

## ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ ATMOSPHERE AND HYDROSPHERE PHYSICS

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-3-338-352>

УДК 551.513.2+550.42



### Сезонная изменчивость физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля на научно-исследовательском стационаре «Ледовая база Мыс Баранова» (арх. Северная Земля)

С.М. Сакерин<sup>1</sup>✉, Л.П. Голобокова<sup>2</sup>, Д.А. Калашникова<sup>1,3</sup>, М.А. Лоскутова<sup>4</sup>,  
Н.А. Онищук<sup>2</sup>, В.В. Польшкин<sup>1</sup>, С.А. Попова<sup>1,5</sup>, Д.Д. Ризе<sup>4</sup>, Г.В. Симонова<sup>3</sup>,  
Ю.С. Турчинович<sup>1</sup>, Т.В. Ходжер<sup>2</sup>, М.Ю. Шиховцев<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> ФГБНУ Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>3</sup> ФГБНУ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,  
Томск, Россия

<sup>4</sup> ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>5</sup> ФГБНУ Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН,  
Новосибирск, Россия

✉ [sms@iao.ru](mailto:sms@iao.ru)

ID СМС, 0000-0002-0419-4979; ЛПГ, 0000-0002-4960-8135; НАО, 0000-0001-8496-2757;  
ТВХ, 0000-0001-5772-7962; МЮШ, 0000-0002-7177-907X8

**Аннотация.** Представлено обобщение данных многолетних (2017–2023 гг.) измерений физико-химических характеристик аэрозоля на научно-исследовательском стационаре «Ледовая база Мыс Баранова»: концентраций ионов, микроэлементов, органического и элементного углерода (ОС, ЕС), а также изотопного состава углерода  $\delta^{13}\text{C}$ . Основной вклад (73 %) в ионный состав аэрозоля вносят морские ионы  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$ , а в элементный состав — терригенные Fe и Al (71 %). У элементов Se, Sn, Sb, Mo, As, Zn, Cu, Cr, Pb и Cd выявлены высокие коэффициенты обогащения, указывающие на техногенное происхождение. По характеру годового хода ионы и элементы разделились на три группы: 1) с зимним максимумом; 2) с летним или осенним максимумом; 3) со слабо выраженной изменчивостью. Годовой ход концентраций ОС и ЕС характеризуется общим максимумом в зимне-весенний период. Среднемесячные значения изотопного состава углерода в аэрозоле изменяются в диапазоне от  $-28,3\text{‰}$  (февраль) до  $-27,3\text{‰}$  (май).

**Ключевые слова:** Арктика, аэрозоль, изотопный состав, ионы, микроэлементы, сезонная изменчивость, углерод

Для цитирования: Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Калашникова Д.А., Лоскутова М.А., Онищук Н.А., Полькин В.В., Попова С.А., Ризе Д.Д., Симонова Г.В., Турчинович Ю.С., Ходжер Т.В., Шиховцев М.Ю. Сезонная изменчивость физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля на научно-исследовательском стационаре «Ледовая база Мыс Баранова» (арх. Северная Земля). *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024; 70(3): 338–352. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-3-338-352>

Поступила 03.06.2024

После переработки 28.06.2024

Принята 01.07.2024

## Seasonal changes in the physicochemical characteristics of atmospheric aerosol at the research station “Ice Base Baranova Cape” (Severnaya Zemlya archipelago)

Sergey M. Sakerin<sup>1✉</sup>, Lyudmila P. Golobokova<sup>2</sup>, Daria A. Kalashnikova<sup>1,3</sup>,  
Marina A. Loskutova<sup>4</sup>, Natalya A. Onischuk<sup>2</sup>, Victor V. Polkin<sup>1</sup>,  
Svetlana A. Popova<sup>1,5</sup>, Denis D. Rize<sup>4</sup>, Galina V. Simonova<sup>3</sup>,  
Yuri S. Turchinovich<sup>1</sup>, Tamara V. Khodzher<sup>2</sup>, Mikhail Yu. Shikhovtsev<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> Limnology Institute, SB RAS, Irkutsk, Russia

<sup>3</sup> Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>4</sup> State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

<sup>5</sup> Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion, SB RAS, Novosibirsk, Russia

✉ [sms@iao.ru](mailto:sms@iao.ru)

 SMS, 0000-0002-0419-4979; LPG, 0000-0002-4960-8135; NAO, 0000-0001-8496-2757;  
TVK, 0000-0001-5772-7962; MYS, 0000-0002-7177-907X

**Abstract.** Since 2017 we have carried out aerosol sampling at the research station “Ice Base Baranova Cape” (Novaya Zemlya Archipelago) with the purpose of studying the variations in aerosol physicochemical characteristics: the concentrations of ions, microelements, organic and elemental carbon (OC and EC), as well as the isotopic composition of carbon  $\delta^{13}\text{C}$  in the aerosol. The average summed concentrations of ions throughout the period of measurements were  $1,99 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , the concentrations of elements were  $51,1 \text{ ng}/\text{m}^3$ ; and those of OC and EC were  $398$  and  $25 \text{ ng}/\text{m}^3$ , respectively; the isotopic composition of carbon  $\delta^{13}\text{C}$  was  $-27.6 \text{ ‰}$ . The main contribution (73 %) to the ion composition of atmospheric aerosol is due to “marine” ions  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$ , and the contribution to the elemental composition is due to terrigenous Fe and Al (71 %). The large enrichment coefficients (with respect to  $\text{Na}^+$  in sea water) were manifested for ions  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$ , and  $\text{Ca}^{2+}$ . Aerosol enrichment by these ions is the largest in the warm period. In the aerosol elemental composition, we identified large enrichment coefficients (with respect to Al in the Earth’s crust) in elements Se, Sn, Sb, Mo, As, Zn, Cu, Cr, Pb, and Cd, indicating their technogenic origin. The nearest sources of aerosol enrichment by technogenic elements are plants for mining and processing mineral resources in the Taymyr Autonomous Okrug. The statistical generalization of the multiyear data allowed us to calculate for the first time the annual average behavior of the chemical composition of aerosol in the study region. With respect to the seasonal variations, the ions and elements can be divided into three groups: 1) with winter maximum ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Br}^-$ ; Se, Cd, V, Co, As); 2) with summer ( $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{CH}_3\text{SO}_3^-$ , F) or autumn (Al, Ti, Li, Sr, Fe, Zn, Ba, Ni) maximum; 3) with poorly defined or indefinite variations in other ions ( $\text{NO}_3^-$ ;  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) and elements (Cu, Pb, Mo, W, Sn, Cr, Sb, Mn). As most of the other characteristics, the annual behaviors of the OC and EC concentrations are characterized

by the general maximum in the winter-spring period. In addition, a second maximum is manifested in the OC content in the summer-autumn period. The average monthly carbon isotopic composition in the aerosol varies in the range from  $-28.3$  ‰ (February) to  $-27.3$  ‰ (May).

