

УДК 551.510.4

Особенности пространственного распределения атмосферного аэрозоля в Евразийском секторе Северного Ледовитого океана

С.М. Сакерин, Д.М. Кабанов[✉], И.А. Круглинский,
В.В. Полькин, А.О. Почуфаров*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 15.05.2024;
после доработки 18.06.2024;
принята к печати 19.06.2024

Интерес к исследованиям аэрозоля в Арктике обусловлен большой динамикой климатических процессов и активным экономическим освоением этого региона. Имеющихся в настоящее время полярных станций недостаточно для определения пространственного распределения аэрозоля над территорией Северного Ледовитого океана (СЛО). В настоящей работе на основе результатов многолетних исследований в Евразийском секторе СЛО (19 судовых экспедиций в 2007–2023 гг.) выполнено статистическое обобщение объемных концентраций мелко- и грубодисперсного аэрозоля (V_f , V_c) в приводном слое и аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы. Среднее значение АОТ (0,5 мкм) составило 0,061 при показателе Ангстрема 0,9; концентраций мелко- и грубодисперсного аэрозоля – 0,35 и 2,5 мкм³/см³ соответственно. Самое большое содержание мелкодисперсного аэрозоля в атмосфере над Норвежским и Баренцевым морями. Пространственное распределение характеризуется спадом концентраций в северном и восточном направлениях: от Баренцева моря до Чукотского средние значения V_f уменьшаются в 1,7 раза (от 0,43 до 0,26 мкм³/см³). В пространственном распределении грубодисперсного аэрозоля отмечены очень высокие концентрации в юго-западной части Карского моря: среднее значение V_c составляет 4,18 мкм³/см³. Содержание грубодисперсного аэрозоля в Карском море уменьшается в восточном и западном направлениях в несколько раз. Представленные результаты могут быть использованы при планировании экономического развития Арктического региона и для совершенствования климатических моделей.

Ключевые слова: Арктика, морские экспедиции, концентрации аэрозоля, аэрозольная оптическая толщина, пространственное распределение; Arctic, sea expedition, aerosol concentration, aerosol optical depth, spatial distribution.

Введение

Аэрозоль играет важную роль в процессах распространения оптического излучения в атмосфере и переносе различных веществ между отдельными регионами. Большое внимание в последнее время уделяется исследованиям аэрозоля в Арктике, где ослаблено влияние местных источников и значительный вклад вносят дальние переносы природного и антропогенного аэрозоля из континентальных районов [1, 2]. Наблюдения на полярных станциях, расположенных на островах и побережье Северного Ледовитого океана (СЛО), позволили определить сезонную и межгодовую динамику характеристик аэрозоля в отдельных районах Арктики (см. например, [1–6]).

Однако количество станций недостаточно для выявления особенностей пространственного распределения аэрозоля на большой территории СЛО.

География исследований аэрозоля постоянно расширяется за счет морских [7–10] и самолетных [11–13] экспедиций в различных районах СЛО. Результаты комплексных экспедиций дают более полную (в сравнении с полярными станциями) информацию о составе аэрозоля и его пространственно-временной изменчивости. Данные, полученные в короткие периоды (один-три месяца) измерений в отдельных экспедициях, нельзя считать репрезентативными для климатологии аэрозоля, необходимы продолжительные единообразные измерения в каждом из исследуемых районов.

Дефицит прямых измерений характеристик аэрозоля восполняется данными восстановления аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы по глобальным спутниковым наблюдениям с использованием спектрорадиометров AVHRR, MODIS, SeaWiFS и др. [14–16]. Погрешность алгоритмов

* Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru); Дмитрий Михайлович Кабанов (dkab@iao.ru); Иван Александрович Круглинский (iak@iao.ru); Виктор Викторович Полькин (victor@iao.ru); Антон Олегович Почуфаров (poa216@iao.ru).

восстановления АОТ над океаном оценивается величиной $\Delta\tau = \pm 0,03 \pm 0,05\tau$ [17], что считается приемлемым для многих климатических и экологических задач.

Ассимиляция данных спутниковых наблюдений, моделей аэрозольной атмосферы и траекторий движения воздушных масс позволяет дополнительно восстанавливать и другие характеристики аэрозоля, связанные с АОТ атмосферы. В частности, в число продуктов реанализа MERRA-2 кроме АОТ (0,55 мкм) входят массовые концентрации аэрозоля (PM_{2,5}) и поглощающего вещества (черного углерода) в составе аэрозоля [18–20]. Несмотря на широкое использование спутниковой информации, следует отметить существенное снижение эффективности алгоритмов восстановления АОТ и других характеристик аэрозоля в полярных широтах [21, 22]. Причинами являются низкая высота Солнца или его отсутствие (полярная ночь) и большая отражательная способность снежного покрова.

В настоящей работе выполнено статистическое обобщение результатов многолетних экспедиционных исследований концентраций аэрозоля и спектральной АОТ атмосферы в Евразийском секторе СЛО.

Цель работы — определение особенностей среднего пространственного распределения концентраций аэрозоля и АОТ атмосферы.

Несмотря на большое количество наших измерений в Евразийском секторе СЛО, пространственное распределение данных неоднородно, а в каких-то случаях даже недостаточно для получения достоверных статистических оценок. Поэтому к анализу пространственной изменчивости привлечены пространственно однородные и более продолжительные данные модельных расчетов — реанализа MERRA-2.

