

УДК 550.462:582.29

ЧЕРНЫЙ УГЛЕРОД В ПРИВОДНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ НАД СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКОЙ И МОРЯМИ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ В ИЮНЕ–СЕНТЯБРЕ 2017 г.

© 2019 г. В. П. Шевченко^{1*}, В. М. Копейкин^{2**}, А. Н. Новигатский¹, Г. В. Малафеев¹

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

*e-mail: vshevch@ocean.ru

² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

**e-mail: kopeikin@ifaran.ru

Поступила в редакцию 05.12.2018 г.

После доработки 23.12.2018 г.

Принята к публикации 05.02.2019 г.

В статье представлены результаты исследования концентраций черного углерода в приводном слое атмосферы над Балтийским и Северным морями, Северной Атлантикой, Норвежским, Баренцевым, Карским морями и морем Лаптевых в период с 30 июня по 29 сентября 2017 г. в 68- и 69-м рейсах научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш”. Черный углерод оказывает существенное влияние на климатические изменения и степень загрязнения Арктики. Черный углерод образуется в результате неполного сгорания ископаемого топлива (в первую очередь угля, нефти) и биомассы или биотоплива. Он состоит из субмикронных частиц и их агрегатов и может переноситься на большое расстояние от источника. Пробы отбирали прокачкой воздуха в течение 4–6 часов через кварцевые фильтры Hahnemule на высоте 10 м над уровнем моря при встречном ветре для исключения попадания на фильтры дыма из трубы судна. В дальнейшем содержание черного углерода определяли в лабораторных условиях азталометрическим методом. Обратные траектории переноса воздушных масс и транспортируемых ими частиц черного углерода в точки отбора проб рассчитывали с помощью модели HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) на сайте <http://www.arl.noaa.gov/ready.html>. Проведенные исследования показывают низкие значения концентраций черного углерода (<50 нг/м³) вдоль маршрута экспедиции тогда, когда воздушные массы поступали из фоновых районов Северной Атлантики и Арктики. Высокие концентрации черного углерода (100–200 нг/м³ и выше) характерны для участков с активным судоходством (Юго-Восточная Балтика, Северное море) и вблизи портов (например, Рейкьявик), а также при поступлении воздушных масс из индустриально развитых районов Европы в Юго-Восточной Балтике и из районов нефтегазовых месторождений, на которых проводят сжигание попутного газа (Северное, Норвежское и Карское моря).

Ключевые слова: аэрозоли, черный углерод, Северная Атлантика, Российская Арктика, загрязнение атмосферы, сжигание попутного газа

DOI: 10.31857/S0030-1574595771-776

ВВЕДЕНИЕ

Существенное влияние на климатические изменения и степень загрязнения Арктики оказывает черный углерод (black carbon), являющийся важным компонентом аэрозолей и нерастворимых частиц, накапливающихся в снежном покрове [12, 17, 18]. Черный (сажевый) углерод образуется в результате неполного сгорания ископаемого топлива (в первую очередь угля, нефти) и биомассы или биотоплива. Он состоит из субмикронных частиц и их агрегатов и может переноситься на большое расстояние от источника, как и значительная часть рассеянного осадочного вещества атмосферы [15, 17]. Кроме различного воздействия на радиационные свой-

ства атмосферы, черный углерод оказывает заметное влияние на оптические свойства подстилающей поверхности: выпадая на снег и лед, он изменяет альбедо и радиационный баланс в слое “атмосфера — земная поверхность” [17, 18]. Частицы сажи являются опасным загрязняющим веществом воздуха для здоровья людей, особенно в районах интенсивного транспорта (в том числе вблизи портов). Они составляют значительную часть фракции аэрозолей с диаметром менее 2.5 мкм, являющихся наиболее токсичными: такие частицы вызывают и усиливают дыхательные, сердечно-сосудистые и аллергические заболевания [14, 18].

Исследования черного углерода в приводном слое атмосферы над Северной Атлантикой и мо-

рями Российской Арктики проводились в ряде экспедиций [3–7, 16, 19–21].

