

УДК 551.510.4

Сезонная и межгодовая изменчивости характеристик аэрозоля по данным многолетних (2011–2021 гг.) измерений в Российском научном центре на архипелаге Шпицберген

Д.М. Кабанов^{✉1}, А.С. Масловский², В.Ф. Радионов²,
С.М. Сакерин¹, О.Р. Сидорова², Д.Г. Чернов^{1*}

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

²Арктический и антарктический научно-исследовательский институт
199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38

Поступила в редакцию 1.03.2023 г.;

после доработки 27.03.2023 г.;

принята к печати 14.04.2023 г.

На основе наблюдений характеристик аэрозоля в Баренцбурге (архипелаг Шпицберген) в 2011–2021 гг. проанализированы сезонная и межгодовая изменчивости аэрозольной оптической толщи атмосферы (АОТ), объемная концентрация аэрозоля и массовая концентрация черного углерода в приземном слое. В годовом ходе всех характеристик можно выделить два максимума: весенний (или зимне-весенний) и летний, обусловленных переносом загрязняющих веществ из средних широт в зимне-весенний период и дымового аэрозоля летом. В межгодовой изменчивости отмечается значимый отрицательный тренд грубодисперсной компоненты АОТ ($-0,012$ за 11 лет) и массовой концентрации поглощающего вещества (на $46,7$ нг/м³ за 10 лет).

Ключевые слова: аэрозольная оптическая толщина атмосферы, концентрация аэрозоля, содержание поглощающего вещества, годовой ход, межгодовая изменчивость, архипелаг Шпицберген; aerosol optical depth, aerosol concentration, black carbon, annual behavior, interannual variability, Spitzbergen Archipelago.

Введение

Происходящее в настоящее время глобальное потепление обуславливает необходимость более детального изучения и мониторинга всех климатообразующих факторов, в число которых входит атмосферный аэрозоль. Особое внимание стало уделяться исследованиям высокоширотных районов, в которых самая большая динамика природной среды сочетается с дефицитом или неопределенностью фактических данных. В период с 2000 по 2011 г. были организованы регулярные измерения аэрозольной оптической толщи (АОТ) и других характеристик аэрозоля в 12 районах Арктики (на широтах $67-82^\circ$ с.ш.) [1]. Станции аэрозольных наблюдений распределены очень неравномерно: большинство (7) находятся

в Американском секторе Арктики, 4 – в Европейском (из них 3 на Шпицбергене) и только одна – в Азиатском секторе (Тикси [2]). Недостаточность измерений в Азиатском секторе частично компенсировалась организацией измерений в 2018 г. еще на одной российской станции – «Мыс Баранова», расположенной на арх. Северная Земля [3]. Самые продолжительные измерения характеристик аэрозоля на российских полярных станциях ведутся в пос. Баренцбург (арх. Шпицберген) [4].

В монографии [5] обобщены результаты исследований аэрозоля в Баренцбурге по данным 9-летних измерений (2011–2019 гг.). Кроме того совместно с С. Ritter проведен сравнительный анализ результатов наблюдений АОТ атмосферы в соседних районах Шпицбергена (Баренцбург и Нью-Алесунн) [6]. Результаты исследований АОТ атмосферы на других станциях Шпицбергена представлены, например, в [7–10].

Цель настоящей работы – анализ особенностей сезонной и межгодовой изменчивости характеристик аэрозоля в Арктическом регионе на основе более представительного ряда наблюдений (2011–2021 гг.).

* Дмитрий Михайлович Кабанов (dkab@iao.ru); Александр Станиславович Масловский (asmaslowsky@aaari.ru); Владимир Федорович Радионов (vradion@aaari.ru); Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru); Ольга Руслановна Сидорова (olsid@aaari.ru); Дмитрий Григорьевич Чернов (chernov@iao.ru).

1. Анализируемые характеристики аэрозоля

Регулярные измерения комплекса физико-химических характеристик аэрозоля в Российском научном центре на арх. Шпицберген (РНЦШ; 78,06' с.ш., 14,22' в.д.) начались в апреле 2011 г. [4]. В данной статье анализируется лишь часть регистрируемых в научном центре характеристик аэрозоля (оптические и микрофизические): АОТ атмосферы, концентрация объемов частиц и массовая концентрация черного углерода. Условия и методики измерений уже приводились в публикациях [4–6], поэтому ограничимся их кратким представлением.

По данным наблюдений солнечных фотометров SPM и SP-9 [11] рассчитывались спектральные АОТ (τ_λ^a) атмосферы и параметры α , β формулы Ангстрема:

$$\tau^a(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha}. \quad (1)$$

Мелко- и грубодисперсный аэрозоль обладает разными оптическими свойствами и имеет разную природу образования и изменчивости. Поэтому дополнительно рассчитывались две составляющие АОТ [6]:

$$\tau^a(\lambda) = \tau^c + \tau^f(\lambda) = \tau^c + m\lambda^{-n}, \quad (2)$$

где τ^c – грубодисперсная компонента, независящая от длины волны, находилась по минимальным значениям АОТ в диапазоне 1,24 ÷ 2,14 мкм; $\tau^f(\lambda)$ – селективная мелкодисперсная компонента, оценивалась на основе формулы (2) как остаточная толщина; m и n – параметры, аналогичные параметрам формулы Ангстрема.

Массовая концентрация поглощающего вещества в аэрозоле в эквиваленте элементного черного углерода (еВС) [12] измерялась с помощью аэолометра МДА [13, 14].

Фотоэлектрическим счетчиком частиц АЗ-10 [15] регистрировались общая счетная концентрация аэрозоля с частицами радиусом 0,15–5 мкм (N_A); концентрации частиц в шести диапазонах (0,15–0,2; 0,2–0,25; 0,25–0,5; 0,5–1,0; 1,0–2,5; > 2,5 мкм) размеров (ΔN_i) и функция распределения объемов частиц (dV/dr):

$$dV_i/dr_i = 4/3\pi r_i^3 \Delta N_i, \quad (3)$$

где ΔN_i и r_i – счетная концентрация и средний радиус частиц в i -м интервале размеров.

Для выделения и анализа отдельных фракций аэрозоля дополнительно рассчитывались объемы частиц мелкодисперсного (субмикронного) и грубодисперсного аэрозоля (V_f и V_c) радиусом меньше и больше 0,5 мкм соответственно:

$$V_{f(c)} = \sum 4/3r_i^3 \Delta N_i. \quad (4)$$

Заметим, что общая объемная концентрация частиц $V_a = V_f + V_c$ пропорциональна массовой концентрации аэрозоля с точностью до заданного значения плотности материала (ρ) частиц: $M \sim \rho V$.

