

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ  
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.510.4

**Результаты исследований характеристик аэрозоля  
в атмосфере Карского и Баренцева морей  
в летне-осенний период 2016 г.**

**С.А. Терпугова<sup>1</sup>, П.Н. Зенкова<sup>1</sup>, Д.М. Кабанов<sup>1</sup>, В.В. Польшкин<sup>1</sup>,  
Л.П. Голобокова<sup>2</sup>, М.В. Панченко<sup>1</sup>, С.М. Сакерин<sup>1</sup>, А.П. Лисицын<sup>3</sup>,  
В.П. Шевченко<sup>3</sup>, Н.В. Политова<sup>3</sup>, В.С. Козлов<sup>1</sup>, Т.В. Ходжер<sup>2</sup>,  
В.П. Шмаргунов<sup>1</sup>, Д.Г. Чернов<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup> *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН*

*634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

<sup>2</sup> *Лимнологический институт СО РАН*

*664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3*

<sup>3</sup> *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН*

*117997, г. Москва, Нахимовский пр., 36*

Поступила в редакцию 8.11.2017 г.

Проанализированы результаты измерений комплекса микрофизических, химических и оптических характеристик аэрозоля в двух рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш», состоявшихся в 2016 г. Работы проходили в Карском море с 10 июля по 20 августа и в Баренцевом море с 25 августа по 10 октября 2016 г. Представлены средние значения характеристик аэрозоля: аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы, мелко- и грубодисперсной компоненты АОТ, счетной концентрации частиц в приводном слое атмосферы, массовых концентраций поглощающего вещества («сажи»), водорастворимых ионов ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), а также газообразных примесей ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NH}_3$ ). Для различных районов Карского и Баренцева морей приведены характерные функции распределения частиц по размерам. Показано, что в период двух рейсов уровни как аэрозольного замутнения столба атмосферы, так и концентраций аэрозоля и «сажи» в приводном слое атмосферы были близки средним многолетним данным в арктических широтах. Заметное влияние на замутнение атмосферы в период измерений оказали выносы дымов лесных пожаров с континента. Вклад дымового аэрозоля, например, в среднее значение АОТ на  $\lambda = 0,50$  мкм, по судовым измерениям, составил около 44%.

**Ключевые слова:** НИС «Академик Мстислав Келдыш», морская атмосфера, аэрозоль, микрофизические характеристики, химический состав, аэрозольная оптическая толщина; RV “Akademik Mstislav Keldysh”, marine atmosphere, aerosol, microphysical characteristics, chemical composition, aerosol optical depth.

### Введение

Известно, что аэрозольные частицы оказывают значительное влияние на оптические свойства и радиационный бюджет атмосферы Земли [1, 2]. Точность оценок радиационных эффектов опреде-

ляется тем, насколько корректно заданы аэрозольная оптическая толщина (АОТ) и альbedo однократного рассеяния аэрозоля [3–5].

Арктический регион является важной составляющей климатической системы Северного полушария. Здесь практически отсутствуют собственные источники аэрозоля, атмосфера менее загрязнена по сравнению со многими другими регионами Земли. В то же время, благодаря атмосферной циркуляции, она подвержена сильному влиянию дальнего переноса примесей из континентальных районов Евразии и Северной Америки [6–8]. По оценкам, этот регион особенно чувствителен к глобальному потеплению [9]. Именно в высоких широтах изменения климата наиболее заметны [10–12].

Широко известно явление так называемой арктической дымки, которое обусловлено переносом аэрозоля с континентов в атмосферу Арктики [13–19]. Из-за сезонных вариаций положения полярного

\* Светлана Александровна Терпугова (swet@iao.ru); Полина Николаевна Зенкова (zpn@iao.ru); Дмитрий Михайлович Кабанов (dkab@iao.ru); Виктор Викторович Польшкин (victor@iao.ru); Людмила Петровна Голобокова (lg@lin.irk.ru); Михаил Васильевич Панченко (pmv@iao.ru); Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru); Александр Петрович Лисицын (lisitzin@ocean.ru); Владимир Петрович Шевченко (vshevch@ocean.ru); Надежда Вячеславовна Политова (politova@ocean.ru); Валерий Степанович Козлов (vkozlov@iao.ru); Тамара Викторовна Ходжер (khodzher@lin.irk.ru); Владимир Петрович Шмаргунов (vpsh@iao.ru); Дмитрий Григорьевич Чернов (chernov@iao.ru).

фронта [14, 19] меридиональный перенос аэрозольного вещества в арктические широты осуществляется в основном зимой. Осаждение аэрозоля на заснеженную поверхность уменьшает ее альбедо и способствует более раннему началу снеготаяния [20–23]. В настоящее время происходит активное таяние льда в Арктике, причем его темпы превосходят предсказываемые существующими моделями [23].

Аэрозольные наблюдения в Арктике ведутся на стационарных континентальных и островных станциях (Барроу (Аляска), Аллерт (Канада), Нью-Алезунд и Хорнзунд (Шпицберген), Соданкила (Финляндия)) [24–30]. Большой объем исследований характеристик арктического аэрозоля был выполнен российскими учеными на дрейфующих станциях «Северный полюс» [31–34]. Начиная с 2011 г. сотрудниками ИОА СО РАН ведутся регулярные комплексные исследования характеристик аэрозоля в порте Баренцбург (Шпицберген) [35–38]. Результаты изучения свойств аэрозоля обобщены в обзорных статьях и монографиях [14, 33, 39–41]. Особое внимание в работах [33, 42–45] обращается на то, что атмосфера в высоких широтах все чаще подвергается влиянию дымов пожаров в бореальных лесах Сибири и Северной Америки.

Важной составляющей изучения арктического аэрозоля являются наблюдения, выполняемые на борту научно-исследовательских судов [46–52]. Так, за последнее десятилетие проведены комплексные исследования аэрозоля Белого и Карского морей [46–50]; в 2013 г. получены уникальные результаты на трассе Северного морского пути от Архангельска до Владивостока [51].

Основные измеряемые характеристики – это оптические параметры и дисперсный состав аэрозолей в приводном слое атмосферы [30, 37, 46, 48, 49], АОТ [34, 36, 53, 55], химический состав аэрозоля [28, 46, 47, 50, 51, 54, 56, 57]. В последние два десятилетия большое внимание уделяется исследованиям спектральных коэффициентов аэрозольного поглощения и концентрации поглощающего вещества (черного углерода, «сажи») в составе аэрозольных частиц [24, 29, 37, 38, 45, 46, 50, 51, 55, 57–63], поскольку именно поглощающий компонент влияет на величину альбедо однократного рассеяния аэрозоля, а следовательно, на выхолаживание или разогрев атмосферы.

В 2016 г. состоялись два рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» (АМК), работы проводились в акваториях Карского и Баренцева морей. Результаты, полученные в этих рейсах, обсуждаются в настоящей статье.

## 1. Аппаратура и методики измерений

Аэрозольные параметры исследовались вдоль маршрутов следования НИС АМК (рис. 1) в ходе 66-го рейса с 10 июля по 20 августа и 67-го рейса с 25 августа по 10 октября 2016 г.; работы в Баренцевом море завершились 3 октября. Значками отмечены пункты, в которых осуществлялись измерения АОТ и общего влагосодержания (ОВС) атмосферы, отрезками – места забора проб на фильтры. Номера фильтров, отобранных в Карском море, обозначены прямым шрифтом, в Баренцевом – курсивом.

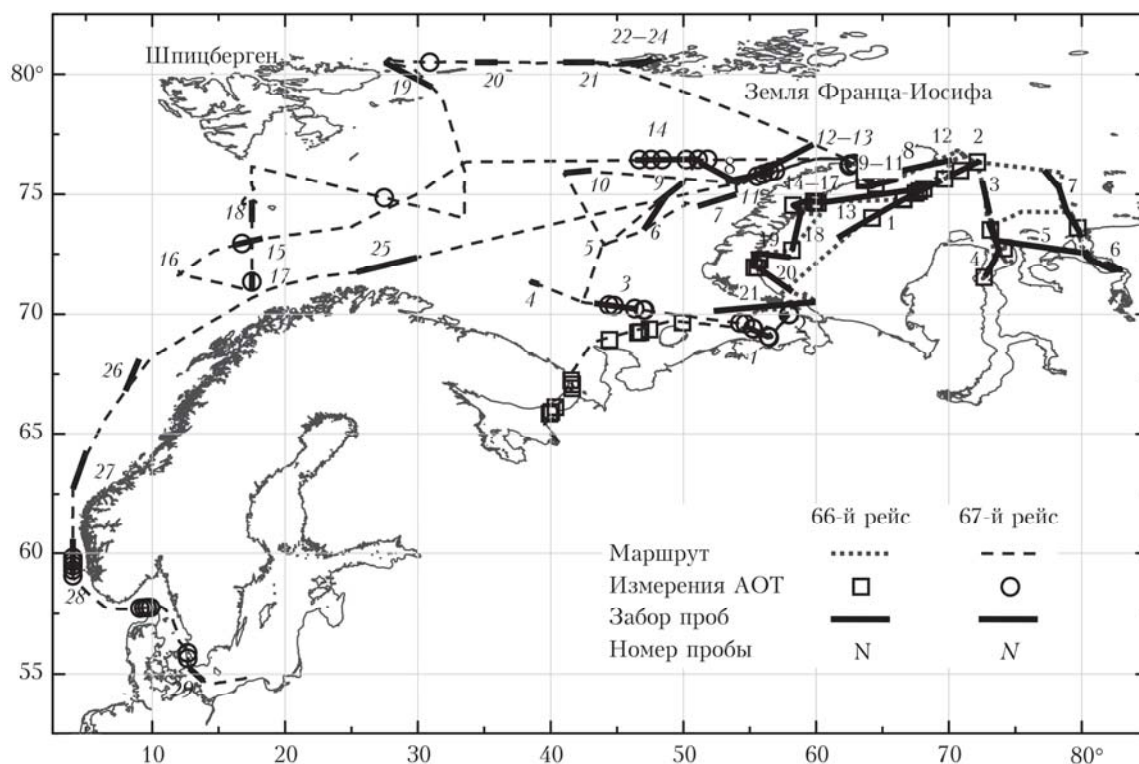


Рис. 1. Маршруты следования судна, места забора проб на фильтры и измерения АОТ атмосферы