**Keywords:** Arctic, aerosol, carbon, ions, isotopic composition, seasonal variability, trace elements

**For citation:** Sakerin S.M., Golobokova L.P., Kalashnikova D.A., Loskutova M.A., Onischuk N.A., Polkin V.V., Popova S.A., Rize D.D., Simonova G.V., Turchinovich Yu.S., Khodzher T.V., Shikhovtsev M.Yu. Seasonal changes in the physicochemical characteristics of atmospheric aerosol at the research station “Ice Base Baranova Cape” (Severnaya Zemlya archipelago). *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(3):338–352. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-3-338-352>

Received 03.06.2024

Revised 28.06.2024

Accepted 01.07.2024

## Введение

Аэрозоль является наиболее изменчивой и сложной по составу компонентой атмосферы во всех регионах планеты [1, 2]. Актуальность исследований аэрозоля обусловлена несколькими причинами. В зависимости от химического состава и размеров аэрозольных частиц в разной степени проявляется их влияние на рассеяние и поглощение солнечной радиации: либо разогрев атмосферы дополнительно к парниковым газам, либо выхолаживающий эффект [3, 4]. Кроме прямого и косвенного радиационного воздействия, аэрозоль участвует в процессах массообмена веществ (в т. ч. загрязняющих) между континентом и океаном [5]. Субмикронный аэрозоль может распространяться на сотни и тысячи километров, а время его жизни в атмосфере оценивается от суток до 1–2 недель. Поэтому дальние переносы аэрозоля, содержащего антропогенные загрязнения, могут оказывать негативное влияние на экологическое состояние природной среды и здоровье человека не только в районах эмиссий, но и в соседних регионах [6, 7].

В последние два десятилетия активно развиваются исследования аэрозоля в Арктике, которая отличается самой большой динамикой природной среды и уязвимостью к изменениям климата. Для выяснения причин и тенденций происходящих изменений ведутся регулярные измерения характеристик аэрозоля на полярных станциях [2, 8–11] и эпизодические — в морских и самолетных экспедициях [12, 13]. Отличительной особенностью Арктической зоны является малочисленность антропогенных источников загрязнения атмосферы. Кроме того, снежный и ледяной покров большую часть года препятствуют поступлению в атмосферу почвенного аэрозоля. Вследствие этого существенную роль играют эпизоды дальних переносов природного и антропогенного аэрозоля из континентальных районов: выбросы предприятий добычи и переработки минеральных ресурсов, сжигание различных видов топлива, лесные пожары и др. Активно развиваемые модельные расчеты позволяют оценить вклад различных источников аэрозольных загрязнений в отдельных районах Арктики [14–17].

Следствием переноса воздушных масс являются нерегулярные колебания концентраций аэрозолей с амплитудой, достигающей двух порядков в масштабе от суток до нескольких недель. Сильная синоптическая изменчивость характеристик аэрозоля затрудняет выделение менее выраженной компоненты среднего сезонного хода. Результаты многолетних наблюдений на полярных станциях позволили определить особенности сезонного изменения концентраций веществ, входящих в состав аэрозоля [2, 8–11, 18]. Наиболее общей закономерностью является увеличение концен-

траций в холодный период относительно теплого. Зимний максимум концентраций обусловлен усилением меридиональных переносов воздушных масс с континентов и уменьшением скорости осаждения аэрозоля в арктической атмосфере. Задержка осаждения аэрозоля в зимний период обусловлена часто наблюдаемыми инверсиями и накоплением загрязнений в отдельных слоях тропосферы, известным как «арктическая дымка» [18–20]. Средняя скорость осаждения аэрозоля в таких условиях уменьшается более чем на порядок [16].

Кроме зимне-весеннего максимума у ряда характеристик аэрозоля наблюдается еще летний максимум, обусловленный выносами в Арктику дымов лесных пожаров. Заметим, что оценки сезонной изменчивости в основном выполнены по данным наблюдений на зарубежных полярных станциях. В Азиатском секторе Арктики регулярные измерения характеристик аэрозоля начались примерно на 10 лет позже с соответствующим временным сдвигом в анализе полученных данных.

По данным наблюдений на научно-исследовательском стационаре «Ледовая база Мыс Баранова» (далее — «Мыс Баранова») в предшествующей работе были рассмотрены особенности межгодовой изменчивости ионного и элементного состава аэрозоля и приведены оценки средних концентраций для четырех сезонов [21]. В настоящей работе сезонная изменчивость химического состава аэрозоля анализируется более детально — по среднемесячным значениям концентраций и с учетом еще одного года измерений. Благодаря этому в годовом ходе концентраций проявились особенности, которые нивелировались при трехмесячном усреднении данных. Кроме ионного и элементного состава, представлено обобщение результатов измерений трех других характеристик — содержание в аэрозоле органического, элементного углерода, а также изотопного состава углерода.

### **Данные измерений и методы анализа**

Полярная станция «Мыс Баранова» расположена на севере острова Большевик архипелага Северная Земля (79°17' с. ш., 101°38' в. д.). Подстилающая поверхность острова большую часть года покрыта льдом и снегом. В июле–августе частично вскрывается каменистая поверхность с мхом и лишайниками. На химический состав аэрозоля в этом секторе Арктики могут влиять выносы загрязнений из относительно близких районов добычи и переработки минеральных ресурсов в Таймырском (г. Норильск) и Ямало-Ненецком АО.

С октября 2017 г. по февраль 2023 г. на «Мысе Баранова» проводился отбор проб аэрозоля на стекловолоконные фильтры Whatman и Munktell для последующего определения химического и изотопного составов. Прокачка воздуха через фильтры осуществлялась с помощью многоканальной воздухоудвки (аспиратора) на удалении более 200 м от жилых и производственных сооружений станции. Продолжительность накопления аэрозольного вещества на фильтрах составляла от одних до трех суток. Используемые нами методы химического анализа аэрозольных проб были представлены в нескольких статьях [11, 21–23], поэтому ограничимся кратким пояснением.

Концентрации водорастворимых ионов ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{CH}_3\text{SO}_3^-$ ) определяли методом ионной хроматографии, а микроэлементов (Al, Ti, Cu, Mn, Sr, Ba, Sb, Li, Sn, Se, Cd, Fe, Zn, Cr, Ni, V, Co, As, Pb, W, Mo) — методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Для определения концентраций органического и элементного углерода (OC, EC) использовали метод реакционной газовой хроматографии [24]. Изотопный состав углерода ( $\delta^{13}\text{C}$ )

определяли методом масс-спектрометрии изотопных отношений [25] с помощью изотопного масс-спектрометра DELTA V Advantage, совмещенного с элементным анализатором Flash 2000 (приборы предоставлены ТомЦКП СО РАН). Общее количество проб, которые использовали в расчетах, составляет: ионный и элементный состав — 261 и 257 проб соответственно; концентрации ОС и ЕС — 404 пробы; изотопный состав углерода в аэрозоле — 432 пробы.

