

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

УДК 551.510.4

DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-4-405-421

ХАРАКТЕРИСТИКИ АЭРОЗОЛЯ НАД АРКТИЧЕСКИМИ МОРЯМИ ЕВРАЗИИ: РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ 2018 ГОДА И СРЕДНЕЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ В ЛЕТНЕ-ОСЕННИЕ ПЕРИОДЫ 2007–2018 ГОДОВ

В.Ф. РАДИОНОВ¹, Д.М. КАБАНОВ², В.В. ПОЛЬКИН², С.М. САКЕРИН², О.Н. ИЗОСИМОВА³

¹ — ГИЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

² — ФГБНУ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

³ — ФГБНУ Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия

**vradion@aari.ru*

AEROSOL CHARACTERISTICS OVER THE ARCTIC SEAS OF EURASIA: RESULTS OF MEASUREMENTS IN 2018 AND AVERAGE SPATIAL DISTRIBUTION IN THE SUMMER-AUTUMN PERIODS OF 2007–2018

V.F. RADIONOV¹, D.M. KABANOV², V.V. POLKIN², S.M. SAKERIN², O.N. IZOSIMOVA³

¹ — State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

² — V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

³ — Limnology Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

**vradion@aari.ru*

Received July, 25, 2019

Accepted October, 2, 2019

Keywords: aerosol, arctic seas, atmosphere, spatial distribution.

Summary

In August-September 2018, on the route of the expedition “Arctic-2018” (R/V “Akademik Tryoshnikov”) in the Arctic Ocean we carried out the following cycle of measurements of aerosol characteristics: aerosol optical depth (AOD) of the atmosphere in the wavelength range of 0.34–2.14 μm , number concentrations of particles with diameters of 0.4–10 μm , and mass concentration

Citation: Radionov V.F., Kabanov D.M., Polkin V.V., Sakerin S.M., Izosimova O.N. Aerosol characteristics over the Arctic seas of Eurasia: results of measurements in 2018 and average spatial distribution in the summer-autumn periods of 2007–2018. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65 (4): 405–421. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-4-405-421.

of absorbing substance (black carbon) in the near-ground layer. The optical and microphysical characteristics of aerosol were measured using portable sun photometer SPM, photoelectric particle counter AZ-10, and aethalometer MDA.

Analysis of the measurements showed that aerosol and black carbon concentrations are maximal in the atmosphere of the Barents Sea and especially in its southern part, subject to outflows of fine aerosol from the north of Europe. The average aerosol characteristics near Kola Peninsula had been 7.2 cm^{-3} for aerosol concentration, 167 ng/m^3 for black carbon concentration, and 0.16 for AOD ($0.5 \mu\text{m}$).

To estimate the specific features of the spatial variations in aerosol over the Arctic seas of Russia, we generalized the measurements in nine (2007–2018) expeditions. All aerosol characteristics are found to decrease from west toward east in the average spatial distribution. The average concentrations of aerosol are 3.5 cm^{-3} , black carbon concentrations are 41.2 ng/m^3 , and AOD ($0.5 \mu\text{m}$) values are 0.080 over the Barents Sea; and they decrease to 1.96 cm^{-3} , 24.3 ng/m^3 , and 0.039 respectively over the East Siberian Sea. The decreasing tendency in the northeastern direction is noted in more detailed latitude-longitude distributions of aerosol characteristics in the atmosphere over the Barents and Kara Seas.

Поступила 25 июля 2019 г.

Принята к печати 2 октября 2019 г.

Ключевые слова: арктические моря, атмосфера, аэрозоль, пространственное распределение.

В экспедиции «Арктика-2018» проведен очередной цикл измерений характеристик аэрозоля: аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы, счетных концентраций частиц ($0.4\text{--}10 \mu\text{км}$) и массовой концентрации сажи. Анализ данных показал, что максимальными концентрациями аэрозоля и сажи отличается атмосфера Баренцева моря и особенно южная часть, подверженная выносам мелкодисперсного аэрозоля с севера Европы. Вблизи Кольского полуострова средние концентрации аэрозоля составили $7,2 \text{ см}^{-3}$, сажи — 167 нг/м^3 , АОТ ($0,5 \mu\text{км}$) — 0,16. Для оценки пространственной изменчивости характеристик аэрозоля проведено обобщение данных измерений в девяти экспедициях (2007–2018). В среднем пространственном распределении отмечен спад всех характеристик аэрозоля с запада на восток. Над Баренцевым морем средние концентрации аэрозоля составляют $3,5 \text{ см}^{-3}$, сажи — $41,2 \text{ нг/м}^3$, АОТ ($0,5 \mu\text{км}$) — 0,080, а над Восточно-Сибирским морем они уменьшаются до $1,96 \text{ см}^{-3}$, $24,3 \text{ нг/м}^3$ и 0,039 соответственно.

ВВЕДЕНИЕ

Атмосферный аэрозоль играет важную роль в формировании климатического и экологического состояния природной среды. В связи с происходящими изменениями климата и освоением Арктического бассейна особое значение приобрели исследования физико-химического состава и изменчивости аэрозоля в высоких широтах. Наряду с наблюдениями на арктических станциях [1–4], в последние годы активно развиваются исследования аэрозоля в морских экспедициях [4–7]. Наибольшее распространение получили измерения с борта научных судов аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы, счетной концентрации частиц аэрозоля и содержания в нем поглощающего вещества, которое обычно называют сажой, или black carbon.

На основе проведенных исследований установлено, что дефицит аэрозоля от собственных источников в арктической зоне восполняется выносами антропогенного и дымового аэрозоля из средних широт Евразии и Северной Америки [1, 2, 8–10]. Влияние аэрозольных загрязнений на арктическую атмосферу усиливается в конце зимы – начале весны. Температурные инверсии в этот период приводят к накоплению аэрозоля в подинверсионных слоях тропосферы, формирующего так называемую арктическую дымку [1, 11, 12].

Наши исследования в нескольких экспедициях в арктических морях Евразии [5, 13, 14] показали, что оптические и микрофизические характеристики аэрозоля

в летне-осенний период в среднем уменьшаются с запада на восток (от Баренцева моря до Восточно-Сибирского моря). В настоящей работе представлены результаты измерений характеристик аэрозоля на маршруте НЭС «Академик Трёшников» в экспедиции «Арктика-2018» и анализируются особенности среднего пространственного распределения аэрозоля в Российском секторе Северного Ледовитого океана (СЛО) на основе обобщенного массива данных, полученных в девяти арктических экспедициях в период с 2007 по 2018 г.

ХАРАКТЕРИСТИКА ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Маршрут экспедиции «Арктика-2018» на НЭС «Академик Трёшников» проходил от Баренцева моря до Восточно-Сибирского моря (рис. 1). Измерения характеристик аэрозоля выполнялись в период с 18 августа по 29 сентября 2018 г. При анализе полученных результатов дополнительно использованы данные измерений характеристик аэрозоля над Баренцевым морем в предшествующей экспедиции — 71-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» (8–14 августа 2018 г.) [15].

В измерениях характеристик аэрозоля, как и в других наших экспедициях [5, 13, 14], использовался комплект приборов в составе солнечного фотометра SPM [16], аэталометра МДА [17] и счетчика частиц АЗ-10. На основе фотометрических наблюдений определялись: спектральные АОТ атмосферы в диапазоне спектра 0,34–2,14 мкм (τ_{λ}^a), параметры Ангстрема α и β , грубо- и мелкодисперсная компоненты АОТ (τ^c и $\tau_{0,5}^f$ — на длине волны 0,5 мкм), а также общее влагосодержание атмосферы W . С помощью счетчика частиц и аэталометра измерялись: счетные концентрации частиц диаметром 0,4–10 мкм (N_a), концентрации частиц мелкодисперсной N_f ($d = 0,4-1$ мкм) и грубодисперсной N_c ($d > 1$ мкм) фракций и массовая концентрация в аэрозоле поглощающего вещества — сажи (M_{bc}).