Характеристики аэрозоля в приводном слое атмосферы измерялись при помощи автоматизированного аэрозольного комплекса, размещенного на палубе ходового мостика на высоте около 15 м над водной поверхностью в передней части судна, чтобы свести к минимуму влияние локальных источников аэрозоля (выхлопных труб, вентиляционных шахт). Однако в некоторых случаях при смене курса судна или направления ветра возникали такие условия, когда аэрозоль локального происхождения попадал в заборные устройства и искажал результаты атмосферных измерений. Данные, на которых явно видно влияние местных источников, отбраковывались при обработке и анализе. В состав комплекса входили фотоэлектрический счетчик частиц АЗ-10 и аэталометр (фотометр поглощения). Счетчик частиц использовался для измерения счетной концентрации аэрозоля  $N_A$  ( $\text{см}^{-3}$ ) и функции распределения частиц по размерам в диапазоне диаметров 0,3–5 мкм; аэталометр разработки ИОА СО РАН [64] обеспечивал получение данных о массовой концентрации черного углерода («сажи»)  $M_{\text{BC}}$  ( $\text{мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ ) в атмосферном воздухе. Концентрационная чувствительность прибора составляет  $0,01 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$  при прокачке через ячейку аэталометра 30 л воздуха. Подробное описание калибровки прибора и экспериментальной методики приведено в [64, 66]. Исследуемый воздух забирался на высоте около 15 м от водной поверхности и поступал по шлангам длиной  $\sim 0,5\text{--}1$  м в рабочие ячейки счетчика и аэталометра. Измерения проводились круглосуточно и синхронно с периодичностью 30 мин – 1 ч в зависимости от особенностей движения судна и текущей концентрации аэрозоля и «сажи» в воздухе. Длительность одного цикла составляла 10–15 мин.

Всего для анализа было сформировано 1060 наборов данных об аэрозольных параметрах в Карском море и 889 в Баренцевом.

Измерения АОТ и ОВС атмосферы выполнялись с помощью портативного солнечного фотометра SPM (Sun Photometer Mobile, разработка ИОА СО РАН) [65], работающего в диапазоне спектра 0,34–2,14 мкм. По результатам измерений прямой солнечной радиации в окнах прозрачности атмосферы рассчитывались АОТ и параметры  $\alpha$ ,  $\beta$  формулы Ангстрема, описывающие спектральную зависимость АОТ в области спектра  $\sim 0,4\text{--}1$  мкм:  $\tau^a(\lambda) = \beta \cdot \lambda^{-\alpha}$ . Данные, полученные в ИК-диапазоне (1,20–2,14 мкм), позволили дополнительно рассчитать [66] грубодисперсную компоненту АОТ  $\tau^c$ , обусловленную квазинейтральным ослаблением радиации крупными частицами, АОТ мелкодисперсного аэрозоля  $\tau_\lambda^f = \tau_\lambda^a - \tau^c$  и параметры  $n$ ,  $m$  селективности спектрального хода  $\tau^f(\lambda) = m \cdot \lambda^{-n}$ . Общее влагосодержание атмосферы определялось на основе дифференциальной методики по данным измерений в полосе поглощения водяного пара (0,94 мкм) и в соседнем окне прозрачности – 0,87 мкм. Подробное описание методик определения АОТ (включая  $\tau^c$ ,  $\tau_\lambda^f$ ) и ОВС приведено в [66–69].

Отбор проб аэрозоля для исследования химического состава выполняли на блок из четырех фильтров по универсальной методике, применяемой в международных сетях мониторинга EANET (Acid Deposition Monitoring Network in East Asia) [70] и EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme) [71]. В акватории Карского моря было проведено 24 серии забора проб, в Баренцевом – 25, в Норвежском море по пути следования судна в порт Калининград – 4. Аэрозольное вещество собиралось на первом и втором фильтрах, в водных вытяжках которого определялись ионы  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ . На оставшихся фильтрах сорбировались газообразные примеси, которые могут участвовать в процессах модификации аэрозольных частиц (в настоящей работе их состав не рассматривался). Измерения выполнялись в аттестованной лаборатории Лимнологического института СО РАН на ионной системе ICS-3000 (Dionex, USA). Качество выполняемых анализов регулярно подтверждается участием в международном контроле качества данных [70].

## 2. Анализ экспериментальных данных

### 2.1. Аэрозольная оптическая толщина и влагосодержание атмосферы

Пункты, где выполнялись измерения АОТ, отмечены на рис. 1. Количество усредненных за час замеров ( $\pm 30$  мин относительно целого значения часа) составило: в 66-м рейсе – 42 (20 дней), в 67-м рейсе – 48 (15 дней).

Временная изменчивость характеристик АОТ, параметра Ангстрема  $\alpha$  и ОВС в течение двух рейсов представлена рис. 2. Видно, что на фоне достаточно малых значений АОТ происходят всплески аэрозольного замутнения атмосферы (рис. 2, *a*). Увеличения значений  $\tau^c$  (рис. 2, *б*) обусловлены, по-видимому, местными факторами: генерацией грубодисперсного морского аэрозоля при сильном ветре и волнением моря, туманом. Кроме того, в отдельных замерах не исключено попадание в поле зрения фотометра слабой перистой облачности.

Пики  $\tau_{0,50}^f$ , скорее всего, связаны с переносом в районы измерений мелкодисперсного аэрозоля с континента. Причем наиболее сильные всплески соответствуют выносам дымового аэрозоля. Об этом свидетельствуют данные спутникового зондирования (MODIS-Aqua [72], 13 июля и 9–12 августа 2016 г.) о пространственном распределении  $\tau_{0,55}^a$  (рис. 3) – шлейф повышенного замутнения атмосферы простирается из района севернее Байкала до арктических морей. На севере Иркутской области, по данным спутникового зондирования [73], в этот период наблюдались мощные лесные пожары. Чередование в районе исследований воздушных масс – арктических и более теплых и влажных континентальных, обогащенных мелкодисперсным аэрозолем, – приводит, в частности, к взаимосвязанным колебаниям ОВС и параметра Ангстрема  $\alpha$ .

