

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.510.4

Оценки периодичности синоптических вариаций характеристик аэрозоля в арктической атмосфере и вклад различных загрязнений в аномально высокие концентрации аэрозоля

И.А. Круглинский[✉], Д.М. Кабанов, С.М. Сакерин*

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

Поступила в редакцию 24.05.2024;

после доработки 19.08.2024;

принята к печати 06.09.2024

Исследуется влияние дальних переносов континентального аэрозоля на загрязнение арктической атмосферы. На основе многолетних измерений характеристик аэрозоля в атмосфере Евразийского сектора Северного Ледовитого океана (СЛО) оценивается периодичность их синоптических вариаций. В периодограммах концентраций субмикронного аэрозоля и черного углерода (V_f и eBC) проявились статистически значимые максимумы амплитудных функций в диапазоне от 3,5 до 18 сут. Более детально рассмотрены случаи аномально высоких концентраций eBC и V_f (5% данных), связанных с дальними переносами континентальных загрязнений. Показано, что средняя продолжительность «аномалий» eBC и V_f равна 1 сут, а максимальная – 112 ч. Временные интервалы между «аномалиями» составляют в среднем 6–16 сут, а максимальные – от 28 до 69 сут. Несмотря на малую продолжительность и редкость аномальных ситуаций, они увеличивают средние концентрации аэрозоля и eBC на 28–77%. Расчеты показали, что основной (79%) вклад в загрязнение атмосферы Карского и Баренцева морей принадлежит выносам антропогенных эмиссий, а в Восточном секторе СЛО – дымам лесных пожаров. Влияние продуктов сжигания попутного газа на предприятиях газонефтедобычи больше всего (до 51%) проявилось в атмосфере над научно-исследовательским стационаром «Ледовая база „Мыс Баранова“». Полученные результаты позволяют количественно оценить вклад различных типов аэрозольных загрязнений в природную среду Арктики.

Ключевые слова: атмосфера над океаном, черный углерод, аэрозоль, Арктика, загрязнения атмосферы; *atmosphere over the ocean, black carbon, aerosol, Arctic, atmospheric pollution.*

Введение

Атмосферный аэрозоль играет важную роль в процессах радиационных взаимодействий (рассеяние, поглощение солнечной радиации) и массовом обмене различных веществ между континентом и океаном. Дальние переносы природного и антропогенного аэрозолей влияют на состояние атмосферы, климат и различные экосистемы во всех регионах планеты [1–3]. Особый интерес представляют исследования влияния переносов в Арктической зоне, характеризующейся сильной динамикой природной среды и чувствительностью к изменениям климата [4–6]. Исследования аэрозоля в Российском секторе Арктики стали активно развиваться в последние 10–15 лет: в ежегодных морских экспедициях в Северном Ледовитом океане (СЛО) [7–14]

и на полярных станциях (Тикси, Баренцбург, «Мыс Баранова») [15–18]. Накопленные данные ежегодных измерений характеристик аэрозоля в арктической атмосфере позволили перейти от анализа «аэрозольной погоды» в отдельных ситуациях или экспедициях к климатическим обобщениям: среднее пространственное распределение аэрозольных характеристик в Евразийском секторе СЛО [11, 12], их сезонная и межгодовая изменчивость в районе полярных станций [15–17].

Особенность арктической атмосферы состоит в том, что дефицит аэрозоля от местных источников восполняется дальними переносами природного и антропогенного аэрозолей из средних широт. Иными словами, состав атмосферы над СЛО в значительной степени определяется эмиссиями аэрозоля на континентах и циркуляциями воздушных масс. Оценки влияния атмосферных загрязнений на природную среду Арктики важны как с научной, так и с природоохранной точки зрения. Соответствующие исследования проводились многими авторами с использованием модельных расчетов,

* Иван Александрович Круглинский (iak@iao.ru); Дмитрий Михайлович Кабанов (dkab@iao.ru); Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru).

основанных на инвентаризации различных источников аэрозоля (местоположение, мощность) и статистических данных о траекториях движения воздушных масс [7, 19–23]. Влияние континентальных загрязнений на арктическую атмосферу оценивалось также с помощью эмпирического подхода по данным многолетних измерений в Евразийском секторе СЛО [24].

Настоящая работа является продолжением работы [24]. Ее цели – оценка периодичности синоптических вариаций характеристик аэрозоля, продолжительности и повторяемости аномально высоких их концентраций, а также систематизация «аномалий» по типам (источникам) загрязнений.

1. Материалы и методы

Многолетние исследования аэрозоля над океаном показали, что его характеристики изменяются в основном в синоптическом масштабе под влиянием смены воздушных масс и погодных условий. Значительные изменения физико-химического состава и содержания аэрозоля наблюдаются в арктической атмосфере: при вторжениях загрязненного воздуха со стороны континентов концентрации увеличиваются на один-два порядка относительно фонового уровня [11, 12]. Загрязнения переносятся на большие расстояния (тысячи километров) в составе субмикронного аэрозоля. Однако более крупные частицы обычно распространяются не больше, чем на сотню километров [25]. Грубодисперсная фракция представлена в основном морским аэрозолем, содержание которого не связано с дальними переносами, а зависит от местных гидрометеорологических условий (скорости ветра и ледовитости океана).