Концентрация аэрозоля и черного углерода в приземном слое атмосферы измерялась в режиме круглосуточного почасового мониторинга: первые шесть лет наблюдения выполнялись только в течение полярного дня (апрель – сентябрь), а с 2016 г. – круглогодично. Фотометрические наблюдения проводились только в период полярного дня (табл. 1). Приборы располагались на высоте около 60 м н.у.м. в лабораторном корпусе РНЦШ в юго-западной части пос. Баренцбург на берегу залива Гренфьорд. На характеристики аэрозоля в Баренцбурге (население около 500 человек) влияют местные источники загрязнений: предприятия угледобывающей промышленности и тепловая электростанция, расположенная на удалении ~0,5 км. В исходных рядах наблюдений встречаются ложные замеры, обусловленные приборными ошибками (пропуски, выбросы значений), а также завышенные значения концентраций из-за влияния источников загрязнений в пос. Баренцбург. Поэтому с помощью специального алгоритма [16] осуществлялась фильтрация исходных данных: выявление короткопериодных (до 3 ч) приборных ошибок и восстановление данных. Однако указанный алгоритм не исключает более продолжительные антропогенные воздействия местных источников, особенно при неблагоприятных направлениях ветра. Поэтому дополнительно проводилась еще одна фильтрация данных: исключались выбросы, превышающие три стандартные отклонения (критерий 3σ). Общий объем данных, которые использовались в анализе, приведен в табл. 1.

Таблица 1

Число дней (часов) измерений характеристик аэрозоля

Год	Период измерений	V_f, V_c	еВС	АОТ
2011	19 апреля – 31 августа	63 (1144)	57 (1175)	31 (194)
2012	21 апреля – 28 августа	69 (1207)	92 (1755)	25 (73)
2013	15 апреля – 8 сентября	30 (516)	35 (629)	13 (64)
2014	22 апреля – 30 августа	74 (1310)	70 (1200)	37 (135)
2015	30 апреля – 28 сентября	95 (2092)	148 (2842)	68 (393)
2016	15 апреля – 24 декабря	199 (3503)	257 (5067)	61 (298)
2017	весь год	162 (3385)	364 (7279)	76 (402)
2018	весь год	198 (3723)	355 (6799)	51 (173)
2019	весь год	321 (6896)	357 (7204)	75 (420)
2020	весь год	208 (4499)	360 (8201)	55 (340)
2021	весь год	148 (2884)*	267 (5369)	31 (175)
Всего		1567 (31159)	2362 (47520)	523 (2667)

*Только измерения V_f .

2. Результаты и обсуждение

2.1. Сезонная и межгодовая изменчивости АОТ атмосферы

На изменчивость АОТ в арктической атмосфере существенно влияет перенос загрязненных воздушных масс из средних широт Евразии и Северной Америки. Источниками аэрозольных загрязнений являются массовые лесные пожары и весенние палы растительности, сжигание попутного газа в районах нефте- и газодобычи, выбросы предприятий теплоэнергетики, промышленности и транспорта в крупных городах. Самые сильные за период наблюдений замутнения атмосферы в Баренцбурге были обусловлены выносом дымов лесных пожаров с континента 10–14.07.2015 г., 20.08.2017 г. и 6–8.07.2019 г. (в эти дни средние значения $\tau_{0,5}^a > 0,4$). На рис. 1, а приведены примеры обратных траекторий (HYSPLIT) для двух эпизодов переноса дымового аэрозоля: с территории Аляски 11 июля 2015 г. (на высоте 1500 м) и из Сибири 6 июля 2019 г. (на высоте 1000 м). В обоих случаях обратные траектории проходят через зоны скопления температурных анома-

лий (по данным MODIS). Несмотря на кратковременность этих эпизодов (1–4 дня) они сильно повлияли на сезонную и межгодовую изменчивости АОТ (рис. 1, б). Поэтому анализ проводился для двух наборов данных: общего массива и с исключением дымовых ситуаций.

Дымовые ситуации выделялись по методике [17], основанной на использовании пороговых значений параметров m , n : $m > 0,02$ и $n > -(1,777 + 1,055 \ln m)$. Поскольку точки в осях $\ln m$ и n для выборок «дымы» и «без дымов» имеют область пересечения, ошибки распознавания этих ситуаций составили: «дымы» – 7%, «без дымов» – 2%.

Сезонный ход относительного числа ситуаций ($\Delta N_{\text{дым}}/N$), идентифицированных как дымовые, показан столбиками на рис. 2, а. Наиболее часто дымовой аэрозоль в атмосфере региона отмечается в июле и августе (до 25%). Без учета 2019 г., особенность которого заключается в том, что после отмеченного выше сильного увеличения замутнения атмосферы 6–8 июля влияние дымов на АОТ продолжилось до сентября [18–21], относительное число дымовых ситуаций составило ~10 и ~15% соответственно.