Целью данного исследования являлось изучение количественного распределения черного углерода в приводном слое воздуха над Северной Атлантикой и ее морями (Балтийским и Северным) и морями Российской Арктики в летне-осенний период и определение его основных регионов-источников.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пробы для определения концентрации черного углерода (сажи) в приводном слое воздуха над Северной Атлантикой и ее морями (Балтийским и Северным) отбирали с 30 июня по 9 августа 2017 г. в 68-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” и с 24 августа по 29 сентября 2017 г. в 69-м рейсе этого судна прокачкой воздуха в течение 4–6 часов через кварцево-волоконные фильтры Nahpmetule на высоте 10 м над уровнем моря при встречном ветре для исключения попадания на фильтры дыма из трубы судна. Районы отбора проб показаны на рис. 1 и 2. В дальнейшем содержание черного углерода определяли в лабораторных условиях аэталометрическим методом [21]. Обратные траектории переноса воздушных

масс и транспортируемых ими аэрозолей, включая черный углерод, в точки отбора проб рассчитывали с помощью модели HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) на сайте <http://www.arl.noaa.gov/ready.html> [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показаны значения концентраций сажевого углерода ($\text{нг}/\text{м}^3$) в приводном слое атмосферы, полученные по ходу движения судна в 68-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” в июне – августе 2017 г. Высокие концентрации сажевого углерода ($100\text{--}200 \text{нг}/\text{м}^3$ и выше) характерны для областей, находящихся под сильным антропогенным влиянием. Так, выделяются районы с активным судоходством и промышленностью в Юго-Западной Балтике (№ 107–109). В 2011 г. концентрация черного углерода в приводном слое атмосферы над Восточной Балтикой по литературным данным в среднем составляла $280 \text{нг}/\text{м}^3$ [9]. Активная добыча углеводородного сырья и сжигание попутных газов на шельфе Северного моря повышает уровень концентрации сажевого углерода в этих областях (№ 110, 111, 114). Кроме этого, здесь активное судоходство. Было показано, что выбросы черного углерода и парни-

