмосферных примесей. При этом под «фоновыми» условиями понимается состояние атмосферы без заметного воздействия местных или региональных источников загрязнения, но под влиянием выбросов естественного происхождения, а также загрязнений, переносимых от удаленных источников. Обоснование такого разделения и алгоритм расчета фоновых концентраций ОС и ЕС изложены в работах [12, 17, 18], как раз применительно к условиям ст. ZOTTO. Временные зависимости рассчитанных фоновых концентраций для обоих углеродных компонентов показаны на рис. 1.

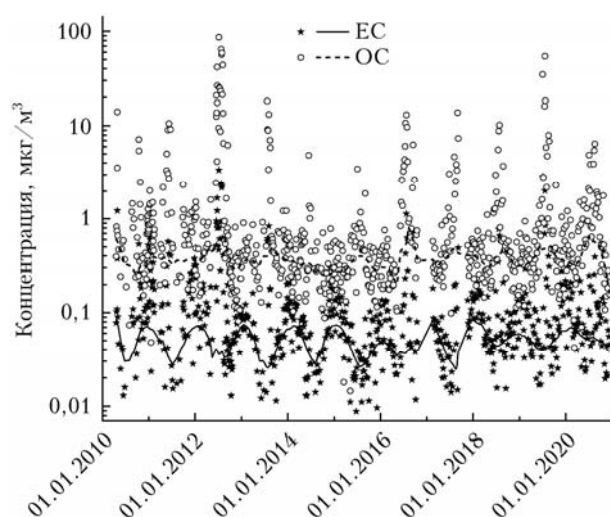


Рис. 1. Временной ход массовых концентраций элементарного и органического аэрозольного углерода по данным измерений на ст. ZOTTO в 2010–2021 гг. (символы — данные измерений; линии — рассчитанные фоновые концентрации)

Представленные графики демонстрируют четко выраженный сезонный ход, причем для ЕС наблюдаются зимние максимумы и летние минимумы фоновых концентраций, а для ОС — обратная зависимость. Подобная сезонная динамика связана с различием преобладающих процессов генерации углеродсодержащих аэрозольных частиц зимой и летом.

2. Метод концентрационно-взвешенных траекторий

Длительные измерения концентрации атмосферной примеси в одной точке (рецепторе) позволяют с помощью рецепторных моделей оценить про-

странственное распределение источников этой примеси на окружающей территории. В настоящей работе применялся метод концентрационно-взвешенных траекторий (CWT — concentration weighted trajectory). Как и все траекторные методы, CWT-метод требует расчета массива обратных траекторий воздушных масс, начинающихся в месте, где расположена наблюдательная станция, в моменты, соответствующие времени проведения измерений. Географическая область, в которой производится поиск источников загрязнения, разбивается координатной сеткой на двумерный массив ячеек. Каждой ячейке сопоставляется взвешенная по траекториям концентрация аэрозольного компонента C_{ij} , рассчитываемая по формуле [15]:

$$C_{ij} = \frac{\sum_{l=1}^N C_l \tau_{ijl}}{\sum_{l=1}^N \tau_{ijl}},$$

где i, j — индексы ячейки; l — номер траектории; N — общее число траекторий; C_l — концентрация компонента, измеряемая в точке наблюдения в момент прихода траектории с номером l ; τ_{ijl} — время, за которое траектория с номером l проходит над ячейкой с номером i, j . Величину C_{ij} часто называют CWT-функцией, и она имеет смысл средней за время измерений концентрации аэрозольного компонента, приносимого в точку наблюдения из ячейки с индексами i, j . Чем выше ее значение для данной ячейки, тем более мощные источники расположены в ней.