Мы анализировали результаты ежечасных измерений концентраций субмикронного аэрозоля и поглощающего вещества (в эквиваленте черного углерода, eBC) в приземном слое атмосферы Евразийского сектора СЛО в 19 морских экспедициях (2007–2023 гг.) и на полярной станции «Ледовая станция „Мыс Баранова“» (2018–2022 гг.), расположенной на арх. Северная Земля. Массовая концентрация черного углерода в составе аэрозоля измерялась аэталометрами МДА [26], а объемная концентрация субмикронного аэрозоля (V_f) рассчитывалась по данным измерений счетчика АЗ-10 в диапазоне радиусов частиц 0,15–0,5 мкм [27]. Методические вопросы измерений и обработки данных, а также районы и сроки морских экспедиций обсуждались в работах [11–16].

Характеристики аэрозоля в морских экспедициях измерялись в период навигации (в основном июнь – октябрь), а на станции «Мыс Баранова» – круглогодично и в несколько других геофизических условиях. Диапазон и характер изменчивости eBC и V_f в разные периоды года различаются. Чтобы исключить влияние сезонного фактора, анализ данных станции «Мыс Баранова» проводился отдельно для навигационного периода (условно – «лето») и «зимы» (ноябрь – май). Общее количество данных

за лето: «Мыс Баранова» – 12248 ч измерений eBC и 8171 ч измерений V_f ; морские экспедиции (СЛО) – 9693 и 8029 ч соответственно. Количество данных в зимний период («Мыс Баранова») составило 19580 ч измерений eBC и 15627 ч измерений V_f .

2. Результаты и обсуждение

2.1. Периодичность синоптических вариаций

Высокочастотный шум, обусловленный погрешностями измерений и внутрисуточной изменчивостью концентрации аэрозоля, затрудняет выделение периодов синоптических колебаний. Поэтому сначала проводилось сглаживание рядов наблюдений методом скользящего среднего с временным окном 1 сут. Затем рассчитывались спектральные плотности мощности вариаций и строились соответствующие периодограммы (амплитудные функции) для данных, полученных в морских экспедициях и на станции «Мыс Баранова» (рис. 1).

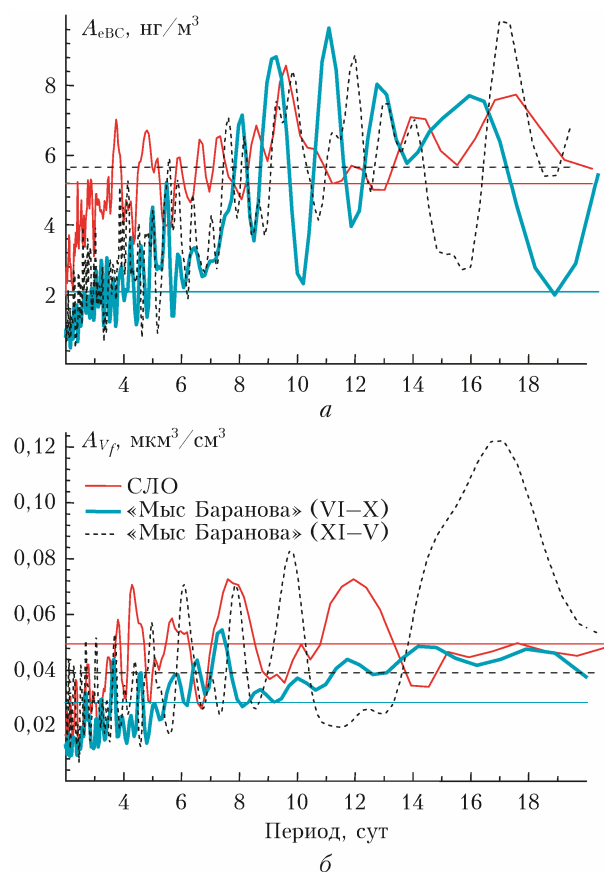


Рис. 1. Периодограммы (амплитудные функции) изменчивости eBC (а) и V_f (б) в морских экспедициях и на станции «Мыс Баранова» (горизонтальными линиями показан уровень статистической значимости 0,05) (см. цветные рисунки на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.11>)

Во всех периодограммах проявились несколько максимумов амплитуд в диапазоне от 3,5 до 18 сут,

но нет оснований выделить какие-то преобладающие периоды. Выявленные в периодограммах максимумы статистически значимы (по уровню 0,05) и соответствуют известным масштабам синоптических и глобальных (волны Россби) колебаний различных характеристик атмосферы [28].