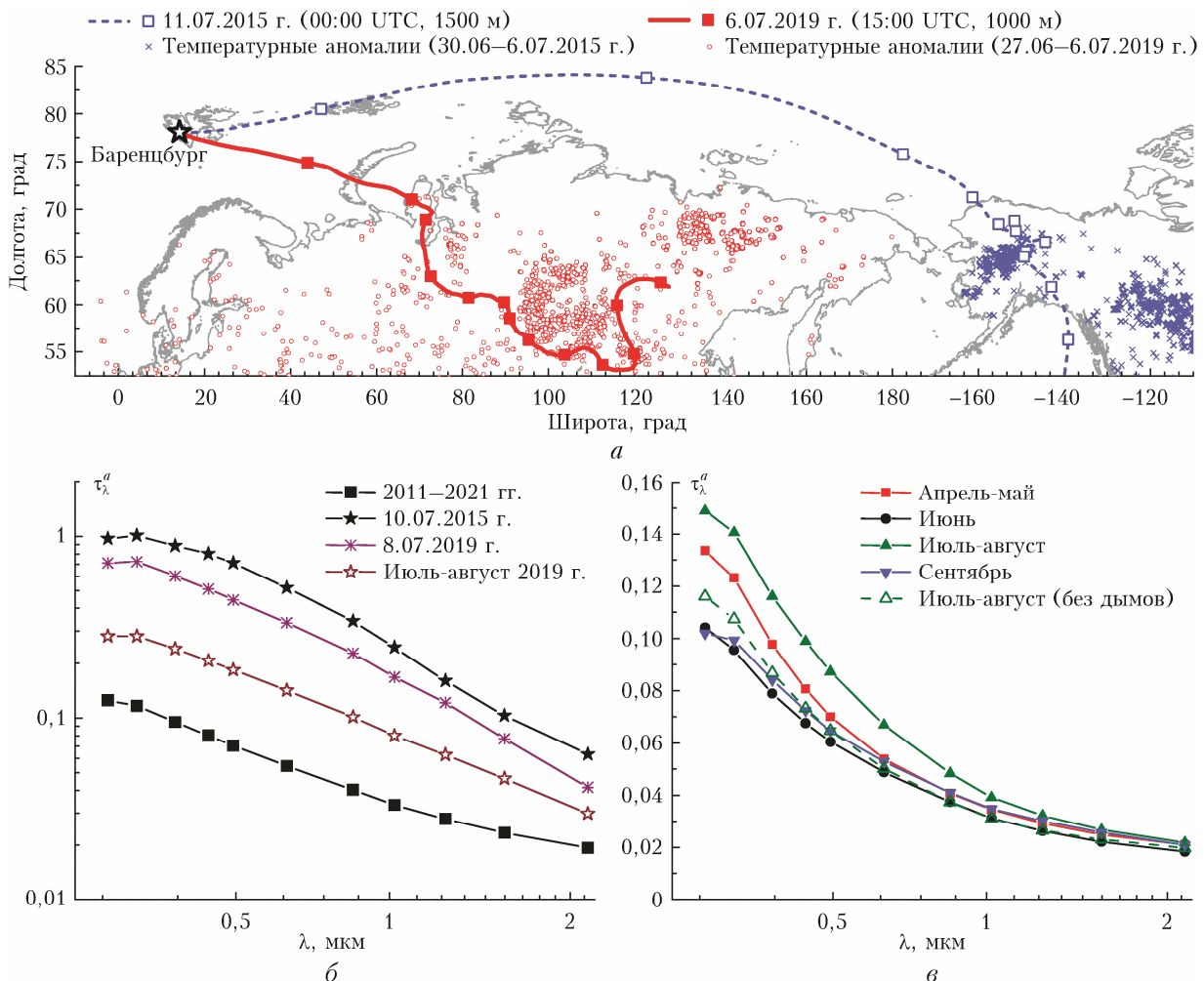


Рис. 1. Обратные траектории переноса воздушных масс в периоды переноса дымов лесных пожаров (а) и спектральные зависимости АОТ при выносе дымов (б), а также в периоды экстремумов годового хода (в)

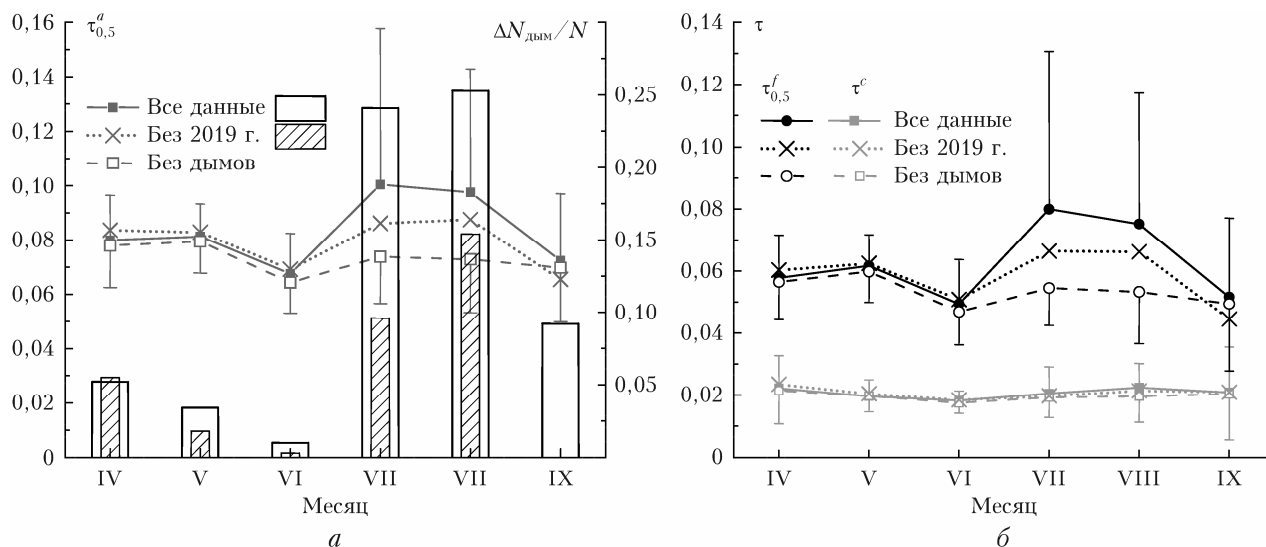


Рис. 2. Средний сезонный ход $\tau_{0,5}^a$ (кривые) и относительное количество дымовых ситуаций (a) (столбики); сезонный ход $\tau_{0,5}^f$ и τ^c (b)

Сезонная изменчивость. Сезонный ход АОТ (рис. 2, a) характеризуется двумя максимумами (апрель-май и июль-август), разделенными июньским минимумом. Последний выражен достаточно хорошо и сопоставим с минимумом АОТ в сентябре. Статистические характеристики АОТ в периоды максимумов и минимумов приведены в табл. 2.

Весенний максимум АОТ является типичным для большинства районов, включая Арктику [22, 23], и связан с увеличением поступления аэрозоля в атмосферу с подстилающей поверхности, активизацией фотохимических процессов его образования в атмосфере за счет увеличения инсоляции и температуры [24]. Сопоставление двух выборок («все данные» и «без дымов») показывает, что основной причиной повышения средних величин АОТ в летние месяцы является перенос с континентов дымов лесных пожаров, участвовавших в последние годы. Исключение из анализа «дымового» 2019 г. снижает среднее значение $\tau_{0,5}^a$ с 0,099 до 0,087, а исключение всех дымовых ситуаций — до уровня 0,073 (рис. 2, a ; табл. 2).

Обратим внимание, что весенний и летний максимумы АОТ определяются поведением мелкодисперсной составляющей $\tau_{0,5}^f$ (рис. 2, b) и лучше проявляются в коротковолновой части спектра (см. рис. 1, b). Сезонные изменения грубодисперсной

составляющей АОТ в измерительный период незначительны (0,018 ÷ 0,022). Вследствие этого сезонный ход показателя селективности α (табл. 2), зависящего от соотношения ($\tau_{0,5}^f/\tau^c$), качественно повторяет изменение $\tau_{0,5}^f$: максимальные значения наблюдаются весной и в июле-августе ($\alpha = 1,29$), а минимальные — в июне и сентябре (1,07 и 1,05 соответственно).

Межгодовая изменчивость. Участвовавшие в последние годы выносы дымового аэрозоля отразились и на колебаниях годовых значений АОТ (рис. 3, a). Под годовыми значениями в данном случае подразумеваются средние значения за месяцы в период полярного дня. Наиболее заметный вклад дымового аэрозоля в $\tau_{0,5}^a$ проявился в 2015, 2018 и 2019 гг. Основной вклад в вариации среднегодовых значений АОТ вносит ее мелкодисперсная компонента. Особенностью многолетней изменчивости τ^c является статистически значимый (по уровню 0,05) тренд, который проявляется как для общего массива данных, так и при исключении дымовых ситуаций. В среднем спад τ^c составил 0,012 за 11 лет наблюдений (~46%). У других характеристик АОТ значимый тренд отсутствует.

Помимо межгодовых вариаций среднегодовых значений АОТ представляет интерес рассмотрение изменчивости АОТ в периоды экстремумов годового хода: в апреле-мае, июне и июле-августе (рис. 3, b).

