

УДК 551.510.4

## Пространственно-временная изменчивость характеристик атмосферного аэрозоля над Карским, Баренцевым, Норвежским и Гренландским морями (экспедиции 2018–2021 гг.)

С.М. Сакерин<sup>✉1</sup>, И.А. Круглинский<sup>1</sup>, Д.М. Кабанов<sup>1</sup>, Д.А. Калашникова<sup>2</sup>, М.Д. Кравчишина<sup>3</sup>, В.И. Макаров<sup>1,4</sup>, С.А. Попова<sup>1,4</sup>, А.О. Почуфаров<sup>1</sup>, Г.В. Симонова<sup>2</sup>, Ю.С. Турчинович<sup>1</sup>, Ф.А. Дарьин<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН  
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

<sup>3</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН  
117997, г. Москва, пр. Нахимовский, 36

<sup>4</sup>Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского  
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3

<sup>5</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН  
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 11

Поступила в редакцию 8.04.2022 г.;  
после доработки 20.04.2022 г.;  
принята к печати 25.04.2022 г.

Обсуждаются результаты измерений физико-химических характеристик аэрозоля летом 2021 г. в Гренландско-Карском секторе Северного Ледовитого океана (83-й и 84-й рейсы НИС «Академик Мстислав Келдыш»). Исследовались аэрозольная оптическая толщина атмосферы, концентрации аэрозоля и черного углерода, а также химический состав аэрозольных проб – концентрации основных элементов, органического и элементного углерода, изотопный состав углерода. Для большинства характеристик аэрозоля отмечены более низкие средние значения в сравнении с тремя предшествующими экспедициями. С учетом данных предшествующих экспедиций оцениваются различия концентраций аэрозоля и черного углерода над Карским, Баренцевым, Норвежским и Гренландским морями.

*Ключевые слова:* атмосфера над океаном, аэрозоль, черный углерод, элементный и органический углерод, элементный и изотопный состав; atmosphere over the ocean, aerosol, black carbon, elemental and organic carbon, elemental and isotopic composition.

### Введение

Атмосферный аэрозоль играет важную роль в формировании климата и экологического состояния регионов. В последнее десятилетие повышенное

внимание уделяется арктической зоне, наиболее чувствительной к климатическим изменениям и антропогенным воздействиям.

Первые измерения характеристик аэрозоля (оптической толщины и концентраций частиц) в российском секторе Арктики были выполнены сотрудниками Арктического и Антарктического научно-исследовательского института в 70–80-х гг. XX в. на дрейфующих станциях «Северный полюс» и арктических островах [1–3]. На втором этапе (с 1991 г.) под руководством академика А.П. Лисицына стал более детально исследоваться физико-химический состав аэрозоля на научно-исследовательских судах (НИС) Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН [4–6]. В последние годы морские экспедиции в Северном Ледовитом океане (СЛО) приобрели регулярный характер [7–13].

\* Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru); Иван Александрович Круглинский (iak@iao.ru); Дмитрий Михайлович Кабанов (dkab@iao.ru); Дарья Александровна Калашникова (terrezapr@mail.ru); Марина Даниловна Кравчишина (kravchishina@ocean.ru); Валерий Иванович Макаров (makarov@kinetics.nsc.ru); Светлана Анатольевна Попова (popova@kinetics.nsc.ru); Антон Олегович Почуфаров (poa216@iao.ru); Галина Владимировна Симонова (galina\_simonova@inbox.ru); Юрий Сергеевич Турчинович (tus@iao.ru); Федор Андреевич Дарьин (f.a.darin@inp.nsk.su).

Кроме того, исследования аэрозоля в российском секторе Арктики проводятся с использованием данных наблюдений на полярных станциях (Баренцбург, Тикси, Мыс Баранова) [14–16], в самолетных экспедициях [17, 18] и на основе модельных расчетов [19–22]. Совокупность получаемой информации позволяет восполнять дефицит данных о характеристиках аэрозоля в атмосфере над СЛО.

В настоящей работе представлены результаты измерений характеристик аэрозоля в двух новых экспедициях в СЛО – 83-й и 84-й рейсы НИС «Академик Мстислав Келдыш». Кроме того с учетом данных предшествующих экспедиций проведен сравнительный анализ характеристик атмосферного аэрозоля над четырьмя арктическими морями – Гренландским, Норвежским, Баренцевым, Карским.

## 1. Характеристика экспедиционных измерений

В 2021 г. продолжены исследования атмосферного аэрозоля в морских экспедициях, а именно в 83-м и 84-м рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш». Для измерений оптических и микрофизических характеристик аэрозоля использовался комплект приборов: портативный солнечный фотометр SPM, фотоэлектрический счетчик частиц АЗ-10, аэталометры АЕ-33 (MageeScientific) [23] и МДА-02 [24]. Методики измерений и обработки данных рассматривались в предшествующих работах [11–13]. Поэтому ограничимся кратким описанием анализируемых характеристик и условий экспедиционных измерений.

На основе измерений счетчика АЗ-10 рассчитывались: счетная концентрация частиц радиусом 0,15–5 мкм ( $N_a$ ); объемы частиц мелко- и грубодисперсного аэрозоля радиусом меньше и больше 0,5 мкм ( $V_f$  и  $V_c$ ). С помощью аэталометров измерялась массовая концентрация поглощающего вещества в эквиваленте элементного черного углерода – еBC [25]. В настоящей работе представлены результаты измерений только одного аэталометра – АЕ-33.

По данным наблюдений фотометра SPM определялись: аэрозольная оптическая толщина (АОТ) атмосферы  $\tau^a(\lambda)$ ; параметр Ангстрема  $\alpha$ ; грубо- и мелкодисперсные составляющие АОТ ( $\tau^c$  и  $\tau^f$  на длине волны 0,5 мкм), а также влагосодержание атмосферы ( $W$ ). Фотометрические наблюдения проводились в ситуациях, когда облачность не закрывала солнечный диск. Вследствие этого ряд наблюдений АОТ прерывистый и объем данных небольшой.

Измерительные приборы располагались на высоте около 15 (83-й рейс) и 12 м н.у.м. (84-й рейс). Концентрации аэрозоля и черного углерода измерялись круглосуточно и непрерывно: АЗ-10 – один раз в 11 мин, АЕ-33 – каждую минуту. В данных измерениях  $N_a$  и еBC встречаются кратковременные пропуски и всплески (ложные замеры) из-за воздействия локальных источников техногенной природы (загрязненный воздух из вентиляционных шахт и дым из трубы судна). Поэтому с помощью специального алгоритма [26] осуществлялась фильтра-

ция результатов измерений. Указанный алгоритм включает процедуры выявления дефектных данных (пропусков и всплесков продолжительностью до 3 ч) и их замену на средние значения показаний до и после выявленного дефекта.