Материалы и методы

В табл. 1 приведен список 19 морских экспедиций, в которых проводились измерения характеристик аэрозоля. Пункты измерений концентраций аэрозоля показаны на рис. 1 (цв. вкладка). Счет-

ные концентрации частиц аэрозоля радиусом 0,15–5 мкм измерялись счетчиками частиц АЗ-10 или GRIMM-11D в нескольких диапазонах размеров. На основе полученных данных для каждого часа измерений рассчитывались объемные концентрации субмикронного (мелкодисперсного) (V_f) и грубодисперсного (V_c) аэрозоля радиусом меньше и больше 0,5 мкм соответственно [10]: $V_{f(c)} = \sum 4/3\pi r_i^3 N_i$, где r_i и N_i — радиусы и счетные концентрации частиц в i -м диапазоне размеров. Индивидуальный анализ мелко- и грубодисперсной составляющих концентраций частиц и АОТ атмосферы (см. ниже) обусловлен разной природой образования и изменчивости двух фракций аэрозоля. Грубодисперсная фракция зависит от погодных и местных особенностей района измерений и в основном представлена частицами морского аэрозоля, а на мелкодисперсную фракцию существенное влияние оказывают дальние переносы природного и антропогенного аэрозоля из континентальных районов.

В рядах измерений концентраций аэрозоля иногда встречаются ложные показания, обусловленные воздействием локальных техногенных источников судна или приборными дефектами (пропуски, выбросы значений). Поэтому с помощью алгоритма [23] осуществлялась фильтрация исходных данных: выявление короткопериодных (до 3 ч) дефектов и восстановление данных. Всего в анализе использовалось 8298 часовых значений концентраций аэрозоля за 476 дней измерений.

Фотометрических наблюдений АОТ атмосферы существенно меньше: 12 морских экспедиций в 2013–2022 гг.; 233 среднечасовых значения АОТ за 83 дня наблюдений. В измерениях АОТ использовался солнечный фотометр SPM. По данным фотометрических наблюдений в диапазоне спектра 0,34–2,14 мкм рассчитывались среднечасовые значения спектральных АОТ и показателя Ангстрема α , характеризующего степенной спад АОТ с ростом длины волны: $\tau^a(\lambda) \sim \lambda^{-\alpha}$. Измерения в ИК-диапазоне спектра ($\lambda > 1$ мкм) позволяли выделить грубую и мелкодисперсную составляющие АОТ (τ^c и τ^f)

Т а б л и ц а 1

Экспедиции, в которых проводились измерения концентраций аэрозоля

№	Период	Экспедиция/НИС
1	Сентябрь — октябрь 2007 г.	54-й рейс/«Академик Мстислав Келдыш»
2	Июль — сентябрь 2013 г.	1-й рейс/«Профессор Хлюстин»
3	Август — сентябрь 2013 г.	NABOS-2013/«Академик Федоров»
4	Август — сентябрь 2015 г.	NABOS-2015/«Академик Трешников»
5	Июль — август 2016 г.	66-й рейс/«Академик Мстислав Келдыш»
6	Август — октябрь 2016 г.	67-й рейс/«Академик Мстислав Келдыш»
7	Июль 2017 г.	«Профессор Молчанов»
8	Июнь — август 2018 г.	71-й рейс/«Академик Мстислав Келдыш»
9	Август — сентябрь 2018 г.	Арктика-2018/«Академик Трешников»
10	Апрель 2019 г.	Трансарктика-2019/«Академик Трешников»
11	Июль — сентябрь 2019 г.	Трансарктика-2019/«Проф. Мультиановский»
12	Июль — август 2020 г.	80-й рейс/«Академик Мстислав Келдыш»
13, 14	Июнь — сентябрь 2021 г.	83–84-й рейсы/«Академик Мстислав Келдыш»
15, 16	Сентябрь — ноябрь 2022 г.	89–90-й рейсы/«Академик Мстислав Келдыш»
17, 18	Сентябрь 2022 г.	«Северный полюс» и «Академик Трешников»
19	Ноябрь — декабрь 2023 г.	93-й рейс/«Академик Мстислав Келдыш»

на длине волны 0,5 мкм [4]. Ввиду небольшого количества экспедиционных измерений дополнительно рассмотрены модельные значения AOT (0,55 мкм) по данным реанализа MERRA-2 [19, 20].

Результаты и обсуждение

В табл. 2 и на рис. 2 представлены статистические характеристики концентраций аэрозоля, рассчитанные для отдельных арктических морей: Гренландское, арктическая часть Норвежского (> 66,6° с.ш.), Баренцево, Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское вместе с Чукотским и Евразийский сектор СЛО, в целом — EAS (остальные обозначения см. на рис. 1). Отдельно приведены концентрации аэрозоля для всего Норвежского моря (вместе с субарктической частью) — NS*. Из полученных результатов следует, что самые большие концентрации мелкодисперсного аэрозоля наблюдаются над Баренцевым и Норвежским морями. Повышенное содержание аэрозоля в этом секторе СЛО обусловлено близостью к Скандинавскому и Кольскому полуостровам — самым заселенным и промышленно развитым районам Северной Евразии. Минимальным содержанием обеих фракций аэрозоля отличается атмосфера Гренландского моря, наиболее удаленного от континентальных источников. В Российском секторе СЛО (от Баренцева моря до Чукотского) хорошо проявилась тенденция спада всех статистических характеристик V_f (рис. 2, а): средняя концентрация уменьшается в 1,7 раза. Средние и модальные значения V_f во всем Евразийском секторе СЛО (EAS) составляют 0,35 и 0,075 мкм³/см³ соответственно.