Таблица 2

Средние значения (\pm СКО) характеристик АОТ в Баренцбурге в отдельные месяцы

Характеристика	Апрель-май	Июнь	Июль-август		Сентябрь
			Все данные	Без дымов	
$\tau_{0,5}^a$	0,081 ± 0,014	0,068 ± 0,015	0,099 ± 0,05	0,073 ± 0,018	0,072 ± 0,025
$\tau_{0,5}^f$	0,060 ± 0,012	0,049 ± 0,014	0,077 ± 0,045	0,054 ± 0,014	0,052 ± 0,025
τ^c	0,021 ± 0,008	0,018 ± 0,003	0,022 ± 0,008	0,019 ± 0,007	0,021 ± 0,015
α	1,29 ± 0,25	1,07 ± 0,20	1,29 ± 0,19	1,26 ± 0,22	1,05 ± 0,41
β	0,034 ± 0,009	0,032 ± 0,006	0,041 ± 0,021	0,031 ± 0,010	0,036 ± 0,013
n	2,12 ± 0,50	1,76 ± 0,31	2,02 ± 0,40	2,04 ± 0,42	1,65071 ± 0,33516
m	0,021 ± 0,006	0,021 ± 0,005	0,028 ± 0,018	0,020 ± 0,007	0,021 ± 0,008

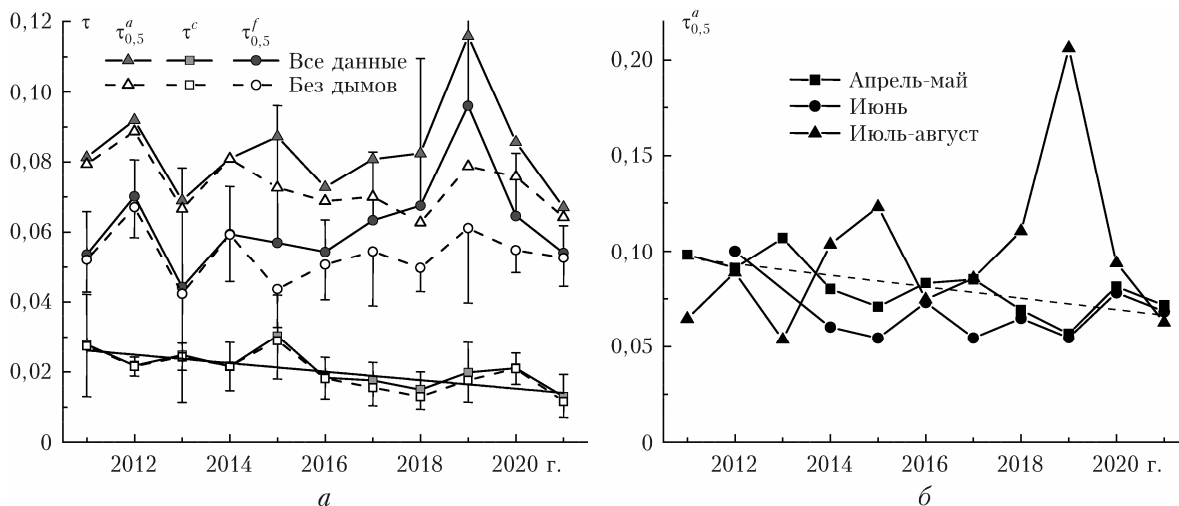


Рис. 3. Многолетняя изменчивость: годовых значений $\tau_{0,5}^a$, $\tau_{0,5}^f$ и τ^c (а); средних значений $\tau_{0,5}^a$ в отдельные сезоны (б)

Наиболее сильные межгодовые колебания АОТ наблюдаются в июле-августе. Коэффициент вариаций в этот сезон более чем в два раза выше, чем в два других, и составляет 0,43. Особенно сильный рост $\tau_{0,5}^a$ был зарегистрирован в 2019 г. Колебания АОТ в разные периоды года не согласованы между собой: максимумы в одни сезоны могут сочетаться с минимумами в другие. Оценки трендовой составляющей сезонных АОТ показали статистически значимый спад $\tau_{0,5}^a$ в апреле-мае в среднем на 0,03 за 11 лет. Указанные тенденции нашли свое отражение в характере сезонного хода АОТ в 2011–2021 гг.: формирование летнего максимума и уменьшающегося с годами весеннего максимума.

2.2. Сезонная и межгодовая изменчивость микрофизических характеристик в приземном слое

Сезонная изменчивость. Годовой ход объемного содержания двух фракций аэрозоля и концентрации поглощающего вещества в приземном слое атмосферы представлен на рис. 4. Из рис. 4, а, б и табл. 3 видно, что V_f и V_c характеризуются двумя максимумами: зимне-весенним (февраль – апрель) и летне-осенним (июль – сентябрь). Отличие заключается в том, что зимне-весенний максимум V_f превышает летне-осенний почти в полтора раза, а соотношение двух максимумов V_c практически одинаковое.

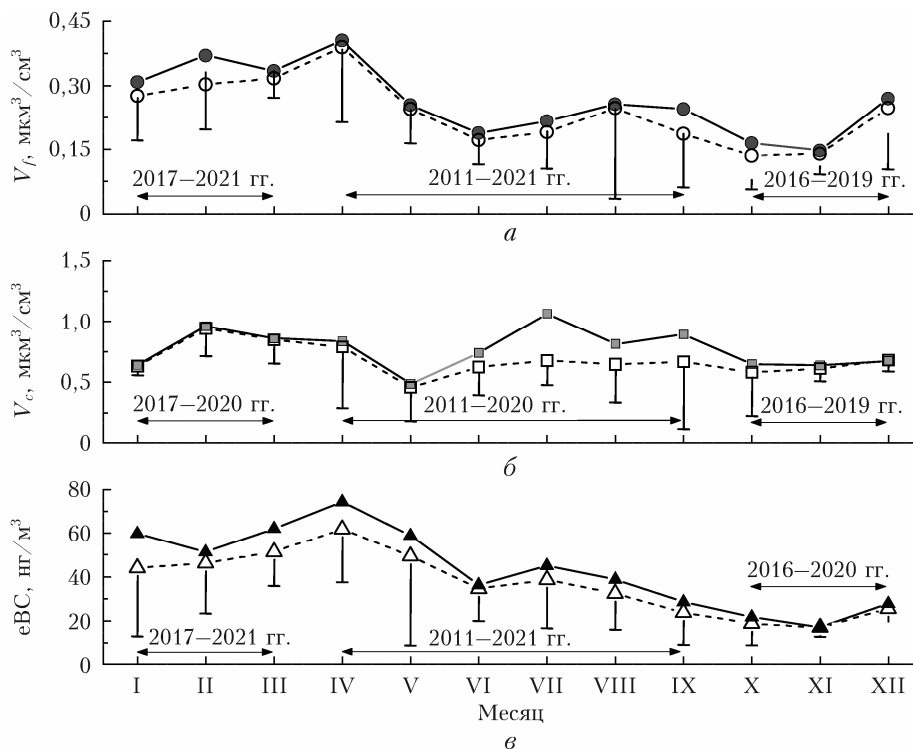


Рис. 4. Годовой ход V_f (а), V_c (б) и $e\text{BC}$ (в) в Баренцбурге (пунктирные линии – дополнительная фильтрация с помощью критерия 3σ)