Кроме концентраций ионов, проанализировано относительное содержание ионов с использованием долевых факторов [26] и коэффициентов обогащения [27]. Долевой фактор  $FM_{sea}$  позволяет оценить вклад в ионный состав аэрозоля преимущественно морских источников ( $Na^+$ ,  $Cl^-$ ):

$$FM_{sea} = 1 - [\sum (C_i^a - k_i^{sw} \cdot C_{Na}^a)] / [\sum (C_i^a)], \quad (1)$$

где  $C_i^a$  — массовая концентрация  $i$ -того иона;  $C_{Na}^a$  — массовая концентрация  $Na^+$ ;  $k_i^{sw} = (C_i^{sw} / C_{Na}^{sw})$  — отношение концентраций  $i$ -того иона к концентрации  $Na^+$  в морской воде;  $\sum C_i^a$  — суммарная концентрация всех ионов в аэрозоле.

С помощью коэффициентов обогащения  $KO_i$  оценивался ионный состав аэрозоля относительно состава морской воды. Коэффициенты  $KO_i$  рассчитывали по соотношению концентраций разных ионов, нормированных на концентрацию  $Na^+$ , в составе аэрозоля и морской воды [27]:

$$KO_i = (C_i^a / C_{Na}^a) / (C_i^{sw} / C_{Na}^{sw}), \quad (2)$$

где  $(C_i^a / C_{Na}^a)$  — концентрация  $i$ -того иона относительно  $Na^+$  в составе аэрозоля;  $(C_i^{sw} / C_{Na}^{sw})$  — концентрация  $i$ -того иона относительно  $Na^+$  в составе морской воды. Значительное превышение коэффициента обогащения ( $KO_i \gg 1$ ) свидетельствует о континентальном (включая антропогенное) происхождении ионов.

Аналогичным образом определяли коэффициенты обогащения микроэлементов в составе аэрозоля ( $KO_3$ ) относительно содержания Al в земной коре [21, 28]:

$$KO_3 = (X_i/Al)_{a3p} / (X_i/Al)_{3k}, \quad (3)$$

где  $X_i/Al$  — концентрация  $i$ -го элемента относительно Al в аэрозоле (аэп) и земной коре (зк). Расчеты величин  $KO_3$  позволяют оценить влияние терригенных и нетерригенных (в основном техногенных) источников на поступление вещества в атмосферу. Для разделения источников использовались следующие значения коэффициентов обогащения: терригенные (литогенные) — при  $KO_3 < 10$ ; не терригенные (в основном техногенные) — при  $KO_3 > 50$ ; смешанные — при  $10 < KO_3 < 50$ .

## Обсуждение результатов

### Ионный состав

Для определения среднего годового хода сначала рассчитывали средние концентрации ионов (элементов, ОС, ЕС) для каждого месяца и года, затем — их средние многолетние значения. Анализ полученных данных показал большую изменчивость среднемесячных и среднегодовых концентраций: коэффициенты вариаций находятся в диапазоне значений 50–200 %. Высокая изменчивость концентраций является следствием особенностей атмосферных переносов и эмиссий аэрозоля в разные месяцы и годы. Независимо от этих особенностей основной вклад в ионный состав аэрозоля на «Мысе Баранова» вносят ионы преимущественно морского происхождения: доля  $Na^+$  и  $Cl^-$  в среднем составляет 73 % суммарной концентрации ионов (см. второй столбец табл. 1).

Таблица 1

Средние значения и стандартное отклонение концентраций ионов (мкг/м<sup>3</sup>)  
 в разные периоды года

Table 1

Average values and standard deviation of ion concentrations (µm/m<sup>3</sup>)  
 in different periods of the year

Ионы	Среднее многолетнее	Зимний максимум (ноябрь–март)	Летний минимум (июнь)	Летний максимум (август)
Cl <sup>-</sup>	0,98 ± 1,49	1,42 ± 1,96	0,35 ± 0,37	0,71 ± 0,48
Na <sup>+</sup>	0,47 ± 0,86	0,74 ± 1,15	0,12 ± 0,23	0,35 ± 0,31
K <sup>+</sup>	0,06 ± 0,09	0,07 ± 0,09	0,02 ± 0,02	0,07 ± 0,08
Mg <sup>2+</sup>	0,05 ± 0,10	0,08 ± 0,13	0,01 ± 0,01	0,02 ± 0,03
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,18 ± 0,20	0,21 ± 0,24	0,08 ± 0,09	0,20 ± 0,15
Ca <sup>2+</sup>	0,06 ± 0,07	0,08 ± 0,09	0,02 ± 0,02	0,05 ± 0,05
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,07 ± 0,10	0,05 ± 0,09	0,07 ± 0,05	0,15 ± 0,17
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,04 ± 0,06	0,06 ± 0,07	0,02 ± 0,01	0,04 ± 0,05
F <sup>-</sup>	0,01 ± 0,01	0,01 ± 0,01	0,01 ± 0,02	0,01 ± 0,02
Br <sup>-</sup>	0,008 ± 0,012	0,01 ± 0,01	0,002 ± 0,002	0,002 ± 0,001
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,03 ± 0,11	0,03 ± 0,09	0,03 ± 0,08	0,12 ± 0,27
CH <sub>3</sub> SO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,01 ± 0,02	0,01 ± 0,02	0,01 ± 0,01	0,01 ± 0,02
Σ <sub>i</sub>	1,99 ± 2,73	2,81 ± 3,60	0,74 ± 0,65	1,74 ± 0,98
N	261	125	21	14

Примечание. Σ<sub>i</sub> — суммарная концентрация, N — количество проб аэрозоля.

Note. Σ<sub>i</sub> is the summed concentration, and N is the number of aerosol samples.

Годовой ход суммарной концентрации ионов Σ<sub>i</sub> (рис. 1а) характеризуется основным зимним максимумом и вторичным — в августе. По особенностям сезонной изменчивости концентрации ионов разделились на три группы. В годовом ходе концентраций первой группы ионов — Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, Mg<sup>2+</sup> и Br<sup>-</sup> (в основном «морских») — наблюдается продолжительный зимний максимум и низкие значения в теплый период (рис. 1б). С февраля по июнь концентрации указанных ионов уменьшаются в 4–8 раз.

Зимний максимум морских ионов согласуется с данными наблюдений на других полярных станциях [11, 12]. Несмотря на закрытие подстилающей поверхности льдом и снегом, морские ионы не исчезают из атмосферы. Их содержание поддерживается за счет дальнего переноса с открытых участков океана и эмиссий из морского льда. Но самое главное, что из-за зимних инверсий существенно уменьшается скорость осаждения аэрозоля [16], что способствует его длительному нахождению в атмосфере (увеличивается «время жизни»).

Обращает на себя внимание большой максимум концентрации ионов Br<sup>-</sup>, сдвинутый на апрель. Высокое весеннее содержание брома в полярных районах отмечалось разными авторами. Наиболее вероятным источником является эмиссия брома из молодого морского льда и снега [29].