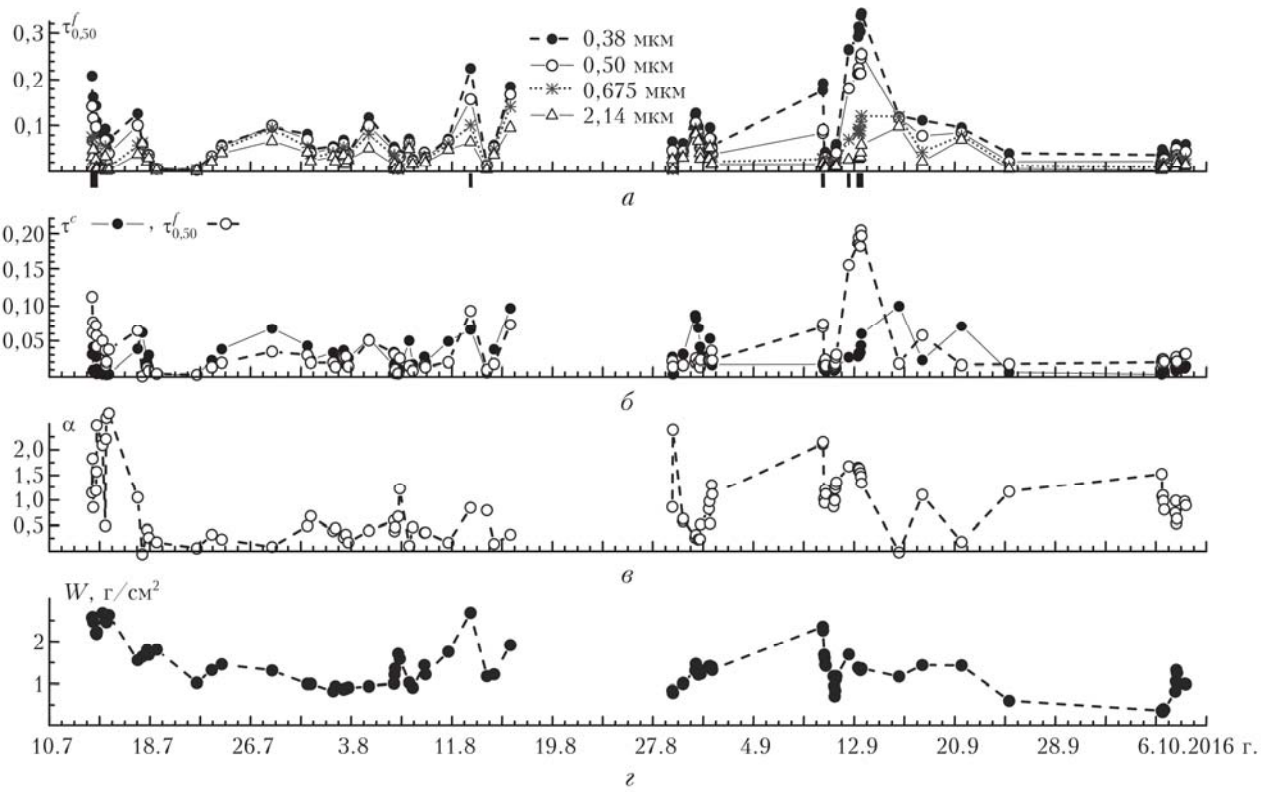
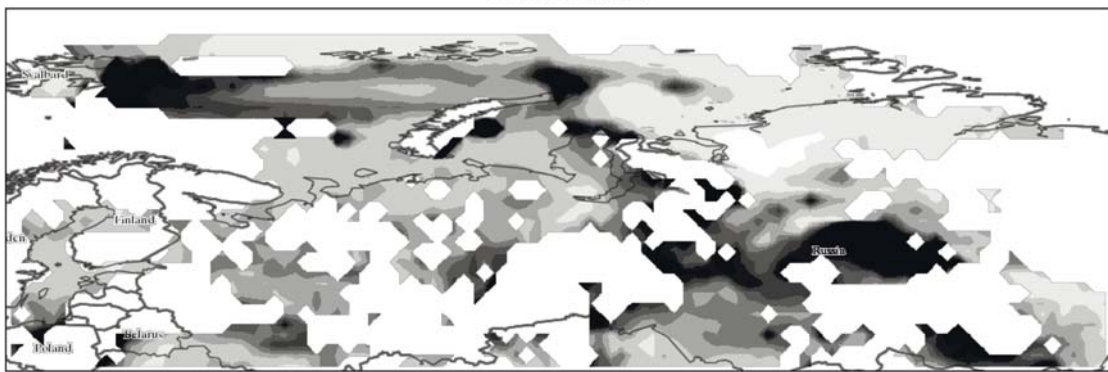


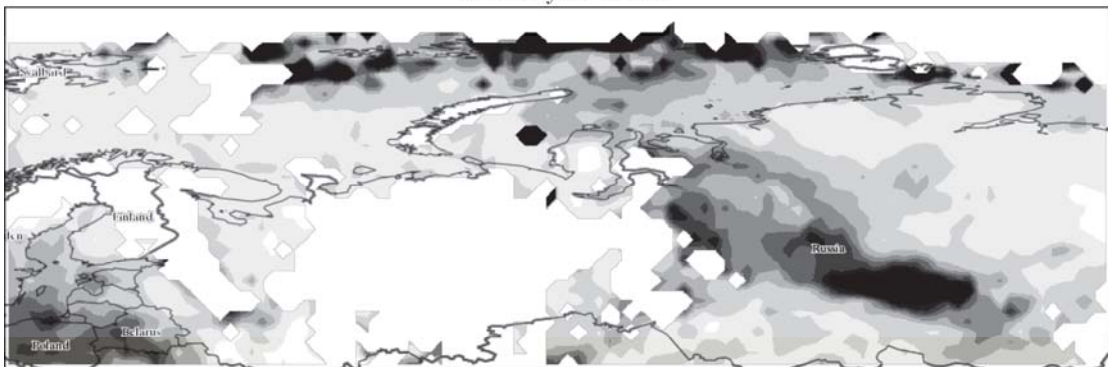
Рис. 2. Временная изменчивость АОТ и ОВС атмосферы

13 июля 2016 г.



а

9–12 августа 2016 г.



б

Рис. 3. Пространственное распределение  $\tau_{0,55}^a$  по данным MODIS

Учитывая отмеченное выше обстоятельство, расчет средних значений АОТ и сопоставление результатов с ранее полученными данными [12, 33, 34, 53, 54, 74, 75] проводился для выборок по всем измерениям только с дымовыми ситуациями и с исключением влияния дымового аэрозоля. Фильтрация дымовых ситуаций выполнялась по среднедневным спутниковым данным (аналогичным рис. 3) и по

данным судовых измерений согласно критериям:  $\tau_{0,50}^f > 0,07$  и  $\tau_{0,50}^f / \tau_{0,50}^a > 0,7$ . Выделенные таким образом замеры отмечены штрихами под осью абсцисс на рис. 2, а.

Статистические характеристики АОТ и ОВС по результатам двух рейсов представлены в табл. 1. На рис. 4, а, б приведены средние спектральные зависимости АОТ для разных выборок.

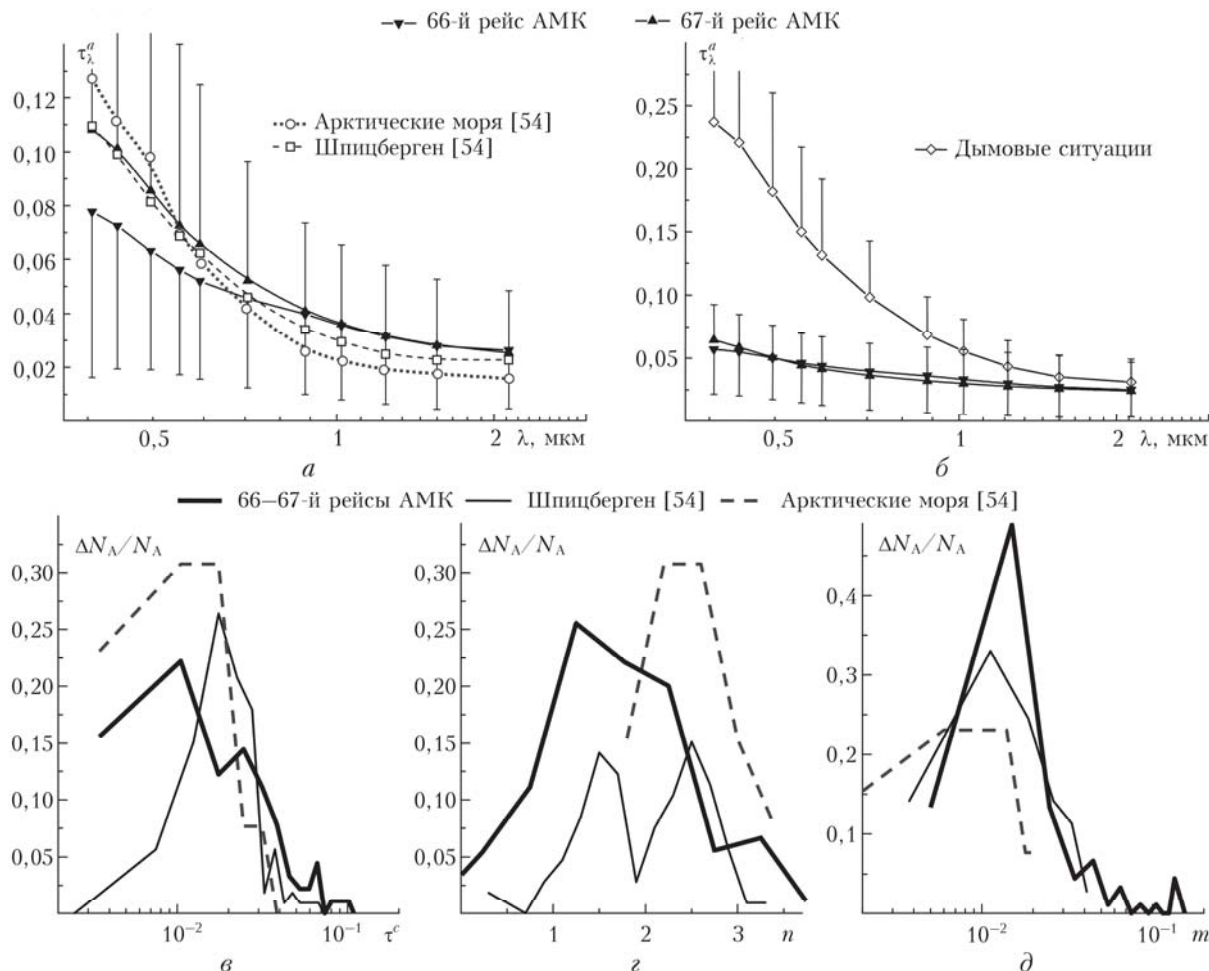


Рис. 4. Средние спектральные зависимости АОТ для разных выборок (а, б) и гистограммы повторяемости величин  $\tau^c$ ,  $m$  и  $n$  (б–д) в сравнении с ранее полученными данными [54]