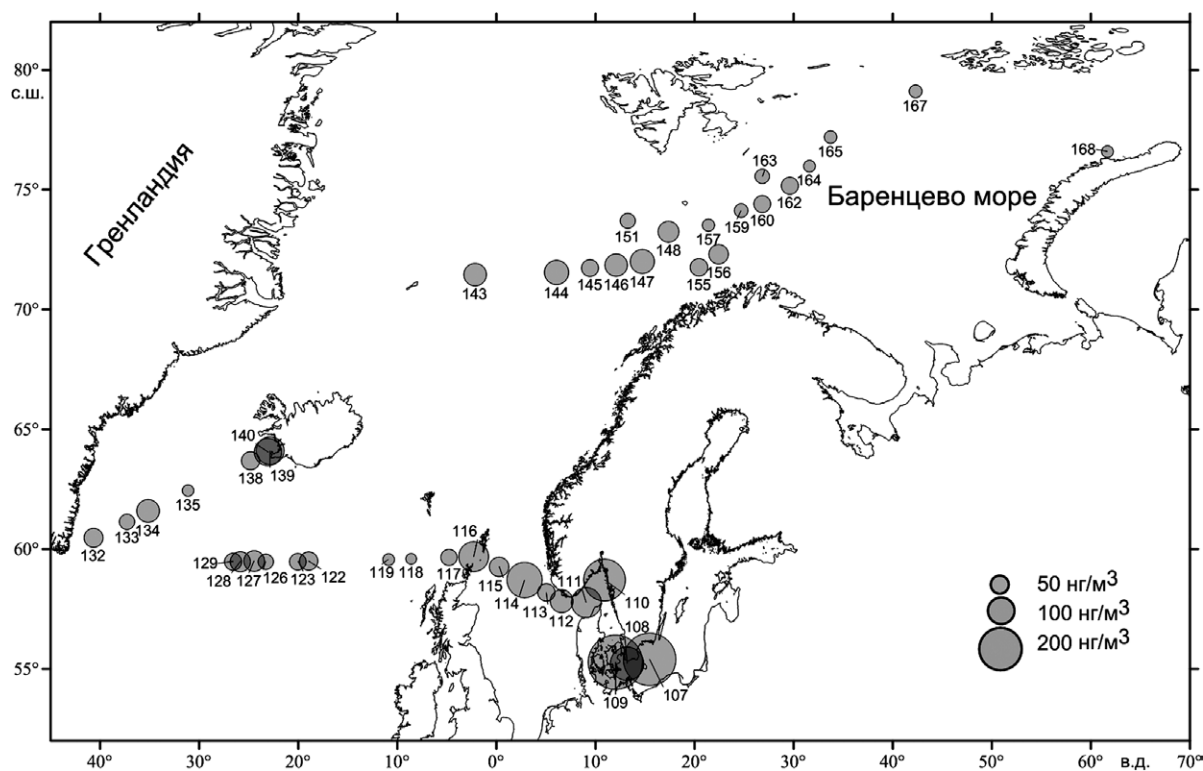


Рис. 1. Концентрация черного углерода ($\text{нг}/\text{м}^3$) в приводном слое атмосферы, 30.06–9.08.2017 г.

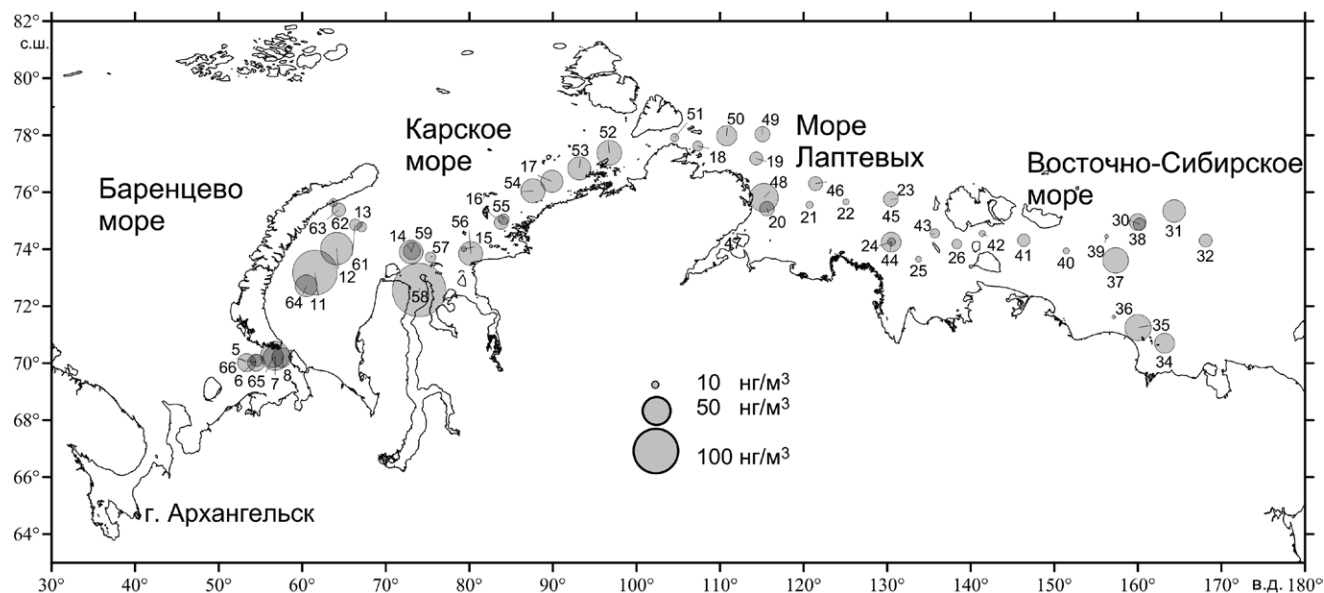


Рис. 2. Концентрация черного углерода ($\text{нг}/\text{м}^3$) в приводном слое атмосферы, 24.08–29.09.2017 г.

ковых газов в атмосферу являются существенной частью их эмиссий в районах активного судоходства и оказывают существенное влияние на климат и загрязнение окружающей среды [11]. Кроме того, выделяются зоны с портовой инфраструктурой (№ 139–140, порт Рейкьявик), где фиксируются достаточно высокие концентрации сажевого углерода $100\text{--}120 \text{ нг}/\text{м}^3$.