2.2. Продолжительность и повторяемость аномально высоких концентраций

Относительно редкие случаи аномально высоких eBC и V_f , связанные с дальними переносами загрязнений, существенно влияют на результаты расчетов их среднего пространственного распределения [12, 13] и сезонной изменчивости [14, 15]. В связи с этим представляет интерес оценить продолжительность и повторяемость таких «аномалий». Для получения количественных оценок эмпирически был определен порог ($\approx 5\%$) наиболее высоких eBC и V_f от общего числа измерений. Для лета (июнь – октябрь) пороговые значения аномальных концентраций составили: $eBC > 100 \text{ нг/м}^3$ и $V_f > 0,93 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$. Зима (ноябрь – май) отличается более высоким содержанием аэрозоля и черного углерода. Поэтому при отборе 5% аномальных концентраций пороговый уровень составил: $eBC > 215 \text{ нг/м}^3$ и $V_f > 1,4 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$. Продолжительность каждой аномальной ситуации (T_A) оценивалась по временному интервалу между началом и окончанием быстрого роста и спада концентраций eBC и V_f . Чтобы оценить, насколько часто наблюдаются «аномалии», рассчитаны интервалы времени (ΔT) между серединами «аномалий».

В табл. 1 и на рис. 2 приведены результаты расчетов продолжительности аномально высоких V_f и eBC , которые наблюдались в атмосфере СЛО и на станции «Мыс Баранова». Из полученных данных видно, что продолжительность «аномалий» eBC и V_f в летний период в основном равна примерно одним суткам (21–24 ч), а максимальная достигает 112 ч. Зимой продолжительность «аномалий» на «Мысе Баранова» увеличивается: средние значения T_A больше в 1,4 раза, а максимальные – почти в два раза.

Анализ временных интервалов не выявил явных различий между значениями ΔT для двух характеристик (eBC , V_f) и сезонов (зима/лето). Временные интервалы между «аномалиями» составляют в среднем 6–16 сут, минимальные значения – немного больше суток, а максимальные – от 28 до 69 сут. Практически каждый месяц в арктической атмосфере могут наблюдаться не менее 1-2 аномальных ситуаций, в которых концентрации аэрозоля и черного углерода превышают 5%-й уровень самых высоких значений от общего числа измерений. Несмотря на относительно малую продолжительность (около суток) и редкость аномальных ситуаций ($\sim 5\%$ данных), они приводят к увеличению средних концентраций аэрозоля и черного углерода

Таблица 1

Характеристики аномальных ситуаций				
Характеристика аэрозоля	N_A	δ_A , %	T_A , ч	ΔT , сут
<i>СЛО, «лето»</i>				
eBC	83	77	$20,6 \pm 21,1$ 1 – 12 – 100	$6,1 \pm 5,6$ 1 – 3,5 – 30,5
V_f	50	46	$27 \pm 21,9$ 3 – 23 – 85	$7,2 \pm 6,1$ 1,6 – 4,5 – 28,1
<i>«Мыс Баранова», «лето»</i>				
eBC	21	54	$28,9 \pm 30,5$ 3 – 15 – 111	$14,5 \pm 16,9$ 1,2 – 8,7 – 55,4
V_f	27	36	$21,8 \pm 24,4$ 3 – 11 – 96	$16,1 \pm 20,2$ 1,4 – 8,3 – 68,8
<i>«Мыс Баранова», «зима»</i>				
eBC	57	51	$41,1 \pm 45,9$ 3 – 27 – 219	$9,2 \pm 8,5$ 1,7 – 6,2 – 43,3
V_f	54	28	$31,4 \pm 29,6$ 3 – 23 – 148	$12,2 \pm 12,1$ 1,1 – 6 – 47,5

Примечание. N_A – количество «аномалий»; δ_A – относительное увеличение средних значений характеристик из-за «аномалий»; T_A – продолжительность, ΔT – повторяемость (1-я строка – среднее \pm СКО; 2-я строка – минимальное – медианное – максимальное значения).