Таблица 2
Средние ($\pm$ СКО) значения V_f и V_c в разных районах СЛО

Район	N	V_f , мкм ³ /см ³	V_c , мкм ³ /см ³
GS	274	0,11 $\pm$ 0,08 (0,73)	0,08 $\pm$ 0,07 (0,88)
NS (> 66,6° с.ш.)	316	0,40 $\pm$ 0,32 (0,80)	0,95 $\pm$ 1,15 (1,21)
NS*	436	0,46 $\pm$ 0,32 (0,70)	1,16 $\pm$ 1,44 (1,24)
BS	3329	0,43 $\pm$ 0,54 (1,25)	2,23 $\pm$ 3,50 (1,57)
KS	2663	0,29 $\pm$ 0,33 (1,14)	4,18 $\pm$ 8,79 (2,10)
LS	1122	0,36 $\pm$ 0,49 (1,36)	1,35 $\pm$ 2,15 (1,59)
ES	867	0,26 $\pm$ 0,34 (1,31)	0,81 $\pm$ 1,29 (1,59)
EAS (1–6)	8571	0,35 $\pm$ 0,45 (1,28)	2,48 $\pm$ 5,67 (2,29)

Примечание. В скобках приведены коэффициенты вариаций; здесь и далее в таблицах N — количество часов измерений.

В географическом распределении грубодисперсного аэрозоля есть некоторые отличия. Максимальное его содержание наблюдается над Карским морем. Концентрации V_c уменьшаются как в восточном, так и в западном направлении. Основной объем данных в Карском море получен в его юго-западной части, окруженной арх. Новая Земля, полуостровами Ямал и Гыданский. По-видимому, именно ближние переносы (до 100–200 км) крупных

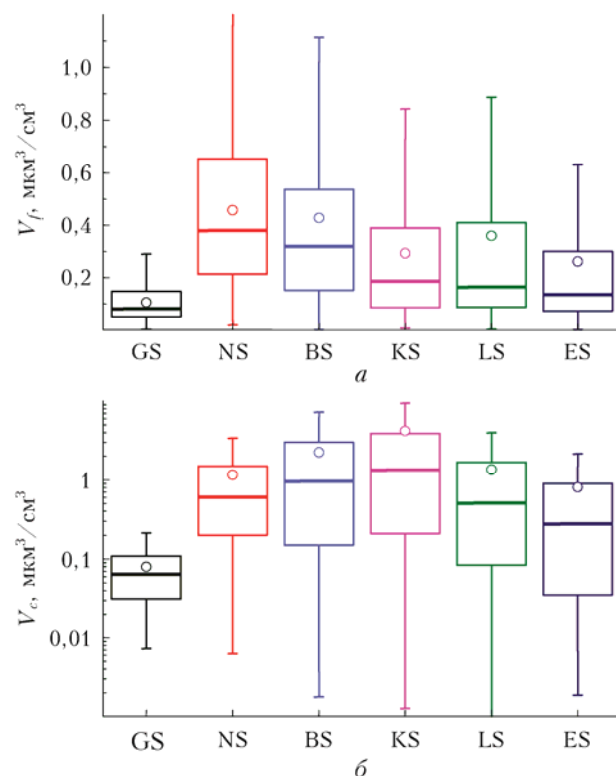


Рис. 2. Статистические характеристики V_f (а) и V_c (б) над разными морями: кружки — средние значения; вертикальные отрезки (усы) — СКО; полужирные горизонтальные линии — второй квартиль (медиана); тонкие линии — первый и третий квартили (25 и 75% данных) (см. цв. рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.09>)

частиц из этих районов определяют повышенные значения V_c . Обратим внимание на очень высокую (в сравнении с V_f) изменчивость концентраций грубодисперсного аэрозоля: коэффициенты вариаций больше примерно в два раза, а пространственные различия V_c между морями достигают пяти раз (см. отличие между KS и ES). Основными факторами, влияющими на содержание грубодисперсного аэрозоля, являются скорость ветра (генерация морских частиц) и ледовое покрытие морской поверхности. Средняя концентрация V_c в Евразийском секторе СЛО составляет 2,5 мкм³/см³.

Более полное представление о пространственном распределении аэрозоля дают карты, построенные с использованием сплайн-интерполяции данных (V_f и V_c) (рис. 3, цв. вкладка). При построении карт из общего массива данных исключались выбросы концентраций, превышающие величину 3σ . В пространственном распределении мелкодисперсного аэрозоля проявилась общая тенденция спада концентраций в северном направлении с максимумом в южных широтах Норвежского моря (рис. 3, а). Вызывают сомнения некоторые локальные неоднородности в распределении концентраций, например повышенные значения V_f в высоких широтах (более 82° с.ш.).

Сомнительные локальные максимумы проявились и в распределении грубодисперсного аэрозоля (рис. 3, б) на севере моря Лаптевых и Баренцева моря. Локальные максимумы невозможно чем-то объяснить, кроме малочисленности данных и неоднородности проведенных измерений. Более достоверными можно считать области высоких концентраций V_c в южных частях Баренцева и Карского морей. Кроме близости к континентальным источникам эти районы характеризуются более интенсивным судоходством.