Кроме приборных измерений с помощью многоканальной воздуходувки проводился отбор проб аэрозоля на фильтры для последующего определения химического состава. Продолжительность отбора проб аэрозоля в среднем составляла 2 сут. В неблагоприятных условиях (морские брызги, выносы дыма от трубы судна) прокачка воздуха через фильтры прекращалась. Методики лабораторного анализа фильтров приводились в предшествующих работах [11–13], поэтому поясним кратко. Элементный состав аэрозольных проб (концентраций К, Са, Тi, Мn, Fe, Со, Ni, Сu, Zn, Вr, Rb, Sr, Zr, Мо, Рb) определялся методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения ИЯФ СО РАН [27]. Содержание элементного (ЕС) и органического (ОС) углерода определялось методом реакционной газовой хроматографии [28]. Анализ изотопного состава углерода  $\delta^{13}\text{C}$  в составе аэрозоля выполнялся в ТомЦКП (ИМКЭС СО РАН) методом изотопной масс-спектрометрии [29].

Маршрут экспедиций проходил по Белому, Баренцеву, Карскому, Норвежскому и Гренландскому морям (рис. 1). Измерения характеристик аэрозоля в 83-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» выполнялись с 18 июня по 4 июля, в 84-м рейсе – с 24 июля по 23 августа. Общее количество данных за два рейса составило: 20 дней измерений АОТ; 45 дней измерений концентраций  $N_a$  и еBC; 14 проб аэрозоля.

## 2. Обсуждение результатов

### 2.1. Оптические и микрофизические характеристики аэрозоля в 83-м, 84-м рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш»

Исследования атмосферного аэрозоля в 83-м и 84-м рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш» проводились в один сезон (лето) и в одном секторе СЛО: от Гренландского до Карского моря. Поэтому в данном случае рассматривался общий массив данных двух экспедиций. Кроме того, не было необходимости разделять данные измерений по отдельным морям. Как уже отмечалось ранее [11–13], изменения характеристик аэрозоля в отдельных экспедициях (1–2 месяца) обусловлены прежде всего сменой воздушными масс и погодных условий, а не пространственными различиями аэрозоля над отдельными арктическими морями.

На рис. 2 показано изменение АОТ и концентраций  $N_a$ , еBC в двух экспедициях 2021 г. Атмосфера в период 83-го рейса отличалась очень высокой прозрачностью: АОТ в области спектра 0,5 мкм ( $\tau_{0,5}^a$ ) не превышала 0,04. Более высокие значения

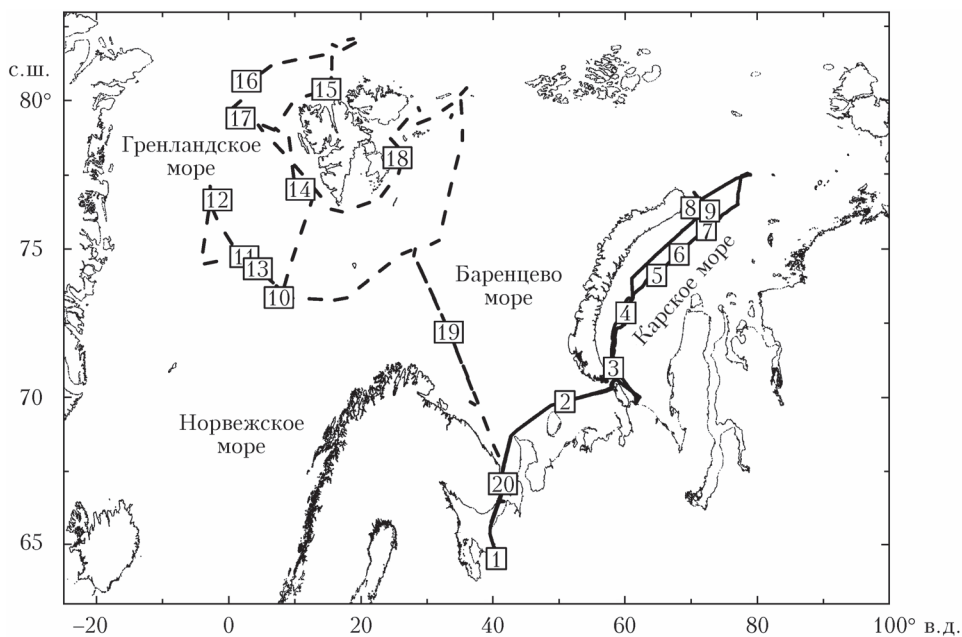


Рис. 1. Маршруты 83-го и 84-го рейсов НИС «Академик Мстислав Келдыш» (числа – порядковые номера дней измерений АОТ)

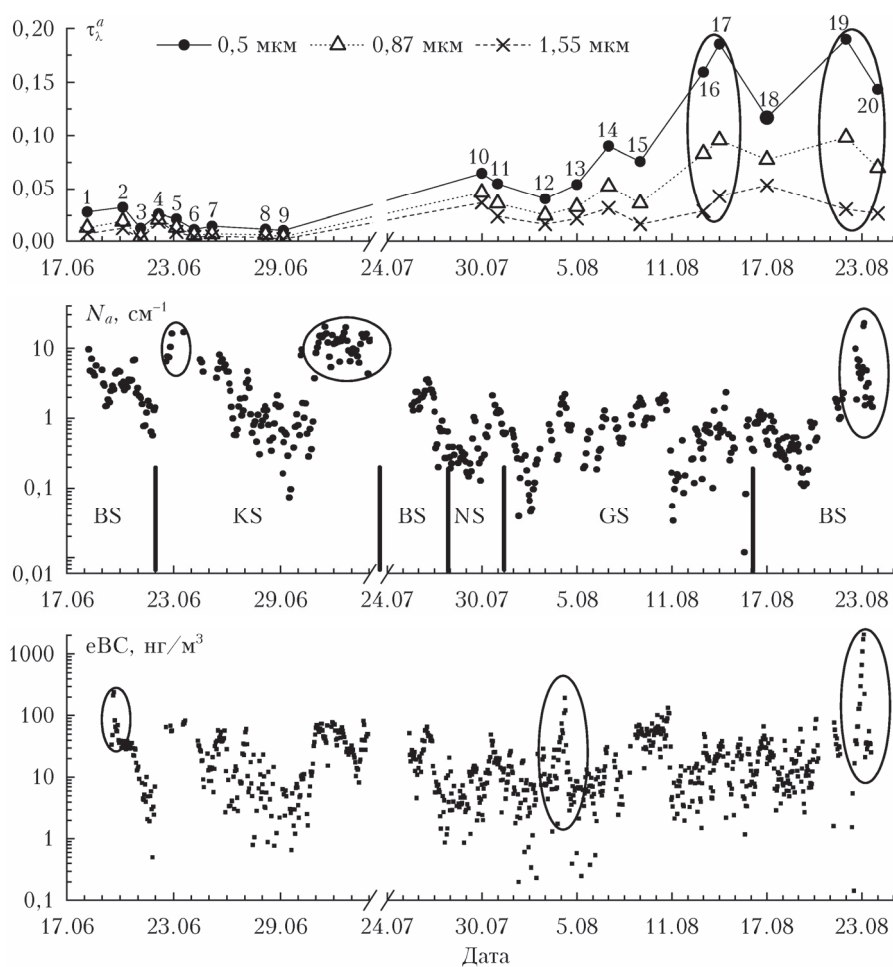


Рис. 2. Вариации средневзвешенных значений АОТ на трех длинах волн и среднечасовых  $N_a$ , eBC в 83-м, 84-м рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш». Вертикальные линии – границы между морями: Баренцево – BS, Карское – KS, Норвежское – NS и Гренландское – GS; числа на верхнем рисунке – порядковые номера дней измерений АОТ

и диапазон изменчивости АОТ наблюдались в 84-м рейсе. В двух случаях величина  $\tau_{0,5}^a$  достигала 0,18: 14 августа на севере Гренландского моря и 22 августа на юге Баренцева моря.