Измерения приземных характеристик аэрозоля (N_a , M_{bc}) осуществлялись в автоматическом режиме, круглосуточно, с периодичностью 1 ч. Фотометрические наблюдения выполнялись сериями из нескольких замеров в ситуациях, когда Солнце

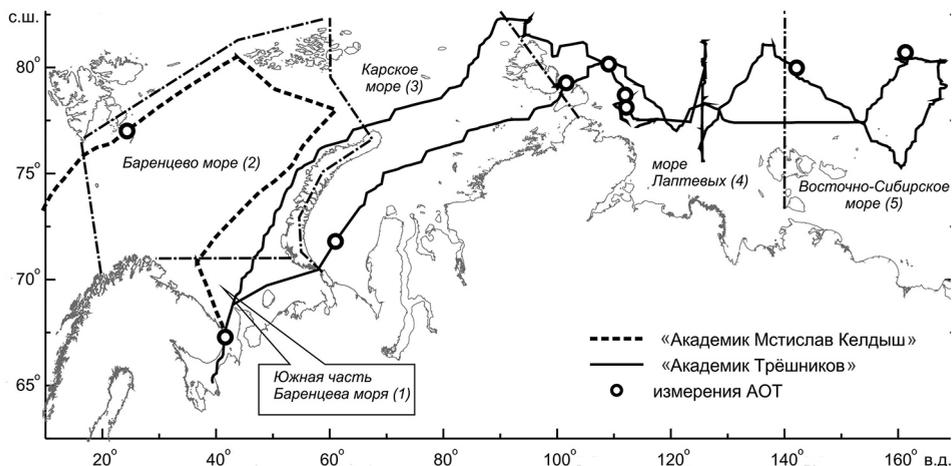


Рис. 1. Маршруты экспедиций 2018 г. на НЭС «Академик Трёшников» и «Академик Мстислав Келдыш» (штрихпунктирными линиями обозначены границы районов)

Fig. 1. Routes of cruises of R/V “Akademik Mstislav Keldysh” and R/V “Akademik Tryoshnikov” in 2018 (the dash-dotted lines indicate the boundaries of the analyzed areas)

Список арктических экспедиций, в которых проводились измерения характеристик атмосферного аэрозоля (2007–2018)

Экспедиции	Период	Арктические моря	Источник
54-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш»	Сентябрь – октябрь 2007	Баренцево и Карское	[18]
АВЛАП/NAVOS-2013 на НЭС «Академик Федоров»	Август – сентябрь 2013	Баренцево, Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское	[5]
1-й рейс УПС «Профессор Хлюстин»	Август 2013	Восточно-Сибирское, Чукотское	[5]
АВЛАП/NAVOS-2015 на НЭС «Академик Трёшников»	Август – октябрь 2015	Баренцево, Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское	[14]
66-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш»	Июль – август 2016	Баренцево и Карское	[13]
67-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш»	Август – октябрь 2016	Баренцево, Карское, Норвежское	[13]
«Арктический плавучий университет» на НИС «Профессор Молчанов»	Июль 2017	Баренцево	[14]
71-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш»	Июль – август 2018	Северная Атлантика, Баренцево	[15]
«Арктика-2018» на НЭС «Академик Трёшников»	Август – сентябрь 2018	Баренцево, Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское	Данная статья

не было закрыто облаками. Более подробно методики измерений характеристик аэрозоля описаны в работах [5, 18].

В табл. 1 представлен перечень арктических экспедиций, результаты измерений в которых использовались в настоящей работе. Маршруты экспедиционных измерений характеристик аэрозоля в 2007–2017 гг. приводились в [14]. Общий объем данных, полученных в акватории различных морей (секторах СЛО), приведен в табл. 2.

Таблица 2

**Количество дней измерений характеристик аэрозоля
в различных арктических морях (секторах СЛО):
1-я строка — экспедиции 2018 г., 2-я строка — все экспедиции**

Характеристики	Баренцево море	Карское море	Море Лаптевых	Восточно-Сибирское море
Концентрации N_a, M_{bc}	10 68	7 92	17 60	12 40
АОТ	2 23	1 19	4 6	1 3

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Характеристики аэрозоля в экспедиции «Арктика-2018»

Временной ход среднесуточных концентраций аэрозоля и сажи в период экспедиции «Арктика-2018» иллюстрируется на рис. 2. Общий диапазон изменения концентраций составил: $N_a = (N_f + N_c)$ от 0,15 до 16,9 см⁻³, M_{bc} от 7,9 до 638 нг/м³.

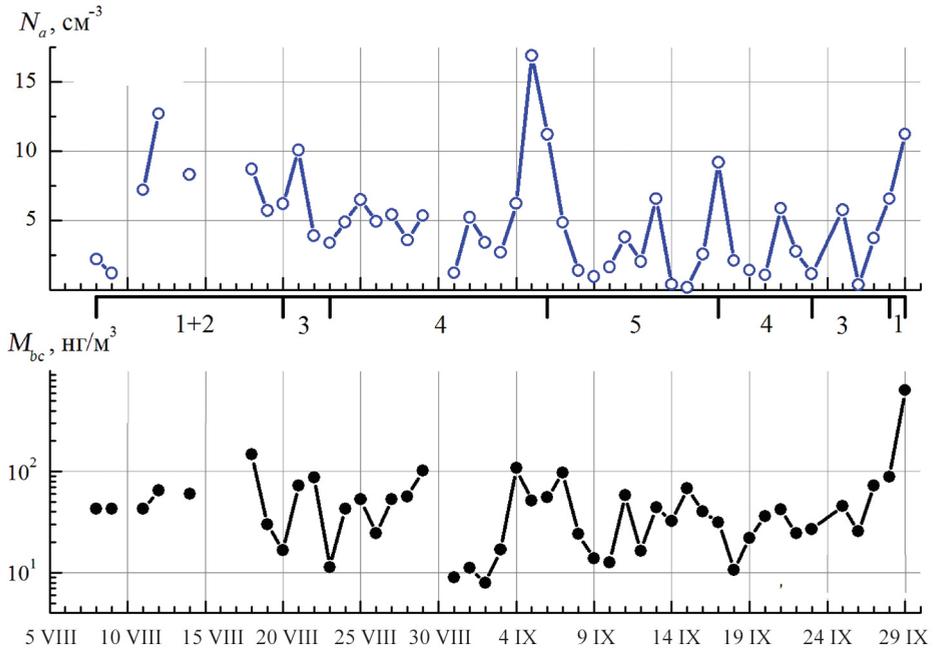


Рис. 2. Вариации среднесуточных значений N_a и M_{bc} на маршруте экспедиций 2018 г. (цифрами обозначены районы измерений: 1 — Баренцево море южнее 71° с.ш., 2 — Баренцево море севернее 71° с.ш., 3 — Карское море, 4 — море Лаптевых, 5 — Восточно-Сибирское море)

Fig. 2. Variations of the average daily values of N_a and M_{bc} on the expedition route 2018 (the numbers indicate the measurement areas: 1 — Barents Sea South of 71° N, 2 — Barents Sea North of 71° N, 3 — Kara Sea, 4 — Laptev Sea, 5 — East Siberian Sea)

Самые высокие концентрации аэрозоля зарегистрированы 5 сентября в северо-восточной части моря Лаптевых. Анализ 6-суточных обратных траекторий движения воздушных масс (HYSPLIT model, <https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>) и спутниковых карт температурных аномалий (пожаров), представленных на сайте (<https://worldview.earthdata.nasa.gov>), показал, что максимум N_a 05.09.2018 был обусловлен выносом дымов лесных пожаров из Якутии (рис. 3). Для приземных характеристик аэрозоля высота прихода траекторий в точку измерений задавалась 10 м.

Два других максимума концентраций аэрозоля наблюдались 12.08 и 29.09.2018 в южной части Баренцева моря. В этом же районе 29.09.2018 зарегистрировано самое высокое содержание сажи. Повышенные концентрации аэрозоля и сажи на юге Баренцева моря (вблизи Кольского полуострова) отмечались и в других наших экспедициях, так как влияние континентальных выносов здесь наиболее вероятно и значительно.

