

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ  
ATMOSPHERE AND HYDROSPHERE PHYSICS

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-421-434>  
УДК 551.510.4



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL PAPER

Характеристики аэрозоля на научно-исследовательском  
станции «Ледовая база Мыс Баранова»  
в 2018–2023 гг.

С.М. Сакерин<sup>1</sup>✉, Д.М. Кабанов<sup>1</sup>, М.А. Лоскутова<sup>2</sup>,  
Д.Д. Ризе<sup>2</sup>, Д.Г. Чернов<sup>1</sup>, Ю.С. Турчинович<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБНУ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup> ГИЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,  
Санкт-Петербург, Россия

✉ [sms@iao.ru](mailto:sms@iao.ru)

© СМС, 0000-0002-0419-4979; ДМК, 0009-0004-3999-9226

**Аннотация.** Представлено обобщение результатов пятилетнего (апрель 2018 г. — май 2023 г.) цикла измерений характеристик атмосферного аэрозоля на полярной станции «Ледовая база Мыс Баранова» (архипелаг Северная Земля). Средние значения характеристик аэрозоля за общий период наблюдений составили: объемы частиц субмикронного и грубодисперсного аэрозоля 0,43 и 0,46 мкм<sup>3</sup>/см<sup>3</sup> соответственно; концентрация поглощающего вещества (черного углерода) — 45,8 нг/м<sup>3</sup>; аэрозольная оптическая толщина атмосферы на длине волны 0,5 мкм — 0,08. Обсуждаются особенности среднего (многолетнего) годового хода приземных концентраций аэрозоля и черного углерода в сравнении с аналогичными данными на полярной станции в Баренцбурге (архипелаг Шпицберген, 2011–2022 гг.) и модельных расчетов — реанализа MERRA-2.

**Ключевые слова:** Арктика, атмосфера, аэрозоль, сезонная изменчивость, черный углерод

**Для цитирования:** 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; 69(4):421–434. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-421-434>

Поступила 28.08.2023

После переработки 22.09.2023

Принята 25.09.2023

## Characteristics of aerosol at the research base “Ice Cape Baranova” in 2018–2023

Sergey M. Sakerin<sup>✉</sup>, Dmitry M. Kabanov<sup>1</sup>, Marina A. Loskutova<sup>2</sup>,  
Denis D. Rize<sup>2</sup>, Dmitry G. Chernov<sup>1</sup>, Yuri S. Turchinovich<sup>1</sup>

<sup>1</sup> V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch RAS, Tomsk, Russia

<sup>2</sup> State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

✉sms@iao.ru

© SMS, 0000-0002-0419-4979; DMK, 0009-0004-3999-9226

**Abstract.** Atmospheric aerosol plays an important role in the processes of radiative transfers and mass exchange by different substances in the “continent–atmosphere–ocean” system. In this paper we discuss the results of a five-year measurement cycle of the atmospheric aerosol characteristics at the polar station “Ice base Cape Baranov”, located on the Bolshevik Island (the Severnaya Zemlya Archipelago). The set of the characteristics analyzed includes: the aerosol optical depth (AOD) of the atmosphere; the ground concentration of aerosol particles in the radius range of 0.15–5 microns; the content of the absorbing substance (soot) in the aerosol in the equivalent of elemental black carbon. The average values of the aerosol characteristics for the general measurement period (from April 2018 to May 2023) were: volumes of submicron and coarse aerosol particles 0.43 and 0.46  $\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$ , respectively; mass concentration of black carbon — 45.8  $\text{ng}/\text{m}^3$ ; AOT of the atmosphere at a wavelength of 0.5  $\mu\text{m}$  — 0.08; Angstrom selectivity exponent — 1.67. The average annual variation of aerosol and black carbon concentrations is characterized by a maximum in winter (January–March) and a minimum in summer (June–August). A comparison is made against the data from analogous measurements of aerosol characteristics at the polar station in Barentsburg (the Spitsbergen Archipelago) and against the data from model calculations, i. e., MERRA-2 reanalysis. A distinctive feature of the data in the Cape Baranov area is the low content of coarse aerosol — 1.7 less than in Barentsburg. There is agreement with the annual variation of black carbon concentrations at other polar stations, but the opposite nature of the seasonal variability of model (MERRA-2) concentrations: low values in winter and high values in summer. It is shown that the average spectral AODs of the atmosphere at the “Cape Baranov” are intermediate values between the data from polar stations in Ny-Ålesund and Barentsburg.

**Keywords:** the Arctic, aerosol, atmosphere, black carbon, seasonal variability

**For citation:** Sakerin S.M., Kabanov D.M., Loskutova M.A., Rize D.D., Chernov D.G., Turchinovich Yu.S. Characteristics of aerosol at the research base “Ice Cape Baranova” in 2018–2023. *Arctic and Antarctic Research*. 2023; 69 (4): 421–434. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-421-434>

Received 28.08.2023

Revised 22.09.2023

Accepted 25.09.2023

### Введение

Актуальность исследований атмосферного аэрозоля обусловлена его важной ролью в процессах распространения оптического излучения (рассеяние, поглощение) и формировании радиационного режима атмосферы [1, 2]. Кроме того, переносы аэрозоля, наряду с речным стоком, обеспечивают массообмен различных веществ между континентом и океаном [3]. Исследования аэрозоля в арктической атмосфере начались в конце 70-х годов прошлого века [4], но приобрели регулярный характер в последние два десятилетия. Интерес к полярным районам в современный период обусловлен большой динамикой природной среды и уязвимостью к изменениям климата [2, 5].