Таблица 3

Статистические характеристики концентраций аэрозоля и еВС в разные месяцы (первая строка – среднее \pm СКО, вторая – минимальные и максимальные значения)

Месяц	$N_A, \text{см}^{-3}$	$V_f, \text{мкм}^3/\text{см}^3$	$V_c, \text{мкм}^3/\text{см}^3$	еВС, $\text{нг}/\text{м}^3$
Январь	$17,20 \pm 6,46$	$0,30 \pm 0,13$	$0,64 \pm 0,08$	$59,7 \pm 59,8$
	$10,97 \pm 23,86$	$0,17 \pm 0,42$	$0,54 \pm 0,69$	18 ± 160
Февраль	$19,07 \pm 6,45$	$0,34 \pm 0,14$	$0,96 \pm 0,23$	$51,2 \pm 26,1$
	$13,88 \pm 26,28$	$0,26 \pm 0,50$	$0,71 \pm 1,16$	34 ± 97
Март	$21,65 \pm 2,38$	$0,35 \pm 0,07$	$0,86 \pm 0,20$	$62 \pm 21,3$
	$19,62 \pm 24,27$	$0,29 \pm 0,46$	$0,64 \pm 1,03$	27 ± 85
Апрель	$22,83 \pm 9,98$	$0,41 \pm 0,19$	$0,84 \pm 0,51$	$74,2 \pm 30,7$
	$6,51 \pm 38,72$	$0,13 \pm 0,78$	$0,26 \pm 1,82$	11 ± 115
Май	$13,68 \pm 6,15$	$0,26 \pm 0,09$	$0,49 \pm 0,32$	$58,9 \pm 50,4$
	$5,49 \pm 27,34$	$0,11 \pm 0,41$	$0,17 \pm 0,98$	22 ± 190
Июнь	$16,52 \pm 21,53$	$0,26 \pm 0,22$	$0,74 \pm 0,32$	$36,2 \pm 15,7$
	$3,74 \pm 68,32$	$0,11 \pm 0,80$	$0,26 \pm 1,38$	14 ± 57
Июль	$9,65 \pm 5,50$	$0,22 \pm 0,13$	$1,06 \pm 0,90$	45 ± 29
	$1,44 \pm 17,90$	$0,09 \pm 0,48$	$0,29 \pm 3,21$	$16,1 \pm 106,6$
Август	$11,92 \pm 9,23$	$0,26 \pm 0,22$	$0,70 \pm 0,33$	$38,7 \pm 26,4$
	$4,26 \pm 28,09$	$0,06 \pm 0,76$	$0,2 \pm 1,27$	$14,7 \pm 101,2$
Сентябрь	$11,25 \pm 8,19$	$0,25 \pm 0,24$	$0,89 \pm 0,95$	$28,5 \pm 22$
	$6,22 \pm 23,49$	$0,11 \pm 0,67$	$0,37 \pm 2,32$	12 ± 74
Октябрь	$4,74 \pm 1,82$	$0,08 \pm 0,02$	$0,65 \pm 0,46$	$21,7 \pm 14,9$
	$2,81 \pm 6,43$	$0,05 \pm 0,09$	$0,24 \pm 1,15$	9 ± 48
Ноябрь	$6,18 \pm 0,69$	$0,11 \pm 0,02$	$0,64 \pm 0,14$	$17,1 \pm 4,1$
	$5,45 \pm 6,82$	$0,10 \pm 0,13$	$0,49 \pm 0,78$	11 ± 20
Декабрь	$10,98 \pm 4,58$	$0,2 \pm 0,09$	$0,67 \pm 0,11$	$27,7 \pm 21,8$
	$6,93 \pm 15,95$	$0,10 \pm 0,29$	$0,55 \pm 0,76$	14 ± 66

При дополнительной фильтрации данных V_c по критерию 3σ летний максимум снижается и становится на треть ниже зимне-весеннего, т.е. формирование летне-осеннего максимума V_c связано не только с повышением среднего уровня содержания аэрозоля, но и в значительной степени с кратковременными и сильными всплесками концентрации грубодисперсного аэрозоля.

Возрастание концентрации аэрозоля (преимущественно субмикронного) в атмосфере в холодный период года обусловлено, по-видимому, увеличением переноса загрязняющих веществ из средних широт в сочетании с температурными инверсиями, которые приводят к накоплению аэрозоля в атмосфере Арктики [24–31]. В летне-осенний период формируются наиболее благоприятные условия для выноса крупных частиц (пыли и морского аэрозоля) с подстилающей поверхности. Увеличение содержания субмикронного аэрозоля в теплый период может быть связано с переносом дымов лесных пожаров.

Минимальные значения V_f наблюдаются в июне и октябре–ноябре, а V_c – в мае и октябре–ноябре. В целом сезонная динамика концентраций в большей степени свойственна субмикронному аэрозолю. Различия максимальных и минимальных месячных значений по отношению к среднему за год для двух выборок V_f (рис. 4, а) составляет 98 и 107%. Для V_c аналогичные значения равны 75 и 71%.

В годовом ходе массовой концентрации еВС (рис. 4, в) отчетливо видно повышение значений в холодный период года с максимумом в апреле

($74,2 \pm 30,7 \text{ нг}/\text{м}^3$). Далее наблюдается спад еВС до октября–ноября ($19,6 \pm 11,1 \text{ нг}/\text{м}^3$) с последующим ростом в декабре. На фоне летнего спада можно выделить небольшой вторичный максимум в июле–августе ($41,5 \pm 26,9 \text{ нг}/\text{м}^3$). Похожая сезонная динамика еВС (зимний максимум и летний минимум) характерна и для других арктических станций: Цепелин, Нью-Алесунн (арх. Шпицберген), Алерт (Канада) и Барроу (Аляска) [32–37].

Сравнение «зимних» (декабрь – апрель) значений еВС в Баренцбурге со значениями на других арктических станциях показало, что различия могут составлять от –25% (Нью-Алесунн, 2009–2010 гг. [34]) до +75% (Алерт, 1989–2011 гг. [33]). В среднем расхождение не превышает 10%.

В июне – сентябре средние значения еВС в Баренцбурге выше уровня на других станциях в два–три раза. Такое различие объясняется как повышенным вкладом антропогенных источников и пыли (в том числе угольной), поступающей с подстилающей поверхности, так и, возможно, влиянием переносов дымового аэрозоля от лесных пожаров. Отметим, что большинство литературных данных, использованных при сопоставлении, относится к периоду до 2011 г. Если рассматривать более близкий к нашим измерениям временной период, например на ст. Барроу (2010–2014 гг.) [34], то здесь также присутствует вторичный летний максимум в июле–августе ($\sim 45 \text{ нг}/\text{м}^3$), обусловленный вкладом дымов лесных пожаров, а среднее различие месячных значений еВС с Баренцбургом составляет 11%.