Для оценки особенностей пространственного распределения аэрозоля над СЛО рассчитаны средние характеристики для пяти районов экспедиции (табл. 3 и рис. 4): 1) Баренцево море южнее 71° с.ш.; 2) Баренцево море севернее 71° с.ш.; 3) Карское море; 4) море Лаптевых; 5) Восточно-Сибирское море; 6) среднее для СЛО (районы 2–5). Из приведенных данных видно, что не только южная часть, но и Баренцево море в целом отличается более высоким содержанием мелкодисперсного аэрозоля

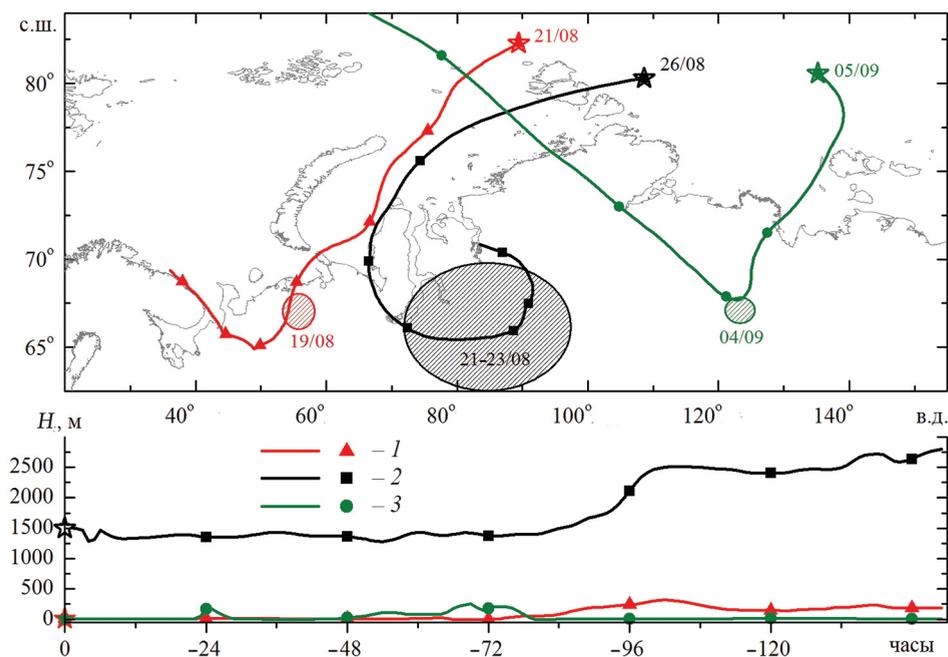


Рис. 3. Обратные траектории движения воздушных масс от очагов температурных аномалий (кружки со штриховкой) в место измерений (звездочки): 1 — с 19 по 21 августа на высоту 10 м; 2 — с 21–23 по 26 августа на высотах 1,5–2,7 км; 3 — с 4 по 5 сентября на высоту 10 м

Fig. 3. Backward trajectories of air mass movement from the foci of temperature anomalies (circles with hatching) to the measurement site (asterisks): 1 — from 19 to 21 August to a height of 10 m; 2 — from August 21–23 to August 26 at altitudes of 1.5–2.7 km; 3 — from 4 to 5 September at a height of 10 m

Таблица 3

**Средние (\pm СКО) концентрации аэрозоля и сажи
над арктическими морями России:
1-я строка — экспедиции 2018 г., 2-я строка — все экспедиции**

№	Районы СЛО	N_p , см^{-3}	$N_{c,2}$, см^{-3}	$M_{h,2}$, нг/м^3
1	Баренцево море южнее 71° с.ш.	$6,83 \pm 4,67$	$0,37 \pm 0,28$	167 ± 244
		$3,60 \pm 2,76$	$0,23 \pm 0,32$	$53,2 \pm 95,4$
2	Баренцево море севернее 71° с.ш.	$5,93 \pm 4,36$	$0,19 \pm 0,19$	$40,8 \pm 27,2$
		$3,42 \pm 3,34$	$0,08 \pm 0,10$	$41,2 \pm 50,1$
3	Карское море	$5,79 \pm 5,02$	$0,33 \pm 0,29$	$50,7 \pm 37,1$
		$1,91 \pm 2,37$	$0,24 \pm 0,44$	$28,7 \pm 27,9$
4	Море Лаптевых	$4,71 \pm 4,65$	$0,23 \pm 0,26$	$35,5 \pm 49,9$
		$2,33 \pm 3,36$	$0,11 \pm 0,18$	$25,8 \pm 34,0$
5	Восточно-Сибирское море	$3,33 \pm 4,18$	$0,13 \pm 0,20$	$29,7 \pm 50,0$
		$1,86 \pm 2,69$	$0,10 \pm 0,14$	$24,3 \pm 36,3$
6	СЛО (районы 2–5)	$4,44 \pm 4,54$	$0,19 \pm 0,24$	$35,9 \pm 47,0$
		$2,26 \pm 2,88$	$0,17 \pm 0,33$	$29,9 \pm 35,5$

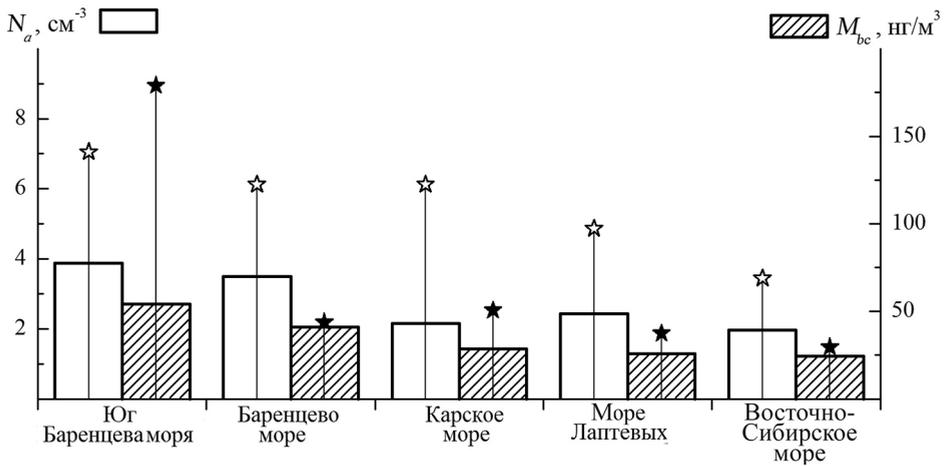


Рис. 4. Средние концентрации аэрозоля и сажи над арктическими морями, рассчитанные по данным измерений в 2018 г. (звездочки) и во всех экспедициях (столбики)

Fig. 4. Average concentrations of aerosol and soot over the Arctic seas, calculated from measurements in 2018 (asterisks) and in all expeditions (columns)

из-за близости к густонаселенным и промышленно развитым районам Скандинавии и Поморья (Мурманская, Архангельская области). Концентрации аэрозоля и сажи, измеренные около Кольского полуострова (район 1), близки к данным, полученным в акватории Белого моря в экспедициях 2003–2007 гг. Согласно [18, 19], средние августовские значения N_a и M_{bc} над Белым морем за период 2007–2018 гг. в диапазонах значений $N_a = 7,2\text{--}13,2 \text{ см}^{-3}$, $M_{bc} = 120\text{--}550 \text{ нг/м}^3$.

Концентрации аэрозоля и сажи, измеренные в других районах СЛО (2–5), заметно меньше: $N_a = 3,4\text{--}6,1 \text{ см}^{-3}$, $M_{bc} = 29,7\text{--}50,7 \text{ нг/м}^3$. В среднем пространственном распределении концентрации аэрозоля и сажи над арктическими морями (см. рис. 4), как и ранее [14], прослеживается спад с запада на восток. Однако концентрации, особенно N_a , оказались в среднем выше, чем в предшествующих экспедициях [14]: $N_a = 1,4\text{--}3,2 \text{ см}^{-3}$, $M_{bc} = 21\text{--}38 \text{ нг/м}^3$. Превышение концентраций (в сравнении с прошлыми данными), по нашему мнению, было обусловлено относительно большей частотой дымовых выносов. В частности, увеличение средних концентраций N_a и M_{bc} в 2018 г. над Карским морем произошло из-за выноса дымовых шлейфов с севера Республики Коми (см. траекторию переноса 21.08.2018 на рис. 3). Источником дымового аэрозоля могли быть как торфяные/лесные пожары, так и сжигание попутного газа предприятий нефте- и газодобычи, расположенных в этом районе.