В данной работе CWT-функция рассчитывалась в географической области $75\text{--}105^\circ$ в.д. $\times$ $50\text{--}70^\circ$ с.ш. на сетке 150×250 ячеек, характерный размер ячейки составил ~ 10 км. Обратные траектории продолжительностью 120 ч строились с помощью модели HYSPLIT с интервалом 1 ч. Таким образом, общее количество обработанных обратных траекторий было ~ 80 тыс. Надо отметить, что подавляющее большинство траекторий проходили указанный географический домен менее чем за 3 сут. Поскольку углеродсодержащий аэрозоль относится к субмикронной фракции, время его жизни в атмосфере существенно превышает длительность обратных траекторий и его можно считать в первом приближении консервативной примесью. Значения массовых концентраций ЕС и ОС, определяемые по данным анализа фильтровой пробы, приписывались всем траекториям, приходящим в точку измерений в течение времени отбора на данный фильтр.

Основные источники углеродсодержащих аэрозольных частиц расположены на поверхности. Поэтому в нашей работе предложено в формуле для расчета CWT-функции учитывать только те участки траекторий, которые над данной ячейкой проходят на высоте, меньшей, чем высота слоя перемешивания. Высота слоя перемешивания и высота траектории рассчитываются в модели HYSPLIT. Такая модернизация алгоритма уменьшает, на наш взгляд, возможный «маскирующий» эффект от воздушных потоков,

траектории которых проходят над источниками на большой высоте и которые поэтому приносят мало загрязнений в точку измерений. Кроме того, при расчете CWT-функции учитывался эффект вымывания аэрозольных частиц осадками. При прохождении траектории через область с интенсивностью осадков выше 0,5 мм/ч вклад от более ранних участков данной траектории в сумму для вычисления C_{ij} обнулялся.

3. Результаты расчета CWT-функции для органического и элементарного аэрозольного углерода

Для оценки пространственного распределения источников углеродсодержащих аэрозолей в указанной географической области по описанной выше методике были рассчитаны значения соответствующих CWT-функций для ОС и ЕС по данным измерений на ст. ZOTTO с января 2013 г. по декабрь 2021 г.

Для анализа внутригодовой изменчивости аэрозольных эмиссий весь цикл измерений был разбит на теплый («лето») и холодный («зима») сезоны. К холодному периоду относились дни, когда среднедекадная температура в пункте измерений была меньше, чем средняя температура за весь период наблюдений (271 К). Результаты расчетов показаны на рис. 2. Нулевые значения CWT-функций в юго-восточной части географического домена обусловлены тем, что там расположены Саянские горы, которые оказывают экранирующий эффект на движение воздушных масс, т.е. отсутствуют обратные траектории, приходящие в точку измерений с этой территории.

На рис. 2 наблюдается сильная корреляция между пространственным распределением источников ЕС и ОС. Коэффициент корреляции между CWT-функциями для ЕС и ОС $R_T = 0,96 \pm 0,02$ в теплые сезоны, а в холодные $R_X = 0,90 \pm 0,02$. Его высокие значения указывают на то, что ЕС