Обратим внимание, что исключение выбросов (критерий 3σ) не приводит к изменению характера годового хода еВС. В среднем различие двух выборок составляет $6,5 \text{ нг/м}^3$ (13%).

Межгодовая изменчивость. Межгодовые изменения концентраций аэрозоля и черного углерода оценивались только для периодов полярного дня — по средним значениям концентраций, измеренным с апреля по сентябрь каждого года (рис. 5). Анализ

Причем основной вклад в межгодовую изменчивость еВС вносит статистически значимый (по уровню 0,05) отрицательный тренд. В среднем уменьшение массовой концентрации еВС за 10 лет (с 2012 г.) составило $46,7 \text{ нг/м}^3$. При исключении тренда коэффициент вариаций межгодовых колебаний снижается до 0,18. Отметим, что отрицательный межгодовой тренд еВС наблюдается на многих арктических станциях (с конца 1980-х гг.) и связывается автора-

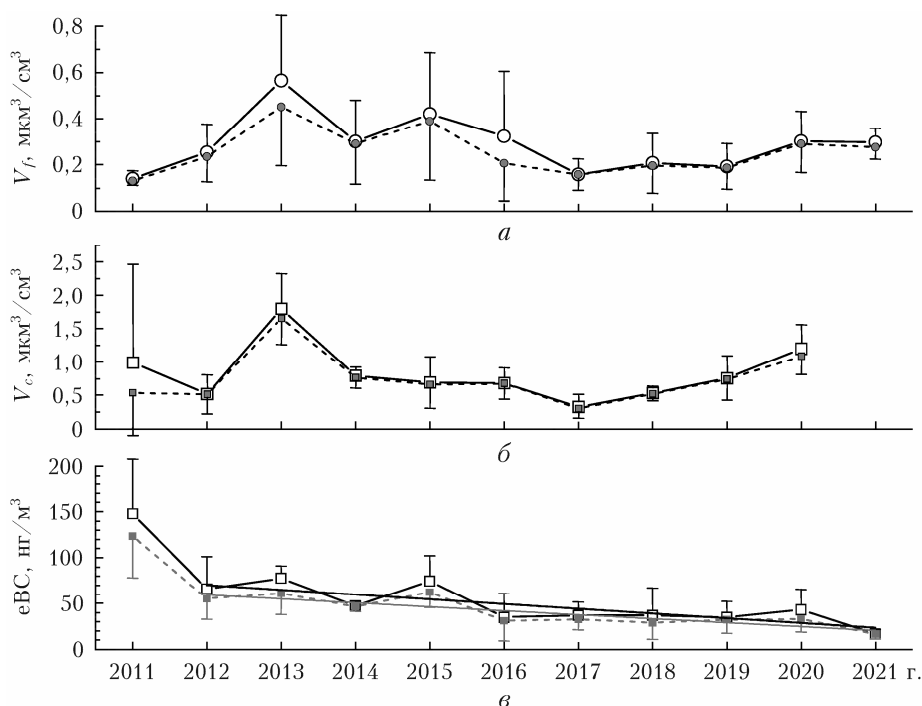


Рис. 5. Межгодовая изменчивость концентраций V_f (а), V_c (б) и еВС (в) для периодов полярного дня (пунктирные линии — дополнительная фильтрация по критерию 3σ)

многолетней изменчивости приземных объемных концентраций аэрозоля (рис. 5, а, б) показал, что более устойчивой характеристикой является концентрация V_f . Отношение максимальных к минимальным значениям V_f составляет ~ 4 , а коэффициент вариаций — 0,43. Несколько большие межгодовые колебания наблюдаются у концентраций V_c , соответствующие параметры составляют $\sim 5,4$ и 0,5.

На фоне межгодовых колебаний выделяются пики V_f и V_c в 2013 г. Отличие этого года от остальных заключается в том, что с мая по июль измерений не проводилось. При исключении 2013 г. коэффициенты вариаций среднегодовых значений V_f и V_c снижаются до 0,33 и 0,36 соответственно.

В среднегодовых значениях еВС выделяется 2011 г. (рис. 5, в). Массовая концентрация черного углерода в этом году более чем в три раза превышала среднюю за весь следующий период, разница с 2012 г. почти двукратная. Причина такого резкого изменения — модернизация в 2012 г. системы очистки выбросов на ТЭЦ и окончание работ по капитальному ремонту жилья и микроструктуры поселка. Если исключить 2011 г. из анализа, то коэффициент вариаций среднегодовых значений еВС составит 0,42.

ми работ [33, 35] со снижением промышленных выбросов. Устойчивая тенденция к уменьшению среднегодовых значений еВС в Баренцбурге в течение последних 10 лет свидетельствует также и о снижении местной антропогенной нагрузки на атмосферу.

Заключение

Анализ результатов измерений характеристик аэрозоля в Баренцбурге в 2011–2021 гг. позволяет сделать следующие выводы.

Годовой ход АОТ характеризуется двумя максимумами: в апреле-мае ($\tau_{0,5}^{-a} = 0,081$) и июле-августе ($\tau_{0,5}^{-a} = 0,099$). Минимальные значения наблюдаются в сентябре ($\tau_{0,5}^{-a} = 0,072$). Динамика АОТ в период исследований определялась совокупностью нескольких факторов: 1) статистически значимым отрицательным межгодовым трендом весеннего максимума (в среднем $-0,03$ за 11 лет); 2) возросшим в последнее десятилетие вкладом в замутнение атмосферы в Баренцбурге выносов дымового аэрозоля из бореальной зоны; 3) значимым отрицательным трендом грубодисперсной составляющей АОТ (в среднем $-0,012$ за 11 лет).

В годовом ходе объемных концентраций субмикронного и грубодисперсного аэрозоля в приземном слое атмосферы можно выделить два максимума: февраль – апрель ($V_f = 0,36 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$, $V_c = 0,90 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$) и июль – сентябрь ($V_f = 0,24 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$, $V_c = 0,88 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$). Минимальные значения V_f наблюдаются в июне и октябре-ноябре, а V_c – в мае и октябре-ноябре.

Сезонная динамика массовой концентрации черного углерода характеризуется более высокими значениями в холодный период года с максимумом в апреле (еВС = $74,2 \text{ нг}/\text{м}^3$) и последующим спадом к октябрю-ноябрю (еВС = $19,6 \text{ нг}/\text{м}^3$). На фоне летнего спада можно выделить небольшой вторичный максимум в июле-августе (еВС = $41,5 \text{ нг}/\text{м}^3$).