Во второй группе ионов (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, CH<sub>3</sub>SO<sub>3</sub><sup>-</sup>, F<sup>-</sup>) основным является летний (июнь–август) максимум концентраций, а зимний — проявляется менее значительно (рис. 1в). Причиной летнего максимума являются практически ежегодные выносы дымов лесных пожаров в Сибири. Третья группа ионов (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, K<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup>) отличается небольшой амплитудой сезонной изменчивости с сопоставимыми значе-

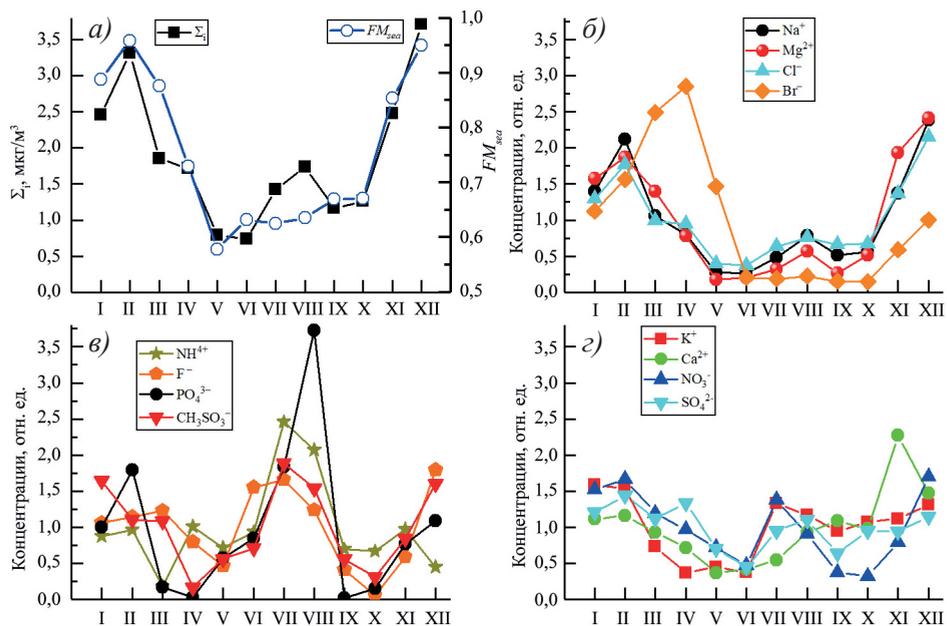


Рис. 1. Средний годовой ход: суммарных концентраций ионов  $\Sigma_i$  и  $FM_{sea}$  (а); нормированных (на среднегодовые значения) концентраций ионов  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Cl^-$  и  $Br^-$  (б);  $NH_4^+$ ,  $F^-$ ,  $PO_4^{3-}$ ,  $CH_3SO_3^-$  (в);  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$  (з)

Fig. 1. Annual average behaviors of: (a) the summed concentrations of ions  $\Sigma_i$  and  $FM_{sea}$ ; normalized (by annual average values) concentrations of ions (б)  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Cl^-$  и  $Br^-$ ; (в)  $NH_4^+$ ,  $F^-$ ,  $PO_4^{3-}$ ,  $CH_3SO_3^-$ ; and (з)  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$

ниями зимнего и летнего максимумов (рис. 1з). Количественные данные о средних концентрациях ионов в характерные периоды максимумов и минимумов приведены в табл. 1. Независимо от типа годового хода, общим для всех ионов является минимум концентраций в начале лета (у большинства — в июне), который согласуется с минимальным содержанием субмикронного аэрозоля на «Мысе Баранова» [30].

Следствием зимнего максимума содержания «морских» ионов ( $Na^+$ ,  $Cl^-$ ), вносящих основной вклад в суммарную концентрацию, являются высокие значения долевого фактора  $FM_{sea}$  в зимние месяцы (0,85–0,96) в сравнении с теплым периодом (0,58–0,67) (см. рис. 1а). Анализ коэффициентов обогащения ионов ( $KO_i$ ) показал, что их сезонная изменчивость в явном виде не проявляется. Наиболее высокие значения коэффициентов обогащения наблюдаются у ионов  $SO_4^{2-}$ ,  $K^+$  и  $Ca^{2+}$  с максимумами в мае, июле и сентябре соответственно (табл. 2).

Таблица 2

**Коэффициенты обогащения ионов относительно состава морской воды**

Table 2

**Ion enrichment factors relative to seawater composition**

Характеристики	$KO_i (SO_4^{2-})$	$KO_i (Ca^{2+})$	$KO_i (K^+)$
Среднегодовое значение	$2,2 \pm 1,0$	$4,1 \pm 1,7$	$4,7 \pm 2,5$
В периоды максимума	4,1 (май)	6,8 (сентябрь)	10 (июль)

### Элементный состав

В табл. 3 представлены статистические данные о содержании в аэрозоле микроэлементов: среднегодовые значения концентраций (в порядке убывания), коэффициенты обогащения относительно состава земной коры ( $KO_3$ ), а также диапазон изменения среднемесячных значений концентраций элементов. Основной вклад (71 %) в суммарную концентрацию ( $\Sigma_3$ ) элементов в составе аэрозоля вносят Fe и Al. Следующим по значимости является вклад Zn, Cr, Cu, Mn. В водорастворимой фракции аэрозоля преобладают соли V, As, Cd, Sb и Ba, а в твердой фракции — соединения элементов Al, Ti, Mn, Fe, Be, Co, Sn, Ag и Pb.

Таблица 3

Средние концентрации микроэлементов (нг/м<sup>3</sup>) и коэффициенты обогащения  $KO_3$

Table 3

Average concentrations of microelements (ng/m<sup>3</sup>) and coefficients of enrichment  $CE_E$

Элементы	Среднегодовые значения			Диапазон изменения среднемесячных значений
	средние	СКО	$KO_3$	
Fe	24,4	8,5	4,1	13 (май) ... 42 (октябрь)
Al	11,9	3,8	1,0	8,2 (март) ... 22 (сентябрь)
<b>Zn</b>	4,2	1,3	<b>389</b>	2,5 (апрель) ... 5,8 (март)
<b>Cr</b>	2,4	1,0	<b>165</b>	1,1 (май) ... 5,3 (январь)
<b>Cu</b>	1,8	0,5	<b>254</b>	1,1 (октябрь) ... 2,9 (август)
Mn	1,4	1,0	9,8	0,4 (апрель) ... 2,8 (ноябрь)
<b>Sn</b>	1,06	0,67	<b>3321</b>	0,21 (сент., окт.) ... 2,26 (январь)
Ti	1,0	0,8	1,3	0,28 (февраль) ... 2,95 (сентябрь)
Sr	0,55	0,26	38	0,31 (май, июль) ... 0,76 (декабрь)
Ba	0,55	0,24	11	0,32 (апрель) ... 1,14 (сентябрь)
Ni	0,45	0,12	39	0,27 (июль) ... 0,66 (сентябрь)
<b>Pb</b>	0,43	0,12	<b>215</b>	0,20 (октябрь) ... 0,61 (март)
W	0,16	0,15	7,0	0,02 (август) ... 0,48 (июнь)
Se	0,14	0,04	<b>19366</b>	0,10 (сентябрь) ... 0,21 (март)
V	0,12	0,07	5,1	0,03 (август) ... 0,26 (март)
<b>Mo</b>	0,10	0,02	<b>600</b>	0,07 (февраль) ... 0,14 (октябрь)
<b>Cd</b>	0,09	0,08	<b>84</b>	0,02 (окт., дек.) ... 0,25 (март)
Co	0,09	0,06	33	0,02 (август) ... 0,17 (июнь)
<b>As</b>	0,08	0,06	<b>386</b>	0,02 (август, окт.) ... 0,18 (январь)
<b>Sb</b>	0,05	0,02	<b>1886</b>	0,04 (окт. — февр.) ... 0,08 (июнь, сент.)
Li	0,03	0,01	12	0,02 (дек. — февр.) ... 0,07 (сент.)
$\Sigma_3$	51,1	12,3	—	—
N	257			