Многолетние наблюдения на полярных станциях и в арктических экспедициях показали низкое содержание аэрозоля в сравнении с континентальными районами

средних широт [2, 4, 5]. Генерация аэрозоля на территории Северного Ледовитого океана (СЛО) ослаблена из-за отсутствия источников антропогенного и органического аэрозоля (промышленность, растительность), а также частичного покрытия подстилающей поверхности льдами и снегом. Пониженная эмиссия аэрозоля от местных источников дополняется дальними переносами субмикронного аэрозоля природного и антропогенного происхождения из средних широт: дым лесных пожаров и сжигание попутного газа, выбросы предприятий промышленности и энергетики, транспорта и систем отопления [6–9]. Влияние дальних переносов аэрозоля с континентов на сотни и тысячи километров не ограничивается только атмосферой. В конечном счете загрязняющие вещества, переносимые аэрозолем, осаждаются на подстилающую поверхность, изменяя ее химический состав и оптические характеристики.

Для изучения аэрозольного состава арктической атмосферы организованы регулярные многолетние наблюдения на островных и береговых станциях [2]. Расположение этих станций неравномерно: семь находятся в американском секторе Арктики; четыре — в европейском секторе (включая Баренцбург на Шпицбергене [10]) и только две — в азиатском секторе (Тикси [11] и «Ледовая база Мыс Баранова» [12]). Кроме наблюдений на полярных станциях, проводятся исследования аэрозоля в морских [13–15] и самолетных [16, 17] экспедициях в различных районах СЛО. Однако данные эпизодических экспедиций не позволяют оценить сезонную изменчивость характеристик аэрозоля. Дефицит натуральных измерений характеристик аэрозоля восполняется модельными расчетами переносов атмосферных загрязнений из средних широт [8, 18, 19].

В настоящей работе обобщены результаты пятилетнего цикла измерений оптических и микрофизических характеристик аэрозоля на научно-исследовательском стационаре «Ледовая база Мыс Баранова» (далее — «Мыс Баранова»), оценена их сезонная изменчивость и проведено сравнение с данными аэрозольных наблюдений в Баренцбурге.

### **Описание измерений и методов**

Станция «Мыс Баранова» находится в северной части острова Большевик архипелага Северная Земля ( $79^{\circ}16'$  с. ш.,  $101^{\circ}45'$  в. д.), расположенного между Карским морем и морем Лаптевых. В азиатской части Арктики это самая северная станция, где ведутся измерения характеристик атмосферного аэрозоля. По природным условиям район станции относится к арктической пустыне со скудной мохово-лишайниковой растительностью. Значительная часть времени территории острова покрыты ледниками и снегом, которые препятствуют выносу почвенного аэрозоля. Поэтому состав атмосферы на островной станции «Мыс Баранова» определяется частицами морского аэрозоля и дальними переносами субмикронного аэрозоля различного типа с континентов.

Измерения оптических и микрофизических характеристик аэрозоля на «Мысе Баранова» ведутся с апреля 2018 г. В настоящей работе анализируются данные, полученные до мая 2023 г. включительно. В измерениях использовался комплект приборов в составе счетчика частиц АЗ-10 [20], аэталометра МДА [21] и солнечного фотометра SPM [22]. По данным фотометрических наблюдений определялись аэрозольная оптическая толщина (АОТ) атмосферы  $\tau^a(\lambda)$ , параметр Ангстрема  $\alpha$  (характеризует степенной спад АОТ с ростом длины волны), грубо- и мелкодисперсных

составляющих ( $\tau^c$  и  $\tau^f$  на длине волны 0,5 мкм). По данным измерений счетчика АЗ-10 рассчитывались: концентрации частиц в диапазоне радиусов 0,15–5 мкм ( $N_a$ ); объемы частиц субмикронного и грубодисперсного аэрозоля радиусом меньше и больше 0,5 мкм ( $V_f$  и  $V_c$ ), функции распределения частиц по объемам ( $dV/dr$ ), а также массовая концентрация аэрозоля  $M_a = \rho \cdot \sum (4/3\pi \cdot r_i^3 \cdot \Delta Ni)$  при плотности аэрозольного вещества  $\rho = 1,5$  г/см<sup>3</sup>. Аэталометром МДА измерялась массовая концентрация поглощающего вещества (сажи) в эквиваленте элементного черного углерода — еBC.

Измерительные приборы располагались в павильоне, удаленном на 200–300 м от жилых и производственных сооружений станции. Приземные характеристики аэрозоля ( $N_a$ , еBC) измерялись в автоматическом режиме, круглосуточно, с периодичностью 1 ч. Фотометрические наблюдения выполнялись сериями из нескольких замеров в ситуациях, когда солнце не было закрыто облаками. Более подробно методики измерений описаны в работах [10, 12, 15]. Общий объем данных, который использовался в статистическом анализе, приведен в табл. 1.

*Таблица 1*

**Периоды измерений и количество дней (часов) измерений характеристик аэрозоля**

*Table 1*

**Periods of measurements and the number of days (hours) of measurements of aerosol characteristics**

Период измерений	$N_a$	еBC	АОТ
2018: 02 апреля — 06 сентября	—	157 (3603)	23 (75)
2019: 24 апреля — 31 декабря	138 (2392)	223 (4857)	20 (61)
2020: весь год	282 (5885)	358 (8345)	—
2021: весь год	295 (6517)	344 (7881)	16 (79)
2022: весь год (еBC: с 01.01 по 31.05)	273 (5955)	148 (3516)	—
2023: январь–май	128 (3049)	151 (3624)	—
Всего	1116 (23798)	1381 (31826)	59 (215)