Более полное представление о среднем дисперсном составе аэрозоля в различных районах СЛО дают объемные функции распределения частиц (dV/dr). Из рис. 5a видно, что атмосфера в южной части Баренцева моря отличается максимальными значениями (dV/dr) в диапазоне как мелких, так и крупных частиц. Высокие средние значения (dV/dr) получены также над Карским морем из-за ситуации дымового выноса 21.08.2018. Нижнее положение на рисунке занимает функция распределения (dV/dr) над Восточно-Сибирским морем.

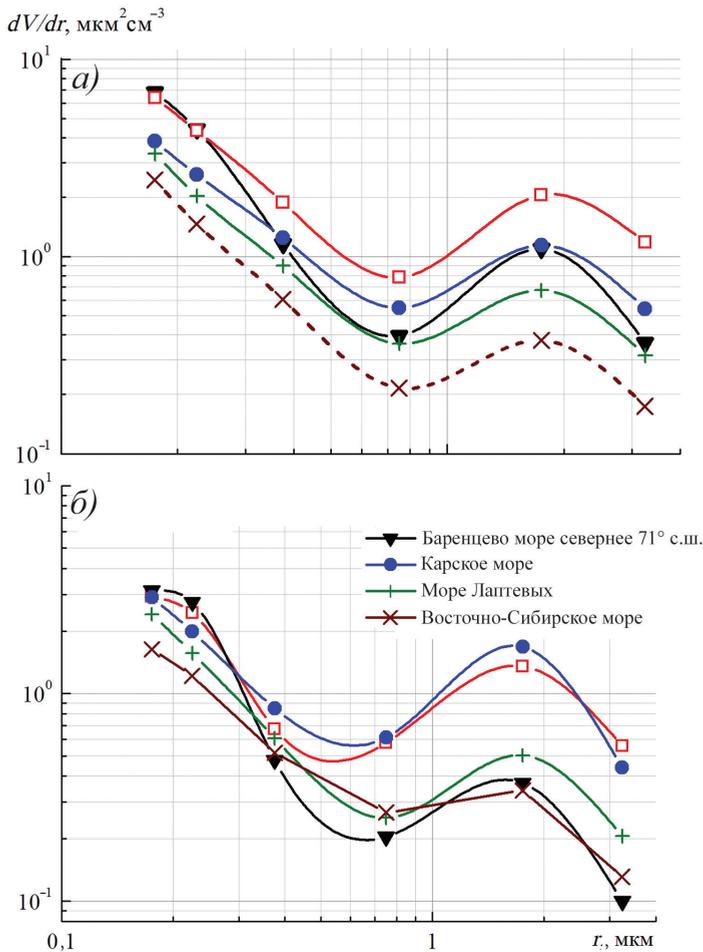


Рис. 5. Средние функции распределения частиц по объемам (dV/dr) над различными арктическими морями в 2018 г. (а) и средние по всем экспедициям (б)

Fig. 5. Average volume distribution functions of particles (dV/dr) over various Arctic seas (a) in 2018 and (б) average for all expeditions

Из-за погодных условий (наличие облачности) существенно меньше проведено измерений АОТ атмосферы (см. табл. 2). В среднем самые большие АОТ наблюдались в южной части Баренцева моря: $\tau^a(0,5) = 0,164$, в том числе, $\tau^c = 0,027$, $\tau'_{0,5} = 0,137$. Однако из-за небольшого числа единичных наблюдений расчет статистических характеристик АОТ проведен для всего Баренцева моря — без выделения южной части. Из табл. 4 видно, что атмосфера над Баренцевым морем отличается более высоким замутнением, в сравнении с другими арктическими морями. При сравнении распределений АОТ и концентраций в приземном слое по районам (см. табл. 3) выявлены две отличительные особенности. Во-первых, в один из дней наблюдений (26 августа) над морем Лаптевых зарегистрировано экстремальное замутнение атмосферы, которое не проявилось в приземных концентрациях N_a и M_{bc} . (Характеристики АОТ для этого эпизода в табл. 4 приведены отдельно.)

Средние (\pm СКО) характеристики АОТ над арктическими морями России:
1-я строка — экспедиции 2018 г., 2-я строка — все экспедиции

Районы СЛО	Море	$\tau^a(0,5)$	α	$\tau^c (\approx\beta)$	$\tau^c_{0,5}$	W , г/см ²
1+2	Баренцево море	0,109 \pm 0,078 0,080 \pm 0,051	1,05 \pm 0,44 1,00 \pm 0,46	0,026 \pm 0,001 0,029 \pm 0,021	0,083 \pm 0,076 0,051 \pm 0,048	0,99 \pm 0,03 1,01 \pm 0,70
3	Карское море	0,018 \pm 0,008 0,057 \pm 0,046	0,33 \pm 0,37 0,35 \pm 0,23	0,011 \pm 0,003 0,033 \pm 0,025	0,008 \pm 0,005 0,024 \pm 0,023	0,44 \pm 0,12 1,32 \pm 0,50
4	Море Лаптевых (без данных за 26.08.18)	0,062 \pm 0,047 0,053 \pm 0,036	0,57 \pm 0,23 0,85 \pm 0,41	0,023 \pm 0,019 0,018 \pm 0,015	0,039 \pm 0,0332 0,035 \pm 0,025	0,48 \pm 0,33 0,55 \pm 0,26
5	Восточно-Сибирское море	0,047 \pm 0,003 0,039 \pm 0,013	0,53 \pm 0,33 0,52 \pm 0,23	0,026 \pm 0,009 0,022 \pm 0,01	0,020 \pm 0,006 0,017 \pm 0,007	0,35 \pm 0,01 0,53 \pm 0,30
4	Море Лаптевых (вынос дымов 26.08.18)	0,225 \pm 0,038	0,82 \pm 0,05	0,023 \pm 0,005	0,202 \pm 0,035	0,34 \pm 0,01

Как показал траекторный анализ (см. рис. 3 и [15]), высокое замутнение атмосферы в ситуации 26.08.2018 было обусловлено переносом дымов лесных пожаров с севера Западной Сибири. Однако увеличения концентраций аэрозоля и сажи в этом случае не произошло, так как перенос дымов происходил существенно выше приземного слоя.

Второе отличие касается предельно низких значений АОТ над Карским морем, что не согласуется с приземными концентрациями N_a и M_{bc} . Причиной является недостаточная статистика измерений АОТ. Об этом свидетельствуют обобщенные данные всех экспедиций (см. вторую строку в табл. 4), из которых следует, что средние АОТ над Карским морем занимают промежуточное положение между Баренцевым морем и морем Лаптевых.

В атмосфере Баренцева моря и в ситуации дымового выноса (26.08.2018) показатель селективности Ангстрема α составил 1,05 и 0,82 соответственно. Во всех других случаях средняя величина показателя α не превышала 0,57. Параметр Ангстрема α и компонента τ^c в исследованных районах варьировали в диапазоне малых значений 0,01–0,03. То есть пространственные различия АОТ над СЛО в основном определялись мелкодисперсной компонентой аэрозоля: средние значения изменялись в диапазоне от 0,083 над Баренцевым морем до 0,008 над Карским морем.

В пространственном распределении общего влагосодержания атмосферы над СЛО более высокие значения наблюдались над Баренцевым морем ($W = 1$ г/см²) в сравнении с другими морями ($W = 0,35$ – $0,48$ г/см²). По многолетним данным (см. вторую строку в табл. 4) самое большое влагосодержание атмосферы ($W = 1,32$ г/см²) наблюдалось над Карским морем.

Среднее пространственное распределение аэрозоля над арктическими морями

Количество результатов измерений в девяти экспедициях в летне-осенние периоды 2007–2018 гг. (от 40 до 92 дней измерений в каждом из морей) можно считать приемлемым для оценки среднего пространственного распределения аэрозоля над СЛО. Анализ обобщенного массива данных показал (см. рис. 4 и табл. 3), что самым высоким содержанием аэрозоля и сажи выделяется южная часть Баренцева

моря. В сравнении с более северной акваторией концентрация M_{bc} здесь больше на 29 %, а N_a — на 9,4 %.