На открытых участках Северной Атлантики в первой половине июля 2017 г. концентрации черного углерода варьируют от 29 до $88 \text{ нг}/\text{м}^3$, в среднем $58.2 \text{ нг}/\text{м}^3$ при стандартном отклонении $17.5 \text{ нг}/\text{м}^3$ ($n = 14$ проб). Рассчитанные обратные траектории воздушных масс для точек с низкими концентрациями показывают, что атмосферные потоки прибывали из юго-западных областей Северной Атлантики (рис. 3а) или Центральной Арктики.

В Норвежском море во второй половине июля концентрации черного углерода были выше (от 50 до $95 \text{ нг}/\text{м}^3$, в среднем $76.6 \text{ нг}/\text{м}^3$ при стандартном отклонении $17.4 \text{ нг}/\text{м}^3$, $n = 8$). Одной из причин повышения концентраций черного углерода в этом районе является сжигание попутных газов.

В период с 29 июля по 9 августа 2017 г. концентрации черного углерода над Баренцевым морем варьировали от 34 до $72 \text{ нг}/\text{м}^3$, составляя в среднем $46.2 \text{ нг}/\text{м}^3$ при стандартном отклонении $12.9 \text{ нг}/\text{м}^3$ ($n = 10$). Воздушные массы в этот район поступали в основном из чистых районов Центральной Арктики (рис. 3б).

Во время 69-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” в юго-восточной части Баренцева моря 24 августа 2017 г. и 29 сентября 2017 г. концентрации черного углерода варьировали от 24 до $52 \text{ нг}/\text{м}^3$, составляя в среднем $36.2 \text{ нг}/\text{м}^3$ при стандартном отклонении $9.2 \text{ нг}/\text{м}^3$ ($n = 6$). Ранее, в октябре 2015 г., во время экспедиции “Север-2015” на борту НЭС “Академик Трёшников” концентрации черного углерода были в основном ниже $30 \text{ нг}/\text{м}^3$ [16].

Во второй половине августа 2013 г. во время экспедиции на НЭС “Академик Фёдоров” концентрации черного углерода в восточной части Баренцева моря вблизи берегов Кольского полуострова варьировали от 80 до $250 \text{ нг}/\text{м}^3$ (в среднем $140 \text{ нг}/\text{м}^3$ при стандартном отклонении $100 \text{ нг}/\text{м}^3$, $n = 3$), а на удалении от Кольского полуострова — от 30 до $80 \text{ нг}/\text{м}^3$ (в среднем $60 \text{ нг}/\text{м}^3$ при стандартном отклонении $20 \text{ нг}/\text{м}^3$, $n = 6$) [19].

На рис. 2 показаны концентрации сажевого углерода ($\text{нг}/\text{м}^3$) в приводном слое атмосферы, полученные по ходу движения судна в 69-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш”. В целом на открытых морских участках преобладают низкие концентрации ($20\text{--}50 \text{ нг}/\text{м}^3$), при среднем значении $30.8 \text{ нг}/\text{м}^3$ (стандартное отклонение $16.7 \text{ нг}/\text{м}^3$, $n = 54$), которые допустимо считать фоновыми.

Рассчитанные с помощью модели HYSPLIT [10] обратные траектории воздушных масс для точек с низкими концентрациями показывают,