Примечание.  $\Sigma_3$  — суммарная концентрация, N — количество проб аэрозоля.

Note.  $\Sigma_3$  is the summed concentration, and N is the number of aerosol samples.

Анализ коэффициентов обогащения показал, что содержание в аэрозоле Al, Ti, Mn, Fe, V и W мало отличается от состава земной коры ( $KO_3 < 10$ ), то есть они имеют терригенное происхождение. Высокие значения коэффициентов обогащения Se, Sn, Sb, Mo, As, Zn, Cu, Cr, Pb и Cd (выделены жирным шрифтом) указывают на их техногенное происхождение. Основным источником обогащения атмосферы этими элемен-

тами являются выносы антропогенных загрязнений со стороны предприятий добычи и переработки минеральных ресурсов, расположенных в Таймырском АО (г. Норильск и др.). Умеренные значения коэффициентов обогащения Sr, Ba, Li, Ni и Co дают основание отнести их к элементам смешанного происхождения. Заметим, что перечень техногенных элементов, выявленных в атмосфере «Мыса Баранова», практически совпадает с данными морских экспедиций в Северном Ледовитом океане (СЛО) [31] и модельных расчетов переносов в Арктику тяжелых металлов [16, 17, 32].

Обращает на себя внимание большой диапазон изменения среднемесячных значений концентраций — у некоторых элементов он достигает одного порядка (см. правый столбец табл. 3). Кроме того, максимумы и минимумы концентраций разных элементов наблюдаются в разные месяцы. Указанные различия обусловлены сезонной изменчивостью выбросов в атмосферу различных видов загрязнений с последующим переносом в Арктику. В холодный период начинают работать системы отопления и одновременно, из-за снежного покрова, ограничивается поступление в атмосферу терригенных элементов. Летом на состав аэрозоля влияют массовые лесные пожары, весной — палы растительности и эмиссии из снега/льда загрязнений, накопившихся в холодный период.

По характеру сезонной изменчивости микроэлементы, как и ионы, разделены на 3 группы (рис. 2). Главной особенностью годового хода 1-й группы элементов (Se, Cd, V, Co, As) является хорошо выраженный зимне-весенний максимум (январь–июнь) и низкие значения концентраций во второй половине года. Зимний

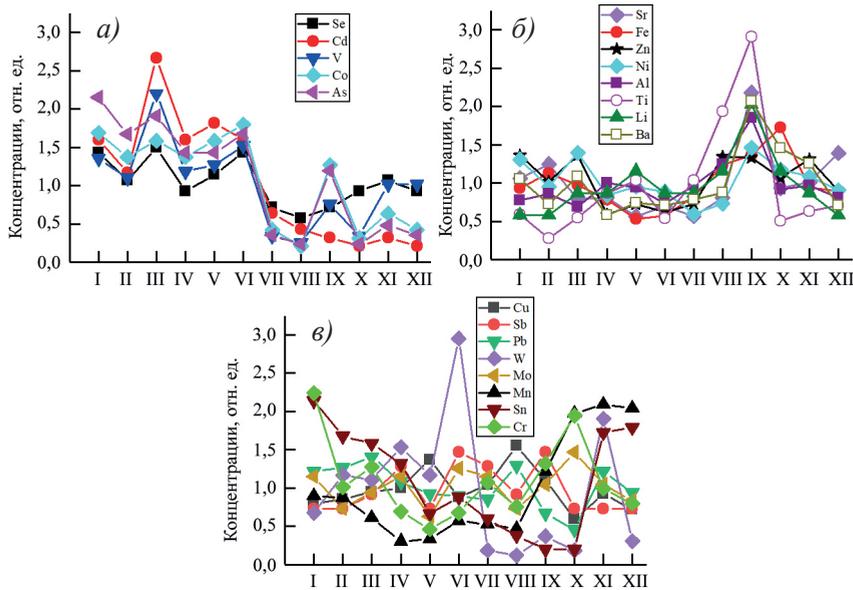


Рис. 2. Средний годовой ход нормированных (на среднегодовые значения) концентраций трех групп микроэлементов: (а) Se, Cd, V, Co, As; (б) Al, Ti, Li, Sr, Fe, Zn, Ba, Ni; (в) Cu, Pb, Mo, W, Sn, Cr, Sb, Mn

Fig. 2. Average behaviors of normalized (by the annual average values) concentrations from the three groups of microelements: (a) Se, Cd, V, Co, As; (б) Al, Ti, Li, Sr, Fe, Zn, Ba, Ni; (в) Cu, Pb, Mo, W, Sn, Cr, Sb, Mn

максимум концентраций этих элементов (а также Cr, Sb и частично Mn) согласуется с данными измерений содержания субмикронного аэрозоля и черного углерода на полярных станциях [2, 8, 9, 30] и результатами модельных расчетов концентраций тяжелых металлов [16, 17].

У элементов 2-й группы (Al, Ti, Li, Sr, Fe, Zn, Ba, Ni) пик концентраций наблюдается осенью (в основном в сентябре). Внутригодовая изменчивость элементов 3-й группы разнообразна и менее выражена: у одних элементов (Cu, Pb, Mo) сезонный ход практически не проявляется; у других (W, Sn, Cr, Sb, Mn) наблюдаются одно- или двухмесячные всплески концентраций, не совпадающие с периодами максимумов двух первых групп элементов. Нельзя исключить, что некоторые всплески в среднем годовом ходе концентраций обусловлены местным техногенным воздействием в сочетании с малым количеством отобранных проб аэрозоля. Для выяснения имеющихся неопределенностей необходимы продолжение наблюдений (отбор проб) и более детальный анализ с привлечением информации о траекториях движения воздушных масс.

Отметим также, что совместный анализ типов сезонной изменчивости концентраций не выявил однозначной взаимосвязи с типами микроэлементов (терригенные, смешанные, техногенные). То есть в каждой группе годового хода концентраций (см. рис. 2) есть микроэлементы различного происхождения.