Анализ траекторий движения воздушных масс [30] и спутниковых карт тепловых аномалий (очагов горения) [31] показал (рис. 3, а, цв. вкладка), что высокие значения АОТ 13–14 августа были обусловлены переносом на высоте  $h = 1500$  м продуктов извержения вулканической системы Крисувик в Исландии (63,9° с.ш., 22,3° з.д.; 11–17 августа 2021 г.) [32]. Шлейф выноса вулканического аэрозоля хорошо проявился и в пространственном распределении АОТ, построенном по данным реанализа MERRA-2 [33] (рис. 3, б). На увеличение АОТ в этой ситуации мог также повлиять перенос загрязненного воздуха с территории Великобритании и газовых месторождений в Северном море ( $h = 1000$  м). Заметим, что переносы вулканических и антропогенных загрязнений проходили на высотах более 1000 м и не повлияли на приземные характеристики аэрозоля: воздух в приземный слой поступал с территории СЛО ( $h = 10$  м).

Менее определенно можно объяснить повышенные значения АОТ 22–23 августа, которые сочетались с максимумами концентраций аэрозоля, черного углерода ( $N_a = 22,7 \text{ см}^{-3}$ ,  $eBC = 2073 \text{ нг/м}^3$ ), а также ЕС (разд. 2.3). Воздушные массы на всех высотах приходили с акватории СЛО и севера Канадского Арктического архипелага. Следовательно, нет признаков дальнего переноса каких-то явных загрязнений. Судно в этот период приближалось к континенту в районе п-ова Рыбачий. По-видимому, причиной повышенного содержания аэрозоля были местные (бризовые) переносы континентального воздуха в прибрежную зону Баренцева моря.

Кроме 23 августа высокие значения  $N_a$  наблюдались 23 июня вблизи Новой Земли и 2–4 июля в Печорском море. Кратковременные максимумы  $eBC$  зарегистрированы 20 июня в Двинской губе Белого моря (вблизи Архангельска) и 4 августа вблизи берегов Западного Шпицбергена. Есть основания полагать, что увеличение концентраций в перечисленных случаях обусловлено близостью к континентальным источникам аэрозоля и более интенсивным судоходством.

В табл. 1 и на рис. 4 представлены статистические характеристики аэрозоля и средняя спектральная зависимость АОТ в 83-м, 84-м рейсах, рассчитанные по среднечасовым значениям. Небольшое число данных, полученных в Белом море, в расчетах не использовалось. В целом полученные характеристики соответствуют арктической атмосфере и согласуются с данными наших предшествующих экспедиций в Евразийском секторе СЛО [11–13].

Обратим внимание на разный диапазон относительной изменчивости характеристик аэрозоля. Самые большие коэффициенты вариаций наблюдались у приземных концентраций  $N_a$  и  $eBC$  – 153 и 385%. Коэффициент вариаций АОТ умеренный – 83%.

Таблица 1

Статистические характеристики аэрозоля в 83-м, 84-м рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш»: средние, максимальные (Max) значения и среднеквадратические отклонения (СКО)

Характеристика	Среднее $\pm$ СКО (Max)
$\tau_{0,5}^a$	$0,06 \pm 0,05$ (0,20)
$\alpha$	$1,02 \pm 0,39$ (2,45)
$\tau^f$	$0,041 \pm 0,045$ (0,16)
$\tau^e$	$0,019 \pm 0,015$ (0,06)
$W$ , г/см <sup>2</sup>	$0,48 \pm 0,12$ (0,80)
$N_a$ , см <sup>-3</sup>	$2,55 \pm 3,90$ (22,7)
$V_f$ , мкм <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>	$0,26 \pm 0,36$ (1,93)
$V_c$ , мкм <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>	$1,42 \pm 3,09$ (22,2)
$eBC$ , нг/м <sup>3</sup>	$25,2 \pm 97$ (2073)

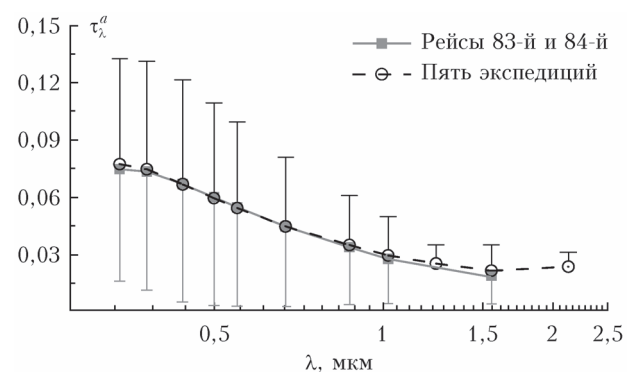


Рис. 4. Средние спектральные зависимости АОТ в 83-м, 84-м рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш» и по данным пяти экспедиций

Наиболее устойчивыми являются влагосодержание атмосферы  $W$  и показатель Ангстрема  $\alpha$  (селективности спектральной зависимости АОТ): коэффициенты вариаций составляют 25 и 38% соответственно.

## 2.2. Оптические и микрофизические характеристики аэрозоля по данным пяти экспедиций

Для определения особенностей пространственного распределения характеристик аэрозоля над СЛО рассмотрен общий массив данных измерений в пяти экспедициях 2018–2021 гг.: 71-й [11], 80-й [12], 83-й, 84-й рейсы НИС «Академик Мстислав Келдыш», а также «Трансарктика-2019» [13]. Выбор только пяти указанных экспедиций, в отличие от [13], обусловлен необходимостью сравнения всего комплекса физических (разд. 2.2) и химических (разд. 2.3) характеристик аэрозоля, полученных в одинаковых условиях (по районам и срокам измерений).

В табл. 2 приведены средние значения оптических и микрофизических характеристик аэрозоля, рассчитанные для четырех арктических морей. Заметим, что данных (дней измерений) характеристик аэрозоля над отдельными морями не всегда достаточно для репрезентативных статистических оценок.