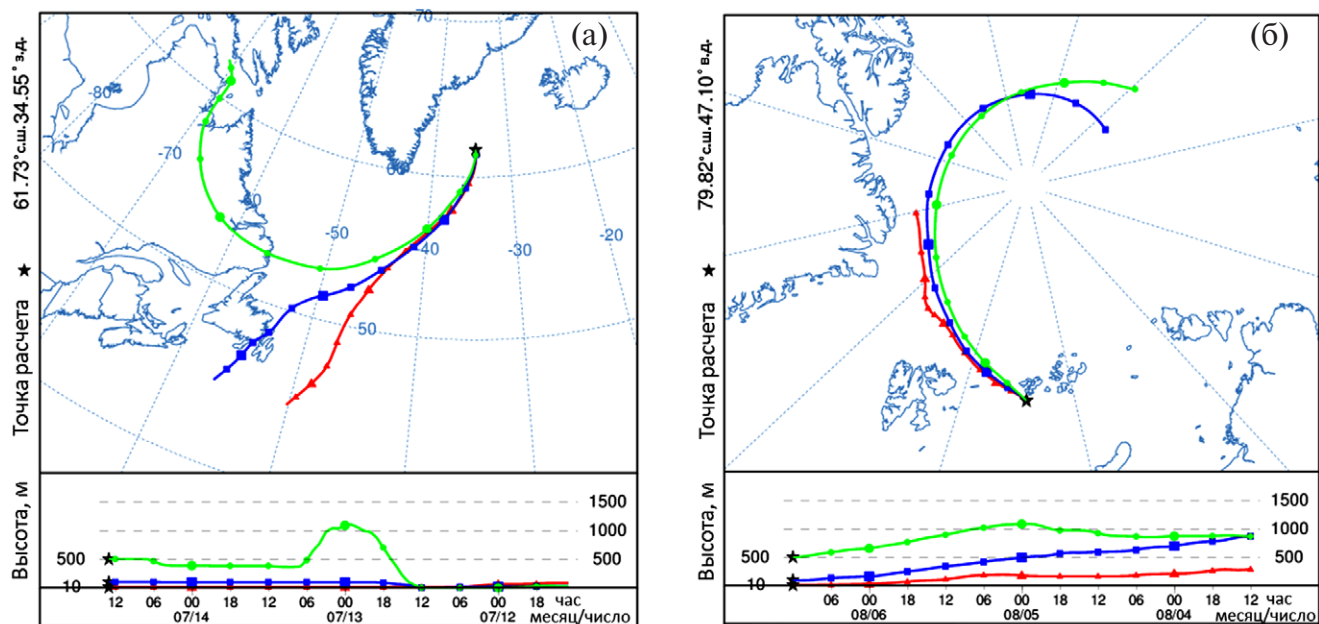


Рис. 3. Обратные траектории воздушных масс для района отбора проб в Северной Атлантике и Баренцевом море: (а) — № 135 от 13:00 UTC (всемирное координированное время) 14.07.2017 г.; (б) — № 167 от 12:00 UTC 06.08.2017 г., рассчитанные по методу, описанному в работе [10].