В рядах наблюдений концентраций аэрозоля и черного углерода встречаются ошибочные данные (промахи), обусловленные как приборными дефектами (пропуски, выбросы значений), так и воздействием локальных источников аэрозоля в месте измерений. Поэтому с помощью специального алгоритма [23] осуществлялась фильтрация исходных данных: (а) выявление короткопериодных ошибочных измерений продолжительностью до 3 ч и (б) восстановление данных. Процедура фильтрации не затрагивает всплески высоких концентраций аэрозоля и черного углерода продолжительностью более 3 ч. Это могут быть как вторжения загрязненного воздуха с континента, так и продолжительное воздействие местных техногенных источников станции при неблагоприятном направлении ветра. Из-за неоднозначности причин таких всплесков концентраций статистические характеристики рассчитывались в двух вариантах: по общему массиву данных и с исключением anomalно высоких значений, превышающих три стандартных отклонения (критерий  $3\sigma$ ). Аналогично — в двух вариантах — рассчитывались статистические характеристики АОТ атмосферы.

Кроме результатов натуральных наблюдений дополнительно рассмотрена изменчивость АОТ и концентраций еBC по модельным данным реанализа MERRA-2, которые

находятся в свободном доступе [24–26]. Продукты реанализа основаны на ассимиляции данных наземных или спутниковых измерений АОТ атмосферы, моделей метеорологических полей, 3D-распределений различных типов аэрозоля и траекторий движения воздуха. Расчет модельных значений АОТ и еВС проводился для района расположения станции «Мыс Баранова» ( $0,5^{\circ} \times 0,625^{\circ}$ ) в период с апреля 2018 г. до мая 2023 г. Заметим, что достоверность результатов модельных расчетов существенно снижается во время полярной ночи из-за прекращения реальных измерений АОТ в высокоширотных районах.

## Обсуждение результатов

### Концентрации аэрозоля и черного углерода

На рис. 1, 2 показан средний годовой ход концентраций еВС и объемов частиц ( $V_f, V_c$ ), рассчитанный по данным 5-летних наблюдений на станции «Мыс Баранова». Самые большие концентрации черного углерода и объемы субмикронных частиц наблюдаются в январе–марте и низкие — в теплый период (июнь–октябрь). С февраля по июнь концентрации  $V_f$  и еВС уменьшаются примерно в 6 и 14 раз соответственно. Более подробные количественные данные о сезонной изменчивости характеристик аэрозоля приведены в табл. 2.

Полученный годовой ход концентраций еВС согласуется с данными других полярных станций на Шпицбергене и в Северной Америке [5, 9, 10, 27]: среднемесячные значения уменьшаются от 50–130  $\text{нг}/\text{м}^3$  в начале года до 5–10  $\text{нг}/\text{м}^3$  в летние месяцы. В отличие от Баренцбурга [10], зимний максимум концентраций еВС и  $V_f$  более узкий и наблюдается не в апреле, а в феврале. Указанные различия могли

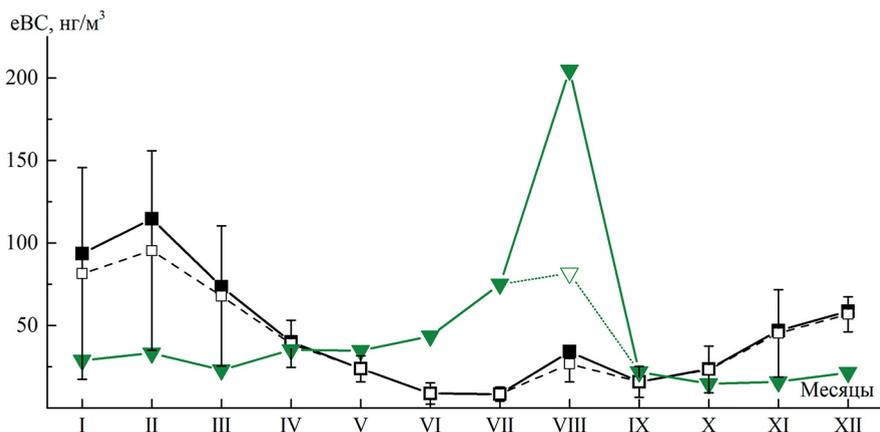


Рис. 1. Годовой ход концентраций еВС в районе «Мыса Баранова» по данным измерений и реанализа MERRA-2.

Штриховыми линиями показан годовой ход концентраций с исключенными аномальными значениями (фильтрация по критерию  $3\sigma$ ); зеленым цветом показаны данные MERRA-2, пунктиром — без августа 2021 г.

Fig. 1. Annual course of eBC concentrations in the Cape Baranov area according to measurements and MERRA-2 reanalysis.

The dashed lines show the annual course of concentrations with excluded anomalous values (filtering according to the  $3\sigma$  criterion); green color shows MERRA-2 data, dotted line — without August 2021

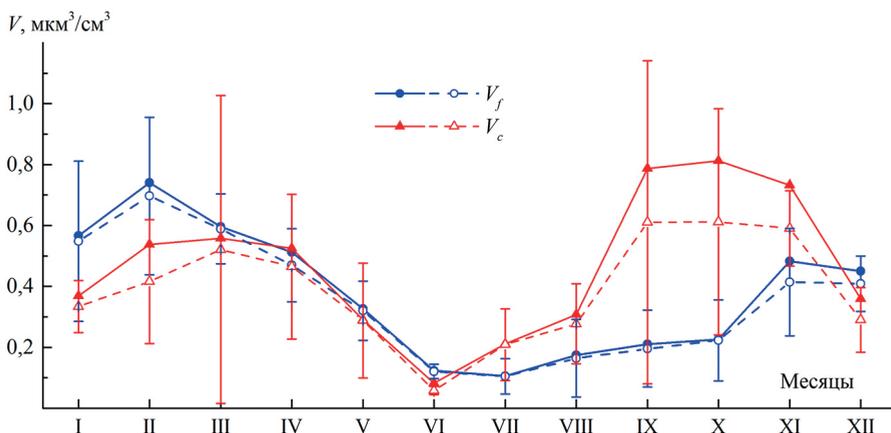


Рис. 2. Годовой ход объемных концентраций V<sub>f</sub> и V<sub>c</sub> на станции «Мыс Баранова».