Аэрозольная оптическая толща атмосферы

На рис. 4 показаны гистограммы распределений и средние спектральные зависимости АОТ атмосферы в морских экспедициях (СЛО) в сравнении с многолетними данными на полярных станциях Баренцбург (арх. Шпицберген) [4] и «Мыс Баранова» (арх. Северная Земля) [5], полученными в теплый период (июнь–сентябрь). Из рис. 4, а видно, что гистограмма распределения АОТ над СЛО сдвинута в область низких значений относительно Баренцбурга и «Мыса Баранова»: модальные значения меньше на 0,025. В среднем немного большие значения АОТ в летний период наблюдаются и на других полярных станциях [1–4]. Указанное различие обусловлено меньшим содержанием в морской атмосфере мелкодисперсного аэрозоля. Сравнение спектральных зависимостей АОТ (рис. 4, б) показывает перераспределение вклада двух компонент АОТ в атмосфере над океаном и на полярных станциях. Более высокие значения АОТ в районе станций быстро спадают с ростом длины волны и в ИК-диапазоне становятся меньше, чем в морской атмосфере.

Предварительные расчеты показали, что средние значения АОТ оказались максимальными над высокоширотным и наиболее удаленным от континентов Гренландским морем. Причиной этого является малое число дней измерений в сочетании с повышенным замутнением атмосферы над Гренландским морем, которое наблюдалось 13–14.08.2021 г. при выносе продуктов вулканического извержения в Исландии [24, 25]. Из-за малочисленности данных проведено объединение результатов измерений в соседних районах: Гренландское и Норвежское моря (GS + NS), в также море Лаптевых с Восточно-Сибирским и Чукотским (LS + ES).

В табл. 3 представлены средние характеристики АОТ, рассчитанные для отдельных морей и секторов СЛО. Средние значения АОТ (0,5 мкм) и показателя Ангстрема для всего Евразийского сектора СЛО составили 0,061 и 0,9 соответственно. В полученных результатах вызывает сомнение тот факт, что даже при объединении данных в Гренландском и Норвежском морях средние АОТ в западном секторе СЛО остались значимо больше, чем над другими морями. Более достоверными являются оценки средних АОТ в Российском секторе СЛО.

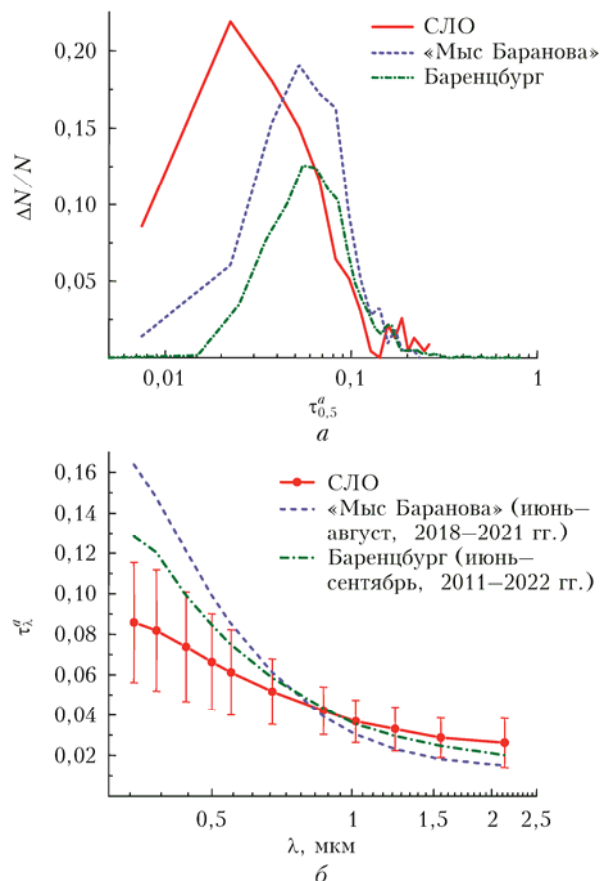


Рис. 4. Гистограммы распределений (а) и средние спектральные зависимости АОТ (б) в Евразийском секторе СЛО и на полярных станциях Баренцбург [4] и «Мыс Баранова» [5] (см. цв. рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.09>)

Но и здесь есть труднообъяснимые отличия от пространственного распределения приземных концентраций аэрозоля (см. выше) и черного углерода [26]: АОТ над восточными морями (LS + ES) в 1,4 раза больше, чем над Карским морем.

По-видимому, количества данных и однородности мест измерений АОТ пока недостаточно для получения достоверных оценок над отдельными арктическими морями. Поэтому дополнительно рассмотрено пространственное распределение модельных АОТ (0,55 мкм), рассчитанных по многолетним и пространственно однородным данным реанализа MERRA-2 [19, 20]. Предварительно мы проанализировали взаимное соответствие двух видов данных путем сравнения измеренных и модельных значений АОТ, совмещенных по времени (± 1 ч) и координатам ($\pm 1^\circ$). Результаты сравнения показали приемлемое их согласие (табл. 4) при немного больших модельных значениях АОТ (в среднем на 0,015).

На рис. 5, а (цв. вкладка) приведена карта распределения АОТ над СЛО, рассчитанная по данным реанализа MERRA-2 для основного периода экспедиционных измерений (июнь–сентябрь 2013–2022 гг.). Пространственное распределение АОТ характеризуется общим спадом в северном направлении и двумя максимумами над Норвежским морем