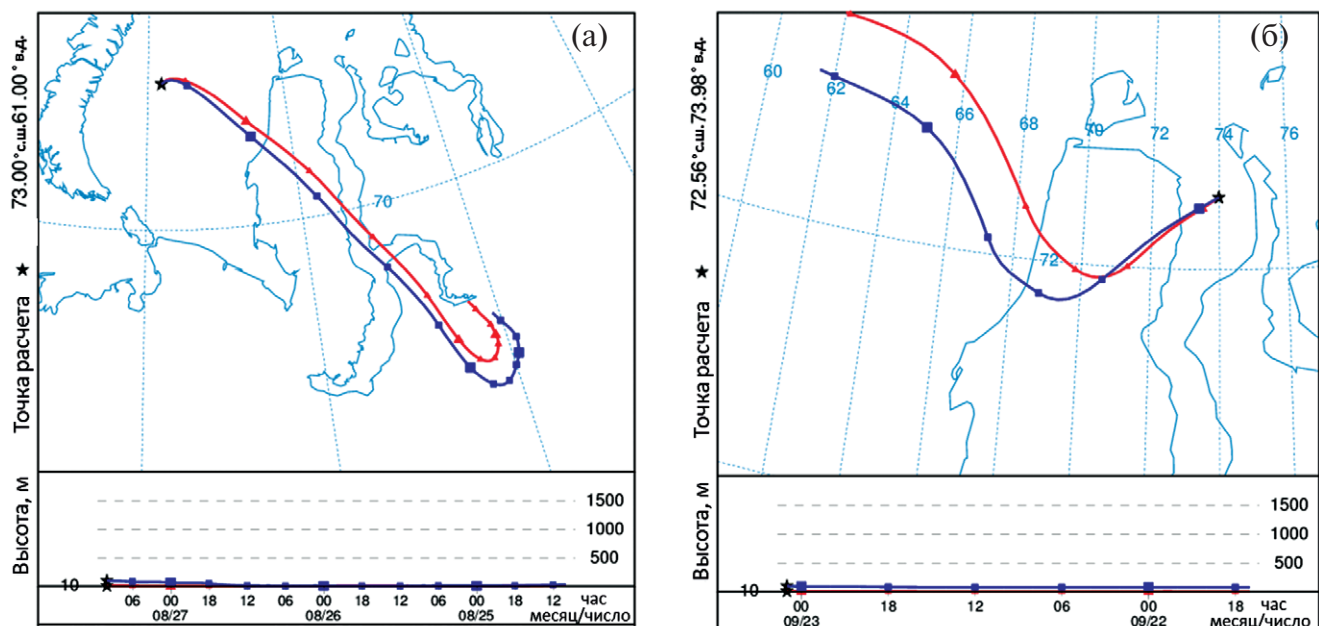


Рис. 4. Обратные траектории воздушных масс для района отбора проб в Карском море: (а) — № 11 от 10:00 UTC 27.08.2017 г.; (б) — № 58 от 1:00 UTC 23.09.2017 г., рассчитанные по методу, описанному в работе [10].

что атмосферные потоки прибывали из северных и северо-восточных районов Арктики.

Высокие концентрации сажевого углерода (79 и 93 нг/м³) в Карском море зафиксированы в области Новоземельской котловины (№ 11, рис. 4а) и в устье р. Оби (№ 58, рис. 4б), что связано с поступлением воздушных масс из райо-

нов добычи углеводородов и сжигания попутных газов в Западной Сибири [1, 2].

Ранее такое увеличение концентраций черного углерода в Карском море было зарегистрировано при поступлении воздушных масс со стороны севера Западной Сибири в сентябре—октябре 2011 г. (59-й рейс НИС “Академик

Мстислав Келдыш”) [21], сентябре–октябре 2015 г. (63-й рейс НИС “Академик Мстислав Келдыш” и в экспедиции “Север-2015”) [16, 20].

Для двух проб в Карском море в сентябре 2015 г. наряду с поступлением воздушных масс из районов со сжиганием попутных газов было отмечено поступление воздушных масс из районов в период происходящих лесных пожаров в Сибири [20]. Сравнительно высокие концентрации черного углерода (около 100 нг/м^3) были отмечены у северной оконечности Новой Земли 9–11 сентября 2016 г. во время поступления воздушных масс со стороны Южной Сибири в период мощных лесных пожаров на севере Иркутской области [6].

Концентрация черного углерода над морем Лаптевых в периоды с 31 августа по 4 сентября и с 13 сентября по 21 сентября 2017 г. варьировала от 6 до 51 нг/м^3 , составляя в среднем 22.9 нг/м^3 при стандартном отклонении 11.2 нг/м^3 ($n = 18$). В июне 2010 г. на побережье море Лаптевых в районе Тикси концентрация черного углерода в среднем составляла 26 нг/м^3 [3]. В сентябре 2015 г. в море Лаптевых вблизи порта Тикси была зарегистрирована концентрация черного углерода равная 112 нг/м^3 при поступлении воздушных масс из районов происходящих тогда лесных пожаров в Сибири, т. е. наряду с влиянием порта существенный вклад в концентрацию черного углерода вносили частицы, образовавшиеся в результате лесных пожаров [20].

Высокие значения эмиссии антропогенного черного углерода в атмосферу характерны для густонаселенных, экономически развитых районов центра Европейской территории России, южных районов Урала и Западной Сибири, а также для малонаселенных Ямало-Ненецкого и Ханты-Мансийского автономных округов, промышленность которых основана на добыче природных нефти и газа и где широко проводится сжигание попутных газов [1, 2, 13, 22].

Повышение концентрации элементного (черного) углерода на северо-западном побережье Кандалакшского залива Белого моря на полуострове Киндо отмечали ранее во время поступления воздушных масс со стороны Северного и Норвежского морей, где происходит активная добыча нефти и газа и сжигание попутных газов [8].