Общей закономерностью для арктических морей России является уменьшение концентраций аэрозоля и сажи с запада на восток в 1,7–1,8 раза: над Баренцевым морем $N_a = 3,5 \text{ см}^{-3}$, $M_{bc} = 41,2 \text{ нг/м}^3$, над Восточно-Сибирским — $1,96 \text{ см}^{-3}$ и $24,3 \text{ нг/м}^3$ соответственно. Спад концентраций в восточном направлении происходит за счет более быстрого уменьшения мелкодисперсной фракции аэрозоля (см. N_f в табл. 3). В пространственном распределении грубодисперсного аэрозоля такой закономерности не наблюдается: средние концентрации N_a варьируют в диапазоне от 0,08 до $0,24 \text{ см}^{-3}$.

В пространственном изменении АОТ атмосферы (см. вторую строку табл. 4 и рис. 6), а также функций распределения (dV/dr) в диапазоне мелких частиц (см. рис. 5б) тоже прослеживается спад средних значений от Баренцева моря до Восточно-Сибирского. Средние АОТ уменьшаются в восточном направлении примерно в 2 раза — от 0,080 до 0,039.

В диапазоне грубодисперсного аэрозоля ($r > 0,5 \text{ мкм}$) закономерность долгоотного спада значений (dV/dr) отсутствует. Крупные частицы разделились на две группы по их объемным распределениям: высокие значения (dV/dr) над Карским морем и на юге Баренцева моря и низкие — в других районах СЛО. Как известно (см. например, [20, 21]), содержание грубодисперсного морского аэрозоля зависит от скорости ветра (волнения). Поэтому есть основание полагать, что скорости ветра над Карским морем и на юге Баренцева моря в среднем были больше, чем над другими морями. Второй причиной низких концентраций грубодисперсного аэрозоля в северо-восточных районах СЛО является большая ледовитость морской поверхности, которая препятствовала генерации морского аэрозоля.

Итак, выделим факторы, влияющие на формирование пространственного распределения характеристик аэрозоля над СЛО. Основными источниками загрязнения арктической атмосферы являются регулярные выносы антропогенного аэрозоля из Европы

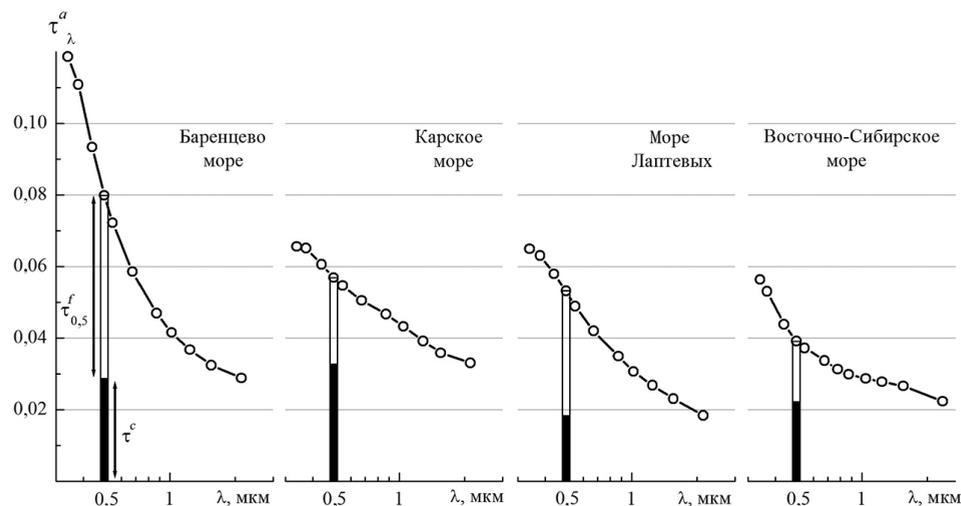


Рис. 6. Средние спектральные зависимости АОТ (с компонентами $\tau^f_{0,5}$, τ^c) над арктическими морями

Fig. 6. Average spectral dependences of AOT (with components $\tau^f_{0,5}$, τ^c) over the Arctic seas

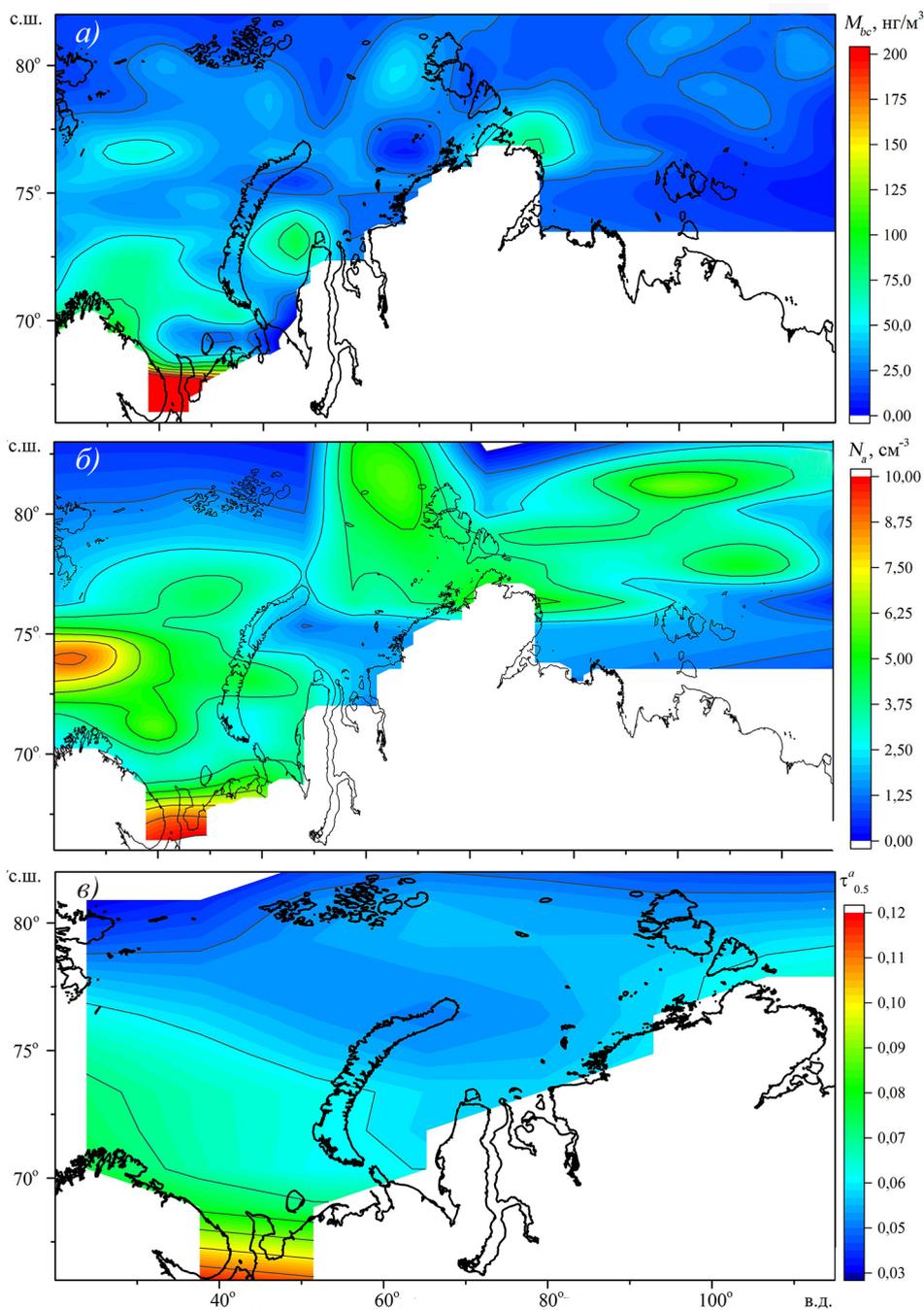


Рис. 7. Карта среднего пространственного распределения M_{bc} (а), N_a (б) и $\tau^a_{0.5}$ (в) над евразийской частью СЛО

Fig. 7. Map of the average spatial distribution of M_{bc} (а), N_a (б) and $\tau^a_{0.5}$ (в) over the Eurasian part of the Arctic Ocean

и эпизодические, но более мощные выносы дымов лесных пожаров из бореальной зоны. Для поглощающего аэрозоля (сажи) сравнительный анализ влияния этих источников, по модельным расчетам и эмпирическим данным, рассматривался во многих работах [22–25].