Таблица 3

Средние характеристики АОТ в разных районах СЛО

Моря	N	$\tau^a(0,5)$	$\tau^f(0,5)$	$\tau^c(\approx \beta)$	α	$\tau_{0,55}(\text{MERRA})$
GS + NS	32	$0,093 \pm 0,053$	$0,064 \pm 0,048$	$0,029 \pm 0,016$	$0,90 \pm 0,36$	$0,100 \pm 0,019$
BS	89	$0,074 \pm 0,054$	$0,048 \pm 0,048$	$0,026 \pm 0,017$	$1,02 \pm 0,52$	$0,096 \pm 0,009$
KS	71	$0,037 \pm 0,034$	$0,015 \pm 0,015$	$0,021 \pm 0,023$	$0,69 \pm 0,53$	$0,104 \pm 0,009$
LS + ES	41	$0,053 \pm 0,053$	$0,038 \pm 0,049$	$0,015 \pm 0,011$	$1,00 \pm 0,39$	$0,112 \pm 0,011$
Все данные	233	$0,061 \pm 0,052$	$0,038 \pm 0,044$	$0,023 \pm 0,019$	$0,90 \pm 0,50$	$0,104 \pm 0,014$

Таблица 4

Статистические характеристики различий измеренных (НИС) и модельных (MERRA) значений АОТ ($\Delta = \tau_{\text{MERRA}} - \tau_{\text{НИС}}$)

Данные	N	Средние значения		$\bar{\Delta}$	SD	R
		MERRA	НИС			
Все	233	0,072	0,056	0,015	0,032	0,75
Западный сектор (BS + KS)	160	0,068	0,052	0,016	0,030	0,74
Восточный сектор (LS + ES)	41	0,057	0,049	0,009	0,038	0,66

Примечание. $\bar{\Delta}$ — средняя величина различия; SD — стандартное отклонение; R — коэффициент корреляции.

и в восточном секторе (LS + ES). Анализ данных в отдельные годы показал, что максимум АОТ над восточными морями связан с выносами дымов лесных пожаров. При исключении самых мощных выносов дымов в 2019 и 2021 гг. максимум в восточном секторе становится менее выраженным (рис. 5, б). Характер полученного распределения АОТ качественно согласуется с пространственным распределением концентраций аэрозоля в приводном слое атмосферы (см. рис. 3).

Сравнение средних значений АОТ над отдельными морями (секторами) СЛО показало (см. последний столбец табл. 3), что модельные значения во всех случаях больше измеренных в среднем на 0,04. Это различие обусловлено двумя составляющими: 1) погрешность оценки средних АОТ по малочисленным данным натурных измерений; 2) общее смещение (завышение) модельных значений АОТ на 0,015 (см. табл. 4).

Заключение

На основе многолетних экспедиционных исследований определены статистические характеристики АОТ и объемных концентраций аэрозоля в приводном слое атмосферы Евразийского сектора СЛО: средние значения АОТ (0,5 мкм) и показателя Ангстрема составили 0,061 и 0,9 соответственно; концентрации мелко- и грубодисперсного аэрозоля — 0,35, 2,5 мкм³/см³ соответственно.

Пространственное распределение мелкодисперсного аэрозоля характеризуется спадом концентраций в северном и восточном направлениях: от Баренцева моря до Чукотского средняя концентрация V_f уменьшается в 1,7 раза (от 0,43 до 0,26 мкм³/см³). Максимальное содержание грубодисперсного аэрозоля наблюдается над Карским морем: среднее значение V_c составляет 4,18 мкм³/см³. Наиболее вероятной причиной повышенного содержания аэрозоля в юго-западной части Карского моря являются

ближние переносы (до 100–200 км) крупных частиц со стороны Новой Земли, Ямала и Гыданского. Концентрации аэрозоля уменьшаются как в восточном, так и западном направлениях относительно максимума V_c над Карским морем.

Средние значения АОТ атмосферы, измеренные в морских экспедициях в СЛО, немного меньше, чем на полярных станциях (Баренцбург и «Мыс Баранова»). Отличительной особенностью данных морских экспедиций является низкое содержание мелкодисперсного аэрозоля при большем содержании грубодисперсного.

Сравнение измеренных и модельных (MERRA-2) значений АОТ, совмещенных по времени и координатам, показало приемлемое согласие двух видов данных: среднее различие (превышение модельных значений) составило 0,015; коэффициент взаимной корреляции — 0,75. В пространственном распределении измеренных и модельных значений АОТ в Евразийском секторе СЛО не выявлено достоверных различий между отдельными арктическими морями.

Благодарности. Авторы выражают благодарность П.Н. Зенковой, О.Н. Изосимовой, Вас.В. Полькину, С.А. Терпуговой, О.Р. Сидоровой, Д.Д. Ризе и Ю.С. Турчиновичу за проведение измерений в отдельных экспедициях.

Финансирование. Исследования выполнены при поддержке РНФ (проект № 21-77-20025).

Список литературы

1. *Physics and Chemistry of the Arctic Atmosphere* / A. Kokhanovsky, C. Tomasi (eds.). England: Springer Polar Sciences series, 2020. 717 p. DOI: ORG/10.1007/978-3-030-33566-3.
2. *Abbatt J.P.D., Leaitch W.R., Aliabadi A.A., Bertram A.K., Blanchet J.-P., Boivin-Rioux A., Bozem H., Burkart J., Chang R.Y.W., Charette J., Chaubey J.P., Christensen R.J., Cirisan A., Collins D.B., Croft B., Dionne J., Evans G.J., Fletcher C.G., Gal M., Ghah-*