### Концентрации ОС, ЕС и изотопный состав углерода $\delta^{13}\text{C}$

Средние значения концентраций органического и элементного углерода за весь период наблюдений на «Мысе Баранова» составили 398 и 25  $\text{нг}/\text{м}^3$  соответственно. Как и другие характеристики, концентрации ОС и ЕС отличаются большой изменчивостью. Тем не менее в годовом ходе средних и квартильных значений концентраций (рис. 3) проявился зимне-весенний максимум: в марте у ОС и в феврале–апреле у ЕС. Кроме того, наблюдается повышение концентраций (второй максимум) в летне-осенний период. В сравнении с ионами и элементами (см. рис. 1, 2) амплитуда сезонной изменчивости концентраций ОС и ЕС невелика. Отношение максимума к минимуму среднемесячных значений ОС и ЕС составляет 1,6–1,8, а у концентраций ионов и элементов это соотношение достигает одного порядка.

Изотопный состав углерода  $\delta^{13}\text{C}$  в атмосферном аэрозоле изменялся в диапазоне от  $-33,6$  до  $-23,6$  ‰. Средняя величина  $\delta^{13}\text{C}$  ( $-27,60 \pm 1,02$  ‰) за весь период наблюдений занимает промежуточное положение между тяжелым ( $-23$  ‰ ...  $-27$  ‰ —

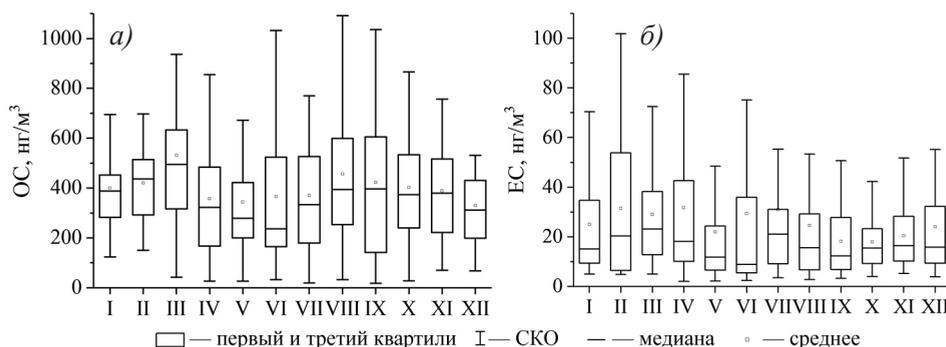


Рис. 3. Средний годовой ход статистических характеристик концентраций ОС (а) и ЕС (б)

Fig. 3. Average annual behaviors of the statistical characteristics of concentrations OC (a) and EC (b)

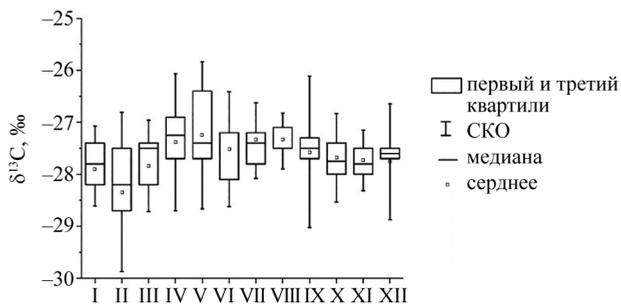


Рис. 4. Средний годовой ход статистических характеристик изотопного состава углерода  $\delta^{13}\text{C}$  в атмосферном аэрозоле

Fig. 4. Average annual behaviors of the statistical characteristics of isotopic composition of carbon  $\delta^{13}\text{C}$  in atmospheric aerosol

сжигание угля и древесины) и легким ( $-28\text{‰}$  ...  $-29\text{‰}$  — сжигание нефтепродуктов) изотопным составом углерода [33]. На рис. 4 показан средний годовой ход статистических характеристик изотопного состава углерода. Более низкие средние значения  $\delta^{13}\text{C}$  наблюдаются в зимний период (с минимумом в феврале  $-28,3\text{‰}$ ), что свидетельствует о преобладании в аэрозоле легкого изотопа углерода  $^{12}\text{C}$ . После февраля происходит утяжеление изотопного состав углерода до максимального значения ( $-27,3\text{‰}$ ) в мае и последующая тенденция снижения до зимнего уровня. Можно также заметить небольшое отклонение от этой тенденции (обогащение тяжелым изотопом  $^{13}\text{C}$ ) в июле–августе, которое указывает на влияние выносов от лесных пожаров. Утяжеление изотопного состава углерода до среднемесячных значений  $-26,5\text{‰}$  наиболее явно проявилось в 2019 г. во время лесных пожаров на территории Красноярского края и Республики Саха. Аналогичное влияние лесных пожаров отмечалось в результатах наблюдений на станции Caribou Poker Creek (Аляска) [34]: величина  $\delta^{13}\text{C}$  в аэрозоле в обычных условиях равнялась  $-27,4\text{‰}$ , а при задымлении от лесных пожаров наблюдалось утяжеление изотопного состава углерода до  $-26,8\text{‰}$ .

### Заключение

Проведено статистическое обобщение результатов многолетних (2017–2023 гг.) измерений на научно-исследовательском стационаре «Ледовая база Мыс Баранова» физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля: концентраций ионов, микроэлементов, органического и элементного углерода, а также изотопного состава углерода в аэрозоле. Основной вклад в ионный состав аэрозоля вносят ионы преимущественно морского происхождения  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  (73 %), а в элементный состав — терригенные Fe и Al (71 %). Средняя суммарная концентрация ионов за период измерений составила  $1,99\text{ мкг/м}^3$ , элементов —  $51,1\text{ нг/м}^3$ ; концентрации органического и элементного углерода —  $398$  и  $25\text{ нг/м}^3$  соответственно.

По особенностям годового хода ионы разделились на три группы: 1) с продолжительным зимним максимумом концентраций —  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Br}^-$ ; 2) с летним (июнь–август) максимумом —  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{CH}_3\text{SO}_3^-$ ,  $\text{F}^-$ ; 3) со слабо выраженной изменчивостью —  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ . Вследствие зимнего максимума содержания ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  долевой фактор морских источников в холодный период имеет более высокие значения (0,85–0,96), чем в теплый период (0,58–0,67). Сезонная изменчивость коэффициентов обогащения ионов в явном виде не проявилась: более

высокие значения коэффициентов обогащения отмечены у ионов  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$  и  $\text{Ca}^{2+}$  с максимумами в мае, июле и сентябре соответственно.

Анализ коэффициентов обогащения микроэлементов показал, что содержание в аэрозоле Al, Ti, Mn, Fe, V и W мало отличается от состава земной коры, т. е. они имеют терригенное происхождение. Элементы Sr, Ba, Li, Ni и Co, с умеренными коэффициентами обогащения, отнесены к элементам смешанного происхождения. Высокие коэффициенты обогащения, выявленные у элементов Se, Sn, Sb, Mo, As, Zn, Cu, Cr, Pb и Cd, указывают на их техногенное происхождение. Наиболее близкими к «Мысу Баранова» источниками техногенных элементов являются предприятия добычи и переработки минеральных ресурсов, расположенные в Таймырском АО (г. Норильск и др.).