В межгодовой изменчивости еВС наблюдается статистически значимый отрицательный тренд. В среднем уменьшение массовой концентрации черного углерода за 10 лет (2012–2021 гг.) составило $46,7 \text{ нг}/\text{м}^3$.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного проекта ИОА СО РАН № 121031500342-0. Расчет АОТ выполнялся с использованием методик и оборудования ЦКП «Атмосфера» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-661).

Список литературы

1. *Physics and Chemistry of the Arctic Atmosphere* / A. Kokhanovsky, C. Tomasi (eds.). England: Springer, 2020. 717 p. DOI: 10.1007/978-3-030-33566-3.
2. *Asmi E., Kondratyev V., Brus D., Laurila T., Lihavainen H., Backman J., Vakkari V., Aurela M., Hakkarla J., Viisanen Y., Uttal T., Ivaikhov V., Makshatas A.* Aerosol size distribution seasonal characteristics measured in Tiksi, Russian Arctic // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, N 3. P. 1271–1287. DOI: 10.5194/acp-16-1271-2016.
3. *Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Кабанов Д.М., Калашникова Д.А., Козлов В.С., Круглинский И.А., Макаров В.И., Макштас А.П., Попова С.А., Радионов В.Ф., Симонова Г.В., Турчинович Ю.С., Ходжер Т.В., Хуриганова О.И., Чанкина О.В., Чернов Д.Г.* Результаты измерений физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля на научно-исследовательском стационаре «Ледовая база “Мыс Баранова”» в 2018 г. // *Оптика атмосф. и океана.* 2019. Т. 32, № 6. С. 421–429; *Sakerin S.M., Golobokova L.P., Kabanov D.M., Kalashnikova D.A., Kozlov V.S., Kругlinский I.A., Makarov V.I., Makshatas A.P., Popova S.A., Radionov V.F., Simonova G.V., Turchinovich Yu.S., Khodzher T.V., Khuriganova O.I., Chankina O.V., Chernov D.G.* Measurements of physicochemical characteristics of atmospheric aerosol at research station ice base Cape Baranov in 2018 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 5. P. 511–520. DOI: 10.1134/S1024856019050130.
4. *Сакерин С.М., Чернов Д.Г., Кабанов Д.М., Козлов В.С., Панченко М.В., Полькин В.В., Радионов В.Ф.* Предварительные результаты исследований аэрозольных характеристик атмосферы в районе Баренцбурга (Шпицберген) // *Проблемы Арктики и Антарктики.* 2012. Т. 9, № 1. С. 20–31.
5. *The current state of the natural environment on Spitzbergen archipelago* / L.M. Savatyugin. St. Petersburg: AARI, 2020. 302 p. DOI: 10.30758/978-5-98364-101-3.
6. *Kabanov D.M., Ritter C., Sakerin S.M.* Interannual and seasonal variations in aerosol optical depth of the atmosphere in two regions of Spitsbergen Archipelago (2002–2018) // *Atmos. Meas. Techniq.* 2020. V. 13, N 10. P. 5303–5317. DOI: 10.5194/amt-13-5303-2020.
7. *Herber A., Thomason L.W., Germandt H., Leiterer U., Nagel D., Schulz K., Kaptu J., Albrecht T., Notholt J.* Continuous day and night aerosol optical depth observations in the Arctic between 1991 and 1999 // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107, N D10. P. AAC6-1–AAC6-13. DOI: 10.1029/2001JD000536.
8. *Glantz P., Bourassa A., Herber A., Iversen T., Karlsson J., Kirkevåg A., Maturilli M., Seland Ø., Stebel K., Struthers H., Matthias 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, N 13. P. 8169–8188. DOI: 10.1002/2013JD021279.
9. *Chen Y.-C., Hamre B., Frette Q., Muyimbwa D., Blindheim S., Stebel K., Sobolewski P., Toledano C., Stannnes J.* Aerosol optical properties in Northern Norway and Svalbard // *Appl. Opt.* 2016. V. 55, N 4. P. 660–672. DOI: 10.1364/AO.55.000660.
10. *Pakszys P., Zielinski T.* Aerosol optical properties over Svalbard: A comparison between Ny-Elesund and Hornsund // *Oceanologia.* 2017. V. 59, N 4. P. 431–444. DOI: 10.1016/j.oceano.2017.05.002.
11. *Счетчик аэрозольных частиц АЗ-10-0.* URL: <https://eco-intech.com/product/schetchik-chastits-az-10> (дата обращения: 6.05.2022).
12. *Petzold A., Ogren J.A., Fiebig M., Laj P., Li S.-M., Baltensperger U., Holzner-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, N 16. P. 8365–8379. URL: www.atmos-chem-phys.net/13/8365/2013/. DOI: 10.5194/acp-13-8365-2013.
13. *Козлов В.С., Шмаргунов В.П., Полькин В.В.* Спектрофотометры для исследования характеристик поглощения света аэрозольными частицами // *Приборы и техника эксперимента.* 2008. № 5. С. 155–157.
14. *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.
15. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ростов А.П., Турчинович С.А., Князев В.В.* Солнечные фотометры для измерений спектральной прозрачности атмосферы в стационарных и мобильных условиях // *Оптика атмосф. и океана.* 2012. Т. 25, № 12. С. 1112–1117; *Sakerin S.M., Kabanov D.M., Rostov A.P., Turchinovich S.A., Knyazev V.V.* Sun photometers for measuring spectral air transparency in stationary and mobile conditions // *Atmos. Ocean. Opt.* 2013. V. 26, N 4. P. 352–356.
16. *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.
17. *Kabanov D.M., Maslovsky A.S., Radionov V.F., Sakerin S.M., Sidorova O.R., Chernov D.G.* Estimate of con-