- remaninezhad R., Girard E., Gong W., Gosselin M., Gourdal M., Hanna S.J., Hayashida H., Herber A.B., Hesarakis S., Hoor P., Huang L., Husserr R., Irish V.E., Keita S.A., Kodros J.K., Kollner F., Kolonjari F., Kunkel D., Ladino L.A., Law K., Levasseur M., Libois Q., Liggio J., Lizotte M., Macdonald K.M., Mahmood R., Martin R.V., Mason R.H., Miller L.A., Moravek A., Mortenson E., Mungall E.L., Murphy J.G., Namazi M., Norman A.L., O'Neill N.T., Pierce J.R., Russell L.M., Schneider J., Schulz H., Sharma S., Si M., Staebler R.M., Steiner N.S., Thomas J.L., von Salzen K., Wentzell J.J.B., Willis M.D., Wentworth G.R., Xu J.-W., Yakobi-Hancock J.D. Overview paper: New insights into aerosol and climate in the Arctic // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. V. 19, N 4. P. 2527–2560. DOI: 10.5194/acp-19-2527-2019.
3. Xian P., Zhang J., O'Neill N.T., Toth T.D., Sorenson B., Colarco P.R., Kipling Z., Hyer E.J., Campbell JR., Reid J.S., Ranjbar K. Arctic spring and summertime aerosol optical depth baseline from long-term observations and model reanalyses – Part 1: Climatology and trend // *Atmos. Chem. Phys.* 2022. V. 22, N 15. P. 9915–9947. DOI: 10.5194/acp-22-9915-2022.
 4. Кабанов Д.М., Масловский А.С., Радионов В.Ф., Сакерин С.М., Чернов Д.Г., Сидорова О.Р. Сезонная и межгодовая изменчивость характеристик аэрозоля по данным многолетних (2011–2021 гг.) измерений в Российском научном центре на архипелаге Шпицберген // *Оптика атмосф. и океана*. 2023. Т. 36, № 6. С. 433–442. DOI: 10.15372/AOO20230602; Kabanov D.M., Maslovsky A.S., Radionov V.F., Sakerin S.M., Sidorova O.R., Chernov D.G. Seasonal and interannual variability of aerosol characteristics according to the data of long-term (2011–2021) measurements at the Russian Scientific Center on the Spitzbergen Archipelago // *Atmos. Ocean. Opt.* 2023. V. 36, N 6. P. 645–654.
 5. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Лоскутова М.А., Ризе Д.Д., Чернов Д.Г., Турчинович Ю.С. Характеристики аэрозоля на научно-исследовательском стационаре «Ледовая база “Мыс Баранова”» в 2018–2023 гг. // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2023. Т. 69, № 4. С. 421–434. DOI: 10.30758/0555-2648-2023-69-4-421-434.
 6. Asmi E., Kondratyev V., Brus D., Laurila T., LiHAVAINEN H., Backman J., Vakkari V., Aurela M., Hatakka J., Viisanen Y., Uttal T., Ivaikov V., Makshatas 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.
 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. V. 5. P. 292–306. DOI: 10.3390/atmos5020292.
 8. Ferrero L., Sangiorgi G., Perrone M.G., Rizzi C., Cataldi M., Markuszewski P., Pakszys P., Makuch P., Petelski T., Becagli S., Traversi R., Bolzacchini E., Zielinski T. Chemical composition of aerosol over the Arctic Ocean from summer ARcticEXpedition (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. 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/atmos1111170.
 11. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев 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 атмосф. и океана*. 2017. Т. 30, № 12. С. 1043–1052. DOI: 10.15372/AOO20171207; Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Nédélec P., 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.
 12. 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 атмосф. и океана*. 2021. Т. 34, № 11. С. 882–890. DOI: 10.15372/AOO20211108; 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.
 13. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Бердашинова О.И., Голобокова Л.П., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Онищук Н.А., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В., Ходжер Т.В. Состав воздуха над Российским сектором Арктики в сентябре 2020 г. 4. Атмосферный аэрозоль // *Оптика атмосф. и океана*. 2024. Т. 37, № 3. С. 214–224. DOI: 10.15372/AOO20240305.
 14. Glantz P., Bourassa A., Herber A., Iversen T., Karlsson J., Kirkevåg 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.: Atmos.* 2014. V. 119. P. 8169–8188. DOI: 10.1002/2013JD021279.
 15. Hsu N.C., Gautam R., Sayer A.M., Bettenhausen C., Li C., Jeong M.J., Tsay S.-C., Holben B.N. Global and regional trends of aerosol optical depth over land and ocean using SeaWiFS measurements from 1997 to 2010 // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12. P. 8037–8053. DOI: 10.5194/acp-12-8037-2012.
 16. 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. 14,487–14,512. DOI: 10.1002/2016JD025310.