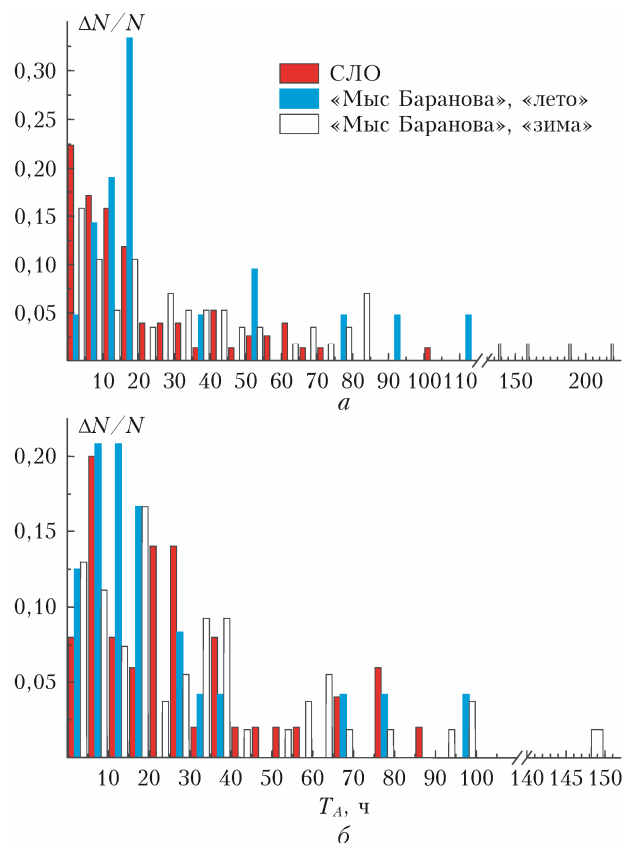


Рис. 2. Гистограммы распределений продолжительности «аномальных» eBC (а) и V_f (б)

на 28–77% (см. δ_A в табл. 1). Наибольший вклад в среднее значение eBC в морских районах вносят непродолжительные (до 10 ч), но высокие по концентрации выбросы.

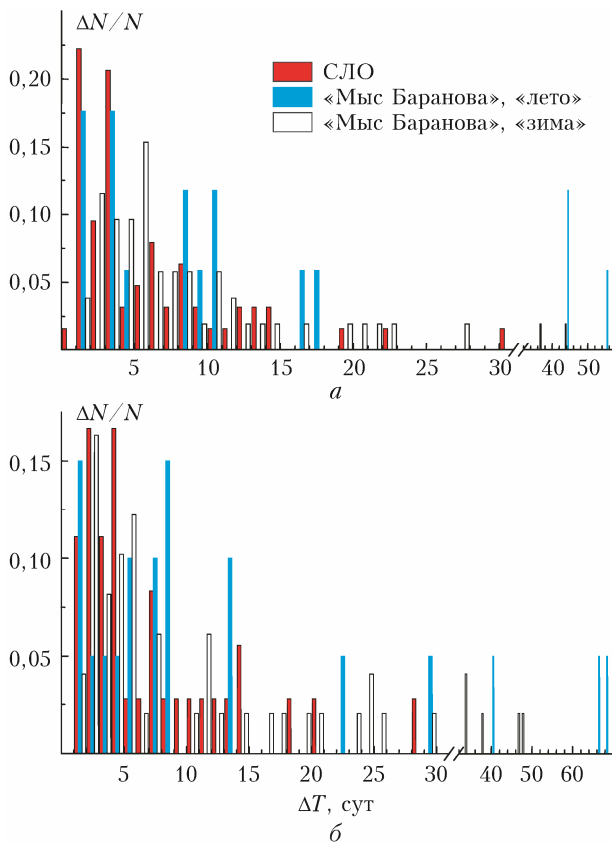


Рис. 3. Гистограммы распределений интервалов времени аномальных концентраций eBC (а) и V_f (б)

На рис. 3 представлены гистограммы интервалов времени аномально высоких концентраций аэрозоля и черного углерода.

2.3. Долевой вклад отдельных типов загрязнений

Систематизация аномально высоких eBC и V_f проводилась по трем типам (источникам) загрязнений: 1) дымы лесных пожаров; 2) факелы сжигания попутного газа; 3) антропогенные выносы от крупных городов и промышленных зон. Для выявления источников загрязнений использовались данные траекторного анализа движения воздушных масс (HYSPLIT) [29], спутниковые карты тепловых аномалий (очагов горения) [30] и информация о 50 наиболее мощных источниках антропогенных эмиссий [31, 32].

Продолжительность обратных траекторий переноса воздуха составляла 5 сут. Решение об идентификации типа загрязнения принималось, если траектория переноса воздуха проходила над местоположением источника в пределах ± 50 км, а высота траектории в этом месте не превышала 1,5 км. С целью повышения достоверности выявления источников загрязнений траекторный анализ проводился для трех высот (20, 50 и 100 м) и времен прихода траекторий в точку измерений (в момент максимума «аномалии», а также на два часа раньше и позже).

В некоторых случаях 5-суточные траектории переноса воздуха проходили только над СЛО или районами, где отсутствуют мощные источники загрязнений («0» — источник не удалось идентифицировать). Такие ситуации могли быть обусловлены: а) явлениями «арктической дымки» [33, 34]; б) местным техногенным воздействием в районе измерений от судна или полярной станции; в) антропогенными выносами от менее крупных городов и промышленных зон, которые нами не учитывались. Выбранный нами подход не позволяет однозначно определить, какой из этих факторов (или их комбинация) имели место в ситуациях, обозначенных «0».