По характеру сезонной изменчивости микроэлементы тоже разделились на три группы: 1) с хорошо выраженным зимне-весенним (январь–июнь) максимумом — Se, Cd, V, Co, As; 2) с осенним (в основном сентябрь) всплеском концентраций — Al, Ti, Li, Sr, Fe, Zn, Ba, Ni; 3) с менее выраженным сезонным ходом — Cu, Pb, Mo, W, Sn, Cr, Sb, Mn. Отмечено, что взаимосвязь типов сезонной изменчивости концентраций с типами микроэлементов (терригенные, смешанные, техногенные) в явном виде не проявляется.

Как и у большинства других характеристик аэрозоля, в среднем годовом ходе концентраций органического и элементного углерода наблюдаются зимне-весенний и летне-осенний максимумы. Однако сезонная изменчивость концентраций OC/EC, в сравнении с другими характеристиками, выражена слабо. Соотношение максимальных и минимальных среднемесячных концентраций составляет 1,55–1,75.

Средняя величина изотопного состава углерода в аэрозоле за весь период наблюдений составила  $-27,60 \pm 1,02$  ‰. Самый тяжелый изотопный состав углерода наблюдается в мае ( $-27,3$  ‰). Затем происходит постепенное снижение среднемесячных величин  $\delta^{13}\text{C}$  до минимума в феврале ( $-28,3$  ‰).

Отмечена необходимость продолжения исследований химического состава аэрозоля на «Мысе Баранова» для уточнения оценок сезонной изменчивости и выяснения причин отличия годового хода отдельных характеристик.

**Конфликт интересов.** Конфликт интересов отсутствует.

**Финансирование.** Анализ сезонной изменчивости химического состава аэрозоля выполнен при финансовой поддержке проекта РНФ № 21-77-20025, а отбор проб аэрозоля проводился в рамках Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021–2030 годы.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность начальнику высокоширотной Арктической экспедиции В.Т. Соколову и инженерному составу метеорологов, проводивших наблюдения (отбор проб) в разные годы.

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

**Funding.** The analysis of the seasonal variations in the chemical composition of aerosol was carried out with the support from the Russian Science Foundation (project no. 21-77-20025), and the aerosol samples were collected in the framework of the Federal scientific-technical program in the field of ecological development of the Russian Federation and climate changes for 2021–2030.

**Acknowledgements.** The authors thank the head of the high-latitude Arctic Expedition V.T. Sokolov and the engineering staff of meteorologists, who carried out the observations (sampling) in different years.

## 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/PRAXI; 2006. 572 p.
2. *Physics and Chemistry of the Arctic Atmosphere*. Alexander Kokhanovsky A., Tomasi C. (eds). Springer Cham; 2020. 717 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-33566-3>

3. Haywood J., Boucher O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: a review. *Rev. Geophys.* 2000;38(4):513–543. <https://doi.org/10.1029/1999RG000078>
4. 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. *Atmospheric Chemistry and Physics.* 2019;19:2527–2560. <https://doi.org/10.5194/acp-19-2527-2019>
5. Шевченко В.П. *Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике.* М.: Наука; 2006. 226 с.
6. Shindell D., Kuylensstierna J.C.I., Vignati E., van Dingenen R., Amann M., Klimont Z., Anenberg S.C., Muller N., Janssens-Maenhout G., Raes F., Schwartz J., Faluvegi G., Pozzoli L., Kupiainen K., Höglund-Isaksson L., Emberson L., Streets D., Ramanathan V., Hicks K., Oanh N.T.K., Milly G., Williams M., Demkine V., Fowler D. Simultaneously mitigating near-term climate change and improving human health and food security. *Science.* 2012;335(6065):183–189. <https://doi.org/10.1126/science.1210026>
7. Schmale J., Arnold S., Law K.S., Thorp T., Anenberg S., Simpson W., Mao J., Pratt K.A. Local Arctic air pollution: A neglected but serious problem. *Earth's Future.* 2018;6:1385–1412. <https://doi.org/10.1029/2018EF000952>
8. Schmale J., Sharma S., Decesari S., Pernov J., Massling A., Hansson H.C., von Salzen K., Skov H., Andrews E., Quinn P.K., Upchurch L.M., Eleftheriadis K., Traversi R., Gilardoni S., Mazzola M., Laing J., Hopke P. Pan-Arctic seasonal cycles and long-term trends of aerosol properties from 10 observatories. *Atmospheric Chemistry and Physics.* 2022;22:3067–3096. <https://doi.org/10.5194/acp-22-3067-2022>
9. Quinn P.K., Bates T.S., Schulz K., Shaw G.E. Decadal trends in aerosol chemical composition at Barrow, Alaska: 1976–2008. *Atmospheric Chemistry and Physics.* 2009;9:8883–8888. <https://doi.org/10.5194/acp-9-8883-2009>
10. Sirois A., Barrie L.A. Arctic lower tropospheric aerosol trends and composition at Alert, Canada: 1980–1995. *J. Geophys. Res.* 1999;104(D9):11599–11618. <https://doi.org/10.1029/1999JD900077>
11. Fenger M., Sørensen L.L., Kristensen K., Jensen B., Nguyen Q.T., Nøjgaard J.K., Massling A., Skov H., Becker T., Glasius M. Sources of anions in aerosols in northeast Greenland during late winter. *Atmospheric Chemistry and Physics.* 2013;13:1569–1578. <https://doi.org/10.5194/acp-13-1569-2013>
12. 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/atmos1111170>
13. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Бердашкинова О.И., Голобокова Л.П., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Онищук Н.А., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В., Ходжер Т.В. Состав воздуха над Российским сектором Арктики в сентябре 2020 г. 4. Атмосферный аэрозоль. *Онтика атмосферы и океана.* 2024;37(3):214–224. <https://doi.org/10.15372/AOO20240305>  
Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Berdashkinova O.I., Golobokova L.P., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Onischuk N.A., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Fofonov A.V., Khodzher T.V. Air composition over the Russian Arctic. 4. Atmospheric aerosols. *Optika Atmosfery i Okeana = Ocean. Opt.* 2024;37(3):214–224. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/AOO20240305>
14. Bond T.C., Streets D.G., Yarber K.F., Nelson S.M., Woo J.-H., Klimont Z. A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion. *J. Geophys. Res.* 2004;109:D14203. <https://doi.org/10.1029/2003JD003697>