17. Remer L.A., Kaufman Y.J., Tanre D., Mattoo S., Chu D.A., Martins J.V., Li R.-R., Ichoku C., Levy R.C., Kleidman R.G., Eck T.F., Vermote E., Holben B.N. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62, N 4. P. 947–973. DOI: 10.1175/JAS3385.1.
18. Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A.M., Gu W., Kim G.-K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J.E., Partyk G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S.D., Sienkiewicz M., Zhao B. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2 (MERRA-2) // *J. Climate.* 2017. V. 30, N 14. P. 5419–5454. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
19. Global Modeling and Assimilation Office (GMAO), 2015a. MERRA-2 tavgM_2d_aer_Nx: 2d, Monthly mean, Time-averaged, Single-Level, Assimilation, Aerosol Diagnostics V5.12.4, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). DOI: 10.5067/FH9A0MLJPC7N (last access: 15.04.2023).
20. Global Modeling and Assimilation Office (GMAO), 2015b. MERRA-2 tavg1_2d_aer_Nx: 2d, 1-Hourly, Time-averaged, Single-Level, Assimilation, Aerosol Diagnostics V5.12.4, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). DOI: 10.5067/KLICLTZ8EM9D (last access: 15.04.2023).
21. Mei L., Xue Y., de Leeuw G., von Hoyningen-Huene W., Kokhanovsky A.A., Istomina L., Guang J., Burrows J.P. Aerosol optical depth retrieval in the Arctic region using MODIS data over snow // *Remote Sens. Environ.* 2013. V. 128. P. 234–245. DOI: 10.1016/j.rse.2012.10.009.
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 атмосф. и океана.* 2020. Т. 33, № 4. С. 250–260. DOI: 10.15372/AOO20200402; 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.
23. 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. P. 119161U. DOI: 10.1117/12.2600591.
24. Chen Y.-C., Hamre B., Frette Q., Muyimbwa D., Blindheim S., Stebel K., Sobolewski P., Toledano C., Stamnes J. Aerosol optical properties in Northern Norway and Svalbard // *Appl. Opt.* 2016. V. 55, N 4. DOI: 10.1364/AO.55.000660.
25. Smithsonian Institution – Global Volcanism Program: Worldwide Holocene Volcano and Eruption Information. URL: <https://volcano.si.edu> (last access: February 2022).
26. Sakerin S.M., Kabanov D.M., Kopeikin V.M., Kruglinsky I.A., Novigatsky A.N., Shevchenko V.P., Turchinovich Yu.S. Spatial distribution of atmospheric black carbon in the Eurasian sector of the Arctic Ocean from 28 marine expeditions (2007–2022) // *Atmos. Pollut. Res.* 2023. V. 14. P. 101885. DOI: 10.1016/j.apr.2023.101885.

S.M. Sakerin, D.M. Kabanov, I.A. Kruglinsky, V.V. Pol'kin, A.O. Pochufarov. Features of the spatial distribution of atmospheric aerosol in the Eurasian sector of the Arctic Ocean.

The volume concentration of fine and coarse aerosol (V_f and V_c) in the near-water layer and the aerosol optical depth (AOD) of the atmosphere are generalized on the basis of long-term studies in Eurasian sector of the Arctic ocean. The mean AOD value at $0.5 \mu\text{m}$ is 0.061, the Angstrom exponent is 0.9, the concentrations of fine and coarse aerosol are 0.35 and $2.5 \mu\text{m}^3/\text{cm}^3$, respectively. The greatest content of fine aerosol is observed in the atmosphere over Norwegian and Barents Seas. The spatial distribution is characterized by the decrease in the concentrations in northern and eastern directions: the mean value V_f becomes 1.7 times less from Barents Sea to Chukchi Sea (from 0.43 to $0.26 \mu\text{m}^3/\text{cm}^3$). The very high concentration of coarse aerosol are observed in south-east part of Kara Sea: the mean V_c is $4.18 \mu\text{m}^3/\text{cm}^3$. Then, the coarse aerosol concentration decreases relatively to Kara Sea in eastern and western directions by several times.

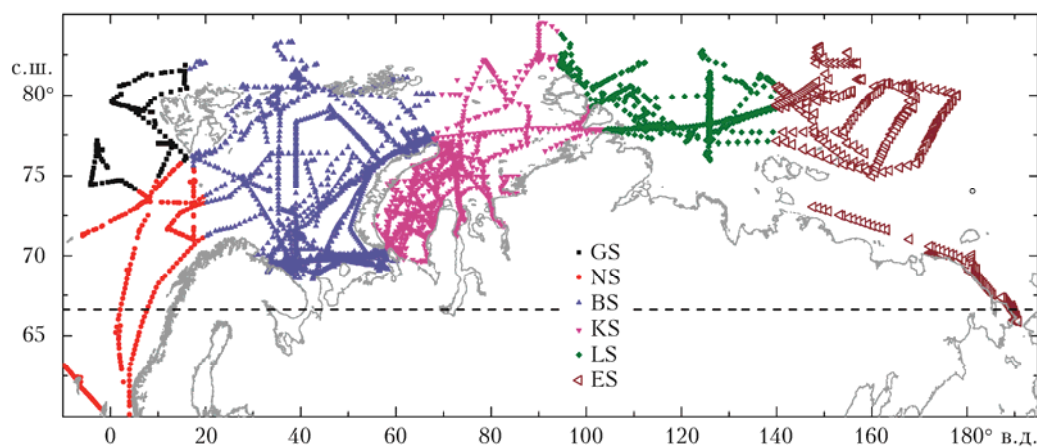


Рис. 1. Пункты измерений концентрации аэрозоля в Евразийском секторе СЛО: GS — Гренландское море, NS — Норвежское, BS — Баренцево, KS — Карское, LS — Лаптевых, ES — Восточно-Сибирское вместе с Чукотским