Рассмотрим сначала распределение N_A по типам (источникам) загрязнений (без учета величины и продолжительности «аномалий»). Из табл. 2 видно, что во многих случаях (примерно треть) источник аномально высоких eBC и V_f не идентифицирован — «0». На станции «Мыс Баранова» большая часть «аномалий» была обусловлена смешанным действием двух источников — сжиганием попутного газа и антропогенных загрязнений (2 + 3). Для «аномалий» V_f в зимний период доля таких случаев достигает 50%. Если рассматривать действие каждого типа источника по отдельности, то в морских экспедициях больше всего «аномалий» eBC (30%) и V_f (22%) связано с выносами антропогенных загрязнений (тип 3). Для всех данных характерно, что наименьшее число «аномалий» связано с лесными пожарами (тип 1).

Таблица 2
Систематизация ситуаций аномально высоких eBC и V_f по типам (источникам) загрязнений

Характеристики аэрозоля	N_A	Доля N_A по типам загрязнений, %				
		1	2	3	2+3	0
<i>СЛО, «лето»</i>						
eBC	83	8	13	30	16	33
V_f	50	4	16	22	14	44
<i>«Мыс Баранова», «лето»</i>						
eBC	21	14	10	19	33	24
V_f	27	—	7	11	26	56
<i>«Мыс Баранова», «зима»</i>						
eBC	57	—	10	14	58	18
V_f	54	—	13	7	50	30

Аномальные ситуации отличаются как по продолжительности, так и по величине концентраций. Более полное и корректное представление дает систематизация «аномалий» по их интегральному воздействию на загрязнение арктической атмосферы. Поэтому для каждого j -го типа загрязнений ($j = 1, 2, 3, 0$) рассчитывалось интегральное воздействие с учетом продолжительности «аномалий»: $S_j = \sum_i X(t)_i \cdot T_A$, где $X(t)_i$ — значение eBC и V_f в i -й аномальной ситуации. При смешанном воздействии двух источников загрязнений их вклад определялся со статистическим весом 0,5. Долевой вклад влияния каждого (j -го) типа загрязнений определялся по отношению к общему воздействию всех аномальных значений характеристик: $\delta_j = S_j / (\sum_j S_j)$.

Таблица 3

Долевой вклад разных типов (1, 2, 3) загрязнений, выносимых из трех районов Евразии в разные секторы СЛО

Район источника	Характеристика аэрозоля	N_A	$\delta_j, \%$		
			1	2	3
<i>Баренцево море</i>					
Европа	eBC	10	–	15	85
	V_f	6	–	3	97
Западная Сибирь	eBC	11	–	77	23
	V_f	6	–	30	70
Восточная Сибирь	eBC	3	100	–	–
	V_f	1	100	–	–
<i>Карское море</i>					
Европа	eBC	3	–	7	93
	V_f	1	–	–	100
Западная Сибирь	eBC	12	–	52	48
	V_f	3	–	60	40
Восточная Сибирь	eBC	3	100	–	–
	V_f	–	–	–	–
<i>Восточные моря</i>					
Европа	eBC	–	–	–	–
	V_f	–	–	–	–
Западная Сибирь	eBC	6	–	30	70
	V_f	5	–	70	30
Восточная Сибирь	eBC	2	100	–	–
	V_f	1	100	–	–
<i>«Мыс Баранова», «лето»</i>					
Европа	eBC	–	–	–	–
	V_f	2	–	–	100
Западная Сибирь	eBC	10	–	47	53
	V_f	9	–	54	46
Восточная Сибирь	eBC	5	94	3	3
	V_f	–	–	–	–
<i>«Мыс Баранова», «зима»</i>					
Европа	eBC	10	–	50	50
	V_f	10	–	50	50
Западная Сибирь	eBC	34	–	51	49
	V_f	28	–	52	48
Восточная Сибирь	eBC	3	–	62	38
	V_f	–	–	–	–

На рис. 4 показано распределение вклада трех типов аэрозольных загрязнений в отдельных секторах СЛО. Над Баренцевым и Карским морями наибольшее влияние на аномальные eBC оказывают антропогенные источники: их вклад составляет 49–54%. Над Карским морем большой вклад (44%) в загрязнения вносят также газовые факелы. Над восточными морями (2013–2022 гг.) влияние антропогенных источников на eBC уменьшается в два раза, а основную роль играют дымы лесных пожаров (62%).