Штриховыми линиями показан годовой ход концентраций с исключенными аномальными значениями (фильтрация по критерию 3σ)

Fig. 2. Annual course of volumetric concentrations V<sub>f</sub> and V<sub>c</sub> at the Cape Baranov station.

The dashed lines show the annual course of concentrations with excluded anomalous values (filtering according to the 3σ criterion)

Таблица 2

**Статистические характеристики концентраций аэрозоля и черного углерода в разные периоды года**

Table 2

**Statistical characteristics of aerosol and black carbon concentrations in different periods of the year**

Период	$N_p, \text{см}^{-3}$	$V_p, \text{мкм}^3/\text{см}^3$	$V_{p2}, \text{мкм}^3/\text{см}^3$	$M_{a2}, \text{нг}/\text{м}^3$	$eBC, \text{нг}/\text{м}^3$
Январь–март	13,94 ± 9,7 (94,9)	0,63 ± 0,46 (6,49)	0,47 ± 1,24 (62,5)	1,66 ± 2,17 (96,1)	93 ± 99 (867)
Июнь–июль	3,13 ± 4,39 (65,4)	0,13 ± 0,17 (2,21)	0,17 ± 0,62 (24,43)	0,44 ± 1,01 (36,7)	8,4 ± 13 (197)
Сентябрь–октябрь	4,99 ± 5,88 (37,9)	0,24 ± 0,26 (1,68)	0,78 ± 1,45 (43,45)	1,53 ± 2,39 (65,7)	20,4 ± 32 (302)
Все данные	9,49 ± 9,57 (137)	0,43 ± 0,46 (7,46)	0,46 ± 1,09 (62,47)	1,34 ± 2,03 (96,1)	45,8 ± 69,8 (1184)

Примечание. Первая строка — среднее значение и стандартное отклонение, вторая (в скобках) — максимальные значения

Note. First line is mean and standard deviation, second line (in brackets) is maximum values

возникнуть из-за недостаточной продолжительности ряда наблюдений на «Мысе Баранова».

Причины зимнего максимума аэрозольных загрязнений в арктической атмосфере хорошо известна [5–7, 18, 27–29]: увеличение меридиональной составляющей выносов континентального воздуха из средних широт и температурные инверсии, которые приводят к скоплению аэрозоля в отдельных слоях тропосферы (явление «арктическая дымка»).

Обращает на себя внимание противоположная сезонная изменчивость концентраций черного углерода, рассчитанная по модельным данным реанализа MERRA-2 (см. рис. 1): низкие значения  $eBC$  (15–30  $ng/m^3$ ) в холодный период и высокие (75–200  $ng/m^3$ ) в июле–августе. Особенно большой вклад в летний максимум модельных данных внес август 2021 г., когда в Сибири наблюдались массовые лесные пожары. По нашему мнению, в данных MERRA-2 завышено влияние дымов лесных пожаров. На сомнительность данных реанализа указывают также результаты сравнения с данными одновременных ( $\pm 1$  час) измерений  $eBC$  на «Мысе Баранова»: коэффициент взаимной корреляции составляет 0,02. Существенное занижение модельных значений  $eBC$  в зимний период и искажение сезонной изменчивости уже отмечалось в работе [30] при сравнении с данными измерений в обсерватории «Тикси», расположенной на побережье моря Лаптевых. То есть данные MERRA-2 плохо описывают реальную изменчивость приземных концентраций черного углерода в анализируемом секторе СЛЮ.

Годовой ход объемов грубодисперсных частиц (см. рис. 2) отличается от субмикронного аэрозоля: кроме зимнего максимума, наблюдается еще осенний (сентябрь–ноябрь). Как следствие, осенний максимум проявляется и в сезонной изменчивости массовой концентрации аэрозоля ( $M_a$ ), которая пропорциональна объемам двух фракций частиц (см. табл. 2).

Влияние осеннего максимума  $V_c$  можно проследить по сезонной трансформации функций распределения частиц по объемам  $dV/dr$  (рис. 3). В период от зимнего максимума до летнего минимума объемные концентрации аэрозоля уменьшаются примерно в 4 раза во всем диапазоне размеров частиц. В сентябре–октябре концентрации самых мелких частиц ( $r < 0,3$  мкм) остаются на минимуме, а количество

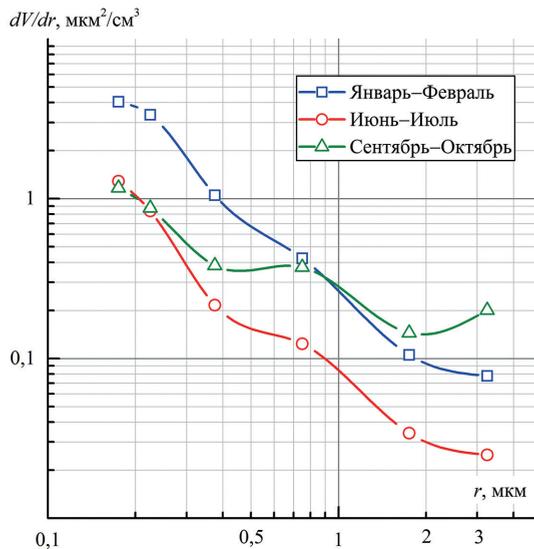


Рис. 3. Средние функции распределения объемов частиц ( $dV/dr$ ) на «Мысе Баранова» в три характерных периода: январь–февраль, июнь–июль и сентябрь–октябрь

Fig. 3. Average volume particle distribution functions ( $dV/dr$ ) at Cape Baranov in three characteristic periods: January–February, June–July and September–October

самых крупных частиц ( $r > 1$  мкм) становится даже больше, чем зимой. Обратим внимание, что мода грубодисперсного аэрозоля, из-за его низкого содержания, в явном виде не проявилась в распределении  $dV/dr$ .