Таблица 1

Статистические характеристики АОТ и ОВС по результатам двух рейсов для выборок «без дымов» и «все данные»

Параметр	Без дымов				Все данные		
	среднее	СКО	min	max	среднее	СКО	max
$\tau_{0,38}^a$	0,057	0,031	0,004	0,185	0,088	0,078	0,343
$\tau_{0,50}^a$	0,045	0,028	0,004	0,168	0,065	0,056	0,256
$\tau_{0,87}^a$	0,034	0,028	0,004	0,141	0,040	0,031	0,141
$\tau_{2,14}^a$	0,025	0,023	0,002	0,099	0,026	0,022	0,099
$\tau^c$	0,024	0,023	0,002	0,099	0,026	0,022	0,099
$\tau_{0,50}^f$	0,021	0,011	0,001	0,072	0,039	0,048	0,205
$\alpha$	0,780	0,630	-0,060	2,690	0,910	0,640	2,690
$\beta$	0,031	0,027	0,003	0,134	0,036	0,029	0,134
$n$	1,530	1,010	-3,470	3,690	1,630	0,950	3,690
$m$	0,016	0,009	0,000	0,063	0,029	0,034	0,148
$W$ , г/см <sup>2</sup>	1,266	0,517	0,333	2,679	1,383	0,572	2,679

Средние значения АОТ (например, для всех измерений  $\bar{\tau}_{0,50}^a = 0,065 \pm 0,056$ , без дымов  $\bar{\tau}_{0,50}^a = 0,045 \pm 0,028$ ), полученные в 66–67-м рейсах АМК, достаточно хорошо согласуются с литературными данными [33, 34, 53, 54, 74 и др.]. В полярных широтах в летне-осенний период средние значения  $\bar{\tau}_{0,50}^a$ , как правило, не превышают 0,10, а фоновые [54] составляют  $0,035 \div 0,050$ .

Как видно из рис. 4, а, основные различия спектрального хода АОТ в двух рейсах проявляются в коротковолновой части спектра и обусловлены разным вкладом дымового аэрозоля. При исключении дымовых ситуаций различия в зависимостях  $\tau_\lambda^a$  практически исчезают (см. рис. 4, б). Отметим, что значительное замутнение атмосферы в достаточно короткие периоды выноса дымового аэрозоля с континента привело к увеличению средних значений АОТ от 4% для  $\tau_{2,14}^a$  до 54% для  $\tau_{0,38}^a$ . Среднее значение  $\tau_{0,50}^f$  возросло на 86% (см. табл. 1).

В целом же изменчивость характеристик АОТ в периоды двух рейсов хорошо согласуется с результатами, полученными ранее в арктических районах [54] (см. рис. 4, в–д). Более 75% наиболее вероятных значений  $\tau^c$  принадлежат диапазону  $0,004 \div 0,052$ , параметров  $n$  и  $m$  – диапазонам  $0,75 \div 2,25$  и  $0,005 \div 0,025$  соответственно.

Изменчивость ОВС атмосферы в течение двух рейсов определялась в основном его сезонным и широтным ходами, а также вторжениями более теплых и влажных воздушных масс с континента. В результате диапазон изменчивости ОВС составил от 0,33 до  $2,68 \text{ г/см}^2$  при среднем значении  $1,38 \text{ г/см}^2$ .

## 2.2. Аэрозоль в приземном слое атмосферы

### 2.2.1. Интегральные параметры

В табл. 2 приведены минимальные, максимальные, средние значения и СКО счетной концентрации аэрозоля и массовой концентрации сажи по массивам данных, полученных в Карском и Баренцевом морях.

Средние значения массовой концентрации аэрозоля для указанных массивов соответствуют диапазонам изменчивости средних значений, приводимых разными авторами для арктических морей ( $0,4\text{--}7 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ ) [40, 48–51, 76]. Сравнение данных для Карского моря с результатами измерений в 54-м рейсе АМК в 2007 г. показывает, что счетная концентрация аэрозоля в приземном слое изме-

нилась слабо ( $5,36 \text{ см}^{-3}$  в 2007 г. и  $5,06 \text{ см}^{-3}$  в 2016 г.). Средние концентрации «сажи» также не выходят за пределы вариаций, приводимых в литературе [49, 51, 52, 54, 57, 60–63].

На рис. 5 показаны карты распределений концентраций аэрозоля и сажи по акваториям Карского и Баренцева морей.

В Карском море наблюдалось повышение концентраций при подходе судна к Енисейскому заливу: средние значения  $N_A = 5,97 \pm 7,1 \text{ см}^{-3}$  и  $M_{BC} = 0,067 \pm 0,062 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ , а также в центральной части архипелага Новая Земля:  $N_A = 11,7 \pm 10,4 \text{ см}^{-3}$  и  $M_{BC} = 0,072 \pm 0,69 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ . Наибольшие концентрации наблюдались вблизи северной его оконечности  $N_A \sim 14 \text{ см}^{-3}$  и  $M_{BC} \sim 0,1 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ . По средним характеристикам наиболее близкой к фоновым условиям оказалась северо-восточная часть прибрежной зоны архипелага Новая Земля:  $N_A < 2 \text{ см}^{-3}$  и  $M_{BC} \sim 0,01 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ .

В Баренцевом море максимальные значения массовой концентрации сажи ( $> 0,2 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ ) наблюдались в южной части, вблизи континента и выхода из Белого моря, минимальные – в западной, юго-западной и северо-западной частях. Области повышенной концентрации аэрозоля ( $30\text{--}35 \text{ см}^{-3}$ ) расположены вблизи побережья Новой Земли ( $72^\circ$  с.ш.,  $50^\circ$  в.д. и  $74^\circ$  с.ш.,  $55^\circ$  в.д.). Как показано в разд. 2.1, во время нахождения судна у северной оконечности Новой Земли 9–11 сентября в этом районе наблюдалось вторжение воздушных масс, обогащенных дымовым аэрозолем от лесных пожаров в Байкальском регионе, что проявилось как в росте АОТ (разд. 2.1), так и в увеличении концентрации аэрозоля в приземном слое атмосферы. Еще одна область повышенной концентрации аэрозоля ( $\sim 25 \text{ см}^{-3}$ ) расположена на севере центральной части Баренцева моря в районе  $76^\circ$  с.ш.,  $35\text{--}45^\circ$  в.д.

### 2.2.2. Функции распределения частиц по размерам

Для анализа поведения спектра размеров аэрозоля в акватории Карского и Баренцева морей рассматривались распределения частиц по объемам  $\Delta V_i / \Delta r_i$ , где  $\Delta V_i$  – объемная концентрация частиц в  $i$ -м диапазоне измерений фотоэлектрического счетчика  $\Delta V_i = 4/3(\pi r_i^3 \cdot \Delta N_i)$ ,  $\Delta N_i$  – счетная концентрация частиц в соответствующем диапазоне,  $r_i$  – средний радиус диапазона;  $\Delta r_i$  – его ширина.

Для более подробного изучения микроструктуры аэрозоля были рассчитаны средние функции распределения по размерам для различных участков

Таблица 2

Статистические характеристики счетной концентрации аэрозоля и массовой концентрации «сажи» в двух рейсах

Параметр	Баренцево море				Карское море			
	среднее $\pm$ СКО, 2016 г.	среднее $\pm$ СКО, 2013 [51]	min	max	среднее $\pm$ СКО, 2016	среднее $\pm$ СКО, 2007 [49]	min	max
$M_{BC}, \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$	$0,039 \pm 0,033$	$0,06 \pm 0,02$	1E–3	0,33	$0,028 \pm 0,021$	$0,09 \pm 0,21$	1E–3	0,14
$N_A, \text{ см}^{-3}$	$7,62 \pm 6,26$	$5,55 \pm 1,08$	0,015	35,7	$5,06 \pm 5,00$	$5,36 \pm 5,23$	0,005	41,0