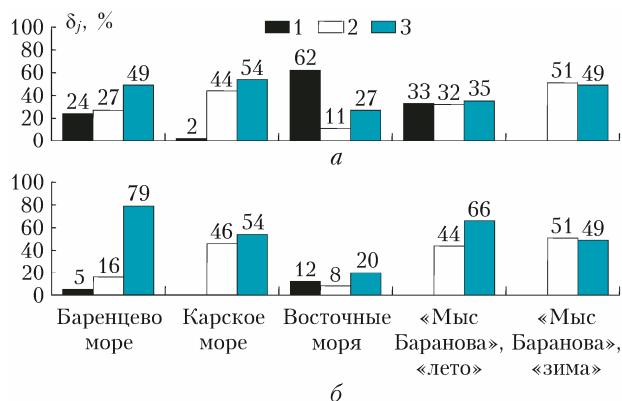


Рис. 4. Относительный вклад отдельных типов загрязнений в аномальные значения eBC (а) и V_f (б) в четырех районах СЛО

Вклад антропогенных источников в аномальные значения V_f уменьшаются в восточном направлении: от 79% над Баренцевым морем до 20% над восточными морями. Над Карским морем сопоставимый вклад вносят антропогенные источники и выносы продуктов сжигания попутного газа. В районе станции «Мыс Баранова» 2-й и 3-й типы источников вносят сопоставимый вклад в аномальные eBC и V_f . Дымы лесных пожаров на «Мысе Баранова» повлияли только на аномальные значения eBC летом.

В табл. 3 приведен долевой вклад всех типов идентифицированных «аномалий» для трех морских районов и станции «Мыс Баранова» («лето» и «зима»). Рассматривалось влияние выносов из трех регионов: Европы (до 50° в.д.), Западной Сибири (от 50–100° в.д.), Восточной Сибири (от 100° в.д.). Анализ показал следующие результаты. Со стороны Европы наибольшее влияние оказывают выносы загрязнений, связанные с антропогенным воздействием, это относится как к «аномалиям» eBC – до 93% в Карском море, так и V_f – до 97% в Баренцевом море. На восточные моря источники, расположенные в Европе, влияния не оказали. Если рассматривать выносы пожаров из Восточной Сибири, то их небольшое влияние (1–3 «аномалии») проявилось в Баренцевом и Карском морях. На «Мысе Баранова» воздействие продуктов сжигания попутного газа и антропогенных загрязнений оказалось одинаковым в зимний период, а в летний особенно не проявилось, за исключением двух случаев.

Выносы со стороны Западной Сибири проявились во всех рассматриваемых регионах, но только от 2-го и 3-го типов источников загрязнения. Интересно то, что в морских районах для двух анализируемых характеристик интегральный вклад оказался противоположным. Так, например, в восточных морях наибольший вклад (70%) в аномальные значения eBC внесли антропогенные источники, а в V_f – факелы сжигания попутного газа. Такая закономерность прослеживается во всех морях. На «Мысе Баранова» вклад загрязняющих источников почти одинаков.

Редкие аномальные ситуации, связанные с пожарами, были зафиксированы во всех морях, и всегда пожар находился в Восточной Сибири; их вклад равен 100% в морской атмосфере и 94% на «Мысе Баранова».

Оценки вклада разных типов источников аэрозоля сделаны с рядом упрощений и для самых сильных загрязнений атмосферы, которые легче идентифицировать. Однако обогащение арктической атмосферы континентальным аэрозолем происходит и в области более низких концентраций — вплоть до фоновых. У нас нет оснований предполагать, что частота и траектории (дистанции) переносов загрязнений в Арктику значимо меняются в зависимости от типа или концентрации субмикронного аэрозоля, выносимого с континента. Следовательно, полученные оценки относительного вклада трех типов аэрозоля приближенно характеризуют и их общее влияние на загрязнение арктической атмосферы.

Заключение

На основе многолетних измерений концентраций субмикронного аэрозоля и черного углерода в арктической атмосфере проанализирована периодичность синоптических колебаний, которые играют основную роль в общей изменчивости характеристик аэрозоля. В периодограммах вариаций eBC и V_f проявились статистически значимые максимумы амплитудных функций в диапазоне от 3,5 до 18 сут. Более детально рассмотрены относительно редкие случаи аномально высоких eBC и V_f (5% данных), связанные с дальними переносами загрязнений из континентальных районов. Показано, что средняя продолжительность «аномалий» eBC и V_f составляет ~ 1 сут, а максимальная достигает 112 ч. Зимой средняя продолжительность «аномалий» на станции «Мыс Баранова» увеличивается в 1,4 раза. Временные интервалы между «аномалиями» в среднем составляют 6–16 сут, а максимальные — от 28 до 69 сут. Несмотря на относительно малую продолжительность и редкость аномальных ситуаций, они приводят к увеличению средних концентраций аэрозоля и черного углерода на 28–77%.

Оценки долевого вклада трех типов аэрозольных загрязнений показали, что антропогенные источники оказывают наибольшее влияние (до 79%) на атмосферу Карского и Баренцева морей. В сектор Баренцева моря в основном выносятся загрязнения из Европы, а в Карское море — из Западной Сибири. В восточном секторе СЛО основной вклад (62%) в аномальные значения eBC принадлежит выносам дымов лесных пожаров. Влияние продуктов сжигания попутного газа в Западной Сибири в наибольшей степени (вклад 51%) проявилось на «Мысе Баранова».