Генезис осеннего максимума концентраций грубодисперсного аэрозоля пока непонятен и требует дальнейшего анализа на более продолжительном ряде наблюдений. Отметим только, что в сентябре–октябре на «Мысе Баранова» наблюдалась самая большая изменчивость (всплески) концентраций грубодисперсных частиц: стандартное отклонение значений  $V_c$  больше, чем во все другие периоды года.

Несмотря на рассмотренные различия годового хода отдельных характеристик аэрозоля ( $eBC$ ,  $V_p$ ,  $V_c$ ,  $M_a$ ), общим для всех является минимум концентраций в июне. Средние значения характеристик аэрозоля за весь период наблюдений составили (см. табл. 2): концентрации черного углерода —  $45,8 \text{ нг/м}^3$ , объемы частиц субмикронного и грубодисперсного аэрозоля —  $0,43$  и  $0,46 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$  соответственно. Интересно, что среднее содержание субмикронного аэрозоля на «Мысе Баранова» в 1,7 раза больше, чем в Баренцбурге, а грубодисперсного аэрозоля — в 1,7 раза меньше [10]. Пониженное содержание грубодисперсного аэрозоля в сравнении с Баренцбургом обусловлено двумя причинами: (а) отсутствием влияния тепловой электростанции; (б) большей закрытостью подстилающей поверхности льдом/снегом, которые препятствуют подъему пыли.

#### **АОТ атмосферы**

Измерения АОТ атмосферы с использованием солнечного фотометра SPM проводились только летом 2018, 2019 и 2021 гг. (см. табл. 1). На рис. 4 приведены средние спектральные зависимости АОТ  $\tau^a(\lambda)$ , рассчитанные для трех лет

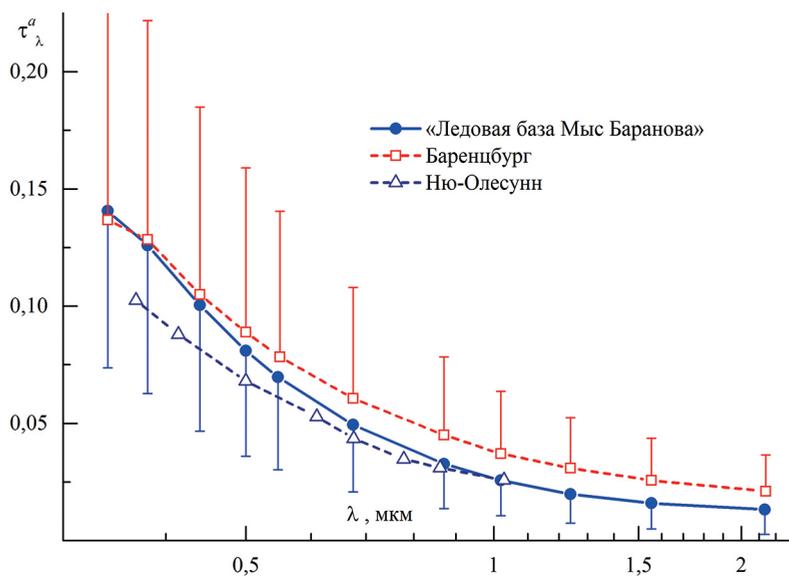


Рис. 4. Средние спектральные зависимости АОТ на станциях «Мыс Баранова», «Баренцбург» [10] и Нью-Олесунн [31]

Fig. 4. Average spectral dependences of the AOD at the «Cape Baranov», Barentsburg [10] and Ny-Ny-Ålesund [31] stations

наблюдений. Здесь же, для сравнения, представлены спектральные зависимости  $\tau^a(\lambda)$  в Баренцбурге (2011–2022 гг.) [10] и Нью-Олесунн (2011–2018 гг.) [31]. Самые низкие значения АОТ наблюдаются на станции Нью-Олесунн. АОТ атмосферы на двух российских станциях имеют близкие значения в коротковолновом диапазоне ( $< 0,4$  мкм), но спектральная зависимость  $\tau^a(\lambda)$  на «Мысе Баранова» отличается более быстрым спадом с ростом длины волны.

В табл. 3 представлены средние, модальные и максимальные значения характеристик АОТ, рассчитанные по общему массиву и с исключением аномально высоких значений (критерий  $3\sigma$ ). Из приведенных данных следует, что редкие случаи высоких замутнений атмосферы, в основном обусловленных дымами лесных пожаров, приводят к увеличению АОТ (0,5 мкм) примерно на 20 % за счет мелкодисперсной составляющей ( $\tau^f$ ). Независимо от вида данных (общий массив или «без аномалий») отличительной особенностью АОТ в районе «Мыса Баранова» являются очень большие значения показателя Ангстрема  $\alpha$  (1,67–1,85). Для сравнения отметим, что показатель Ангстрема в Нью-Олесунне в среднем составляет 1,44 [31], а в Баренцбурге меняется от 1,05 осенью до 1,29 весной [10]. Более высокий показатель Ангстрема на «Мысе Баранова» обусловлен низкими значениями грубодисперсной составляющей АОТ ( $\tau^c = 0,011$ – $0,013$ ) в сравнении с Баренцбургом ( $\tau^c = 0,018$ – $0,022$ ) при сопоставимых значениях мелкодисперсной составляющей ( $\tau^f = 0,05$ – $0,07$ ).