ВЫВОДЫ

Таким образом, проведенные исследования показали, что низкие значения концентраций черного углерода вдоль маршрута экспедиции наблю-

дались тогда, когда воздушные массы поступали из фоновых районов Северной Атлантики и Арктики. Высокие концентрации были характерны для участков с активным судоходством (Юго-Восточная Балтика, Северное море) и вблизи портов (например, Рейкьявик), а также при поступлении воздушных масс из индустриально развитых районов и из районов нефтегазовых месторождений, на которых проводят сжигание попутного газа (Северное, Норвежское и Карское моря).

Благодарности. Авторы благодарят академика А. П. Лисицына за поддержку и ценные советы, экипаж научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш” за помощь в экспедиции, Э. В. Соколову за помощь в обработке фильтров.

Источник финансирования. Экспедиционные исследования проведены при поддержке РФФИ (грант № 14-50-00095). Интерпретация результатов выполнена в рамках госзадания ФАНО (тема № 0149-2019-0007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградова А. А.* Эмиссии антропогенного черного углерода в атмосферу: распределение по территории России // *Оптика атмосферы и океана*. 2014. Т. 27. № 12. С. 1059-1065.
2. *Виноградова А. А., Васильева А. В.* Черный углерод в воздухе северных районов России: источники, пространственные и временные вариации // *Оптика атмосферы и океана*. 2017. Т. 30. № 6. С. 467-475.
3. *Голобокова Л. П., Польшкин В. В., Кабанов Д. М. и др.* Исследования атмосферного аэрозоля в арктических районах России // *Лед и снег*. 2013. № 2 (122). С. 129-136.
4. *Польшкин В. В., Голобокова Л. П., Козлов В. С. и др.* Оценка связи микрофизического и химического состава для приводного аэрозоля Белого моря // *Оптика атмосферы и океана*. 2004. Т. 17. № 5-6. С. 377-385.
5. *Польшкин В. В., Панченко М. В., Грищенко И. В. и др.* Исследования дисперсного состава приводного аэрозоля Белого моря в конце летнего сезона 2007 г. // *Оптика атмосферы и океана*. 2008. Т. 21. № 10. С. 836-840.
6. *Терпугова С. А., Зенкова П. Н., Кабанов Д. М. и др.* Результаты исследований характеристик аэрозоля в атмосфере Карского и Баренцева морей в летне-осенний период 2016 г. // *Оптика атмосферы и океана*. 2018. Т. 31. № 5. С. 391-402.
7. *Шевченко В. П., Лисицын А. П., Куццов В. М. и др.* Состав аэрозолей в приводном слое атмосферы над морями западного сектора Российской Арктики // *Океанология*. 1999. Т. 39. № 1. С. 142-151.
8. *Шевченко В. П., Стародымова Д. П., Виноградова А. А. и др.* Элементный и органический углерод в атмосферном аэрозоле над северо-западным побережьем Кандалакшского залива Белого моря // *Докл. РАН*. 2015. Т. 461. № 1. С. 70-74.