Благодарности. Авторы выражают благодарность П.Н. Зенковой, О.Н. Изосимовой, М.А. Лоскутовой, Вас.В. Полькину, Вик.В. Полькину, А.О. Почуфарову, Д.Д. Ризе, О.Р. Сидоровой, С.А. Терпуговой и Ю.С. Турчиновичу, которые в разные годы проводили измерения в морских экспедициях и на «Мысе Баранова».

Финансирование. Исследования выполнялись при поддержке РФФИ (проект № 21-77-20025). Обработка результатов измерений на «Мысе Баранова» проводилась в рамках госбюджетного проекта ИОА СО РАН № 121031500342-0.

Список литературы

1. Kondratyev K.Ya., Ivlev L.S., Krapivin V.F., Varotsos C.A. Atmospheric aerosol properties, formation processes, and impacts: From nano- to global scales. Chichester, United Kingdom: Springer/PRAXIS, 2006. 572 p.
2. Stohl A. Characteristics of atmospheric transport into the Arctic troposphere // J. Geophys. Res. 2006. V. 111, N D11306. DOI: 10.1029/2005JD006888.
3. Bond T.C., Doherty S.J., Fahey D.W., Forster P.M., Berntsen T., DeAngelo B.J., Flammer M.G., Ghan S., Kärcher B., Koch D., Kinne S., Kondo Y., Quinn P.K., Sarofim M.C., Schultz M.G., Schulz M., Venkataraman C., Zhang H., Zhang S., Bellouin N., Guttikunda S.K., Hopke P.K., Jacobson M.Z., Kaiser J.W., Klimont Z., Lohmann U., Schwarz P., Shindell D., Streltsov T., Warren S.G., Zender C.S. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment // J. Geophys. Res.: Atmos. 2013. V. 118. P. 5380–5552. DOI: 10.1002/jgrd.50171.
4. IPCC, 2021: Summary for Policymakers // Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. P. 1–41.
5. Sand M., Berntsen T.K., von Salzen K., Flammer M.G., Langner J., Victor D.G. Response of Arctic temperature to changes in emissions of short-lived climate forcers // Nat. Clim. Change. 2015. N 11. DOI: 10.1038/NCLIMATE2880.
6. Willis M.D., Leitch R.W., Abbatt J.P.D. Processes controlling the composition and abundance of Arctic aerosol // Rev. Geophys. 2018. V. 56, N 4. P. 621–671. DOI: 10.1029/2018RG000602.
7. Stohl A., Klimont Z., Eckhardt S., Kupiainen K., Shevchenko V.P., Kopeikin V.M., Novigatsky A.N. Black carbon in the Arctic: The underestimated role of gas flaring and residential combustion emissions // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13. P. 8833–8855. DOI: 10.5194/acp-13-8833-2013.
8. 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.
9. Shevchenko V.P., Kopeikin V.M., Novigatsky A.N., Malafeev G.V. Black carbon in the atmospheric boundary layer over the North Atlantic and the Russian Arctic seas in June–September 2017 // Oceanology. 2019. V. 59, N 5. P. 692–696. DOI: 10.1134/S0001437019050199.
10. 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.