Таблица 3

Статистические характеристики АОТ на станции «Мыс Баранова»

Table 3

Statistical characteristics of the AOT at the station "Cape Baranov"

Вид данных	$\tau_{0,5}^a$	$\tau^f$	$\tau^c$	$\alpha$
Все данные	$0,081 \pm 0,045$ 0,05 // 0,22	$0,068 \pm 0,041$ 0,04 // 0,20	$0,013 \pm 0,011$ 0,01 // 0,05	$1,67 \pm 0,34$ 1,85 // 2,21
«Без аномалий»	$0,066 \pm 0,027$ 0,05 // 0,12	$0,055 \pm 0,026$ 0,04 // 0,10	$0,011 \pm 0,009$ 0,01 // 0,05	$1,68 \pm 0,35$ 1,85 // 2,17

Примечание. Первая строка — среднее значение и стандартное отклонение, вторая — модальные // максимальные значения

Note. First line is mean and standard deviation, second line is modal // maximum values

Из-за фрагментарности фотометрических наблюдений на станции «Мыс Баранова» оценки сезонной изменчивости АОТ в анализируемый период (2018–2023 гг.) выполнены по более полным модельным данным реанализа MERRA-2. Основанием для использования модельных значений АОТ (на длине волны 0,55 мкм) послужила приемлемая взаимосвязь с данными одновременных ( $\pm 1$  ч) реальных измерений. Модельные значения АОТ немного превышают измеренные (на величину 0,02), а коэффициент взаимной корреляции  $R$  составляет 0,58.

Из рис. 5 видно, что годовой ход АОТ, как и в других районах Арктики [5, 10], характеризуется весенним и летним (август) максимумами. Летний максимум АОТ в основном обусловлен выносами дымов лесных пожаров в Сибири [31, 32], которые участились в последние годы [33]. Особенно сильно влияние дымового аэрозоля проявилось летом 2021 г.: августовский максимум АОТ увеличился на 70 %.

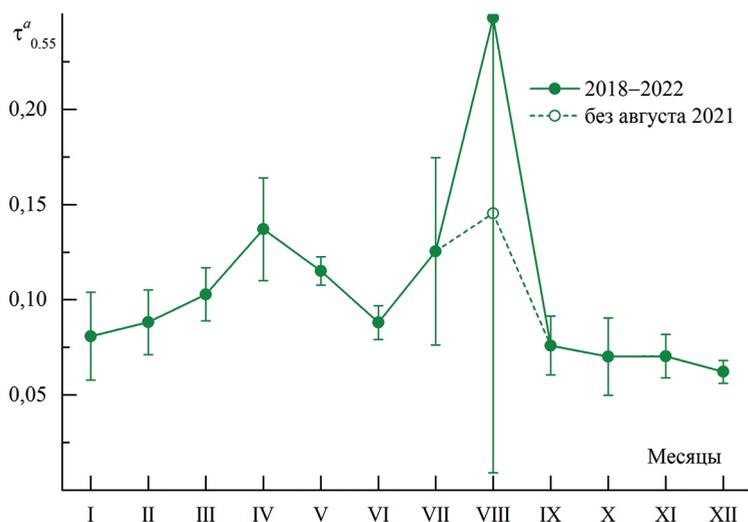


Рис. 5. Годовой ход АОТ (0,5 мкм) атмосферы в районе «Мыса Баранова» по данным реанализа MERRA-2 (2018–2023 гг.)

Fig. 5. Annual course of AOT (0.5 μm) of the atmosphere in the Cape Baranov area according to the MERRA-2 reanalysis data (2018–2023)

### Заклучение

Анализ результатов пятилетнего (апрель 2018 — май 2023) цикла наблюдений характеристик аэрозоля на полярной станции «Мыс Баранова» показал следующее.

1. Средние значения характеристик аэрозоля в исследованный период составляют: АОТ атмосферы (0,5 мкм) — 0,081, при показателе селективности Ангстрема — 1,67; концентрации черного углерода — 45,8 нг/м<sup>3</sup>; объемы частиц субмикронного и грубодисперсного аэрозоля — 0,43 и 0,46 мкм<sup>3</sup>/см<sup>3</sup> соответственно. Отличительной особенностью полученных данных является очень низкое содержание грубодисперсного аэрозоля: средние значения  $V_c$  и  $\tau^c$  примерно в 1,7 меньше, чем в Баренцбурге.

2. Годовой ход содержания субмикронного аэрозоля и черного углерода в атмосфере «Мыса Баранова» согласуется с данными других полярных станций: самые большие концентрации наблюдаются в холодный период и минимальные — летом. Среднемесячные концентрации  $V^j$  и eBC в феврале в 6–14 раз превышают июньские значения. В годовом ходе объемов грубодисперсных частиц ( $V_c$ ), наряду с зимним максимумом, проявляется еще осенний (сентябрь–ноябрь), который пока не получил объяснения.

3. Показано, что годовой ход модельных концентраций eBC (по данным реанализа MERRA-2) имеет противоположный характер: низкие значения — зимой и высокие — летом. Кроме того, взаимосвязь между измеренными и модельными значениями концентраций eBC в районе «Мыса Баранова» практически отсутствует. Аналогичное сравнение измеренных и модельных (MERRA-2) значений АОТ показало приемлемую взаимосвязь ( $R = 0,58$ ). Поэтому сезонный ход модельных АОТ, характеризующийся весенним (апрель) и летним (август) максимумами, можно

считать правдоподобным. Тем более что такая же сезонная изменчивость АОТ наблюдается в Баренцбурге и других полярных районах.