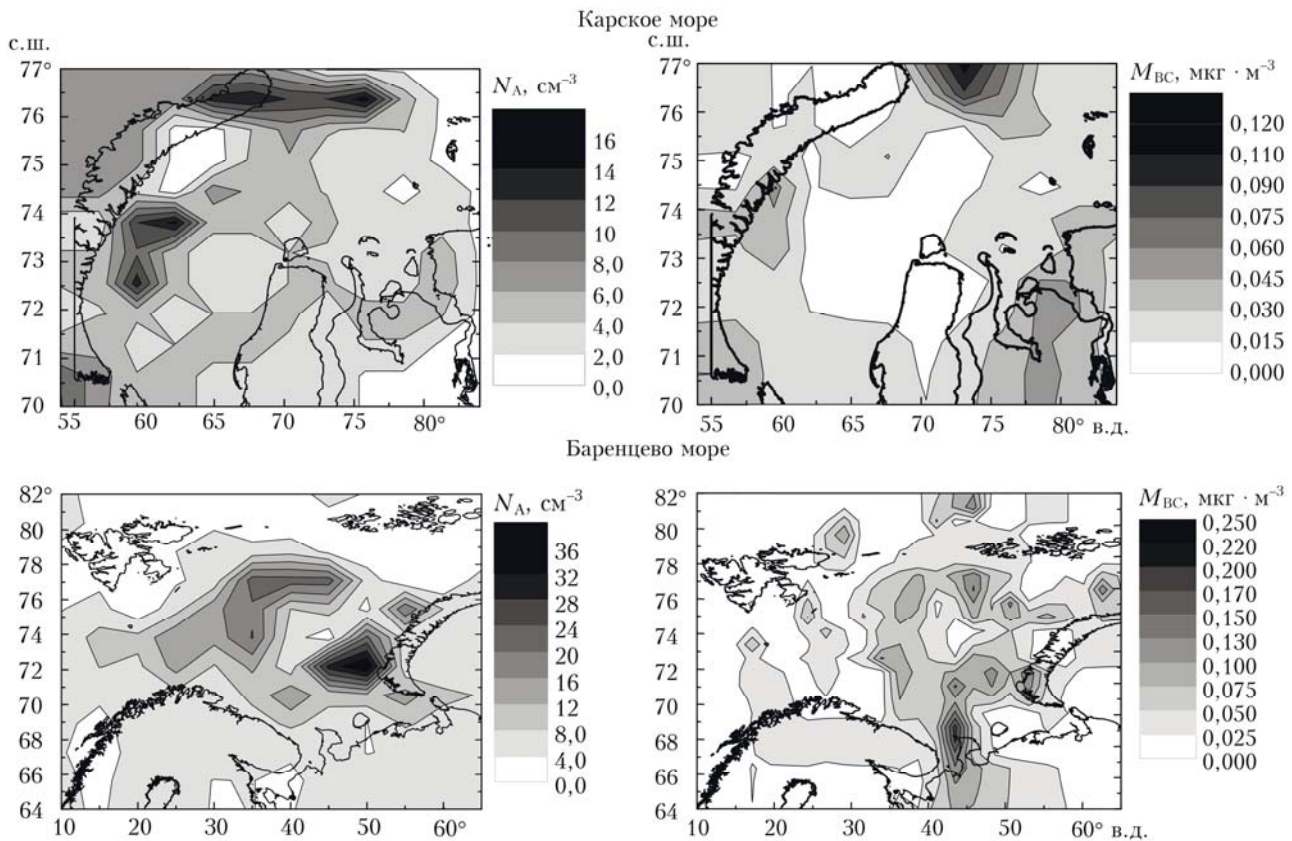


Рис. 5. Карты распределения концентраций аэрозоля  $N_A$  и сажи  $M_{BC}$  по акваториям Карского и Баренцева морей

Карского и Баренцева морей. В 66-м рейсе были выделены следующие районы: 1) Белое и Баренцево моря (выход из порта Архангельск, проход через Белое море и вдоль южного побережья Баренцева моря до пролива Карские Ворота); 2) район Обской губы и Енисейского залива; 3) район архипелага Новая Земля. В Баренцевом море рассматривались районы: 1) Печорское море; 2) Центральная котловина (73–76° с.ш.; 41–50° в.д.); 3) центральная часть к западу от Новой Земли (74–76° с.ш.;

50–54 в.д.); 4) Новая Земля, залив Русская Гавань (76–76,5° с.ш.; 61–62,5° в.д.); 5) Земля Франца-Иосифа и окрестности (80–80,6° с.ш.; 41–48° в.д.); 6) «Кольский меридиан» (разрез по 33,5° в.д., 74–76,3° с.ш.); 7) разрез по 17,5° от Норвегии до Шпицбергена, 71–76° с.ш.; 8) район к северо-востоку от Шпицбергена (79–80,5° с.ш.; 27,5–34° в.д.).

На рис. 6 показаны функции распределения частиц по размерам, осредненные по районам измерений.

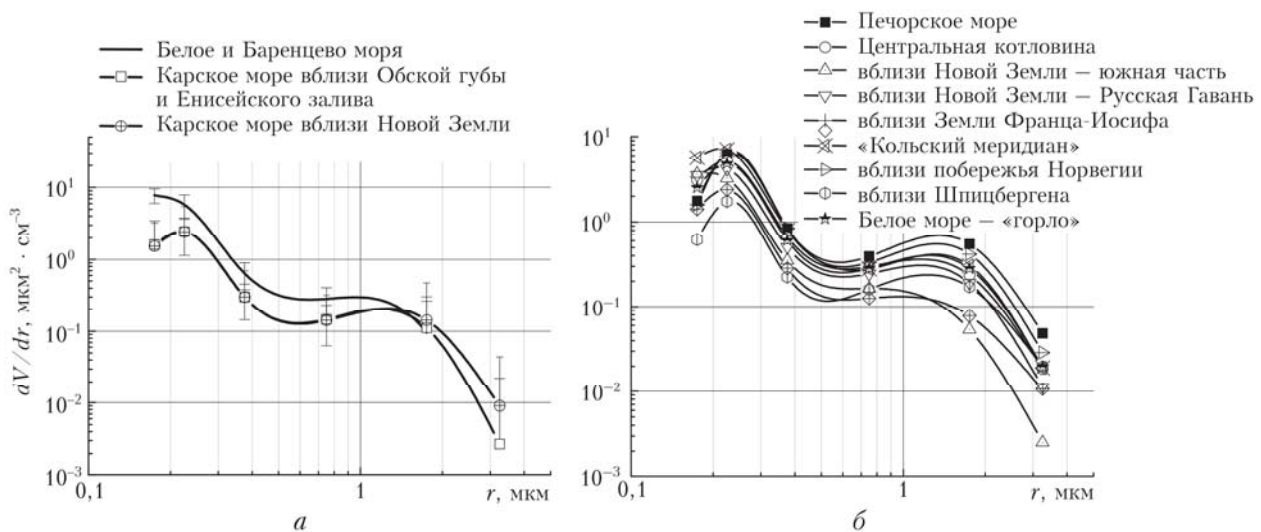


Рис. 6. Функции распределения аэрозольных частиц по размерам в различных районах измерений: 66-й рейс АМК, Карское море (а), 67-й рейс, Баренцево море (б)

Видно, что в Баренцевом море по сравнению с Карским сильнее выражена грубодисперсная фракция частиц. В акватории Карского моря выделяется участок прохода вдоль континентального побережья, обозначенный как «Белое и Баренцево моря» — здесь наблюдается повышенная концентрация частиц, особенно в мелкодисперсном диапазоне размеров. В акватории Баренцева моря наиболее отличаются от остальных районы вблизи центральной части Новой Земли и Шпицбергена — здесь наблюдается значительное снижение содержания грубодисперсных частиц. Максимальная концентрация грубодисперсных частиц характерна для морских районов с сильным волнением морской поверхности, что вызывает генерацию частиц при дроблении волн и усилении «пузырькового механизма».

### 2.2.3. Ионный состав

В табл. 3 приводятся массовые концентрации различных ионов ( $\text{мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ ), обнаруженных в пробах, отобранных с помощью аспиратора в Карском

и Баренцевом морях. Пробы, в которых явно прослеживалось попадание брызг и тумана, были отбракованы, и эти данные исключены из анализа. Для сравнения в последнем столбце приведены результаты, полученные в Карском море в 2007 г. [49].

Для оценки вклада различных источников в формирование химического состава приводного аэрозоля была использована методика, основанная на анализе массовой концентрации ионов континентального ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ) и морского ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) происхождения с использованием долевых факторов  $F_{\text{cont}}$  и  $F_{\text{ocean}}$ , алгоритм определения которых описан в [77]. Для расчетов используется отношение массовых концентраций ионов к массовой концентрации реперного иона в морской воде. В нашем случае в качестве реперного иона был взят  $\text{Na}^+$ . Величины  $F_{\text{cont}}$  и  $F_{\text{ocean}}$  представляют собой долю массовой концентрации ионов соответствующего происхождения и связаны соотношением  $F_{\text{cont}} + F_{\text{ocean}} = 1$ . На рис. 7 приведены долевые факторы  $F_{\text{cont}}$  и  $F_{\text{ocean}}$ , полученные для проб аэрозоля, отобранных в двух рейсах АМК.