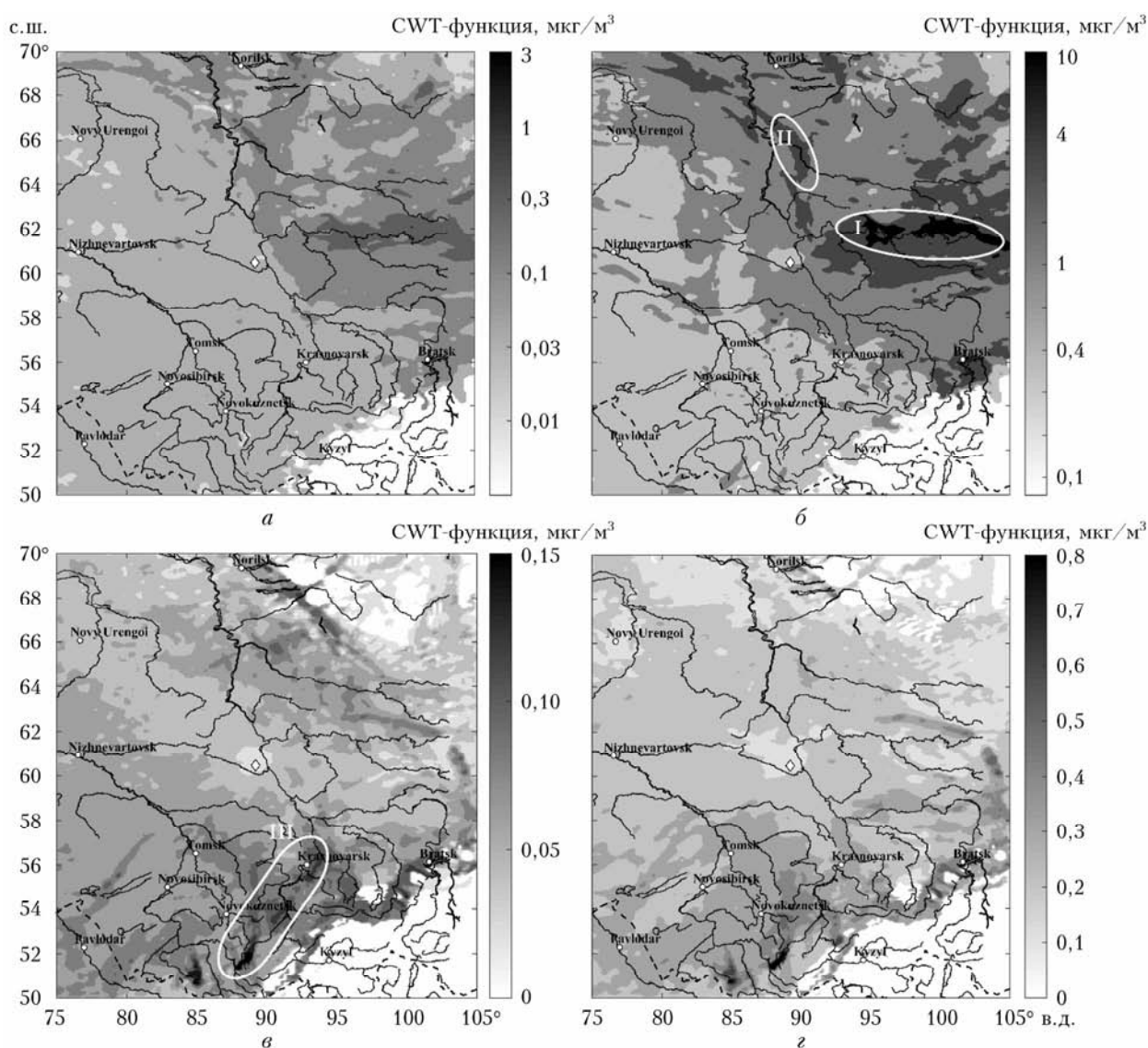


Рис. 2. CWT-функции для элементарного (а, в) и органического (б, г) аэрозольного углерода в теплые (а, б) и холодные (в, г) сезоны; I, II, III — области, для которых определялись коэффициенты регрессии (см. пояснения в тексте)

и ОС, содержащиеся в аэрозольных частицах, генерируются в основном одними и теми же мощными источниками, которые обеспечивают высокие концентрации аэрозольного углерода в точке измерений. Если рассмотреть отдельно «чистые» периоды, когда концентрация аэрозольного углерода была ниже, чем 150% от фоновой концентрации (см. рис. 1), то корреляция между CWT-функциями для ЕС и ОС будет существенно ниже: $R_{т.фон} = 0,73 \pm 0,03$ и $R_{х.фон} = 0,64 \pm 0,03$ для лета и зимы соответственно.

Полученные результаты иллюстрируют ярко выраженный сезонный характер пространственного распределения источников углеродсодержащего аэрозоля. В теплый сезон эмиссия ЕС и ОС существенно выше, чем в холодный. При этом летом основные источники сконцентрированы к востоку и северу от ст. ЗОТТО вдоль р. Подкаменной Тунгуски и Енисея, значения CWT-функций для этих областей более чем на порядок превышают уровни, характерные для остальных рассматриваемых территорий. Естественно соотнести эти мощные источники с лесными пожарами, которые ежегодно охватывают значительную площадь Центральной Сибири в летние сезоны. По результатам космического мониторинга природных пожаров [19, 20] их площадь в Сибирском регионе в среднем составляет ~ 60 тыс. км² ежегодно, при этом в атмосферу поступает около 1 млн т мелкодисперсного аэрозоля (PM_{2,5}). Локализация многочисленных очагов горения меняется как в течение одного сезона (с апреля по сентябрь), так и от года к году практически по всему рассматриваемому региону. Данные многолетнего мониторинга, приведенные в [19], показывают высокую концентрацию лесных пожаров на территориях к востоку от Енисея, что согласуется с высокими значениями CWT-функции, полученными в настоящей работе.

В холодный сезон значения CWT-функций для ОС и ЕС на порядок ниже. Наиболее мощные источники углеродсодержащего аэрозоля зимой расположены в окрестностях крупных промышленных городов (Красноярск, Новокузнецк, Норильск) и сконцентрированы в основном в южной части домена. Скорее всего, это антропогенные источники, связанные с выбросами промышленных предприятий, транспорта и всевозможных численных отоплений.

4. Корреляция между эмиссиями органического и элементарного аэрозольного углерода

Как отмечалось выше, основная доля аэрозольного углерода поступает в атмосферу в результате сгорания органических материалов различного происхождения, когда одновременно производятся и органический, и элементарный углерод. Однако соотношение между этими компонентами различается в зависимости от видов топлива и условий горения [21–23]. Поэтому эмиссионное отношение ОС/ЕС может использоваться в качестве индикатора

происхождения аэрозолей. Понятно, что отношение значений CWT-функций для ЕС и ОС не тождественно эмиссионному отношению, но можно ожидать, что оно так же будет различаться в зависимости от типов источников, преобладающих на данной территории. На рис. 3 показана взаимозависимость между CWT-функциями органического и элементарного углерода в теплый и холодный периоды для регионов с мощными аэрозольными источниками (эти регионы отмечены на рис. 2, б, в). Каждая точка на этих графиках соответствует определенной ячейке географической сетки, и координаты этой точки соответствуют рассчитанным для ячейки значениям CWT-функции для ОС и ЕС.

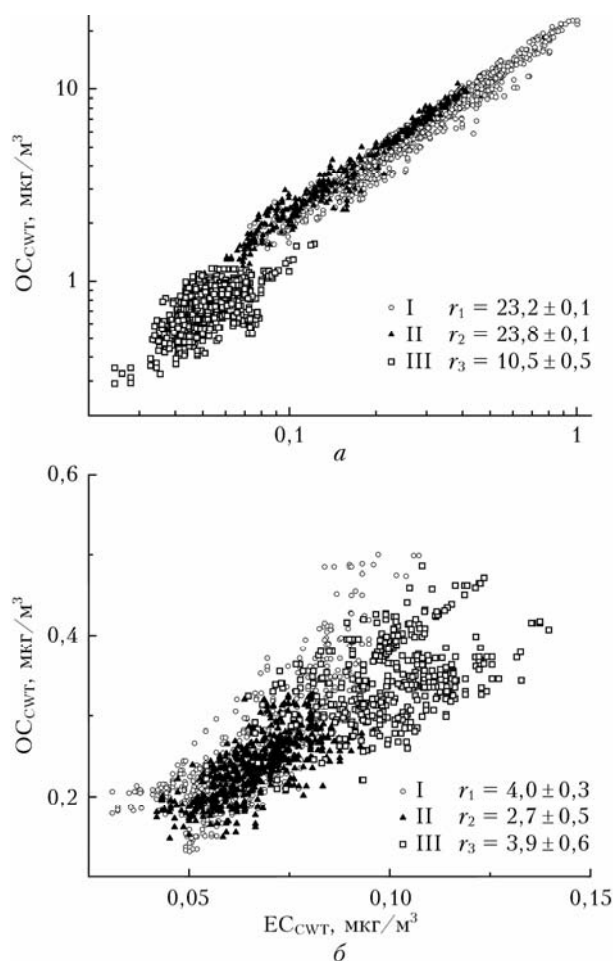


Рис. 3. Корреляция между значениями CWT-функции для элементарного и органического углерода на выделенных территориях: а – теплый сезон; б – холодный сезон (пояснения см. в тексте)

Видно, что летом в регионе Подкаменной Тунгуски и среднего течения Енисея (области I и II) коэффициент линейной регрессии практически одинаковый ($r \approx 23$), что указывает на идентичность источников аэрозольного углерода, связанных с мощными природными пожарами. В эти же сезоны для более населенных регионов (область III) коэффициент регрессии существенно ниже ($r \approx 11$), как и сами значения CWT-функций. Зимой для всех

рассматриваемых областей коэффициенты линейной регрессии еще меньше ($r \approx 2,7 \div 4,0$) и определяются с гораздо большим разбросом. Такие значения, по-видимому, характерны для источников, связанных с интенсивным сжиганием различного ископаемого топлива в отопительный период.

Полученные результаты согласуются с литературными данными об эмиссионных отношениях. По оценкам [21] отношение ОС/ЕС составляет 16 ± 6 для лесных пожаров вне тропиков, 7 ± 4 для сжигания биотоплива и $3,2 \pm 0,3$ для каменного угля. Практическое совпадение эмиссионных соотношений с коэффициентами линейной регрессии для SWT-функций ОС и ЕС позволяет использовать последние для классификации преобладающих источников углеродсодержащих частиц на различных территориях.

Заключение

Проведенный с помощью модифицированного траекторного SWT-метода анализ данных измерений концентрации органического и элементарного аэрозольного углерода на станции ЗОТТО позволил оценить пространственное распределение источников углеродсодержащих частиц в Центральной Сибири ($75\text{--}105^\circ$ в.д.; $50\text{--}70^\circ$ с.ш.) и проследить его сезонную изменчивость. Одновременное определение значений SWT-функций для ОС и ЕС дало возможность выявить регрессионные связи между ними и классифицировать преобладающие на разных территориях процессы генерации аэрозольного углерода. Показано, что в летний период основные источники ОС и ЕС расположены к востоку от ст. ЗОТТО, в регионе р. Подкаменной Тунгуски и связаны, вероятнее всего, с лесными пожарами, на что указывает высокий коэффициент линейной регрессии между значениями SWT-функций. В холодный сезон источники аэрозольного углерода находятся в основном в юго-западной части анализируемой географической области, где расположены крупные города и сосредоточена большая часть населения. Низкие коэффициенты регрессии соответствуют сжиганию топлива транспортом и отопительными станциями.

Современные траекторные методы показали свою перспективность для анализа данных мониторинга атмосферных примесей. Кроме локализации источников они позволяют сравнивать их интенсивность и тип, находить территории, выделяющиеся на фоне остальных (которые имеет смысл изучить с использованием других методов и средств), и тем самым существенно увеличивают объем информации, извлекаемый из данных локальных измерений атмосферных компонентов.

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

Финансирование. Работа выполнена при поддержке НИР СПбГУ (№ 116234388).

Список литературы

1. Crutzen P.J., Birks J.W. The atmosphere after a nuclear war: Twilight at noon // *Ambio*. 1982. V. 11. P. 115–125.
2. Golitsyn G.S., Ginsburg A.S. Comparative estimates of climatic consequences of Martian dust storms and of possible nuclear war // *Tellus*. 1985. V. 37B. P. 173–181.
3. Goetz S.J., Mack M.C., Gurney K.R., Randerson J.T., Houghton R.A. Ecosystem responses to recent climate change and fire disturbance at northern high latitudes: Observations and model results contrasting northern Eurasia and North America // *Environ. Res. Lett.* 2007. V. 2, N 4. DOI: 10.1088/1748-9326/2/4/045031.
4. Tunved P., Hansson H.-C., Kerminen V.-M., Ström J., Dal Maso M., Lihavainen H., Viisanen Y., Aalto P.P., Komppula M., Kulmala M. High natural aerosol loading over boreal forests // *Science*. 2006. V. 312. P. 261–263.
5. Kulmala M., Alekseychek P., Paramonov M., Laurila T., Asmi E., Arneth A., Zilitinkevich S., Kerminen V.-M. On measurement of aerosol particles and greenhouse gases in Siberia and future research needs // *Boreal. Environ. Res.* 2011. V. 16. P. 337–362.
6. Andreae M.O., Rosenfeld D. Aerosol–cloud–precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols // *Earth-Sci. Rev.* 2008. V. 89. P. 13–41.
7. Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Ваганов Е.А., Сухинин А.И., Максюттов Ш.Ш., Мккаллум И., Лаккида И.П. Влияние природных пожаров в России 1998–2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет // *Докл. АН*. 2011. Т. 441, № 4. С. 544–548.
8. Carslaw K.S., Lee L.A., Reddington C.L., Pringle K.J., Rap A., Forster P.M., Mann G.W., Spracklen D.V., Woodhouse M.T., Regayre L.A., Pierce J.R. Large contribution of natural aerosols to uncertainty in indirect forcing // *Nature*. 2013. V. 503, N 7. P. 67–71.
9. Попова С.А., Макаров В.И. Определение концентраций вторичного органического углерода в аэрозолях континентальной территории // *Гео-Сибирь*. 2009. Т. 4, № 2. С. 57–60.
10. Сафатов А.С., Буряк Г.А., Олькин С.Е., Резникова И.К., Макаров В.И., Попова С.А. Анализ данных мониторинга органического/неорганического углерода и суммарного белка в аэрозоле приземного слоя атмосферы юга Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана*. 2013. Т. 26, № 12. С. 1054–1058; Safatov A.S., Buryak G.A., Olkin S.E., Reznikova I.K., Makarov V.I., Popova S.A. Analysis of monitoring data on organic/elemental carbon and total protein in ground air layer aerosol in the south of Western Siberia // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 2. P. 164–168.
11. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Панченко М.В., Тумаков А.Г., Шмаргунов В.П. Свойства атмосферного аэрозоля в дымовых шлейфах лесных пожаров по данным спектрофелометрических измерений // *Оптика атмосф. и океана*. 2014. Т. 27, № 2. С. 126–133; Rakhimov R.F., Kozlov V.S., Panchenko M.V., Tumakov A.G., Shmargunov V.P. Properties of atmospheric aerosol in smoke plumes from forest fires according to spectrophelometer measurements // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 3. P. 275–282.
12. Mikhailov E.F., Mironova S., Mironov G., Vlasenko S., Panov A., Chi X., Walter D., Carbone S., Artaxo P., Heimann M., Lavric J., Pöschl U., Andreae M.O. Long-term measurements (2010–2014) of carbonaceous aerosol and carbon monoxide at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) in central Siberia //

- Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17. P. 14365–14392. DOI: 10.5194/acp-17-14365-2017.
13. Hopke P.K. Recent developments in receptor modeling // J. Chemometrics. 2003. V. 17. P. 255–265.
 14. Giemsa E., Jacobeit J., Ries L., Hachinger S. Investigating regional source and sink patterns of Alpine CO₂ and CH₄ concentrations based on a back trajectory receptor model // Environ. Sci. Europe. 2019. V. 31. DOI: 10.1186/s12302-019-0233-x.
 15. Hao T., Cai Z., Chen S., Han S., Yao Q., Fan W. Transport pathways and potential source regions of PM_{2.5} on the west coast of Bohai Bay during 2009–2018 // Atmosphere. 2019. V. 10. P. 345. DOI: 10.3390/atmos10060345.
 16. Birmili W., Stopfkuchen K., Herman M., Wiedensohler A., Heintzenberg J. Particle penetration through a 300 m inlet pipe for sampling atmospheric aerosols from a tall meteorological tower // Aerosol. Sci. Technol. 2007. V. 41. P. 811–817.
 17. Chi X., Winderlich J., Mayer J.C., Panov A.V., Heilmann M., Birmili W., Heintzenberg J., Cheng Y., Andreae M.O. Long-term measurements of aerosol and carbon monoxide at the ZOTTO tall tower to characterize polluted and pristine air in the Siberian taiga // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13. P. 12271–12298. DOI: 10.5194/acp-13-12271-2013.
 18. Власенко С.С., Волкова К.А., Ионов Д.В., Рышкевич Т.И., Иванова О.А., Михайлов Е.Ф. Изменчивость углеродсодержащей фракции атмосферного аэрозоля вблизи Санкт-Петербурга // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2019. Т. 55, № 6. С. 147–156.
 19. Бондур В.Г., Воронова О.С., Черепанова Е.В., Цидилина М.Н., Зима А.Л. Пространственно-временной анализ многолетних природных пожаров и эмиссий вредных газов и аэрозолей в России по космическим данным // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 4. С. 3–17.
 20. Воронова О.С., Зима А.Л., Кладов В.Л., Черепанова Е.В. Аномальные пожары на территории Сибири летом 2019 г. // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 1. С. 70–82.
 21. Andreae M.O., Merlet P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning // Glob. Biogeochem. Cycl. 2001. V. 15. P. 955–966. DOI: 10.1029/2000GB001382.
 22. Wang Yu., Wang X., Kondo Y., Kajino M., Munger J.W., Hao J.M. Black carbon and its correlation with trace gases at a rural site in Beijing: Top-down constraints from ambient measurements on bottom-up emissions // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. D24304. DOI: 10.1029/2011JD016575.
 23. Kozlov V.S., Panchenko M.V., Yausheva E.P. Mass fraction of black carbon in submicron aerosol as an indicator of influence of smokes from remote forest fires in Siberia // Atmos. Environ. 2008. V. 42, N 11. P. 2611–2620.

S.S. Vlasenko, A.S. Mikhailova, O.A. Ivanova, E.Yu. Nebosko, E.F. Mikhailov, T.I. Ryshkevich.
Spatial distribution of potential sources of carbonaceous aerosols in central Siberia.

We present the results of trajectory analysis of multi-year measurements of organic (OC) and elemental (EC) carbon in aerosols sampled on quartz filters from a height of 300 m at ZOTTO station. The EC and OC concentrations were determined by the thermo-optical method. The obtained time series were supplemented with the HYSPLIT backward trajectories. As a result the CWT and PSCF functions were calculated on a grid of 150 × 250 cells covering the geographical area 30 × 20° with the center in Zotino. These functions characterize the intensity of potential sources of carbon-containing aerosols for a given cell. The results allow us to identify the areas with the strongest organic and elemental carbon emissions and to estimate the seasonal variability of these emissions. In particular, in summer, the main sources of OC and EC are located to the east of Zotino, in the Podkamennaya Tunguska River region, and are most likely associated with forest fires. During the cold seasons, the sources of aerosol carbon dominate in the southwestern part of the geographical area under study, where large cities are located and the bulk of the population is concentrated. It is shown that regression analysis of CWT functions of organic and elemental carbon allows one in some cases to determine the dominant type of sources of carbonaceous aerosols. Our results can be used for estimation of aerosol radiative forcing in Siberia.