**Конфликт интересов.** Конфликт интересов отсутствует.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность В.П. Шмаргунову за поддержку функционирования аэталометра МДА и Г.К. Аксененко за участие в измерениях. Мы также выражаем признательность разработчикам онлайн-системы данных Giovanni (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni>), поддерживаемой NASA GES DISC и ученым миссии MERRA-2, которые предоставили данные, использованные в нашем исследовании.

**Финансирование.** Исследования выполнялись при финансовой поддержке проекта РФФИ № 21-77-20025. В измерениях АОТ атмосферы использовался солнечный фотометр SPM, входящий в состав ЦКП «Атмосфера» поддержанного Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2021-661). Измерения характеристик аэрозоля проводились по теме НИТР 5.1.4 «Мониторинг состояния и загрязнения природной среды, включая криосферу, в Арктическом бассейне и районах научно-исследовательского стационара “Ледовая база Мыс Баранова”, Гидрометеорологической обсерватории Тикси и Российского научного центра на архипелаге Шпицберген».

**Competing interests.** There is no conflict of interests.

**Acknowledgements.** The authors are grateful to V.P. Shmargunov for supporting the operation of the MDA aetolometer and G.K. Aksenenko for participating in the measurements. We also acknowledge the developers of the Giovanni online data system (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni>) maintained by NASA GES DISC and the MERRA-2 mission scientists who provided the data used in our study.

**Funding.** This work was supported by the Russian Science Foundation (Grant No. 21-77-20025). The AOT data were obtained using the techniques and equipment of the Center for Collective Use “Atmosphere” with a support from the Ministry of Education and Science of Russia (Agreement No. 075-15-2021-661). The measurements of aerosol characteristics were carried out on the subject of NITR 5.1.4 “Monitoring of the state and pollution of the natural environment, including the cryosphere, in the Arctic basin and areas of the research station “Ice Base Cape Baranov”, the Tiksi Hydrometeorological Observatory and the Russian Scientific Center on the Svalbard Archipelago”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

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: Springer/PRAXIS; 2006. 512 p.
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., Ghahremaninezhad R., Girard E., Gong W., Gosselin M., Gourdal M., Hanna S.J., Hayashida H., Herber A.B., Hesaraki S., Hoor P., Huang L., Hussherr 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; 19: 2527–2560.
3. Лисицын А.П. *Современные представления об осадкообразовании в океанах и морях. Океан как природный самописец взаимодействия геосфер Земли*. Мировой океан. Т. 2. Физика, химия, и биология океана. Осадкообразование в океане и взаимодействие геосфер Земли. М.: Научный мир; 2014. С. 337–351.
4. Бартенева О.Д., Никитинская Н.И., Сакунов Г.Г., Веселова Л.К. *Прозрачность толщи атмосферы в видимой и ближней ИК-области спектра*. Л.: Гидрометеоздат; 1991. 224 с.

5. *Springer Polar Sciences series*. Cham: Springer; 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-33566-3>
6. Stohl A. Characteristics of atmospheric transport into the Arctic troposphere. *J. Geophys. Res.* 2006; 111(D11306). <https://doi.org/10.1029/2005JD006888>
7. Wang Q., Jacob D.J., Fisher J.A., Mao J., Leibensperger E.M., Carouge C.C., Le Sager P., Kondo Y., Jimenez J.L., Cubison M.J., Doherty S.J. Sources of carbonaceous aerosols and deposited black carbon in the Arctic in winter-spring: implications for radiative forcing. *Atmos. Chem. Phys.* 2011; 11: 12453–12473. <https://doi.org/10.5194/acp-11-12453-2011>
8. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Атмосферный перенос антропогенных примесей в арктические районы России (1986–2010). *Оптика атмосферы и океана*. 2012;25(6):475–483. Vinogradova A.A., Ponomareva T.Ya. Atmospheric transport of anthropogenic impurities to the Russian Arctic (1986–2010). *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2012;25(6): 414–422. <https://doi.org/10.1134/S1024856012060127>
9. 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; 13: 8833–8855. <https://doi.org/10.5194/acp-13-8833-2013>
10. Кабанов Д.М., Масловский А.С., Радионов В.Ф., Сакерин С.М., Чернов Д.Г., Сидорова О.Р. Сезонная и межгодовая характеристик аэрозоля по данным многолетних (2011–2021 гг.) измерений в Российском научном центре на архипелаге Шпицберген. *Оптика атмосферы и океана*. 2023; 36(6): 433–442. <https://doi.org/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. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2023; 36(6): 433–442. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/AOO20230602>
11. Asmi E., Kondratyev V., Brus D., Laurila T., Lihavainen H., Backman J., Vakkari V., Aurela M., Hatakka J., Viisanen Y., Uttal T., Ivakhov V., Makshtas A. Aerosol size distribution seasonal characteristics measured in Tiksi, Russian Arctic. *Atmos. Chem. Phys.* 2016;16:1271–1287. <https://doi.org/10.5194/acp-16-1271-2016>
12. 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 «Ледовой базе Мыс Баранова» в 2018 г. *Оптика атмосферы и океана*. 2019; 32(6): 421–429. <https://doi.org/10.15372/AOO20190601>  
Sakerin S.M., Golobokova L.P., Kabanov D.M., Kalashnikova D.A., Kozlov V.S., Kruglinsky I.A., Makarov V.I., Makshtas A.P., Popova S.A., Radionov V.F., Simonova G.V., Turchinovich Yu.S., Khodzher T.V., Khuriganowa O.I., Chankina O.V., and Chernov D.G. Measurements of physicochemical characteristics of atmospheric aerosol at research station Ice Base Cape Baranov in 2018. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2019; 32(5): 511–520. <https://doi.org/10.1134/S1024856019050130>
13. Xing J., Bian L., Hu Q., Yu J., Sun C., and Xie Z. Atmospheric black carbon along a cruise path through the Arctic Ocean during the Fifth Chinese Arctic Research Expedition. *Atmosphere*. 2014;5:292–306. <https://doi.org/10.3390/atmos5020292>
14. Шевченко В.П., Копейкин В.М., Новигатский А.Н., Малафеев Г.В. Черный углерод в приземном слое атмосферы над Северной Атлантикой и морями Российской Арктики в июле–сентябре 2017 г. *Океанология*. 2019; 59(5): 771–776. <https://doi.org/10.31857/S0030-1574595771-776>  
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; 59(5): 692–696. <https://doi.org/10.1134/S0001437019050199>