Таблица 3

Средние массовые концентрации ионов в пробах аэрозоля, отобранных в акваториях Карского и Баренцева морей, а также их СКО, минимальные и максимальные значения

Ион	Карское море				Баренцево море				Карское море 2007 г. [49]
	среднее	СКО	min	max	среднее	СКО	min	max	
$\text{Na}^+$	0,26	0,24	0,035	0,87	1,81	2,53	0,34	12,26	1,94
$\text{K}^+$	0,85	2,55	0	11,53	0,16	0,17	1E-3	0,91	0,28
$\text{Mg}^{2+}$	0,043	0,098	0	0,445	0,53	1,27	0,023	6,41	0,21
$\text{Ca}^{2+}$	0,20	0,47	0,004	2,12	1,24	2,02	0,086	10,60	0,23
$\text{Cl}^-$	1,76	3,71	0,19	16,9	4,05	2,57	0,898	10,67	4,55
$\text{Br}^-$	0,003	0,007	0	0,033	0,021	0,063	1E-3	0,32	—
$\text{NH}_4^+$	1E-3	0,005	0	0,025	0,31	0,33	0	1,69	0,28
$\text{NO}_2^-$	0	1E-3	0	0,004	0,077	0,041	0	0,14	—
$\text{NO}_3^-$	0,018	0,029	0	0,099	0,78	0,35	1E-3	1,37	0,16
$\text{SO}_4^{2-}$	0,17	0,19	0,023	0,78	1,14	0,77	0,19	3,74	1,32
$\text{PO}_4^{3-}$	0,009	0,013	0	0,055	0,017	0,029	0	0,11	—

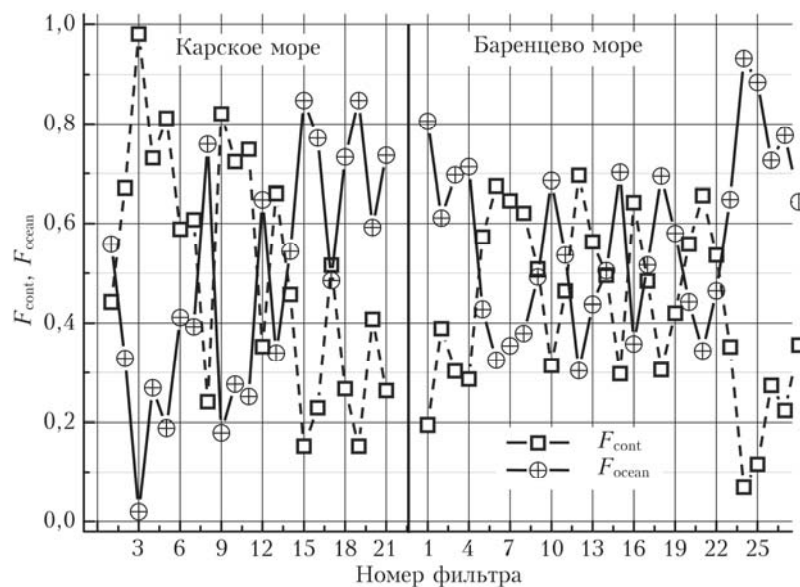


Рис. 7. Долевые факторы ионов континентального и морского происхождения



В Карском море преобладание ионов континентального происхождения наблюдается в пробах № 2–7 (район Обской губы и Енисейского залива) и № 9–11 (северная часть Новой Земли). В районе Печорского моря в обоих рейсах (пробы № 21 из 66-го рейса и № 2–7 из 67-го рейса), несмотря на близость континента, преобладают ионы морского происхождения. Это объясняется тем, что во время нахождения судна в данном районе наблюдались ветры преимущественно северо-западного направления, что способствовало притоку аэрозоля из открытых районов Баренцева моря в пункты измерений. Ионы морского происхождения также преобладают в пробах № 3–4 (центральная котловина Баренцева моря), № 15–18 (разрез по 17,5° в.д., вдали от побережья как Норвегии, так и Шпицбергена). Ионы континентального происхождения преобладают в пробах № 12–13 (залив Русская Гавань, северная оконечность Новой Земли). Во время работы судна в данном месте отчетливо проявлялось влияние дальнего переноса континентального аэрозоля, включая дымы пожаров (см. рис. 2, 3, 5). Также повышенная концентрация ионов континентального происхождения по сравнению с морскими наблюдается в пробах № 21–24 (работы в проливах архипелага Земля Франца-Иосифа в непосредственной близости от островов). В пробах, отобранных в Норвежском море, очевиден преимущественный вклад ионов морского происхождения.

### Заключение

В работе проанализированы результаты измерений комплекса физико-химических характеристик аэрозоля в двух рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш», состоявшихся летом и осенью 2016 г. Результаты измерений показали, что в периоды двух рейсов уровни как аэрозольного замутнения атмосферы, так и концентраций аэрозоля и «сажи» в приводном слое атмосферы были близки средним многолетним данным в арктических широтах.

Заметное влияние на замутнение атмосферы в период измерений оказали выносы дымов лесных пожаров с континента. Вклад дымового аэрозоля, например, в среднее значение АОТ (0,50 мкм) суточных измерений составил около 44%.

Авторы благодарят экипаж НИС «Академик Мстислав Келдыш» за помощь в экспедициях.

Измерения в Карском море выполнены при поддержке гранта РФФИ № 14-50-00095, измерения в Баренцевом море — при поддержке гранта РФФИ № 14-27-00114, анализ результатов — при поддержке Программы ОНЗ РАН № П.2П/IX.135-8 и комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН П.1 — проект № 0368-2018-0014.

1. Кондратьев К.Я. Аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. 2. Прямое и косвенное воздействие на климат // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15, № 4. С. 301–320.

2. Ивлев Л.С. Аэрозольное воздействие на климатические процессы // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 5. С. 392–410.
3. Кондратьев К.Я. Радиационное возмущающее воздействие, обусловленное аэрозолем // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16, № 1. С. 5–18.
4. Кондратьев К.Я. Аэрозоль и климат: современное состояние и перспективы разработок. 3. Аэрозольное радиационное возмущающее воздействие // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19, № 7. С. 565–575.
5. Zhao C., Garrett T.J. Effects of Arctic haze on surface cloud radiative forcing // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42, iss. 2. P. 557–564. DOI:10.1002/2014GL062015.
6. Виноградова А.А., Егоров В.А. О возможностях дальнего атмосферного переноса загрязнений в Российскую Арктику // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1996. Т. 32, № 6. С. 796–802.
7. Виноградова А.А. Атмосферный перенос пассивных примесей в разные части Российской Арктики в весеннее время года // Докл. РАН. 1997. Т. 355, № 5. С. 677–679.
8. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Атмосферный перенос антропогенных примесей в арктические районы России (1986–2010 гг.) // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 6. С. 475–483; Vinogradova A.A., Ponomareva T.Ya. Atmospheric transport of anthropogenic impurities to the Russian arctic (1986–2010) // Atmos. Ocean. Opt. 2012. V. 25, N 6. P. 414–422.
9. Arctic Climate Impact Assessment, Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment (ACIA) Tech. Rep. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2005. 140 p.
10. IPCC: Climate Change 2007: Synthesis Report, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. 52 p. [Electronic resource]. URL: [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf) (last access: 20.05.2012).
11. IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013. 1552 p. [Electronic resource]. URL: [http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5\\_ALL\\_FINAL.pdf](http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf) (last access: 20.08.2014).
12. Glantz P., Bourassa A., Herber A., Iversen T., Karlsson J., Kirkeveg A., Maturilli M., Seland Ø., Stabel K., Struthers H., Tesche M., Thomason L. Remote sensing of aerosols in the Arctic for an evaluation of global climate model simulations // J. Geophys. Res. 2014. V. 119, iss. 13. P. 8169–8188. DOI: 10.1002/2013JD021279.
13. Смирнов В.В., Шевченко В.П. Дымки и туманы полярных морей // Метеорол. и гидрол. 2003. № 1. С. 49–57.
14. Виноградова А.А. Микроэлементы в составе арктического аэрозоля (обзор) // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1993. Т. 29, № 4. С. 437–456.
15. Smirnov V.V., Radionov V.F., Savchenko A.V., Proinin A.A., Kuusk V.V. Variability in aerosol and air ion composition in the Arctic spring atmosphere // Atmos. Res. 1998. V. 49. P. 163–176.
16. Виноградова А.А., Шевченко В.П. Роль атмосферных аэрозолей в загрязнении Северного Ледовитого океана и его морей // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 5–6. С. 387–394.
17. Виноградова А.А. Сезонные и долговременные вариации индексов атмосферной циркуляции и перенос воздуха в Российскую Арктику // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 6. С. 463–472.
18. Ancellet G., Pelon J., Blanchard Y., Quennehen B., Bazureau A., Law K.S., Schwarzenboeck A. Transport