Средние ( $\pm$  СКО) значения характеристик аэрозоля над разными морями по данным пяти экспедиций (в скобках указано количество дней измерений)

Характеристика	Карское море	Баренцево море	Норвежское море	Гренландское море	Общее (четыре моря)
$\tau_{0,5}^a$	0,018 $\pm$ 0,007 (7)	0,094 $\pm$ 0,040 (12)	0,054 $\pm$ 0,013 (9)	0,077 $\pm$ 0,050 (3)	0,059 $\pm$ 0,05 (31)
$\tau^f$	0,009 $\pm$ 0,003	0,062 $\pm$ 0,03	0,019 $\pm$ 0,015	0,053 $\pm$ 0,047	0,038 $\pm$ 0,04
$\tau^c$	0,009 $\pm$ 0,007	0,030 $\pm$ 0,010	0,034 $\pm$ 0,003	0,023 $\pm$ 0,009	0,020 $\pm$ 0,013
$\alpha$	1,03 $\pm$ 0,46	0,93 $\pm$ 0,2	0,41 $\pm$ 0,33	0,88 $\pm$ 0,28	0,94 $\pm$ 0,38
eBC, нг/м <sup>3</sup>	26 $\pm$ 27 (22)	47 $\pm$ 93 (43)	37 $\pm$ 55 (33)	18 $\pm$ 19,7 (17)	42 $\pm$ 101 (115)
$V_f$ , мкм <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>	0,45 $\pm$ 0,46 (15)	0,55 $\pm$ 0,55 (40)	0,48 $\pm$ 0,3 (30)	0,21 $\pm$ 0,25 (15)	0,35 $\pm$ 0,34 (100)
$V_c$ , мкм <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>	3,82 $\pm$ 3,98 (11)	1,62 $\pm$ 2,26 (37)	1,56 $\pm$ 1,7 (30)	1,07 $\pm$ 2,24 (15)	1,75 $\pm$ 2,92 (93)

В первую очередь это касается АОТ атмосферы: от 3 до 12 дней измерений в разных районах. Из-за малого количества измерений различие средних значений АОТ над отдельными морями достигает пяти раз. Более достоверны оценки характеристик АОТ для общего массива данных в Гренландско-Карском секторе СЛО (5° з.д. – 100° в.д.), которые приведены в последнем столбце табл. 2. Средние характеристики АОТ в этом секторе СЛО, полученные в пяти экспедициях и в 83-м, 84-м рейсах (см. табл. 1 и рис. 4), практически не различаются.

Сопоставление приземных характеристик аэрозоля над отдельными морями показало, что самые низкие концентрации eBC,  $V_f$  и  $V_c$  в атмосфере Гренландского моря, а максимальные концентрации (кроме  $V_c$ ) – над Баренцевым морем. Немного ниже концентрации eBC и  $V_f$  над Норвежским морем. Такой результат можно объяснить удаленностью Гренландского моря и близостью Баренцева и Норвежского морей к источникам континентального аэрозоля (Скандинавский и Кольский п-ова). Высокие концентрации  $V_c$  над Карским морем трудно объяснить естественными причинами: возможно, сказалось малое число измерений.

Из сравнения данных во всем Гренландско-Карском секторе СЛО следует, что средние объемы частиц ( $V_f$ ,  $V_c$ ) и концентрации черного углерода в 83-м, 84-м рейсах (табл. 1) в 1,2–1,7 раза меньше, чем в пяти экспедициях (табл. 2).

### 2.3. Химический состав аэрозольных проб в Гренландско-Карском секторе СЛО

Для определения химического состава аэрозоля необходима продолжительная (2–3 сут) прокачка через фильтры большого объема воздуха. Проб, полученных в 83-м, 84-м рейсах, как и в предшествующих трех экспедициях, пока недостаточно для сравнительного анализа состава аэрозоля над отдельными морями. Поэтому средние характеристики аэрозольных проб (табл. 3) рассчитывались в целом для Гренландско-Карского сектора СЛО: а) по данным измерений в 83-м, 84-м рейсах; б) в пяти экспедициях 2018–2021 гг.

На рис. 5 показано изменение характеристик аэрозольных проб (ОС, ЕС,  $\delta^{13}\text{C}$ ) на маршруте

83-го, 84-го рейсов НИС «Академик Мстислав Келдыш». Из рис. 5, а видно, что изотопный состав углерода ( $\delta^{13}\text{C}$ ) в пробах аэрозоля менялся от –29,0 до –27,4‰. В большинстве проб (в 8 из 14) зарегистрирован легкий изотопный состав (от –29,0 до –28,1‰), который соответствует сжиганию нефте- и газопродуктов [34, 35]. В шести пробах получены промежуточные значения  $\delta^{13}\text{C}$  между легким и тяжелым изотопным составом: от –27,9 до –27,4‰. Такие значения  $\delta^{13}\text{C}$  можно объяснить смешанным вкладом двух источников углерода: сжигание нефтепродуктов (легкий изотопный состав) и сжигание угля или древесины, при горении которых образуется углерод с более тяжелым изотопным составом. Средние значения изотопного состава в 83-м, 84-м рейсах (–28,2‰) практически не отличаются от общего среднего значения  $\delta^{13}\text{C}$  в пяти экспедициях в Гренландско-Карском секторе СЛО (–28,0‰).

Таблица 3

Средние ( $\pm$  СКО) значения  $\delta^{13}\text{C}$ , ОС и ЕС в пробах аэрозоля, отобранных в Гренландско-Карском секторе СЛО ( $n$  – количество проб аэрозоля)

Характеристика проб аэрозоля	83-м, 84-й рейсы ( $n = 14$ )	Пять экспедиций ( $n = 39$ )
$\delta^{13}\text{C}$ , ‰	–28,20 $\pm$ 0,55	–28,00 $\pm$ 0,66
ОС, нг/м <sup>3</sup>	496 $\pm$ 450	939 $\pm$ 1019
ЕС, нг/м <sup>3</sup>	27,9 $\pm$ 24,8	54,4 $\pm$ 60,4

Концентрации ЕС и ОС в период 83-го рейса (до 5 июля) не превышали 61 и 380 нг/м<sup>3</sup> соответственно (рис. 5, б). В более широком диапазоне менялись концентрации углерода в 84-м рейсе. Самая высокая концентрация органического углерода (ОС = 1685 нг/м<sup>3</sup>) зарегистрирована в пробе 6–9 августа вблизи берегов Шпицбергена. Максимум концентраций ЕС (76,2 нг/м<sup>3</sup>), как и других характеристик аэрозоля (см. разд. 2.2), наблюдался 21–23 августа на юге Баренцева моря при сближении с п-овом Рыбачий. Несмотря на указанные максимумы, средние значения ЕС и ОС в этих двух рейсах оказались в 1,9 раза меньше, чем в среднем в пяти экспедициях (табл. 3).

Изменения концентраций ЕС и eBC, измеренных в одинаковые периоды (рис. 5, б), в основном