15. Hirdman D., Sodemann H., Eckhardt S., Burkhardt J.F., Jefferson A., Mefford T., Quinn P.K., Sharma S., Strom J., Stohl A. Source identification of short-lived air pollutants in the Arctic using statistical analysis of measurement data and particle dispersion model output. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2010;10:669–693. <https://doi.org/10.5194/acp-10-669-2010>
16. Виноградова А.А., Иванова Ю.А. Тяжелые металлы в атмосфере над северным побережьем Евразии: Межгодовые вариации зимой и летом. *Геофизические процессы и биосфера*. 2016;15(4):5–17. <https://doi.org/10.21455/GPB2016.4-1>  
Vinogradova A.A., Ivanova Yu.A. Heavy metals in the atmosphere over the Northern coast of Eurasia: Interannual variations in winter and summer. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2017;53(7): 711–718. <https://doi.org/10.1134/S000143381707009X>
17. Виноградова А.А., Иванова Ю.А. Перенос воздушных масс и загрязнений к арктическим островам России (1986–2016 гг.): долговременные, межгодовые и сезонные вариации. *Геофизические процессы и биосфера*. 2017;16(4):5–20. <https://doi.org/10.21455/GPB2017.4-1>  
Vinogradova A.A., Ivanova Yu.A. Air mass and pollution transport to the Arctic Russian islands (1986–2016): Long-term, year to year, and seasonal variations. *Geophysical processes and biosphere*. 2017;16(4):5–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.21455/GPB2017.4-1>
18. Quinn P.K., Shaw G., Andrews E., Dutton E.G., Ruoho-Airola T., Gong S.L. Arctic haze: Current trends and knowledge gaps. *Tellus*. 2007;59B:99–114. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2006.00238.x>
19. Shaw G.E. The Arctic haze phenomenon. *Bull. Am. Meteor. Soc.* 1995;76:2403–2414. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1995\)076<2403:ТАНН>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1995)076<2403:ТАНН>2.0.CO;2)
20. Arnold S.R., Law K.S., Brock C.A., Thomas J.L., Starkweather S., von Salzen K., Stohl A., Sharma S., Lund M., Flanner M.G., Petäjä T., Tanimoto H., Gamble J., Dibb J.E., Melamed M., Johnson N., Fidel M., Tynkynen V.-P., Baklanov A., Bozem H. Arctic air pollution: Challenges and opportunities for the next decade. *Elementa: Science of the Anthropocene*. 2016;4:000104. <https://doi.org/10.12952/journal.elementa.000104>
21. Голобокова Л.П., Бердашкинова О.И., Лоскутова М.А., Ризе Д.Д., Онищук Н.А., Сакерин С.М., Турчинович Ю.С. Результаты многолетних исследований химического состава аэрозоля в атмосфере на стационаре «Ледовая база Мыс Баранова». *Оптика атмосферы и океана*. 2023;36(11):874–882. <https://doi.org/10.15372/AOO20231102>  
Golobokova L.P., Berdashkinova O.I., Loskutova M.A., Rize D.D., Onischuk N.A., Sakerin S.M., Turchinovich Yu.S. Long-term studies of atmospheric aerosol chemical composition at the Cape Baranov Ice Base Station. *Atmos. Ocean. Opt.* 2024;37(1):14–23. <https://doi.org/10.1134/S1024856023700033>
22. 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., 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;32(5):511–520. <https://doi.org/10.1134/S1024856019050130>
23. Golobokova L.P., Kruglinsky I.A., Pochufarov A.O., Marinaite I.I., Onischuk N.A., Kravchishina M.D., Flint M.V., Shikhovtsev M.Yu., Khuriganov O.I. Chemical composition of atmospheric aerosol in Arctic Regions in summer 2021. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2023;59(1):S70–S80. <https://doi.org/10.1134/S000143382313008X>
24. Makarov V.I., Koutsenogii K.P., Koutsenogii P.K. Daily and seasonal changes of organic and inorganic carbon content in atmospheric aerosol Novosibirsk region. *J. Aer. Sci.* 1999;30:S255–S256. [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(99\)80139-6](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(99)80139-6)
25. Лебедев А.Т. *Масс-спектрометрия для анализа объектов окружающей среды*. М.: Техносфера; 2013. 632 с.

26. Польшкин В.В., Щелканов Н.Н., Голобокова Л.П., Панченко М.В. Сравнение методик оценки вклада континентальных и морских источников в ионный состав приводного аэрозоля Белого моря. *Оптика атмосферы и океана*. 2008;21(1):23–26.  
Pol'kin V.V., Shchelkanov N.N., Golobokova L.P., Panchenko M.V. Comparison of the techniques for estimating the contribution of continental and marine sources into ion composition of near-water aerosol of the White Sea. *Atmos. Ocean. Opt.* 2008;21(1):17–19.
27. Tsunogai S., Saito O., Yamada K., Nakay S. Chemical composition of oceanic aerosol. *J. Geophys. Res.* 1972;77(27):5283–5292. <https://doi.org/10.1029/JC077i027p05283>
28. Xu G., Gao Y. Atmospheric trace elements in aerosols observed over the Southern Ocean and coastal East Antarctica. *Polar Res.* 2014;33:23973. <https://doi.org/10.3402/polarv.33.23973>
29. Pratt K.A., Custard K.D., Shepson P.B., Douglas T.A., Pöhler D., General S., Zielcke J., Simpson W.R., Platt U., Tanner D.J., Huey L.G., Carlsen M., Stirm B.H. Photochemical production of molecular bromine in Arctic surface snowpacks. *Nature Geoscience Letters*. 2013;6:351–356. <https://doi.org/10.1038/NCEO1779>
30. 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>  
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>
31. Польшкин В.В., Голобокова Л.П., Онищук Н.А., Сакерин С.М., Шевченко В.П., Шиховцев М.Ю. Статистическое обобщение ионного и элементного состава аэрозоля в Евразийском секторе Северного Ледовитого океана. *Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы. Труды XXX Международного симпозиума*. С-Петербург, 1–5 июля 2024 г. В90–В93.
32. Виноградова А.А., Котова Е.И., Топчая В.Ю. Атмосферный перенос антропогенных тяжелых металлов в районы севера Европейской России. *География и природные ресурсы*. 2017;1:108–116. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-1\(108-116\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-1(108-116))  
Vinogradova A.A., Kotova E.I., Topchaya V.Yu. Atmospheric transport of heavy metals to regions of the north of the European territory of Russia. *Geogr. Nat. Resour.* 2017;38(1):78–85. (In Russ.)
33. Attri P., Mani D., Satyanarayanan M., Reddy D.V., Kumar D., Sarkar S., Kumar S., Hegde P. Atmospheric aerosol chemistry and source apportionment of PM10 using stable carbon isotopes and PMF modelling during fireworks over Hyderabad, southern India. *Heliyon*. 2024;10(5):E26746. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26746>
34. Mouteva G.O., Czimczik C.I., Fahrmi S.M., Wiggins E.B., Rogers B.M., Veraverbeke S., Xu X., Santos G.M., Henderson J., Miller C.E., Randerson J.T. Black carbon aerosol dynamics and isotopic composition in Alaska linked with boreal fire emissions and depth of burn in organic soils. *Global Biogeochem. Cycles*. 2015;29(11):1977–2000. <https://doi.org/10.1002/2015GB005247>