- of aerosol to the Arctic: analysis of CALIOP and French aircraft data during the spring 2008 POLARCAT campaign // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14. P. 8235–8254. DOI: 10.5194/acp-14-8235-2014.
19. Heidam N.Z. The components of the Arctic aerosol // *Atmos. Environ.* 1984. V. 18, N 2. P. 329–343.
  20. Stock M., Ritter C., Herber A., von Hoyningen-Huene W., Baibakov K., Gräser J., Orgis T., Treffeisen R., Zinoviev N., Makshtas A., Dethloff K. Springtime arctic aerosol: Smoke versus haze, a case study for March 2008 // *Atmos. Environ.* 2012. V. 52. P. 48–55.
  21. Deser C., Tomas R., Alexander M., Lawrence D. The seasonal atmospheric response to projected Arctic sea ice loss in the late twenty-first century // *J. Clim.* 2010. V. 23. P. 333–351.
  22. Gagne M.-E., Gillett N.P., Fyfe J.C. Impact of aerosol emission controls on future Arctic sea ice cover // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. P. 8481–8488. DOI: 10.1002/2015GL065504.
  23. Stroeve J., Holland M.M., Meier W., Scambos T., Serreze M. Arctic sea ice decline: Faster than forecast // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. P. L09501. DOI: 10.1029/2007GL029703.
  24. Eleftheriadis K., Vratolis S., Nyeki S. Aerosol black carbon in the European Arctic: Measurements at Zeppelin Station, Ny-Ålesund, Svalbard from 1998–2007 // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. P. L02809. DOI: 10.1029/2008GL035741.
  25. Di Pierro M., Jaegl'el L., Eloranta E.W., Sharma S. Spatial and seasonal distribution of Arctic aerosols observed by the CALIOP satellite instrument (2006–2012) // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. P. 7075–7095. DOI: 10.5194/acp-13-7075-2013.
  26. Shantz N.C., Gultepe I., Andrews E., Zelenyuk A., Earle M.E., Macdonald A.M., Liu P.S.K., Leaitch W.R. Optical, physical, and chemical properties of springtime aerosol over Barrow Alaska in 2008 // *Int. J. Climatol.* 2014. V. 34. P. 3125–3138. DOI: 10.1002/joc.3898.
  27. Zhan J., Gao Y., Li W., Chen L., Lin H., Lin Q. Effects of ship emissions on summertime aerosols at Ny-Ålesund in the Arctic // *Atmos. Pollut. Res.* 2014. V. 5. P. 500–510.
  28. Bazzano A., Ardini F., Grotti M., Malandrino M., Giacomino A., Abollino O., Cappelletti D., Becagli S., Traversi R., Udusti R. Elemental and lead isotopic composition of atmospheric particulate measured in the Arctic region (Ny-Ålesund, Svalbard Islands) // *Rend. Fis. Acc. Lincei.* 2016. V. 27 (Suppl. 1). P. S73–S84.
  29. Sinha P.R., Kondo Y., Koike M., Ogren J.A., Jefferson A., Barrett T.E., Sheesley R.J., Ohata S., Moteki N., Coe H., Liu D., Irwin M., Tunved P., Quinn P.K., Zhao Y. Evaluation of ground-based black carbon measurements by filter-based photometers at two Arctic sites // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2017. V. 122. P. 3544–3572. DOI: 10.1002/2016JD025843.
  30. Deshpande C.G., Kamra A.K. Physical properties of the arctic summer aerosol particles in relation to sources at Ny-Ålesund, Svalbard // *J. Earth Syst. Sci.* 2014. V. 123, N 1. P. 201–212. DOI: 10.1007/s12040-013-0373-0.
  31. Radionov V.F., Marshunova M.S. Long-term variations in the turbidity of the Arctic atmosphere in Russia // *Atmos. Ocean.* 1992. V. 30, N 4. P. 531–549. DOI: 10.1080/07055900.1992.9649454.
  32. Радионов В.Ф., Маршунова М.С., Русина Е.Н., Лубо-Лесниченко К.Е., Пиманова Ю.Е. Аэрозольная мутность атмосферы в полярных районах // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 1994. № 6. С. 797–801.
  33. Tomasi C., Vitale V., Lupi A., Di Carmine C., Campanelli M., Herber A., Treffeisen R., Stone R.S., Andrews E., Sharma S., Radionov V., von Hoyningen-Huene W., Stebel K., Hansen G.H., Myhre C.L., Wehrli C., Aaltonen V., Lihavainen H., Virkkula A., Hillamo R., Ström J., Toledano C., Cachorro V.E., Ortiz P., De Frutos A. M., Blindheim S., Frioud M., Gausa M., Zielinski T., Petelski T., Yamanouchi T. Aerosols in polar regions: A historical overview based on optical depth and in situ observations // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. P. D16205. DOI: 10.1029/2007JD008432.
  34. Toledano C., Cachorro V.E., Gausa M., Stebel K., Aaltonen V., Berjyn A., Ortiz de Galisteo J.P., De Frutos A.M., Bemouna Y., Blindheim S., Myhre C.L., Zibordi G., Wehrli C., Kratzer S., Hakansson B., Carlund T., De Leeuw G., Herber A., Torres B. Overview of sun photometer measurements of aerosol properties in Scandinavia and Svalbard // *Atmos. Environ.* 2012. V. 52. P. 18–28.
  35. Сакерин С.М., Чернов Д.Г., Кабанов Д.М., Козлов В.С., Панченко М.В., Польшкин В.В., Радионов В.Ф. Предварительные результаты исследований аэрозольных характеристик атмосферы в районе Баренцбурга (Шпицберген) // *Проблемы Арктики и Антарктики.* 2012. Т. 91, № 1. С. 20–31.
  36. Сакерин С.М., Андреев С.Ю., Кабанов Д.М., Николашкин С.В., Прахов А.Н., Радионов В.Ф., Турчинович Ю.С., Чернов Д.Г., Holben B.N., Smirnov A., Sorokin M.G. О результатах исследований аэрозольной оптической толщи атмосферы в Арктических районах // *Оптика атмосфер. и океана.* 2014. Т. 27, № 5. С. 413–423; Sakerin S.M., Andreev S.Yu., Kabanov D.M., Nikolashkina S.V., Prakhov A.N., Radionov V.F., Turchinovich Yu.S., Chernov D.G., Holben B.N., Smirnov A., Sorokin M.G. On results of studies of atmospheric aerosol optical depth in Arctic regions // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 6. P. 517–528.
  37. Чернов Д.Г., Козлов В.С., Панченко М.В., Турчинович Ю.С., Радионов В.Ф., Губин А.В., Прахов А.Н. Особенности изменчивости концентраций аэрозоля и сажи в приземном слое воздуха в Баренцбурге (Шпицберген) в 2011–2013 гг. // *Проблемы Арктики и Антарктики.* 2014. Т. 102, № 12. С. 34–44.
  38. Chernov D.G., Kozlov V.S., Panchenko M.V., Turchinovich Yu.S., Radionov V.F., Gubin A.V., Prakhov A.N., Lubo-Lesnichenko K.E., Sidorova O.R., Golobokova L.P., Khodzher T.V., Huriganova O.I., Onishchuk N.A. Investigation of microphysical characteristics and chemical composition of near-ground aerosol in Barentsburg (Spitsbergen) in the spring and summer seasons of 2011–2015 // *Proc. SPIE.* 2016. V. 10035. P. 100334.
  39. Шевченко В.П. Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. М.: Наука, 2006. 226 с.
  40. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А., Смирнов В.В., Серова В.В., Штайн Р. Аэрозоли Арктики – результаты десятилетних исследований // *Оптика атмосфер. и океана.* 2000. Т. 13, № 6–7. С. 551–576.
  41. Döschner R., Vihma T., Maksimovich E. Recent advances in understanding the Arctic climate system state and change from a sea ice perspective: A review // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14. P. 13571–13600. DOI: 10.5194/acp-14-13571-2014.
  42. Markowicz K.M., Pakyszy P., Ritter Ch., Zielinski T., Udusti R., Cappelletti D., Mazzola M., Shio-