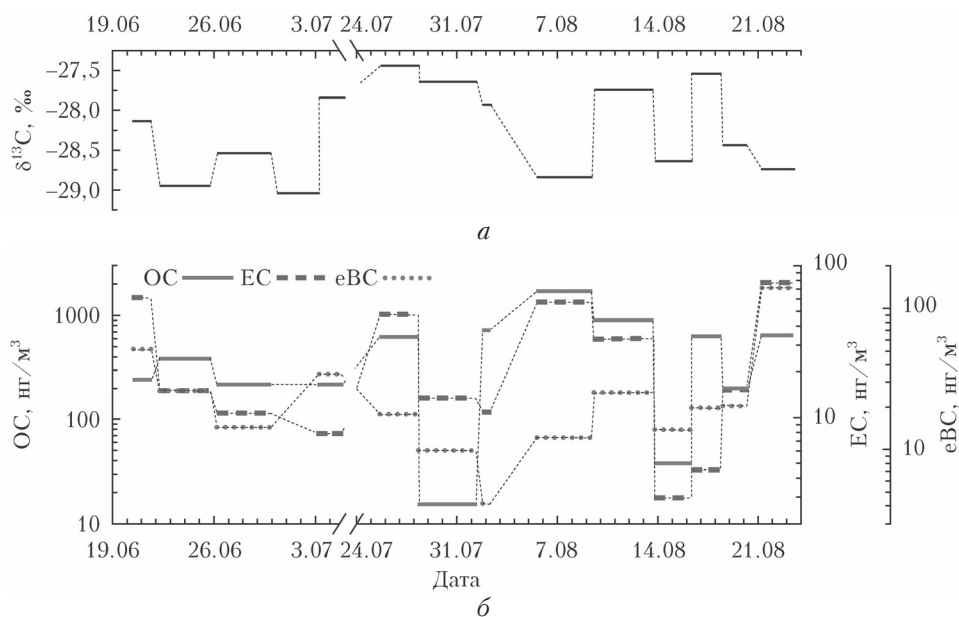


Рис. 5. Вариации изотопного состава  $\delta^{13}C$  (а) и концентраций ОС, ЕС (б) в 83-м, 84-м рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш» (горизонтальные отрезки соответствуют периодам отбора проб)

согласованные: среднее различие этих характеристик составляет  $19 \text{ ng}/\text{m}^3$ , а коэффициент взаимной корреляции — 0,6. В то же время совместный анализ данных приборных измерений и отбора проб в 83-м, 84-м рейсах и в предшествующих экспедициях [11–13] показал, что в поведении отдельных характеристик аэрозоля иногда проявляется противоположная динамика, которую невозможно объяснить только различием самих характеристик (микрофизический, химический состав). Причина этого — методические особенности измерений разных характеристик: используемый метод, режим измерений, расположение воздухозаборных устройств и т.д. В данных приборных измерений есть возможность выявить и исключить случаи кратковременных техногенных воздействий судна. При отборе проб можно лишь остановить прокачку воздуха через фильтры в случаях наиболее сильных (визуально наблюдаемых) техногенных воздействий и только в дневное время. То есть в отбираемые пробы аэрозоля могут вносить вклад локальные источники на судне, и это иногда приводит к сомнительным результатам. Чтобы минимизировать влияние этого фактора, сейчас изготавливается новое воздухозаборное устройство [36] с датчиком концентраций аэрозоля, который будет автоматически отключать прокачку воздуха через фильтры в случаях техногенных воздействий.

В табл. 4 приведен средний элементный состав аэрозоля в 83-м, 84-м рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш» в порядке убывания концентраций. Сравнение с данными других экспедиций в Гренландско-Карском секторе СЛО показало многократное превышение концентраций элементов в 80-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш». До выяснения причин больших различий мы исключили данные 80-го рейса из статистических расчетов.

Таблица 4

Средние ( $\pm$  СКО) концентрации элементов ( $ng/m^3$ ) в составе аэрозоля в Гренландско-Карском секторе СЛО ( $n$  — количество проб аэрозоля) и в пос. Ключи

Элемент	83-м, 84-й рейсы ( $n = 14$ )	Четыре экспедиции без 80-го рейса ( $n = 31$ )	пос. Ключи ( $n = 30$ )
Ca	$287 \pm 285$	$261 \pm 266$	$6989 \pm 5059$
K	$156 \pm 146$	$180 \pm 176$	$2420 \pm 1138$
Fe	$48,5 \pm 45,9$	$76,1 \pm 74,2$	$2182 \pm 1380$
Zn	$14,1 \pm 25,7$	$18,5 \pm 22,5$	$28,3 \pm 9,6$
Br	$11,4 \pm 13,3$	$12,6 \pm 12,4$	$2,2 \pm 0,82$
Cu	$5,28 \pm 5,79$	$5,91 \pm 10,7$	$5,9 \pm 2,9$
Ti	$5,04 \pm 5,02$	$14,1 \pm 15,2$	$614 \pm 368$
Ni	$3,66 \pm 9,47$	$2,63 \pm 7,41$	$1,5 \pm 1,3$
Mn	$2,42 \pm 2,55$	$3,46 \pm 3,86$	$87,6 \pm 52,1$
Cr	$2,23 \pm 2,29$	$2,39 \pm 1,97$	$14,6 \pm 10,1$
Sr	$1,52 \pm 2,34$	$2,17 \pm 2,01$	$15,6 \pm 10,2$
Pb	$1,16 \pm 1,19$	$1,26 \pm 0,93$	$5,4 \pm 2,9$
V	$1,13 \pm 0,76$	$1,51 \pm 0,86$	$23,3 \pm 15,1$
Co	$0,49 \pm 0,34$	$0,79 \pm 0,68$	$10,5 \pm 6,4$
Rb	$0,16 \pm 0,12$	$0,16 \pm 0,11$	$4,5 \pm 3,0$
Zr	$0,15 \pm 0,12$	$0,25 \pm 0,29$	$6,3 \pm 3,4$
Se	$0,13 \pm 0,07$	$0,19 \pm 0,12$	$0,15 \pm 0,07$
Mo	$0,06 \pm 0,04$	$0,09 \pm 0,06$	$0,12 \pm 0,08$

Из табл. 4 видно (столбцы 2 и 3), что средние концентрации большинства элементов в 83-м, 84-м рейсах на несколько десятков процентов меньше, чем в четырех экспедициях. Исключением являются очень низкие (в 2,8 раза ниже) концентрации Ti и более высокие концентрации Ca и Ni. Последовательность распределения концентраций по величине в двух последних рейсах и четырех экспедициях практически одинакова, кроме некоторого различия в расположении средней группы элементов (от Ti до V).

Представляло интерес оценить отличия элементного состава аэрозоля в морской арктической

атмосфере от континентальной атмосферы средних широт. Для сравнения использовались данные, полученные в сельском районе Сибири – в пос. Ключи Новосибирской обл. (см. столбец 4). Пробы аэрозоля отбирались летом 2013 г. [37], а концентрации элементов определялись тем же методом рентгенофлуоресцентного анализа [27]. Сопоставление двух типов данных показало, что средние концентрации большинства элементов над арктическими морями меньше, чем в континентальной атмосфере. Самое большое снижение концентраций (в 20–40 раз) характерно для Ti, Ca, Fe, Mn, Rb и Zr. Средние значения массовых средних концентраций Zn, Cu, Ni, Se и Mo в арктических и средних широтах сопоставимы. Аналогичная особенность отмечалась в [38] при сравнении элементного состава аэрозольных проб в арктической и южной частях Сибири. Еще одна отличительная особенность состава аэрозоля в арктической атмосфере состоит в более высоком содержании брома. Наиболее вероятный источник Br – эмиссии из морского льда и снега [13, 39]. Из-за перечисленных особенностей последовательность распределения концентраций элементов (от больших к меньшим) в арктической и континентальной атмосфере отличается, за исключением трех первых элементов – Ca, K, Fe.