Из результатов наших измерений следует, что дымовые шлейфы приводят к значительному увеличению АОТ (ситуация 26.08.2018 и 10.07.2015 в [26]), но не всегда сопровождаются одновременным ростом характеристик аэрозоля в приземном слое. Хотя в конечном счете вслед за выносом шлейфа следует его диффузия и оседание аэрозоля в нижние слои.

Если же рассматривать не кратковременное (1–3 дня), а интегральное воздействие (средние данные), то, как следует из рис. 4 и 6, антропогенный источник все же преобладает. По мере удаления от Скандинавии на восток содержание мелкодисперсного аэрозоля и сажи над СЛЮ уменьшается, а влияние континентальных выносов из малонаселенных районов Северной Сибири оказывается незначительным и не компенсирует этот спад.

Относительно воздействия на арктическую атмосферу дымового аэрозоля, уточним, что его источником является не только Сибирь (как чаще всего указывается), но и другие регионы средних широт — Северная Америка [8, 26], Европа [9, 10] и Дальний Восток. Дистанции дальних переносов дымового аэрозоля из указанных регионов в Евразийский сектор Арктики имеют сопоставимые значения — 2–4 тыс. км.

Средние характеристики, приведенные на рис. 4 и 6, не учитывают широтной изменчивости содержания аэрозоля. Поэтому были рассчитаны двумерные (широтнo-долготные) распределения M_{bc} , N_a и $\tau_{0,5}^a$ над районами СЛЮ, где проведено основное число измерений (рис. 7). Построение пространственных распределений характеристик аэрозоля выполнено с помощью сплайн функций программного пакета Origin (<http://www.OriginLab.com>).

Следует оговориться, что количество измерений (особенно АОТ) и однородность распределения данных над арктическими морями пока недостаточны для получения надежных оценок. Тем не менее из приведенных рисунков видно, что в изменении характеристик аэрозоля проявились две составляющие — уменьшение средних значений в северном и восточном направлениях. В целом на полученных изображениях прослеживается убывающий шлейф континентального влияния, направленный на северо-восток (с удалением от Скандинавии).

Следует также обратить внимание на то, что воздействие континентальных выносов существенно возрастает в переходной зоне, соединяющей Баренцево и Белое моря (между полуостровами Кольский и Канин Нос). Увеличению содержания аэрозоля и сажи, кроме континентального влияния, способствует еще интенсивное судовождение в этом районе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В августе–сентябре 2018 г. проведен очередной цикл экспедиционных измерений оптических и микрофизических характеристик атмосферного аэрозоля с борта НЭС «Академик Трёшников» в нескольких районах Северного Ледовитого океана. В изменчивости характеристик аэрозоля отмечены кратковременные (около суток) всплески, обусловленные выносами дымового аэрозоля из бореальной зоны. Самые высокие средние характеристики аэрозоля получены в южной части Баренцева моря (южнее 71° с.ш.), наиболее подверженной выносам аэрозоля из Скандинавии и Поморья: $N_a = 7,2 \text{ см}^{-3}$, $M_{bc} = 167 \text{ нг/м}^3$, $\tau_{0,5}^a = 0,164$. В полученных результатах,

как и в предшествующих экспедициях (2007–2017 гг.), наблюдается уменьшение средних характеристик аэрозоля над СЛО с запада на восток. Средние концентрации аэрозоля и сажи над Баренцевым морем (севернее 71° с.ш.) по данным всех экспедиций составили $N_a = 3,5 \text{ см}^{-3}$, $M_{bc} = 41,2 \text{ нг/м}^3$, а над Восточно-Сибирским морем они становятся в 1,7–1,8 раза меньше: $N_a = 1,96 \text{ см}^{-3}$, $M_{bc} = 24,3 \text{ нг/м}^3$. Несколько больший спад в восточном направлении наблюдается у АОТ (0,5 мкм) — от 0,080 до 0,039. В более детальном широтно-долготном распределении аэрозоля над акваториями Баренцева и Карского морей проявилась тенденция уменьшения средних характеристик аэрозоля в северо-восточном направлении — по мере удаления от Скандинавского полуострова.

Благодарности. Авторы выражают благодарность П.Н. Зенковой, Вас.В. Полькину, А.П. Ростову, С.А. Терпуговой, С.А. Турчиновичу, А.В. Уразгильдеевой, В.П. Шмаргунову за участие в измерениях и приборное обеспечение.

Авторы признательны сотрудникам Лаборатории воздушных ресурсов Американской национальной администрации по исследованию океана и атмосферы США (NOAA) за предоставленную возможность строить обратные траектории воздушных масс, пользуясь моделью HYSPLIT.

Работа выполнена по Программе измерений физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля с борта НЭС «Академик Трёшников» в экспедиции NABOS-2018 при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № АААА-Ф18-118012500294-9).

Acknowledgments. The authors thank their colleagues who participated in preparation of instrumentation and in measurements, i.e., to P.N. Zenkova, Vas.V. Polkin, A.P. Rostov, S.A. Terpugova, S.A. Turchinovich, A.V. Urazgildeeva and V.P. Shmargunov.

The study was carried out according to the Program of measurements of physical and chemical characteristics of atmospheric aerosol from the board of R/V “Akademik Tryoshnikov” in the expedition NABOS-2018 and was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. АААА-Ф18-118012500294-9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tomasi C., Kokhanovsky A.A., Lupi A., Ritter C., Smirnov A., O'Neill N.T., Stone R.S., Holben B.N., Nyeki S., Wehrli C., Stohl A., Mazzola M., Lanconelli C., Vitale V., Stebel K., Aaltonen V., de Leeuw G., Rodriguez E., Herber A.B., Radionov V.F., Zielinski T., Petelski T., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Xue Y., Mei L., Istomina L., Wagener R., McArthur B., Sobolewski P.S., Kivi R., Courcoux Y., Larouche P., Broccardo S., Piketh S.J. Aerosol remote sensing in polar regions // *Earth-Science Reviews*. 2015. V. 140. P. 108–157. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.001>.
2. Stone R.S., Sharma S., Herber A., Eleftheriadis K., Nelson D.W. A characterization of Arctic aerosols on the basis of aerosol optical depth and black carbon measurements // *Elementa science anthropocene*. 2014. V. 2. 27 p. doi: 10.12952/journal.elementa.000027.
3. Asmi E., Kondratyev V., Brus D., Laurila T., Lihavainen H., Backman J., Vakkari V., Aurela M., Hatakka J., Viisanen Y., Uttal T., Ivakhov V., Makshtas A. Aerosol size distribution seasonal characteristics measured in Tiksi, Russian Arctic // *Atmos. Chem. Phys*. 2016. V. 16. P. 1271–1287. doi: 10.5194/acp-16-1271-2016.
4. Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Кабанов Д.М., Козлов В.С., Полькин В.В., Радионов В.Ф., Чернов Д.Г. Сравнение средних характеристик аэрозоля в соседних арктических районах // *Оптика атмосферы и океана*, 2018. Т. 31. № 8. С. 640–646. doi: 10.15372/AOO20180807.