- tribution from different variability scales to variation in aerosol characteristics on Spitsbergen Archipelago // Proc. SPIE. DOI: 10.1117/12.2644068.
18. Lawrence Z.D., Perlwitz J., Butler A.H., Manney G.L., Newman P.A., Lee S.H., Nash E.R. The remarkably strong arctic stratospheric polar vortex of winter 2020: links to record-breaking Arctic Oscillation and ozone loss // J. Geophys. Res.: Atmos. 2020. V. 125, N 22. DOI: 10.1029/2020JD033271.
 19. Engelmann R., Ansmann A., Ohneiser K., Griesche H., Radenz M., Hofer J., Althausen D., Dahlke S., Maturilli M., Veselovskii I., Jimenez C., Wiesen R., Baars H., Bühl J., Gebauer H., Haarig M., Seifert P., Wandinger U., Macke A. Wildfire smoke, Arctic haze, and aerosol effects on mixed-phase and cirrus clouds over the North Pole region during MOSAiC // Atmos. Chem. Phys. 2021. V. 21, N 17. P. 13397–13423. DOI: 10.5194/acp-21-13397-2021.
 20. Johnson M.S., Strawbridge K., Knowland K.E., Keller C., Travis M. Long-range transport of Siberian biomass burning emissions to North America during FIREX-AQ // Atmos. Environ. 2021. V. 252. P. 118241. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2021.118241.
 21. Baars H., Ansmann A., Ohneiser K., Haarig M., Engelmann R., Althausen D., Hanssen I., Gausa M., Pietruczuk A., Szkop A., Stachlewska I.S., Wang D., Reichardt J., Skupin A., Mattis I., Trickl T., Vogelmann H., Navas-Guzmán F., Haefele A., Acheson K., Ruth A.A., Tatarov B., Müller D., Hu Q., Podvin T., Goloub P., Veselovskii I., Pietras C., Haeffelin M., Fréville P., Sicard M., Comeryn A., Fernández García A.J., Molero Menéndez F., Córdoba-Jabonero C., Guerrero-Rascado J.L., Alados-Arboledas L., Bortoli D., Costa M.J., Dionisi D., Liberti G.L., Wang X., Sannino A., Papagiannopoulos N., Boselli A., Mona L., D'Amico G., Romano S., Perrone M.R., Belegante L., Nicolae D., Grigorov I., Gialitaki A., Amiridis V., Soupion A., Papayannis A., Mamouri R.-E., Nisantzi A., Heese B., Hofer J., Schechner Y.Y., Wandinger U., Pappalardo G. The unprecedented 2017–2018 stratospheric smoke event: Decay phase and aerosol properties observed with the EARLINET // Atmos. Chem. Phys. 2019. V. 19. P. 15183–15198. DOI: 10.5194/acp-19-15183-2019.
 22. 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., deLeeuw 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., Larouche P., Broccardo S., Piketh S.J. Aerosol remote sensing in polar regions // Earth-Sci. Rev. 2015. V. 140. P. 108–157. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.11.001.
 23. Shaw G.E. Atmospheric turbidity in the Polar regions // J. Appl. Meteorol. 1982. V. 21. P. 1080–1088.
 24. Kondratyev K.Ya., Izev L.S., Krapivin V.F., Varotsof C.A. Atmospheric aerosol properties, formation processes, and impacts: From nano- to global scales. Chichester, UK: Springer, 2006. 572 p.
 25. Quinn P., Shaw G., Andrews E., Dutton E.G., Ruoho-Airola T., Gong S.L. Arctic haze: Current trends and knowledge gaps // Tellus B. 2007. V. 59, N 1. P. 99–114. DOI: 10.1111/j.1600-0889.2006.00238.x.
 26. Sharma S., Ishizawa M., Chan D., Lavoué D., Andrews E., Eleftheriadis K., Maksyutov S. 16-year simulation of Arctic black carbon: Transport, source contribution, and sensitivity analysis on deposition // J. Geophys. Res.: Atmos. 2013. V. 118, N 1. P. 943–964.
 27. 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, N 17. P. 8833–8855.
 28. Yttri K.E., Lund Myhre C., Eckhardt S., Fiebig M., Dye C., Hirdman D., Ström J., Klimont Z., Stohl A. Quantifying black carbon from biomass burning by means of levoglucosan – a one-year time series at the Arctic observatory Zeppelin // Atmos. Chem. Phys. 2014. V. 14. P. 6427–6442. DOI: 10.5194/acp-14-6427-2014.
 29. Breider T.J., Mickley L.J., Jacob D.J., Wang Q., Fisher J.A., Chang R.Y.-W., Alexander B. Annual distributions and sources of Arctic aerosol components, aerosol optical depth, and aerosol absorption // J. Geophys. Res.: Atmos. 2014. V. 119, N 7. P. 4107–4124. DOI: 10.1002/2013JD020996.
 30. Wang H., Rasch P.J., Easter R.C., Singh B., Zhang R., Ma P.-L., Qian Y., Ghan S.J., Beagley N. Using an explicit emission tagging method in global modeling of source-receptor relationships for black carbon in the Arctic: Variations, sources, and transport pathways // J. Geophys. Res.: Atmos. 2014. V. 119, N 22. P. 12888–12909. DOI: 10.1002/2014JD022297.
 31. Ikeda K., Tanimoto H., Sugita T., Akiyoshi H., Kanaya Y., Zhu C., Taketani F. Tagged tracer simulations of black carbon in the Arctic: Transport, source contributions, and budget // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17, N 17. P. 10515–10533. DOI: 10.5194/acp-17-10515-2017.
 32. Eleftheriadis K., Vratolis S., Nyeki S. Aerosol black carbon in the European Arctic: Measurements at Zeppelin station, Ny-Elesund, Svalbard from 1998–2007 // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. L02809. DOI: 10.1029/2008GL035741.
 33. Stone R.S., Sharma S., Herber A., Eleftheriadis K., Nelson D.W. A characterization of Arctic aerosols on the basis of aerosol optical depth and black carbon measurements // ELEMENTA. 2014. V. 2. DOI: 10.12952/journal.elementa.000027.
 34. Xu Jun-Wei, Martin R.V., Morrow A., Sharma S., Huang L., Leaitch W.R., Burkart J., Schulz H., Zannatta M., Willis M.D., Henze D.K., Lee C.J., Herber A.B., Abbatt J.P.D. Source attribution of Arctic black carbon constrained by aircraft and surface measurements // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17, N 19. P. 11971–11989. DOI: 10.5194/acp-17-11971-2017.
 35. Hirdman D., Burkhart J.F., Sodemann H., Eckhardt S., Jefferson A., Quinn P.K., Sharma S., Ström J., Stoh A. Long-term trends of black carbon and sulphate aerosol in the Arctic: Changes in atmospheric transport and source region emissions // Atmos. Chem. Phys. 2010. V. 10, N 19. P. 9351–9368. DOI: 10.5194/acp-10-9351-2010.
 36. Molders N., Edwin S.G. Review of Black Carbon in the Arctic – origin, measurement methods, and observations // Open J. Air Pollut. 2018. V. 7, N 2. P. 181–213. DOI: 10.4236/ojar.2018.72010.
 37. 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; Zhuravleva T.B., Artyushina A.V., Vinogradova A.A., Voronina Yu.V. Black carbon in the near-surface at-

phere far away from emission sources: Comparison of measurements and MERRA-2 reanalysis data // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 6. P. 591–601.

D.M. Kabanov, A.S. Maslovsky, V.F. Radionov, S.M. Sakerin, O.R. Sidorova, D.G. Chernov. **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.**

The results of the analysis of seasonal and interannual variability of the aerosol optical depth of the atmosphere (AOD), the aerosol volume concentration, and the mass concentration of black carbon in the surface layer obtained at observations in Barentsburg (Spitzbergen archipelago) in 2011–2021 are presented. The annual behavior of all parameters is characterized by two maxima: spring (or winter-spring) and summer, apparently due to the transport of pollutants from the middle latitudes in the winter-spring period and smoke aerosol in summer. In the interannual variability, there are significant negative trends in the fine AOT component (-0.012 over 11 years) and the mass concentration of the absorbing substance (by 46.7 ng/m^3 over 10 years).