## Заключение

Представлены результаты измерений комплекса физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля на маршруте 83-го и 84-го рейсов НИС «Академик Мстислав Келдыш» в Гренландско-Карском секторе СЛО. Средние значения характеристик аэрозоля за две экспедиции составили:  $\tau_{0,5}^a = 0,06$  при  $\alpha = 1,02$ ;  $N_a = 2,55 \text{ см}^{-3}$ ;  $V_f = 0,26 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$ ;  $V_c = 1,42 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$ ;  $eBC = 25,2 \text{ нг}/\text{м}^3$ ;  $EC = 27,9 \text{ нг}/\text{м}^3$ ;  $OC = 496 \text{ нг}/\text{м}^3$ ;  $\delta^{13}\text{C} = -28,20\%$ . Средние значения большинства характеристик аэрозоля ( $N_a$ ,  $V_f$ ,  $V_c$ ,  $eBC$ ,  $EC$ ,  $OC$ ), полученных в 83-м, 84-м рейсах, в 1,2–1,9 раза меньше, чем в пяти экспедициях 2018–2021 гг. Средние значения АОТ и  $\delta^{13}\text{C}$  в 83-м, 84-м рейсах совпадают со средними в пяти экспедициях.

Концентрации элементов в пробах аэрозоля, отобранных в 83-м, 84-м рейсах, в основном на несколько десятков процентов меньше, чем в четырех экспедициях в этом же секторе СЛО. Средние концентрации большинства элементов в составе аэрозоля над арктическими морями меньше, чем в средних широтах. Самое большое различие концентраций (в 20–40 раз) характерно для Ti, Ca, Fe, Mn, Rb и Zr. Особенность элементного состава аэрозоля в арктической атмосфере – высокое содержание Br (около  $12 \text{ нг}/\text{м}^3$ ).

Совместный анализ данных отбора проб и приборных измерений показал, что в поведении отдельных характеристик аэрозоля иногда наблюдается противоположная динамика, которая обусловлена не только различием самих характеристик (микрофизический, химический состав), но и методическими особенностями их измерений. Отмечена необхо-

димость совершенствования технологии отбора проб для исключения или минимизации техногенного воздействия судна.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность П.Н. Зенковой, В.Ю. Кустову, Д.Д. Ризе, В.В. Польшину, А.П. Ростову и В.П. Шмаргунову за подготовку аппаратуры, проведение измерений и первичную обработку данных в экспедициях 2018–2019 гг. В части анализа элементного состава аэрозоля выражаем благодарность за использование оборудования ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000» в ИЯФ СО РАН, поддержанное проектом RFMEFI62119X0022. В измерениях АОТ атмосферы использовался солнечный фотометр SPM, входящий в состав ЦКП «Атмосфера» при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-661).

**Финансирование.** Анализ результатов экспедиционных исследований аэрозоля в 2021 г. и статистическое обобщение данных проводилось при финансовой поддержке РНФ (проект № 21-77-20025). Первичная обработка и химический анализ проб, отобранных до 2021 г., выполнялась в рамках государственных заданий ИОА и ИХКГ СО РАН (проекты № 121031500342-0 и 0304-2017-0012).

## Список литературы

1. Маршунова М.С., Мишин А.А. Мониторинг прозрачности атмосферы в полярных областях // Мониторинг климата Арктики. Л.: Гидрометеониздат, 1988. С. 132–140.
2. Бартенева О.Д., Никитинская Н.И., Сакунов Г.Г., Веселова Л.К. Прозрачность толщи атмосферы в видимой и ближней ИК-области спектра. Л.: Гидрометеониздат, 1991. 224 с.
3. 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. Т. 30, № 6. С. 797–801.
4. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А., Смирнов В.В., Серова В.В., Штайн Р. Аэрозоли Арктики – результаты десятилетних исследований // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13, № 6–7. С. 551–576.
5. Аэрозоли Сибири / под ред. К.П. Куценого. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. 548 с.
6. Лисицын А.П. Современные представления об осадкообразовании в океанах и морях. Океан как природный самописец взаимодействия геосфер Земли // Мировой океан. Т. 2. Физика, химия и биология океана. Осадкообразование в океане и взаимодействие геосфер Земли. М.: Научный мир, 2014. С. 331–571.
7. Xing J., Bian L., Hu Q., Yu J., Sun C., Xie Z. Atmospheric black carbon along a cruise path through the Arctic Ocean during the Fifth Chinese Arctic Research Expedition // Atmosphere. 2014. N 5. P. 292–306.
8. Ferrero L., Sangiorgi G., Perrone M.G., Rizzi C., Cattaldi M., Markuszewski P., Pakuszys P., Makuch P., Petelski T., Becagli S., Traversi R., Bolzacchini E., Zielinski T. Chemical composition of aerosol over the Arctic Ocean from summer ARctic Expedition (AREX) 2011–2012 cruises: Ions, amines, elemental carbon, organic matter, polycyclic aromatic hydrocarbons, n-Alkanes, metals, and rare Earth elements // Atmosphere. 2019. V. 10, N 54. DOI: 10.3390/atmos10020054.



