

## Химический состав атмосферного аэрозоля арктических районов в летний период 2021 года

© 2022 г. Л.П. Голобокова<sup>1\*</sup>, И.А. Круглинский<sup>2</sup>, А.О. Почуфаров<sup>2</sup>, И.И. Маринайте<sup>1</sup>,  
Н.А. Онищук<sup>1</sup>, М.Д. Кравчишина<sup>3</sup>, М.В. