

УДК 550.462 : 582.29

ЭЛЕМЕНТНЫЙ И ОРГАНИЧЕСКИЙ УГЛЕРОД В АТМОСФЕРНОМ АЭРОЗОЛЕ НАД СЕВЕРО-ЗАПАДНЫМ ПОБЕРЕЖЬЕМ КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА БЕЛОГО МОРЯ

© 2015 г. В. П. Шевченко, Д. П. Стародымова, А. А. Виноградова,
академик РАН А. П. Лисицын, В. И. Макаров, С. А. Попова, В. В. Сивонен, В. П. Сивонен

Поступило 03.09.2014 г.

DOI: 10.7868/S086956521507021X

Атмосферный перенос взвешенных частиц — самый быстрый канал поступления многих веществ (включая черный углерод) в удаленные районы. Этот механизм переноса вещества имеет особенно большое значение для окружающей среды Арктики [1]. Черный углерод — продукт неполного сгорания различных видов топлива (в особенности угля и дизельного топлива), биомассы (леса, травы, сельскохозяйственных отходов) или биотоплива. Аэрозольный черный углерод — компонент атмосферы, вносящий значительный вклад в климатические изменения в Арктическом регионе [2]. Основная составляющая черного углерода — элементный углерод (ЭУ). В результате горения различных видов топлива, ряда биологических и физико-химических процессов в атмосферу поступает также органический углерод (ОУ).

В морях Российской Арктики и на их побережьях проведен ряд исследований по изучению черного углерода в атмосфере, но они были в основном кратковременными [3–7].

В нашей работе представлены результаты длительных исследований, проводимых с 2010 г. в окрестностях Беломорской биологической станции им. Н.А. Перцова МГУ им. М.В. Ломоносова (ББС МГУ), расположенной на п-ове Киндо на

северо-западном побережье Кандалакшского залива (66.55° с.ш., 33.1° в.д.), в рамках проекта “Система Белого моря” (руководитель — академик А.П. Лисицын) [8]. Район пробоотбора можно считать фоновым, так как расстояние до маленькой ж.-д. ст. Пояконда на трассе Москва–Мурманск 15, а до ближайшего города Кандалакша — 75 км (рис. 1). Отопление на станции только электрическое.

Отбор проб атмосферных аэрозолей производят пробоотборником воздуха UAS-310, который прокачивает воздух через стекловолоконные фильтры “Pall” А/Е. Размеры фильтра, на котором осаждаются частицы мельче 2.5 мкм (PM 2.5), 225 × 172 мм, скорость прокачки воздуха 270 л/мин. Длительность отбора одной пробы порядка недели. После отбора проб фильтры хранятся в стерильных пакетах в холодильнике. На зиму работу пробоотборника приостанавливают.

Количество ЭУ, ОУ на фильтрах определяли в Институте химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН методом реакционной газовой хроматографии, суть которого заключается в термическом разделении ОУ и ЭУ с последующим окислением каждого компонента в диоксид углерода. Последний конвертируется в метан для определения пламенно-ионизационным детектором. Используемый в данной работе метод термического разделения [9, 10] заключается в том, что при нагревании образца до 700°С в инертной атмосфере органические вещества (ОВ) испаряются и определяются как ОУ, а ЭУ определяется отдельно при сгорании в окислительно-инертной атмосфере. Проанализировали 84 пробы, отобранные в 2010–2012 гг.

Средняя концентрация ОУ в приземной атмосфере ББС МГУ составила 524 нг/м³ при относительном стандартном отклонении 90%. Максимальная концентрация ОУ (2600 нг/м³) измерена в период 30.07–02.08.2010 г. Средняя концентрация ЭУ составила 107 нг/м³ (относительное стан-

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова
Российской Академии наук, Москва
E-mail: vshevch@ocean.ru*

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской Академии наук, Москва*

*Институт химической кинетики и горения
им. В.В. Воеводского
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Новосибирск*

*Беломорская биологическая селекция им. Н.А. Перцова,
Кандалакша Мурманской обл.*

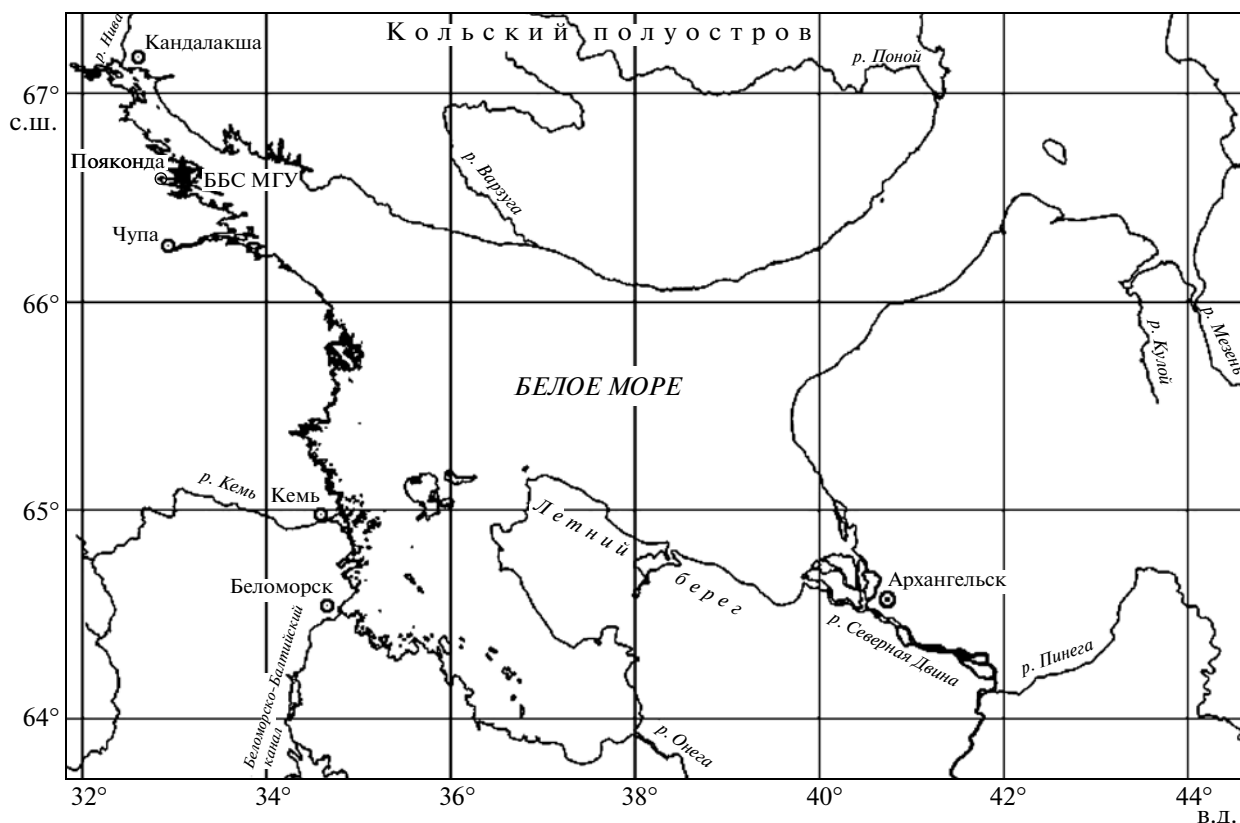


Рис. 1. Расположение точки отбора проб (звездочка).

дартное отклонение 67%), что близко к концентрациям в фоновых районах Арктики (табл. 1). Максимальная концентрация ЭУ, полученная в июле 2010 г., близка к концентрациям черного углерода, характерным для порта Архангельска [4]. Для ОУ характерна значительная изменчивость

по сезонам и годам. Концентрации ОУ, как правило, выше в летние месяцы (рис. 2), в то время как осенью и весной часто эти концентрации ниже предела обнаружения за счет вымывания из атмосферы осадками. Для ЭУ сезонная изменчивость не столь выражена.

Таблица 1. Сравнение полученных оценок концентрации черного углерода в воздухе (нг/м³) с литературными данными по северу Европейской части России

Место, время	Разброс	Среднее	Комментарии	Ссылка
П-ов Киндо, 2010–2012 гг.	20–356	107 ± 66.5	Измерения ЭУ	Данная работа
Ненецкий заповедник, 2001–2010 гг.	18–185	73	Модельные оценки	[11]
Баренцево море, октябрь 1998 г.	10–250	160	Измерения черного углерода	[6]
	660–1650	980	Измерения черного углерода – перенос из Западной Сибири	[6]
Акватория Белого моря, август–сентябрь 2007 г.		43 ± 90	Измерения черного углерода	[4]
Порт Архангельск		360 ± 470	То же	[4]
Акватория Белого моря, август 2006 г.	13–900 (N 284)	120 ± 130	»	[5]
Унский маяк (Летний берег Белого моря), август 2006 г.	8–530 (N 130)	72 ± 94	»	[6]

Примечание. N – количество измерений.

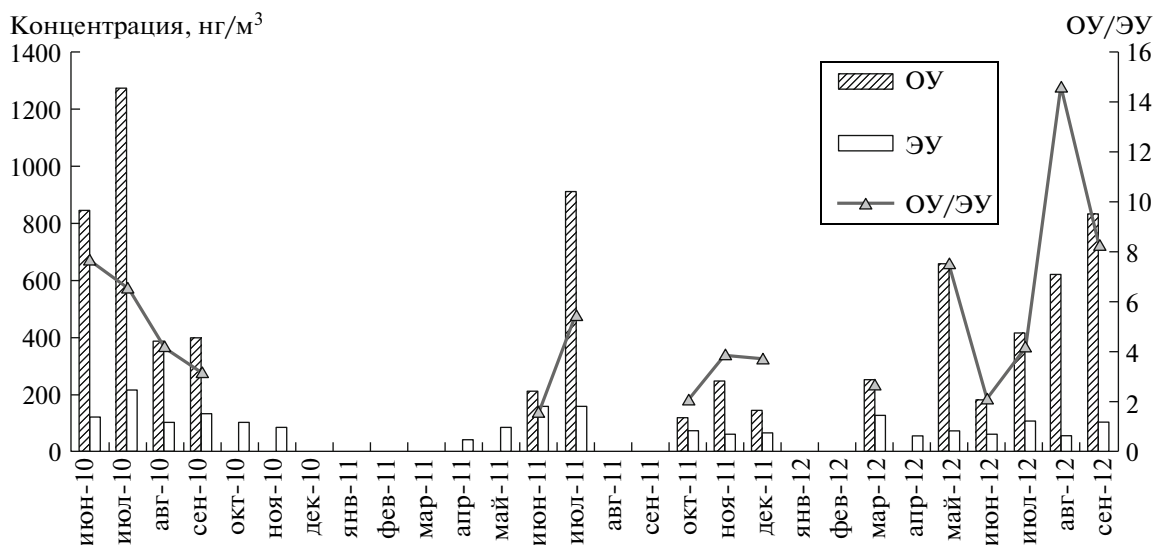


Рис. 2. Распределение среднемесячных концентраций ОУ, ЭУ (нг/м³) и ОУ/ЭУ.

Лето 2010 г. стало аномальным по концентрациям ОУ в атмосфере в районе наблюдений. Средние концентрации ОУ в июне и июле равны соответственно 843 и 1271 нг/м³. Важный источник аэрозольного ОУ в летние месяцы – лесные пожары. В июне 2010 г. средняя концентрация ОУ превысила более чем в 1.5 раза среднее значение по выборке, в то время как период массовых пожаров лесов и торфяников на европейской территории России пришелся на июль–август 2010 г. Повышенные концентрации ОУ в июне можно связать с явлением конденсации газообразных ОВ, образующихся при жизнедеятельности деревьев [12].

Для выявления источника поступления аэрозольного материала с помощью программы HYSPLIT были рассчитаны трехмерные обратные траектории [13] воздушных масс, приходящих на ББС МГУ на уровне 20 м с шагом 12 ч. Для летних месяцев рассчитывали трехсуточные траектории, для остальных – пятисуточные. Для оценки влияния лесных пожаров на состав аэрозоля в летние месяцы 2010–2012 гг. были рассчитаны коэффициенты корреляции (r) между концентрациями ОУ и ЭУ и количеством отдельных траекторий, прошедших через зону действовавших пожаров в период отбора пробы. Расчет вели путем сопоставления карты обратных траекторий с картой действующих в период отбора пробы пожаров [14]. Эти коэффициенты корреляции между концентрациями составили соответственно 0.46 и 0.57 при критическом $r = 0.44$ для 1%-го уровня значимости. Таким образом, существует значимая положительная корреляция между концентрациями ОУ, ЭУ и количеством очагов лесных пожаров, через которые проходят воздушные массы, поступающие в район ББС МГУ. Существование такой связи мо-

жет помочь в изучении истории лесных пожаров в геологическом прошлом по колонкам донных осадков водоемов.

Анализ обратных траекторий выявил другой важный источник ЭУ. Замечено, что в те дни, когда воздушные массы приходят со стороны газовых факелов Северного моря [15] и индустриально развитых районов Северной Европы (западный перенос), значительно возрастает концентрация ЭУ в аэрозольных пробах. На рис. 3 представлена карта обратных траекторий воздушных масс, пришедших на ББС МГУ с 30.07 по 02.08.2010 г. Отобранная в это время проба характеризуется максимальной концентрацией ОУ (2600 нг/м³) и третьей по величине концентрацией ЭУ (257 нг/м³). В этот период воздушные массы приходили со стороны Северного моря, промышленных районов Северной Европы и юга России, где в это время было большое количество лесных пожаров, что обеспечило повышенные концентрации ЭУ, ОУ.

Анализ обратных траекторий, рассчитанных для других сезонов, показал, что в весенний и осенне-зимний периоды повышенные концентрации ОУ связаны с воздушными массами, приходящими с Кольского п-ова, а повышенные концентрации ЭУ – с поступлением воздушных масс из районов, для которых характерны эмиссии в атмосферу от факелов нефтедобычи Северного моря и индустриально развитых районов Северной Европы. В пробе, отобранной 7–14 сентября 2012 г., концентрации ОУ, ЭУ составляли 1384 и 115 нг/м³ соответственно; концентрация ОУ более чем вдвое превышала среднее значение по выборке. Воздушные массы в эти дни приходили с Кольского п-ова и из окрестностей Архангельска.

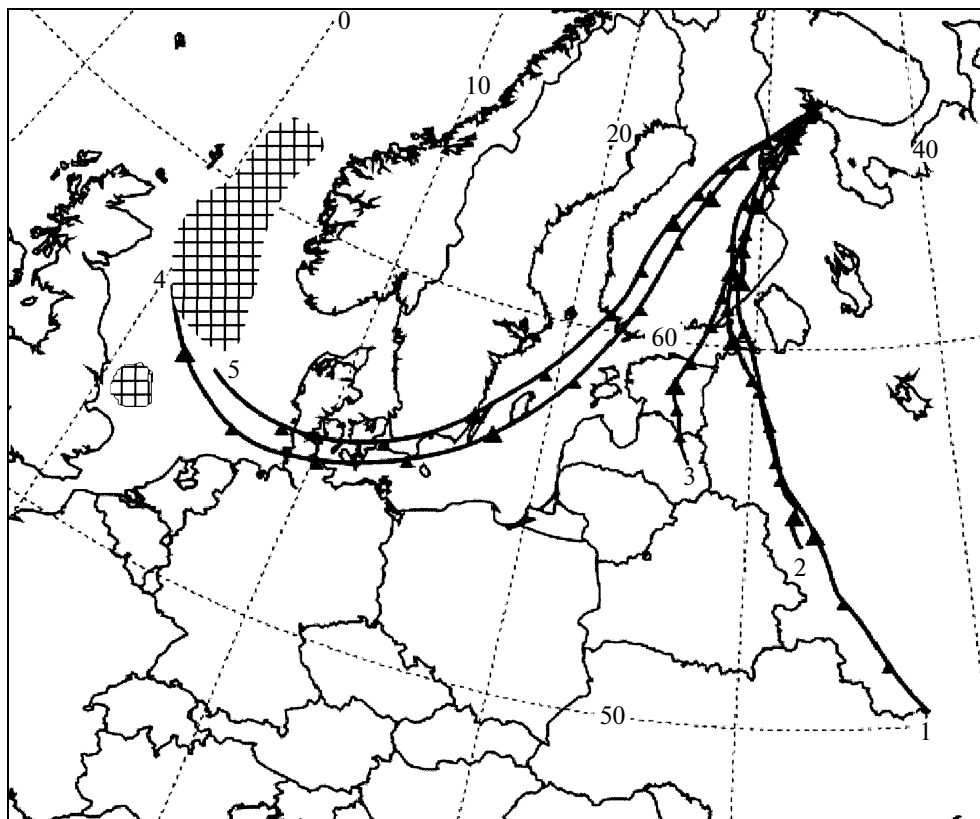


Рис. 3. Обратные траектории воздушных масс, прибывающих на БГС МГУ на высоте 20 м над уровнем моря с 31.07. по 02.08.2010 г. Траектории рассчитаны по [13] с шагом 12 ч. Цифрами обозначены траектории, прибывшие в точку пробоотбора: в 7 : 00, 19 : 00 по Гринвичу 31.07.2010 г. (1, 2); в 7 : 00, 19 : 00 01.08.2010 г. (3, 4); в 7 : 00 02.08.2010 г. (5). Области распространения нефтегазовых факелов [15] заштрихованы.

Таким образом, полученные результаты показывают, что в аэрозолях приземного слоя атмосферы на побережье Кандалакшского залива Белого моря концентрации ОУ характеризуются сильной сезонной и годовой изменчивостью. Показано, что другой источник ОУ в летний период – местные и удаленные лесные пожары. Лето 2010 г. было аномальным по концентрациям ОУ в воздухе, что может быть обусловлено явлением конденсации газообразных ОВ, образующихся при жизнедеятельности деревьев в начале лета, и действием лесных пожаров в середине лета. В осенне-зимний и весенний периоды существенный источник поступления ОУ – индустриально развитые районы Кольского п-ова.

Концентрации ЭУ в этом районе находятся на фоне для Арктики уровне и характеризуются незначительными сезонной и годовой изменчивостями. Существенный источник ЭУ – западный перенос со стороны индустриально развитых районов Северной Европы, в том числе газовые факелы нефтяных месторождений Северного моря. В летние месяцы лесные пожары – дополнительный источник ЭУ.

Авторы выражают благодарность А.Б. Цетлину, А.В. Савченко, Н.А. Вершинину, Л.Д. Папунашвили, А.А. Клювиткину, А.Н. Новигатскому, А.С. Филиппову за помощь в организации и проведении отбора проб, К.П. Куценогому, О.С. Покровскому, Й.Е. Сонке (J.E. Sonke), А. Штолю (A. Stohl) – за поддержку.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы 44 фундаментальных исследований Президиума РАН (проект “Седиментологические и биогеохимические исследования...”), РФФИ (гранты 14–05–93089, 14–05–31512, 14–05–00059), Научного фонда Норвегии (проект SLIC-FONIA) и экспедиционного гранта СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А., Смирнов В.В., Серова В.В., Штайн Р. // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 6–7. С. 551–576.
2. Quinn P.K., Stohl A., Arneth A., Berntsen T., Burkhardt J.F., Christensen J., Flanner M., Kupiainen K., Lihavainen H., Shepherd M., Shevchenko V., Skov H., Vestreng V. The Impact of Black Carbon on Arctic Climate. Oslo: Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), 2011. 72 p.

3. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Купцов В.М., Ван-Малдерен Г., Мартэн Ж.-М., Ван-Грикен Р., Хуан В.В. // *Океанология*. 1999. Т. 39. № 1. С. 142–151.
4. Польшкин В.В., Панченко М.В., Грищенко И.В., Коробов В.Б., Лисицын А.П., Шевченко В.П. // *Оптика атмосферы и океана*. 2008. Т. 21. № 10. С. 836–840.
5. Козлов В.С., Тихомиров А.Б., Панченко М.В., Шмаргунов В.П., Польшкин В.В., Сакерин С.М., Лисицын А.П., Шевченко В.П. // *Оптика атмосферы и океана*. 2009. Т. 22. № 8. С. 767–776.
6. Копейкин В.М., Репина И.А., Гречко Е.И., Огородников Б.И. // *Оптика атмосферы и океана*. 2010. Т. 23. № 6. С. 444–450.
7. Stohl A., Klimont Z., Eckhardt S., Kupiainen K., Shevchenko V.P., Kopeikin V.M., Novigatsky A.N. // *Atmos. Chem. and Phys.* 2013. V. 13. P. 8833–8855. DOI:10.5194/acp-13-8833-2013.
8. Лисицын А.П. В кн.: Система Белого моря. Т. I. Природная среда водосбора Белого моря. М.: Науч. мир, 2010. С. 353–445.
9. Makarov V.I., Koutsenogii K.P., Koutsenogii P.K. // *J. Aerosol Sci.* 1999. V. 30. P. S255–S256.
10. Самсонов Ю.Н., Попова С.А., Беленко О.А., Чанкина О.В. // *Оптика атмосферы и океана*. 2008. Т. 21. № 6. С. 523–531.
11. Виноградова А.А., Веремейчик А.О. // *Оптика атмосферы и океана*. 2013. Т. 26. № 6. С. 443–451.
12. Kulmala M., Vehkamäki H., Petäjä T., Dal Maso M., Lauri A., Kerminen V.-M., Birmili W., McMurry P.H. // *J. Aerosol Sci.* 2004. V. 35. № 2. P. 143–176.
13. Draxler R.R., Rolf G.D. HYSPLIT (Hebrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory). Silver Spring (MD): NOAA Air Resources Lab., 2003. Mod access via NOAA ARL READY Website (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>).
14. <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/firemap/>
15. <http://geology.com/articles/oil-fields-from-space/>