9. Park J., Dall'Osto M., Park K., Gim Y., Kang H.J., Jang E., Park K.-T., Park M., Yum S.S., Jung J., Lee B.Y., Yoon Y.J. Shipborne observations reveal contrasting Arctic marine, Arctic terrestrial and Pacific marine aerosol properties // *Atmos. Chem. Phys.* 2020. V. 20, N 5. P. 5573–5590. DOI: 10.5194/acp-20-5573-2020.
10. Шевченко В.П., Копейкин В.М., Новигатский А.Н., Малафеев Г.В. Черный углерод в приземном слое атмосферы над Северной Атлантикой и морями Российской Арктики в июле-сентябре 2017 г. // *Океанология.* 2019. Т. 59, № 5. С. 771–776. DOI: 10.31857/S0030-1574595771-776.
11. Сакерин С.М., Зенкова П.Н., Кабанов Д.М., Калашникова Д.А., Лисицын А.П., Макаров В.И., Полькин В.В., Попова С.А., Симонова Г.А., Чанкина О.В., Шевченко В.П. Результаты исследований физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля в 71-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» // *Оптика атмосфер. и океана.* 2020. Т. 33, № 5. С. 358–367; Sakerin S.M., Zenkova P.N., Kabanov D.M., Kalashnikova D.A., Lisitsin A.P., Makarov V.I., Polkin V.V., Popova S.A., Simonova G.V., Chankina O.V., Shevchenko V.P. Results of studying physicochemical characteristics of atmospheric aerosol in the 71st cruise of RV Akademik Mstislav Keldysh // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 5. P. 470–479.
12. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Калашникова Д.А., Круглинский И.А., Макаров В.И., Новигатский А.Н., Полькин В.В., Попова С.А., Почуфаров А.О., Симонова Г.В., Турчинович Ю.С., Шевченко В.П. Результаты измерений характеристик аэрозоля в 80-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» на маршруте от Балтийского моря до Баренцева моря // *Оптика атмосфер. и океана.* 2021. Т. 34, № 7. С. 515–523; Sakerin S.M., Kabanov D.M., Kalashnikova D.A., Kruglinsky I.A., Makarov V.I., Novigatinsky A.N., Polkin V.V., Popova S.A., Pochufarov A.O., Simonova G.V., Turchinovich Yu.S., Shevchenko V.P. Measurements of aerosol physicochemical characteristics in the 80th cruise of RV Akademik Mstislav Keldysh on the route from the Baltic to Barents Sea // *Atmos. Ocean. Opt.* 2021. V. 34, N 5. P. 455–463.
13. Sakerin S.M., Kabanov D.M., Makarov V.I., Polkin V.V., Popova S.A., Chankina O.V., Pochufarov A.O., Radionov V.F., Rize D.D. Spatial distribution of atmospheric aerosol physicochemical characteristics in Russian sector of the Arctic Ocean // *Atmosphere.* 2020. V. 11, N 11. P. 1170. DOI: 10.3390/atmos11111170.
14. Tomasi C., Kokhanovsky A.A., Lupi A., Ritter C., Smirnov A., Mazzola M., Stone R.S., Lanconelli C., Vitale V., Holben B.N., Nyeki S., Wehrli C., Altonen V., de Leeuw G., Rodriguez E., Herber A.B., Stebel K., Stohl A., O'Neill N.T., 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., Butler J., Kivi R., Courcoux Y., Laroche P., Broccardo S., Piketh S.J. Aerosol remote sensing in polar regions // *Earth-Sci. Rev.* 2015. V. 140. P. 108–157. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.001>.
15. Asmi E., Kondratyev V., Brus D., Laurila T., Lihavainen H., Backman J., Vakkari V., Aurela M., Hatakka J., Viisanen Y., Uttal T., Ivaikhov 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.
16. Виноградова А.А., Тумкова Т.Б., Иванова Ю.А. Эпизоды аномально высокой концентрации черного углерода в приземном воздухе в районе станции Тикси, Якутия // *Оптика атмосфер. и океана.* 2018. Т. 31, № 10. С. 837–844; Vinogradova A.A., Titkova T.B., Ivanova Yu.A. Episodes with anomalously high black carbon concentration in surface air in the region of Tiksi Station, Yakutiya // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 1. P. 94–102.
17. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Излев Г.А., Козлов А.В., Nédélec Ph., Paris J.-D., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Вертикальное распределение газовых и аэрозольных примесей воздуха над российским сектором Арктики // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 12. С. 1043–1052; Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Davydov D.K., Izlev G.A., Kozlov A.V., Nédélec Ph., Paris J.-D., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadnaya T.K., Tolmachev G.N., Fofonov A.V. Vertical distributions of gaseous and aerosol admixtures in air over the Russian Arctic // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 3. P. 300–310.
18. Зенкова П.Н., Чернов Д.Г., Шмаргунов В.П., Панченко М.В., Белан Б.Д. Субмикронный аэрозоль и поглощающее вещество в тропосфере российского сектора Арктики по данным измерений самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик» в 2020 г. // *Оптика атмосфер. и океана.* 2021. Т. 34, № 11. С. 882–890; Zenkova P.N., Chernov D.G., Shmargunov V.P., Panchenko M.V., Belan B.D. Submicron aerosol and absorbing substance in the troposphere of the Russian sector of the Arctic according to measurements onboard the Tu-134 Optik aircraft laboratory in 2020 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35, N 1. P. 43–51.
19. Cheng M.-D. Geolocating Russian sources for Arctic black carbon // *Atmos. Environ.* 2014. V. 92, N 4. P. 398–410. DOI: [org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.031](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.031).
20. Huang K., Fu J.S., Prikhodko V.Y., Storey J.M., Romanov A., Hodson E.L., Cresko J., Morozova I., Ignatieva Y., Cabanis J. Russian anthropogenic black carbon: Emission reconstruction and Arctic black carbon simulation // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2015. V. 120, P. 11. P. 306–333. DOI: 10.1002/2015JD023358.
21. Виноградова А.А., Васильева А.В. Черный углерод в воздухе северных районов России: источники, пространственные и временные вариации // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 6. С. 467–475; Vinogradova A.A., Vasileva A.V. Black carbon in air over northern regions of Russia: Sources and spatiotemporal variations // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 6. P. 533–541.
22. Журавлева Т.Б., Артюшина А.В., Виноградова А.А., Воронина Ю.В. Черный углерод в приземной атмосфере вдали от источников эмиссий: сравнение результатов измерений и реанализа MERRA-2 // *Оптика атмосфер. и океана.* 2020. Т. 33, № 4. С. 250–260; Zhuravleva T.B., Artyushina A.V., Vinogradova A.A., Voronina Yu.V. Black carbon in the near-surface atmosphere far away from emission sources: Comparison of measurements and MERRA-2 reanalysis data // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 6. P. 591–601. DOI: 10.1134/S102485602006025.
23. Magee Scientific. Magee Scientific Aerosol d.o.o, Aethalometer Model AE33 User's Manual. URL: [https://www.benchmarkmonitoring.com.au/sites/default/files/documents/AE33\\_UsersManual\\_Rev154.pdf](https://www.benchmarkmonitoring.com.au/sites/default/files/documents/AE33_UsersManual_Rev154.pdf) (last access: 14.01.2021).
24. Kozlov V.S., Shmargunov V.P., Panchenko M.V. Modified aethalometer for monitoring of black carbon concentration in atmospheric aerosol and technique for cor-



- rection of the spot loading effect // Proc. SPIE. 2016. P. 1003530. DOI: 10.1117/12.2248009.
25. *Petzold A., Ogren J.A., Fiebig M., Laj P., Li S.-M., Baltensperger U., Holzer-Popp T., Kinne S., Pappalardo G., Sugimoto N., Wehrli C., Wiedensohler A., Zhang X.-Y.* Recommendations for reporting “black carbon” measurements // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13. P. 8365–8379. DOI: 10.5194/acp-13-8365-2013.
  26. *Turchinovich Yu.S., Pochufarov A.O., Sakerin S.M.* Algorithm of controlling the quality and retrieval of data from measurements of aerosol and black carbon concentrations in marine expeditions // Proc. SPIE. 2021. V. 11916. DOI: 10.1117/12.2600591.
  27. *Piminov P.A., Baranov G.N., Bogomyagkov A.V., Berkaev D.E., Borin V.M., Dorokhov V.L., Karnaeov S.E., Kiselev V.A., Levichev E.B., Meshkov O.I., Mishnev S.I., Nikitin S.A., Nikolaev I.B., Sinyatkin S.V., Vobly P.D., Zolotarev K.V., Zhuravlev A.N.* Synchrotron radiation research and application at VEPP-4 // Phys. Procedia. 2016. V. 84. P. 19–26. DOI: 10.1016/j.phpro.2016.11.005.
  28. *Makarov V.I., Koutsenogii K.P., Koutsenogii P.K.* Daily and seasonal changes of organic and inorganic carbon content in atmospheric aerosol Novosibirsk region // J. Aerol. Sci. 1999. V. 30. P. S255–S256.
  29. *Лебедев А.Т.* Масс-спектрометрия для анализа объектов окружающей среды. М.: Техносфера, 2013. 632 с.
  30. *Air Resources Laboratory – HYSPLIT*, Modified April 1, 2020. URL: <https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php> (last access: 3.03.2022).
  31. *Fire Information for Resource Management System*. URL: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov> (last access: 4.04.2021).
  32. *Smithsonian Institution – Global Volcanism Program: Worldwide Holocene Volcano and Eruption Information*. URL: <https://volcano.si.edu/> (last access: 2.02.2022).
  33. *Giovanni: The Bridge between Data and Science v 4.35*. URL: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni> (last access: 2.02.2022).
  34. *Widory D.* Combustibles, fuels and their combustion products: A view through carbon isotopes // Combust. Theory Model. 2006. V. 10, N 5. P. 831–841. DOI: 10.1080/13647830600720264.
  35. *Widory D., Roy S., Moullec Y.L., Goupil G., Cocherie A., Guerrot C.* The origin of atmospheric particles in Paris: A view through carbon and lead isotopes // Atmos. Environ. 2004. V. 38, iss. 7. P. 953–961. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2003.11.001.
  36. *Почуфаров А.О., Сакерин С.М.* Концепция создания автоматизированного комплекса сбора аэрозольной и метеорологической информации // Тез. докл. XIV Сибирского совещания и школы молодых ученых по климато-экологическому мониторингу, Томск, 19–22 октября 2021 г. Томск: ИМКЭС СО РАН, 2021. С. 252–254.
  37. *Попова С.А., Макаров В.И., Бизин М.А., Чанкина О.В., Смоляков Б.С., Шинкоренко М.П.* Источники и временные вариации химического состава атмосферного аэрозоля в Новосибирской области // Сб. материалов XI Междунар. науч. конгресса Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. Новосибирск: СГУГиТ, 2015. Т. 2. С. 130–134.
  38. *Куценогий К.П., Куценогий П.К.* Аэрозоли Сибири. Итоги семилетних исследований // Сиб. экол. журн. 2000. № 1. С. 11–20.
  39. *Pratt K.A., Custard K.D., Shepson P.B., Douglas T.A., Pöhler D., General S., Zielcke J., Simpson W.R., Platt U., Tanner D.J., Huey L.G., Carlsen M., Stirm B.H.* Photochemical production of molecular bromine in Arctic surface snowpacks // Nature Geosci. Lett. 2013. V. 6. P. 351–356. DOI: 10.1038/NCEO1779.