11. 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.
12. Sakerin S.M., Kabanov D.M., Makarov V.I., Pol'kin 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.
13. Кабанов Д.М., Круглинский И.А., Почуфаров А.О., Сакерин С.М., Сидорова О.Р., Турчинович Ю.С. Пространственное распределение и средние характеристики атмосферного аэрозоля в акватории Карского моря // Оптика атмосферы и океана. 2024. Т. 37. № 1. С. 77–83. DOI: 10.15372/АОО20240110.
14. Сакерин С.М., Круглинский И.А., Кабанов Д.М., Калашникова Д.А., Кравчишина М.Д., Макаров В.И., Попова С.А., Почуфаров А.О., Симонова Г.В., Турчинович Ю.С., Дарьин Ф.А. Пространственно-временная изменчивость характеристик атмосферного аэрозоля над Карским, Баренцевым, Норвежским и Гренландским морями (экспедиции 2018–2021 гг.) // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35, № 6. С. 447–455. DOI: 10.15372/АОО20220603; Sakerin S.M., Kruglinsky I.A., Kabanov D.M., Kalashnikova D.A., Kravchishina M.D., Makarov V.I., Novigatsky A.N., Popova S.A., Pochufarov A.O., Simonova G.V., Turchinovich Yu.S., Darin F.A. Darin spatiotemporal variations in atmospheric aerosol characteristics over the Kara, Barents, Norwegian, and Greenland Seas (2018–2021 expeditions) // Atmos. Ocean. Opt. 2022. V. 34, N 6. P. 651–660.
15. 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 атмосферы и океана. 2023. Т. 36, № 6. С. 433–442. DOI: 10.15372/АОО20230602; 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.
16. 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.
17. Physics and Chemistry of the Arctic Atmosphere / A. Kokhanovsky, C. Tomasi (eds.). Springer, 2020. 717 p. DOI: 10.1007/978-3-030-33566-3.
18. 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.
19. 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. 15, N 22. P. 9915–9947. DOI: 10.5194/acp-22-9915-2022.
20. Cheng M.-D. Geolocating Russian sources for Arctic black carbon // Atmos. Environ. 2014. V. 92, N 4. P. 398–410. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.04.031.
21. 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, N 11. P. 306–333. DOI: 10.1002/2015JD023358.
22. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Атмосферный перенос антропогенных примесей в арктические районы России (1986–2010) // Оптика атмосферы 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.
23. Виноградова А.А., Васильев А.В., Иванова Ю.А. Загрязнение воздуха черным углеродом в районе о-ва Врангеля: сравнение источников и вкладов территорий Евразии и Северной Америки // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33, № 12. С. 907–912. DOI: 10.15372/АОО20201201; Vinogradova A.A., Vasileva A.V., Ivanova Yu.A. Air pollution by black carbon in the region of Wrangel Island: Comparison of Eurasian and American sources and their contributions // Atmos. Ocean. Opt. 2021. V. 34, N 2. P. 97–103.
24. Kruglinsky I.A., Kabanov D.M., Pol'kin V.V., Sakerin S.M., Popova S.A. Estimates of how different types (sources) of continental pollutants influence the Arctic atmosphere // Proc. SPIE. 12780. 2023. DOI: 10.1117/12.2690459.
25. Семенченко Б.А. Физическая метеорология. М.: Аспект пресс, 2002. 415 с.
26. Kozlov V.S., Shmargunov V.P., Panchenko M.V. Modified aethalometer for monitoring of black carbon concentration in atmospheric aerosol and technique for correction of the spot loading effect // Proc. SPIE. 2016. P. 1003530. DOI: 10.1117/12.2248009.
27. АЗ-10 счетчик частиц аэрозольных переносной. [G. M.], 2024. URL: <https://gazoanalit.ru/catalog/perenosnye1/schetchik-chastits-az-10/> (дата обращения: 27.06.2024)
28. Хуторова О.Г., Хуторов В.Е., Корчагин Г.Е. Параметры волновых процессов по данным сети приемников спутниковых навигационных систем // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34, № 6. С. 458–462. DOI: 10.15372/АОО20210612; Khutorova O.G., Khutorov V.E., Korchagin G.E. Parameters of wave processes from GNSS data // Atmos. Ocean. Opt. 2022. V. 35, N 1. P. 52–56.
29. Air Resources Laboratory–HYSPLIT. URL: <https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php> (last access: 02.02.2023).
30. Fire Information for Resource Management System. URL: Available online: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov> (last access: 02.02.2023).
31. Министертство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. URL: <https://2020.ecology-gosdoklad.ru/doklad/o-doklade> (last access: 02.02.2023).

32. *Empowering the World to Breathe Cleaner Air*. URL: <https://www.iqair.com/> (last access: 02.02.2023).
33. *Shaw G.E.* The Arctic haze phenomenon // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1995. V. 76, N 12. P. 2403–2414. DOI: 10.1175/1520-0477(1995)076<2403:TAHP>2.0.CO;2.
34. *Quinn P., Shaw G., Andrews E., Dutton E.G., Ruoho-Airola T., Gong S.L.* Arctic haze: Current trends and knowledge gaps // *Tellus B: Chem. Phys. Meteorol.* 2007. V. 59, N 1. P. 99–114. DOI: 10.1111/j.1600-0889.2006.00238.x.

I.A. Kruglinsky, D.M. Kabanov, S.M. Sakerin. Estimates of the frequency of synoptic variations in aerosol characteristics in the Arctic atmosphere and the contribution of various pollutants to anomalously high aerosol concentrations.

The periodicity of synoptic-scale variations in aerosol characteristics in the atmosphere of Eurasian sector of the Arctic Ocean is analyzed on the basis of long-term measurements. Statistically significant maxima of amplitude functions in the range from 3.5 to 18 days were manifested in periodograms of the concentrations of submicron aerosol and black carbon (V_f and eBC). Cases of anomalously high eBC and V_f (5% of data), associated with long-range transports of continental pollutants, were considered in more detail. It is shown that the average duration of “anomalies” in eBC and V_f is few days, and the maximal duration attains 112 hours. The time intervals between “anomalies” are, on the average, 6–16 days, and the maximal intervals are from 28 to 69 days. Despite the short duration and rare occurrence of anomalous situations, they increase the average concentrations of aerosol and black carbon by 28–77%. Calculations showed that the major (79%) contributors to air pollution over the Kara and Barents Seas are made by the outflows of anthropogenic pollutants; and in the eastern sector of the Arctic Ocean, the contribution of smokes from wildfires is maximal. The effect of the products of associated gas combustion at gas-oil plants was manifested most strongly (up to 51%) in the atmosphere of Cape Baranov.