15. 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; 11(11): 1170. <https://doi.org/10.3390/atmos11111170>
16. 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., Nedelec Ph., Paris J.-D., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Вертикальное распределение газовых и аэрозольных примесей воздуха над российским сектором Арктики. *Оптика атмосферы и океана*. 2017; 30(12): 1043–1052. <https://doi.org/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., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N. and Fofonov A.V. Vertical distributions of gaseous and aerosol admixtures in air over the Russian Arctic. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2018; 31(3): 300–310. <https://doi.org/10.1134/S1024856019010020>
17. 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 атмосферы и океана*. 2021; 34(11): 882–890. <https://doi.org/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. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2022; 35(1): 43–51. <https://doi.org/10.1134/S1024856022010146>
18. Виноградова А. А., Иванова Ю. А. Атмосферный перенос черного углерода в Российскую Арктику от различных источников (зима и лето 2000–2016 гг.). *Оптика атмосферы и океана*. 2023; 36(6): 425–432. <https://doi.org/10.15372/AOO20230601>  
Vinogradova A.A., Ivanova Yu.À. Atmospheric transport of black carbon to the Russian Arctic from different sources: winter and summer 2000–2016. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2023; 36(6): 425–432. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/AOO20230601>
19. 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; 33(12): 907–912. <https://doi.org/10.15372/AOO20201201>  
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. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2021; 34(2): 97–103. <https://doi.org/10.1134/S1024856021020111>
20. Счетчик аэрозольных частиц АЗ-10-0. URL: <https://eco-intech.com/product/schetchik-chastits-az-10/> (дата обращения: 06.05.2022)  
AZ-10-0 aerosol particle counter. Available at: <https://eco-intech.com/product/schetchik-chastits-az-10/> (accessed 06.05.2022). (In Russ.)
21. 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, 22nd International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 2016; 1003530. <https://doi.org/10.1117/12.2248009>
22. Сакерин С.М., Кabanov Д.М., Ростов А.П., Турчинович С.А., Князев В.В. Солнечные фотометры для измерений спектральной прозрачности атмосферы в стационарных и мобильных условиях. *Оптика атмосферы и океана*. 2012; 25(12): 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. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2013; 26(4): 352–356. <https://doi.org/10.1134/S102485601304012X>

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 11916, 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics*. 2021; 119161U. <https://doi.org/10.1117/12.2600591>
24. Global Modeling and Assimilation Office (GMAO). 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). 2015. URL: <https://10.5067/FH9A0MLJPC7N> (accessed 15.04 2023).
25. Global Modeling and Assimilation Office (GMAO). 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). 2015. URL: <https://10.5067/KLICLTZ8EM9D> (accessed 15.04 2023).
26. Acker J.G., Leptoukh G. Online analysis enhances use of NASA Earth science data. *Eos, Trans. AGU*. 2007; 88(2): 14,17. <https://doi.org/10.1029/2007EO020003>
27. 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: Science of the Anthropocene*. 2014; 2: 000027. <https://doi.org/10.12952/journal.elementa.000027>
28. Tomasi C., Kokhanovsky A.A., Lupi A., Ritter C., Smirnov A., Mazzola M., Stone R.S., Lanconelli C., Vitale V., Holben B.N., Nyeki S., Wehrli C., Altonen V., de Leeuw G., Rodriguez E., Herber A.B., Stebel K., Stohl A., O'Neill N.T., Radionov V.F., Zielinski T., Petelski T., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Xue Y., Mei L., Istomina L., Wagener R., McArthur B., Sobolewski P.S., Butler J., Kivi R., Courcoux Y., Larouche P., Broccardo S., Piketh S.J. Aerosol remote sensing in polar regions. *Earth-Science Reviews*. 2015; 140: 108–157. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.001>
29. Shaw G.E. The Arctic haze phenomenon. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1995; 76(12): 2403–2414.
30. 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 атмосферы и океана*. 2020; 33(4): 250–260. <https://doi.org/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; 33(6): 591–601. <https://doi.org/10.1134/S102485602006025>
31. 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). *Atmospheric Measurement Techniques*. 2020; 13: 5303–5317.
32. 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; 15(22): 9915–9947. <https://doi.org/10.5194/acp-22-9915-2022>
33. Ponomarev E.I, Zabrodin A.N., Shvetsov E.G., Ponomareva T.V. Wildfire intensity and fire emissions in Siberia. *Fire*. 2023; 7(6): 246. <https://doi.org/10.3390/fire6070246>