5. Sakerin S.M., Bobrikov A.A., Bukin O.A., Golobokova L.P., Polkin Vas.V., Polkin Vik.V., Shmirko K.A., Kabanov D.M., Khodzher T.V., Onischuk N.A., Pavlov A.N., Potemkin V.L., Radionov V.F. On measurements of aerosol-gas composition of the atmosphere during two expeditions in 2013 along Northern Sea Route // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. Issue 21. P. 12413–12443. doi:10.5194/acp-15-1-2015.
6. Schevchenko V.P., Kopeikin V.M., Evangeliou N., Lisitzin A.P., Novigatsky A.N., Pankratova N.V., Starodymova D.P., Stohl A., Thomson R. Atmospheric black carbon over the north Atlantic and Russian arctic seas in summer-autumn time // *Химия в интересах устойчивого развития.* 2016. Т. 24. № 4. С. 441–446. doi: 10.15372/KhUR20160402.
7. Поповичева О.Б., Макутас А.П., Мовчан В.В., Персианцева Н.М., Тимофеев М.А., Ситников Н.М. Аэрозольная составляющая приводного слоя атмосферы по данным наблюдений экспедиции «Север-2015» // *Проблемы Арктики и Антарктики.* 2017. № 4 (114). С. 57–65.
8. Markowicz K.M., Pakszys P., Ritter C., Zielinski T., Udisti R., Cappelletti D., Mazzola M., Shiobara M., Xian P., Zawadzka O., Lisok J., Petelski T., Makuch P., Karasiński G. Impact of North American intense fires on aerosol optical properties measured over the European Arctic in July 2015 // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2016. V. 121. P. 14487–14512. <http://dx.doi.org/10.1002/2016JD025310>.
9. Myhre C.L., Toledano C., Myhre G., Lihavainen H. Regional aerosol optical properties and radiative impact of the extreme smoke event in the European Arctic in spring 2006 // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7 (22). P. 511–534. <http://dx.doi.org/10.5194/acp-7-5899-2007>.
10. Stohl A., Berg T., Burkhart J.F., Fjærraa A.M., Forster C., Herber A., Hov Ø., Lunder C., McMillan W.W., Oltmans S., Shiobara M., Simpson D., Solberg S., Stebel K., Ström J., Tørseth K., Treffeisen R., Virkkunen K., Yttri K.E. Arctic smoke – record high air pollution levels in the European Arctic due to agricultural fires in Eastern Europe in spring 2006 // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7. № 2. P. 511–534. <http://dx.doi.org/10.5194/acp-7-511-2007>.
11. Shaw G.E. The Arctic haze phenomenon // *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1995. V. 76. № 12. P. 2403–2414.
12. Quinn P., Shaw G., Andrews E., Dutton E.G., Ruoho-Airola T., Gong S.L. Arctic haze: current trends and knowledge gaps // *Tellus.* 2007. V. 59B (1). P. 99–114. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0889.2006.00238.x>.
13. Терпугова С.А., Зенкова П.Н., Кабанов Д.М., Полькин В.В., Голобокова Л.П., Панченко М.В., Сакерин С.М., Лисицын А.П., Шевченко В.П., Политова Н.В., Козлов В.С., Ходжер Т.В., Шмаргунов В.П., Чернов Д.Г. 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. doi: 10.15372/AOO20180509.
14. Sakerin S.M., Kabanov D.M., Polkin V.V., Golobokova L.P., Zenkova P.N., Kessel A.S., Polkin Vas.V., Radionov V.F., Terpugova S.A., Urazgildeeva A.V., Khodzher T.V., Khuriganowa O.I. Features of spatial distribution of aerosol characteristics over Arctic seas // *Proc. SPIE 10833, 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 1083339 (13 December 2018).* doi: 10.1117/12.2502013.
15. Полькин В.В., Зенкова П.Н., Изосимова О.Н., Кабанов Д.М., Радионов В.Ф., Сакерин С.М., Малафеев Г.В., Шевченко В.П. Результаты измерений оптических и микрофизических характеристик аэрозоля в экспедициях 2018 г. на НИС «Академик Мстислав Келдыш» и «Академик Трёшников» // *Тезисы докладов XXV Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (1–5 июля 2019, Томск).* Изд. ИОА СО РАН, 2019. С-31–С-35.
16. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ростов А.П., Турчинович С.А., Князев В.В. Солнечные фотометры для измерений спектральной прозрачности атмосферы в стационарных и мобильных условиях // *Оптика атмосферы и океана.* 2012. Т. 25. № 12. С. 1112–1117.
17. Козлов В.С., Шмаргунов В.П., Полькин В.В. Спектрофотометры для исследования характеристик поглощения света аэрозольными частицами // *Приборы и техника эксперимента.* 2008. № 5. С. 1–3.

18. *Полькин В.В., Панченко М.В., Голобокова Л.П., Филиппова У.Г., Ходжер Т.В., Лисицын А.П., Шевченко В.П.* Приводный аэрозоль Белого и Карского морей в августе–сентябре 2007 г. // Метеорологические и геофизические исследования. М.: Paulsen, 2011. С. 199–214.
19. *Козлов В.С., Тихомиров А.Б., Панченко М.В., Шмаргунов В.П., Полькин В.В., Сакерин С.М., Лисицын А.П., Шевченко В.П.* Оптические и микрофизические характеристики аэрозоля в приводной атмосфере Белого моря по данным одновременных корабельных и береговых измерений в августе 2006 г. // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 8. С. 767–776.
20. *Gathman S.G.* Optical properties of the marine aerosol as predicted by the Navy aerosol model // *Optical Engineering*. 1983. V. 22. № 1. P. 57–62.
21. *Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И., Поздняков Д.В.* Атмосферный аэрозоль. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 224 с.
22. *Виноградова А.А., Смирнов Н.С., Коротков В.Н., Романовская А.А.* Лесные пожары в Сибири и на Дальнем Востоке: эмиссии и атмосферный перенос черного углерода в Арктику // *Оптика атмосферы и океана*. 2015. Т. 28. № 6. С. 512–520. doi: 10.15372/AOO20150603.
23. *Stohl A., Klimont Z., Eckhardt S., Kupiainen K., Shevchenko V.P., Kopeikin V.M., Novigatsky A.N.* Black carbon in the Arctic: The underestimated role of gas flaring and residential combustion emissions // *Atmos. Phys. Chem*. 2013. V. 13. № 17. P. 8833–8855. doi: 10.5194/acp-13-8833-2013.
24. *Cheng M.-D.* Geolocating Russian sources for Arctic black carbon // *Atmos. Environ*. 2014. V. 92. № 4. P. 398–410. doi: org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.031.
25. *Wang Q., Jacob D.J., Fisher J.A., Mao J., Leibensperger E.M., Carouge C.C., Le Sager P., Kondo Y., Jimenez J.L., Cubison M.J., Doherty S.J.* Sources of carbonaceous aerosols and deposited black carbon in the Arctic in winter-spring: Implications for radiative forcing // *Atmos. Chem. Phys*. 2011. V. 11. № 12. P. 12453–12473. doi: 10.5194/acp-11-12453-2011.
26. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Радионов В.Ф., Чернов Д.Г., Турчинович Ю.С., Лубо-Лесниченко К.Е., Прахов А.Н.* Обобщение результатов измерений спектральной аэрозольной оптической толщины атмосферы на арх. Шпицберген в 2011–2016 гг. // *Оптика атмосферы и океана*. 2017. Т. 30. № 11. С. 948–955. doi: 10.15372/AOO20171107.

REFERENCES

1. *Tomasi C., Kokhanovsky A.A., Lupi A., Ritter C., Smirnov A., O'Neill N.T., Stone R.S., Holben B.N., Nyeki S., Wehrli C., Stohl A., Mazzola M., Lanconelli C., Vitale V., Stebel K., Aaltonen V., de Leeuw G., Rodriguez E., Herber A.B., Radionov V.F., Zielinski T., Petelski T., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Xue Y., Mei L., Istomina L., Wagener R., McArthur B., Sobolewski P.S., Kivi R., Courcoux Y., Larouche P., Broccardo S., Piketh S.J.* Aerosol remote sensing in polar regions. *Earth-Science Reviews*. 2015, (140): 108–157. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.001>.
2. *Stone R.S., Sharma S., Herber A., Eleftheriadis K., Nelson D.W.* A characterization of Arctic aerosols on the basis of aerosol optical depth and black carbon measurements. *Elementa. Sci. Anth*. 2014, 2: 27 p. doi: 10.12952/journal.elementa.000027.
3. *Asmi E., Kondratyev V., Brus D., Laurila T., Lihavainen H., Backman J., Vakkari V., Aurela M., Hatakka J., Viisanen Y., Uttal T., Ivakhov V., Makshtas A.* Aerosol size distribution seasonal characteristics measured in Tiksi, Russian Arctic. *Atmos. Chem. Phys*. 2016, 16: 1271–1287. doi: 10.5194/acp-16-1271-2016.
4. *Sakerin S.M., Golobokova L.P., Kabanov D.M., Kozlov V.S., Pol'kin V.V., Radionov V.F., Chernov D.G.* Comparison of Average Aerosol Characteristics in Neighboring Arctic Regions. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2019, 32 (1): 33–40. DOI: 10.1134/S1024856019010147.
5. *Sakerin S.M., Bobrikov A.A., Bukin O.A., Golobokova L.P., Polkin Vas.V., Polkin Vik.V., Shmirko K.A., Kabanov D.M., Khodzher T.V., Onischuk N.A., Pavlov A.N., Potemkin V.L., Radionov V.F.*