9. Byčenkienė S., Ulevičius V., Dudoitis V., Pauraitė J. Identification and characterization of black carbon aerosol sources in the East Baltic region // *Advances in Meteorology*. 2013. V. 2013. Article ID 380614.
10. Draxler R. R., Rolph G. D. HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory). Silver Spring (MD): NOAA Air Resources Lab., 2003. Mod access via NOAA ARL READY Website (www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html).
11. Fuglestedt J., Bernsten T., Eyring V. et al. Shipping emissions: from cooling to warming of climate and reducing impacts on health // *Environmental Science & Technology*. 2009. V. 43. № 24. P. 9057-9062.
12. Hansen J., Nazarenko L. Soot climate forcing via snow and ice albedos // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2004. V. 101. P. 423-428.
13. Huang K., Fu J. S., Prikhodko V. Y. et al. Russian anthropogenic black carbon: Emission reconstruction and Arctic black carbon simulation // *J. Geophys. Res: Atmospheres*. 2015. V. 120. № 21. P. 11306-11333.
14. Lappalainen H. K., Kerminen V.-M., Petaja T. et al. Pan-Eurasian Experiment (PEEX): towards holistic understanding of the feedbacks and interactions in the land-atmosphere-ocean-society continuum in the northern Eurasian region // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2016. V. 16. P. 14421-14461.
15. Lisizin A. P. Arid sedimentation in the oceans and atmospheric particulate matter // *Russian Geology and Geophysics*. 2011. V. 52. № 10. P. 1100-1133.
16. Popovicheva O. B., Evangelidou N., Eleftheriadis K. et al. Black carbon constrained by observations in the Russian high Arctic // *Environmental Science & Technology*. 2017. V. 51. № 7. P. 3871-3879.
17. Quinn P. K., Bates T. S., Baum E. et al. Short-lived pollutants in the Arctic: their climate impact and possible mitigation strategies // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2008. V. 8. № 6. P. 1723-1735.
18. Quinn P. K., Stohl A., Arneth A. et al. The Impact of Black Carbon on Arctic Climate. Oslo: Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), 2011. 72 p.
19. Sakerin S. M., Bobrikov A. A., Bukin O. et al. On measurements of aerosol-gas composition of the atmosphere during two expeditions in 2013 along the Northern Sea Route // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2015. V. 15. № 21. P. 12413-12443.
20. Shevchenko V. P., Kopeikin V. M., Evangelidou N. et al. Atmospheric black carbon over the North Atlantic and the Russian Arctic seas in summer — autumn time // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2016. Т. 24. № 4. С. 441-446.
21. Stohl A., Klimont Z., Eckhardt S. et al. Black carbon in the Arctic: the underestimated role of gas flaring and residential combustion emissions // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2013. V. 13. № 17. P. 8833-8855.
22. Vinogradova A. A. Anthropogenic black carbon emissions to the atmosphere: surface distribution through Russian territory // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2015. V. 28. № 2. P. 158-164.

BLACK CARBON IN THE MARINE BOUNDARY LAYER OVER THE NORTH ATLANTIC AND SEAS OF THE RUSSIAN ARCTIC IN JUNE-SEPTEMBER 2017

© 2019 V. P. Shevchenko^{1*}, V. M. Kopeikin^{2**}, A. N. Novigatsky¹, G. V. Malafeev¹

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*e-mail: vshevch@ocean.ru

² A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**e-mail: kopeikin@ifaran.ru

Received December 05, 2018

Revised version received December 23, 2018

After revision February 05, 2019

The paper presents the results of a study of the concentrations of black carbon in the marine boundary layer over the Baltic and North Seas, the North Atlantic, the Norwegian, the Barents, the Kara and the Laptev seas from June 30 to September 29, 2017 in the 68th and 69th voyages of research vessel "Akademik Mstislav Keldysh". Black carbon has a significant impact on climate change and the degree of pollution of the Arctic. Black carbon is formed as a result of incomplete combustion of fossil fuels (primarily coal, oil) and biomass or biofuel. It consists of submicron particles and their aggregates and can be transported a great distance from the source. Samples were taken by pumping air for 4–6 hours through quartz filters Hahnemule at an altitude of 10 m above sea level in a headwind to prevent smoke of the vessel from entering the filters. Subsequently, the black carbon content was determined in the laboratory by the aetometric method. The backward trajectories of the air mass transfer and the black carbon particles transported by them to the sampling points were calculated using the HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) model at <http://www.arl.noaa.gov/ready.html>. The conducted studies show low values of black carbon concentrations (<50 ng/m³) along the expedition route when air masses came from the background areas of the North Atlantic and the Arctic. High concentrations of black carbon (100–200 ng/m³ and higher) are characteristic for areas with active navigation (the South-Eastern Baltic, the North Sea) and near ports (eg Reykjavik), as well as for incoming air masses from the industrialized regions of Europe to South-Eastern Baltic and from areas of oil and gas fields where associated gas is flared (the North, the Norwegian and the Kara seas).

Keywords: aerosols, black carbon, North Atlantic, Russian Arctic, atmospheric pollution, gas flaring