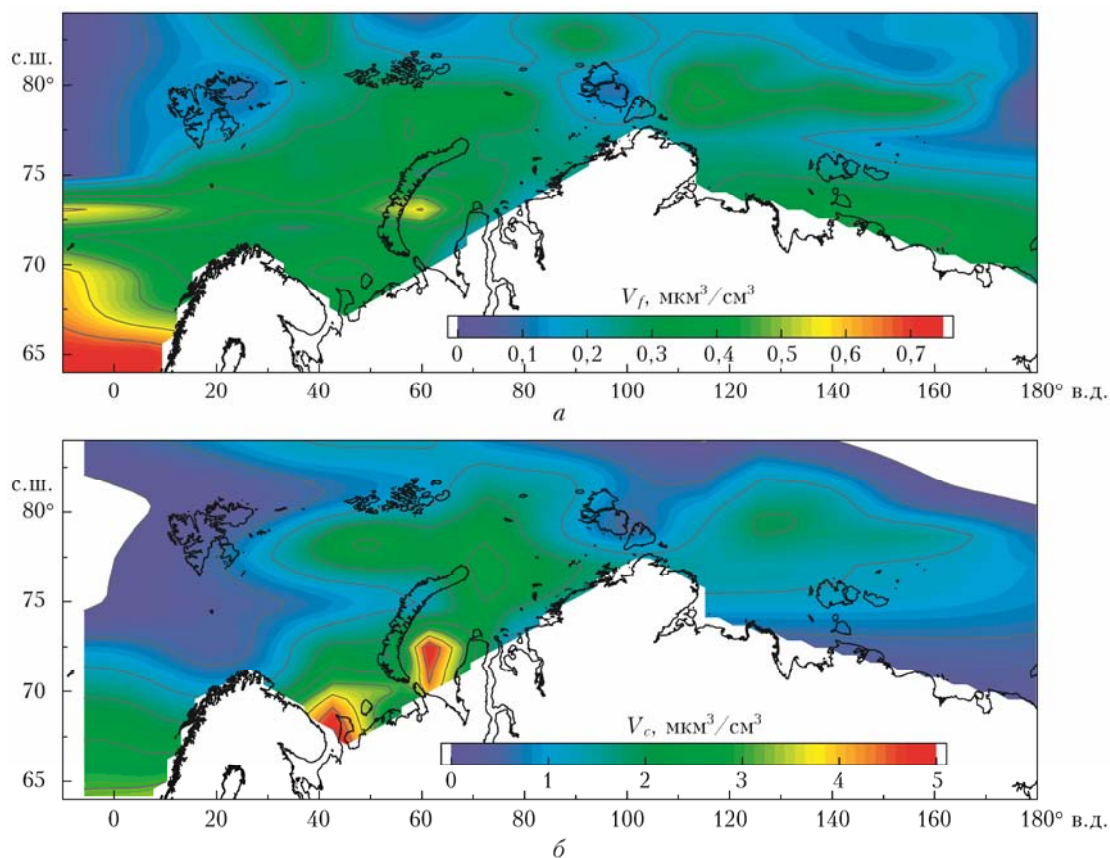


Рис. 3. Карты пространственного распределения концентраций мелкодисперсного (а) и грубодисперсного (б) аэрозоля

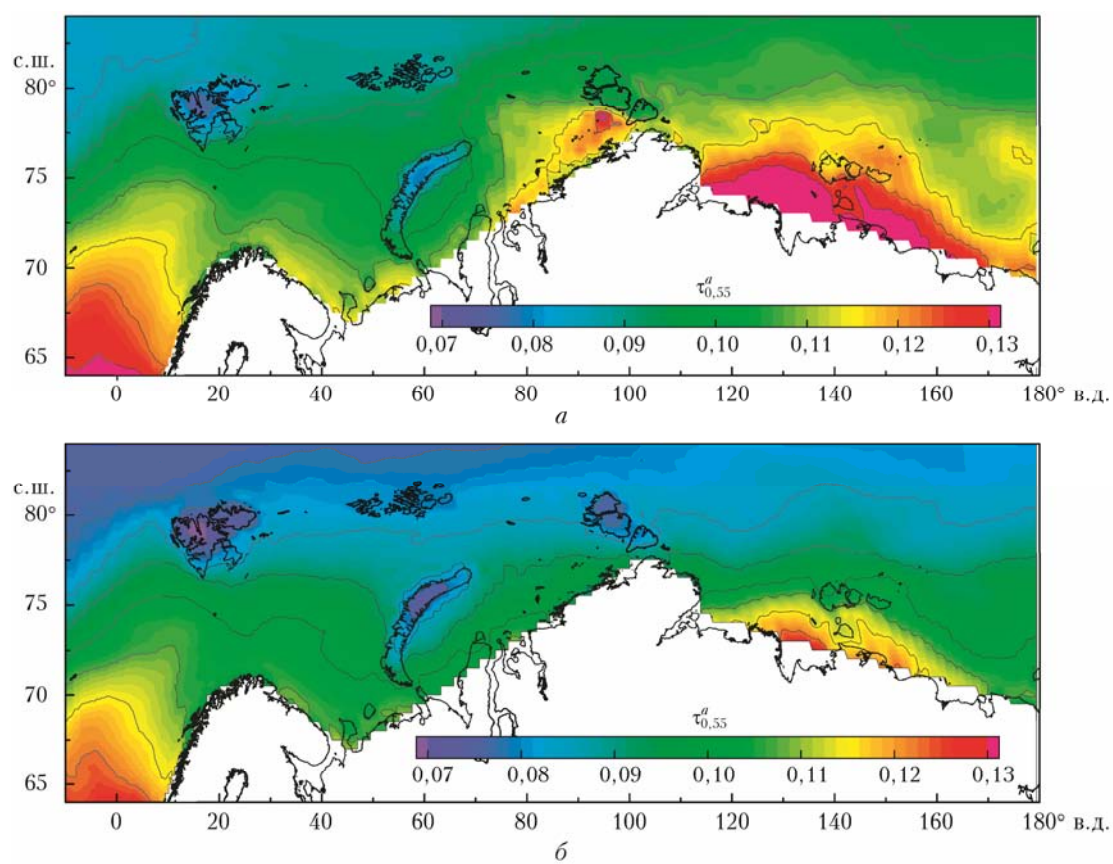


Рис. 5. Карта пространственного распределения АОТ по данным реанализа MERRA-2: все данные за июнь—сентябрь 2013—2022 гг. (а); без учета дымов в июле—августе 2019 и 2021 гг. (б)