- On measurements of aerosol-gas composition of the atmosphere during two expeditions in 2013 along Northern Sea Route. *Atmos. Chem. Phys.* 2015, 15 (21): 12413–12443. doi:10.5194/acp-15-1-2015.
6. *Shevchenko V.P., Kopeikin V.M., Evangeliou N., Lisitzin A.P., Novigatsky A.N., Pankratova N.V., Starodymova D.P., Stohl A., Thomson R.* Atmospheric black carbon over the north Atlantic and Russian arctic seas in summer-autumn time. *Khimiia v interesakh ustoichivogo razvitiia. Chemistry for Sustainable Development.* 2016, 24 (4): 441–446. doi: 10.15372/KhUR20160402.
7. *Popovicheva O.B., Makshtas A.P., Movchan V.V., Persiantseva N.M., Timofeev M.A., Sitnikov N.M.* Aerosol component of the atmospheric surface layer according observations of the expedition “North-2015”. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Problems of Arctic and Antarctic.* 2017, 4 (114): 57–65. [In Russian].
8. *Markowicz K.M., Pakszys P., Ritter C., Zielinski T., Udisti R., Cappelletti D., Mazzola M., Shiobara M., Xian P., Zawadzka O., Lisok J., Petelski T., Makuch P., Karasiński G.* Impact of North American intense fires on aerosol optical properties measured over the European Arctic in July 2015. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2016, 121: 14487–14512. <http://dx.doi.org/10.1002/2016JD025310>.
9. *Myhre C.L., Toledano C., Myhre G., Lihavainen H.* Regional aerosol optical properties and radiative impact of the extreme smoke event in the European Arctic in spring 2006. *Atmos. Chem. Phys.* 2007, 7(22): 511–534. <http://dx.doi.org/10.5194/acp-7-5899-2007>.
10. *Stohl A., Berg T., Burkhardt J.F., Fjérraa A.M., Forster C., Herber A., Hov Ø., Lunder C., McMillan W.W., Oltmans S., Shiobara M., Simpson D., Solberg S., Stebel K., Ström J., Tørseth K., Treffeisen R., Virkkunen K., Yttri K.E.* Arctic smoke – record high air pollution levels in the European Arctic due to agricultural fires in Eastern Europe in spring 2006. *Atmos. Chem. Phys.* 2007, 7 (2): 511–534. <http://dx.doi.org/10.5194/acp-7-511-2007>.
11. *Shaw G.E.* The Arctic haze phenomenon // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1995, 76 (12): 2403–2414.
12. *Quinn, P., Shaw, G., Andrews, E., Dutton, E.G., Ruoho-Airola, T., Gong, S.L.* Arctic haze: current trends and knowledge gaps. *Tellus.* 2007, 59B (1): 99–114. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0889.2006.00238.x>.
13. *Terpugova S.A., Zenkova P.N., Kabanov D.M., Pol'kin V.V., Golobokova L.P., Panchenko M.V., Sakerin S.M., Lisitzin A.P., Shevchenko V.P., Politova N.V., Kozlov V.S., Khodzher T.V., Shmargunov V.P. and Chernov D.G.* Results of the Study of Aerosol Characteristics in the Atmosphere of the Kara and Barents Seas in Summer and Autumn 2016. *Optika atmosfery i okeana. Atmospheric and Oceanic Optics.* 2018, 31 (5): 391–402. doi: 10.15372/AOO20180509. [In Russian].
14. *Sakerin S.M., Kabanov D.M., Polkin V.V., Golobokova L.P., Zenkova P.N., Kessel A.S., Polkin Vas.V., Radionov V.F., Terpugova S.A., Urazgildeeva A.V., Khodzher T.V., Khuriganowa O.I.* Features of spatial distribution of aerosol characteristics over Arctic seas // *Proc. SPIE 10833, 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics.* 1083339 (13 December 2018). doi: 10.1117/12.2502013.
15. *Polkin V.V., Zenkova P.N., Izosimova O.N., Kabanov D.M., Radionov V.F., Sakerin S.M., Malafeev G.V., Shevchenko V.P.* The results of measurements of the optical and microphysical characteristics of the aerosol in the 2018 expeditions on the RV Akademik Mstislav Keldysh and Akademik Treshnikov. Abstracts of the XXV International Symposium “Optics of the Atmosphere and the Ocean. Atmospheric Physics” (July 1–5, 2019, Tomsk), Ed. IAO SB RAS., 2019: C-31 – C-35. [In Russian].
16. *Sakerin S.M., Kabanov D.M., Rostov A.P., Turchinov S.A., Knyazev V.V.* Sun photometers for measuring spectral air transparency in stationary and mobile conditions. *Optika atmosfery i okeana. Atmospheric and Oceanic Optics.* 2012, 25 (12): 1112–1117. [In Russian].
17. *Kozlov V.S., Shmargunov V.P., Pol'kin V.V.* Spectrophotometers of the study of characteristics of light absorption by aerosol particles. *Pribery Tekhn. Eksperim.* 2008, 5: 1–3. [in Russian].
18. *Polkin V.V., Panchenko M.V., Golobokova L.P., Filippova U.G., Khodzher T.V., Lisitzin A.P., Shevchenko V.P.* Aerosols in the marine boundary layer over the White and Kara seas in August-

September 2007. *Meteorologicheskie i geofizicheskie issledovaniia*. Meteorological and geophysical researches. M: Paulsen Editions, 2011: 199–214. [In Russian].

19. Kozlov V.S., Tikhomirov A.A., Panchenko M.V., Shmargunov V.P., Pol'kin V.V., Sakerin S.M., Lisitzyn A.P., Shevchenko V.P. Optical and microphysical parameters of aerosol in the near-water atmosphere of the White Sea as assessed from the data of simultaneous shipborne and coast-based measurements in August 2006. *Optika atmosfery i okeana*. Atmospheric and Oceanic Optics. 2009, 22 (8): 767–776. [In Russian].

20. Gathman S.G. Optical properties of the marine aerosol as predicted by the Navy aerosol model. *Optical Engineering*. 1983, 22 (1): 57–62.

21. Kondrat'ev K.Ia., Moskalenko N.I., Pozdnyakov D.V. *Atmosfernyi aerazol'*. Atmospheric aerosol. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1983: 224 p. [In Russian].

22. Vinogradova A.A., Smirnov N.S., Korotkov V.N., Rîmanovskaya A.A. Forest fires in Siberia and the Far East: Emissions and atmospheric transport of black carbon to the Arctic. *Optika atmosfery i okeana*. Atmospheric and Oceanic Optics, 2015, 28 (6): 512–520. [In Russian].

23. Stohl A., Klimont Z., Eckhardt S., Kupiainen K., Shevchenko V.P., Kopeikin V.M., Novigatsky A.N. Black carbon in the Arctic: The underestimated role of gas flaring and residential combustion emissions. *Atmos. Phys. Chem.* 2013, 13 (17): 8833–8855. doi: 10.5194/acp-13-8833-2013.

24. Cheng M.-D. Geolocating Russian sources for Arctic black carbon. *Atmos. Environ.*, 2014, 92 (4): 398–410. doi: org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.031.

25. Wang Q., Jacob D.J., Fisher J.A., Mao J., Leibensperger E.M., Carouge C.C., Le Sager P., Kondo Y., Jimenez J.L., Cubison M.J., Doherty S.J. Sources of carbonaceous aerosols and deposited black carbon in the Arctic in winter-spring: Implications for radiative forcing. *Atmos. Chem. Phys.* 2011, 11 (12): 12453–12473. doi: 10.5194/acp-11-12453-2011.

26. Sakerin S.M., Kabanov D.M., Radionov V.F., Chernov D.G., Turchinovich Yu.S., Lubo-Lesnichenk K.E., Prakhov A.N. Generalization of results of atmospheric aerosol optical depth measurements on Spitsbergen Archipelago in 2011–2016. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2018, 31 (2): 163–170. doi: 10.15372/AOO20171107.