- bara M., 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.* 2016. V. 121. P. 14487–14512.
43. 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 атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 6. С. 512–520; Vinogradova A.A., Smirnov N.S., Korotkov V.N., Romanovskaya A.A. Forest fires in Siberia and Far East: Emissions and atmospheric transport of black carbon to the Arctic // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 6. P. 566–574.
44. Виноградова А.А., Смирнов Н.С., Коротков В.Н. Аномальные пожары 2010 и 2012 гг. на территории России и поступление черного углерода в Арктику // *Оптика атмосф. и океана.* 2016. Т. 29, № 6. С. 482–487; Vinogradova A.A., Smirnov N.S., Korotkov V.N. Anomalous wildfires in 2010 and 2012 on the territory of Russia and supply of black carbon to the Arctic // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 6. P. 545–550.
45. Raut J.-C., Marelle L., Fast J.D., Thomas J.L., Weinzierl B., Law K.S., Berg L.K., Roiger A., Easter R.C., Heimerl K., Onishil T., Delanoe J., Schlager H. Cross-polar transport and scavenging of Siberian aerosols containing black carbon during the 2012 ACCESS summer campaign // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2017. V. 17, iss. 18. P. 10969–10995. DOI: 10.5194/acp-2016-1023.
46. Полькин В.В., Голобокова Л.П., Козлов В.С., Коробов В.Б., Лисицын А.П., Панченко М.В., Пескова М.А., Ходжер Т.В., Шевченко В.П. Оценка связи микрофизического и химического состава для приводного аэрозоля Белого моря // *Оптика атмосф. и океана.* 2004. Т. 17, № 5–6. С. 377–385.
47. Полькин В.В., Панченко М.В., Голобокова Л.П. Ионный состав приводного аэрозоля Белого моря в августе 2003–2006 гг. // *Оптика атмосф. и океана.* 2007. Т. 20, № 11. С. 998–1003.
48. Полькин В.В., Панченко М.В., Грищенко И.В., Коробов В.Б., Лисицын А.П., Шевченко В.П. Исследования дисперсного состава приводного аэрозоля Белого моря в конце летнего сезона 2007 г. // *Оптика атмосф. и океана.* 2008. Т. 21, № 10. С. 836–840.
49. Полькин В.В., Панченко М.В., Голобокова Л.П., Филитова 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.
50. Полькин В.В., Голобокова Л.П., Погодаева Т.В., Козлов В.С., Коробов В.Б., Лисицын А.П., Панченко М.В., Пескова М.А., Ходжер Т.В., Шевченко В.П. Состав аэрозолей приводного слоя атмосферы над Белым морем во второй половине августа 2003 и 2004 гг. // *Фундаментальные исследования океанов и морей / под ред. Н.П. Лаверова.* М.: Наука, 2006. С. 413–439.
51. Sakerin S.M., Bobrikov A.A., Bukin O.A., Golobokova L.P., Pol'kin Vas.V., Pol'kin 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 the Northern Sea Route // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. P. 12413–12443. DOI: 10.5194/acp-15-12413-2015.
52. Popovicheva O.B., Evangelidou N., Eleftheriadis K., Kalogridis A.C., Sitnikov N., Eckhardt S., Stohl A. Black carbon sources constrained by observations in the Russian High Arctic // *Environ. Sci. Technol.* 2017. V. 51, N 7. P. 3871–3879. DOI: 10.1021/acs.est.6b05832.
53. Голубева Н.И., Бурцева Л.В., Матишов Г.Г., Ильин Г.В. Результаты измерений тяжелых металлов в атмосферных аэрозолях в открытых районах арктических морей в 2009–2010 гг. // *Докл. АН.* 2013. Т. 453, № 1. С. 72–75.
54. Сакерин С.М., Кабанов Д.М. Мелко- и грубодисперсные компоненты аэрозольной оптической толщи атмосферы в морских и полярных районах // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 8. С. 690–697; Sakerin S.M., Kabanov D.M. Fine and coarse components of atmospheric aerosol optical depth in maritime and polar regions // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 6. P. 510–517.
55. 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.* 2014. V. 2. P. 27. DOI: <http://doi.org/10.12952/journal.elementa.000027>.
56. Виноградова А.А., Полиссар А.В. Элементный состав аэрозоля в атмосфере центральной части Российской Арктики // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 1995. Т. 31, № 2. С. 164–172.
57. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Купцов В.М., Ван-Малдерен Г., Мартэн Ж.-М., Ван-Грикен Р., Хуан В.В. Состав аэрозолей в приводном слое атмосферы над морями западного сектора Российской Арктики // *Океанология.* 1999. Т. 39, № 1. С. 142–151.
58. Huang K., Fu J.S., Prikhodko V.Y., Storey J.M., Romanov A., Hodson E.L., Cresko J., Morozova I., Ignatieva Y., Cabaniss J. Russian anthropogenic black carbon: Emission reconstruction and Arctic black carbon simulation // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2015. V. 120, iss. 21. P. 11,306–11,333. DOI:10.1002/2015JD023358.
59. Qi L., Li Q., Li Y., He C. Factors controlling black carbon distribution in the Arctic // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 17. P. 1037–1059.
60. Kozlov V.S., Panchenko M.V., Shmargunov V.P., Chernov D.G., Yausheva E.P., Pol'kin V.V., Terpugova S.A. Long-term investigations of the spatiotemporal variability of black carbon and aerosol concentrations in the troposphere of West Siberia and Russian Subarctic // *Химия в интересах устойчивого развития.* 2016. V. 24, N 4. P. 423–440.
61. Shevchenko V.P., Kopeikin V.M., Evangelidou N., Lisitzin A.P., Novigatsky A.N., Pankratova N.V., Starodymova D.P., Stohl A., Tompson R. 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.
62. Виноградова А.А., Веремейчик А.О. Модельные оценки содержания антропогенной сажи в атмосфере Российской Арктики // *Оптика атмосф. и океана.* 2013. Т. 26, № 6. С. 443–451.
63. Копейкин В.М., Репина И.А., Гречко Е.И., Огородников Б.И. Измерение содержания сажевого аэрозоля над водной поверхностью в Южном и Северном полушариях // *Оптика атмосф. и океана.* 2010. Т. 23, № 6. С. 444–450; Kopeikin V.M., Repina I.A., Grechko E.I., Ogorodnikov B.I. Measurements of soot aerosol content in the near-water layer in Southern and Northern hemispheres // *Atmos. Ocean. Opt.* 2010. V. 23, N 6. P. 500–507.

64. Козлов В.С., Шмаргунов В.П., Польшкин В.В. Спектрофотометры для исследования характеристик поглощения света аэрозольными частицами // Приборы и техн. эксперим. 2008. № 5. С. 1–3.
65. 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 атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1112–1117; 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 // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 4. P. 352–356.
66. Исследование радиационных характеристик аэрозоля в азиатской части России // под общей ред. С.М. Сакерина. Томск. Изд-во ИОА СО РАН, 2012. 484 с.
67. Кабанов Д.М., Сакерин С.М. О методике определения аэрозольной оптической толщи атмосферы в ближнем ИК-диапазоне спектра // Оптика атмосф. и океана. 1997. Т. 10, № 8. С. 866–874.
68. Кабанов Д.М., Веретенников В.В., Воронина Ю.В., Сакерин С.М., Турчинович Ю.С. Информационная система для сетевых солнечных фотометров // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 1. С. 61–67; Kabanov D.M., Veretennikov V.V., Voronina Yu.V., Sakerin S.M., Turchinovich Yu.S. Information system for network solar photometers // Atmos. Ocean. Opt. 2009. V. 22, N 1. P. 121–127.
69. Турчинович Ю.С., Кабанов Д.М., Сакерин С.М. Программа расчета спектральной аэрозольной толщи и интегрального влагосодержания атмосферы «SRAOTcalc» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014614193 от 17.04.2014. Правообладатель: ИОА СО РАН (RU).
70. EANET: Acid Deposition Monitoring Network in East Asian [Electronic resource]. URL: <http://www.eanet.asia/product/index.html> (last access: 17.01.2017).
71. EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme), [Electronic resource]. URL: <http://www.emep.int/> (last access: 2.02.2017).
72. Giovanni. The Bridge Between Data and Science v 4.21.6 [Electronic resource]. URL: <http://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov> (last access: 3.02.2017).
73. Карта пожаров [Электронный ресурс]. URL: <http://fires.kosmosnimki.ru/> (дата обращения: 3.03.2017).
74. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Козлов В.С., Польшкин В.В., Радионов В.Ф., Чернов Д.Г. Сравнительный анализ характеристик атмосферного аэрозоля в полярных районах Северного и Южного полушария // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. Т. 107, № 1. С. 74–83.
75. Tomasi C., Lupi A., Mazzola M., Stone R.S., Dutton E.G., Herber A., Radionov V.F., Holben B.N., Sorokin M.G., Sakerin S.M., Terpugova S.A., Sobolewski P.S., Lanconelli C., Petkov B.H., Busetto M., Vitale V. An update on polar aerosol optical properties using POLAR-AOD and other measurements performed during the International Polar Year // Atmos. Environ. 2012. V. 52. P. 29–47.
76. Croft B., Martin R.V., Leitch W.R., Tunved P., Breider T.J., D'Andrea S.D., Pierce J.R. Processes controlling the annual cycle of Arctic aerosol number and size distributions // Atmos. Chem. Phys. 2016. V. 16. P. 3665–3682. DOI: 10.5194/acp-16-3665-2016.
77. Польшкин В.В., Щелканов Н.Н., Голобокова Л.П., Панченко М.В. Сравнение методик оценки вклада континентальных и морских источников в ионный состав приводного аэрозоля Белого моря // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 1. С. 23–26.

S.A. Terpugova, P.N. Zenkova, D.M. Kabanov, V.V. Pol'kin, L.P. Golobokova, M.V. Panchenko, S.M. Sakerin, A.P. Lisitzin, V.P. Shevchenko, N.V. Politova, V.S. Kozlov, T.V. Khodzher, V.P. Shmargunov, D.G. Chernov. **Results of investigations of aerosol characteristics in the atmosphere of the Kara and Barents Seas in summer and autumn of 2016.**

Results of measurements of a complex of aerosol microphysical, chemical, and optical characteristics in two cruises of the research vessel «Akademik Mstislav Keldysh» in 2016 are analyzed. The work was carried out in the Kara Sea from July 10 till August 20 and in the Barents Sea from August 25 till October 10, 2016.

The mean values of the following aerosol characteristics are presented: AOD of the atmosphere, fine and coarse components of AOD, number concentration of particles in the near-water layer of the atmosphere, mass concentrations of the absorbing matter («soot»), water-soluble ions ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), and gaseous admixtures ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NH}_3$ ). The characteristic particle size distribution functions are presented for different regions of the Kara and Barents Seas. It is shown that the levels of both aerosol turbidity of the atmospheric column (AOD) and the concentrations of aerosol and soot in the near-water atmospheric layer were close to the long-term mean values in Arctic latitudes. The atmospheric turbidity during the period of measurements was noticeably affected by emissions of forest fire smokes from the continent. The contribution of smoke aerosol into the mean values of AOD at  $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$  obtained from shipborne measurements is about 44%.