*S.M. Sakerin, I.A. Kruglinsky, D.M. Kabanov, D.A. Kalashnikova, M.D. Kravchishina, V.I. Makarov, S.A. Popova, A.O. Pochufarov, G.V. Simonova, Yu.S. Turchinovich, F.A. Darin. Spatiotemporal variations in atmospheric aerosol characteristics over the Kara, Barents, Norwegian, and Greenland Seas (2018–2021 expeditions).*

We discuss the results from measurements of aerosol physicochemical characteristics in summer 2021 in the Greenland-Kara sector of the Arctic Ocean (83rd and 84th cruises of RV “Akademik Mstislav Keldysh”). The studied characteristics included: the aerosol optical depth of the atmosphere, the aerosol and black carbon concentrations, as well as the chemical composition of aerosol samples, i.e., the concentrations of main elements, the concentrations of organic and elemental carbon, and the isotopic composition of carbon. For the most aerosol characteristics, we noted lower average values as compared to the three preceding expeditions. Data from five expeditions are used to estimate the differences in the aerosol and black carbon concentrations among the Kara, Barents, Norwegian, and Greenland Seas.

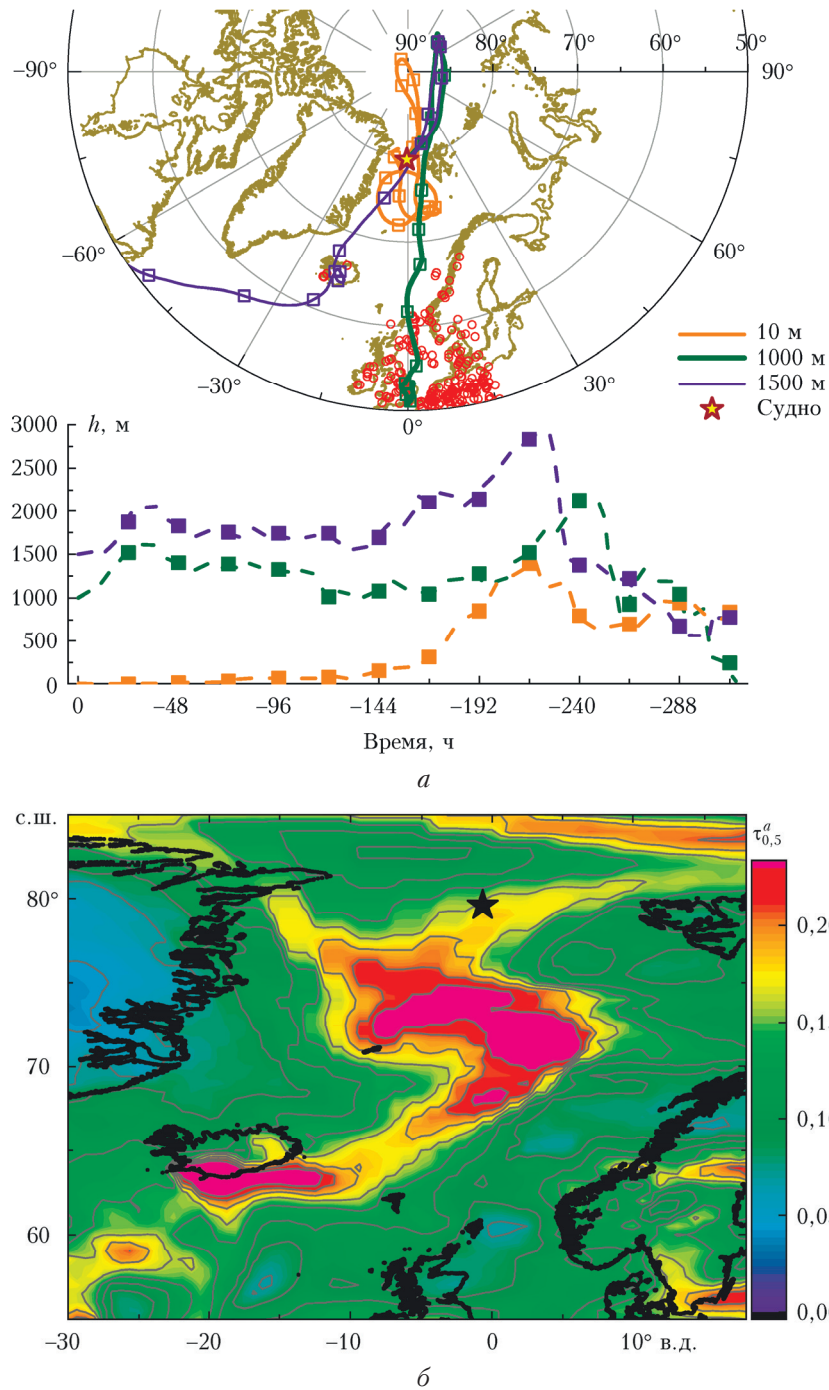


Рис. 3. Обратные траектории движения воздушных масс в район измерений (звездочка) и очаги горения (красные кружки) (а); карта пространственного распределения АОТ над СЛО по данным реанализа MERRA-2 [33] для 14 августа 2021 г. (б)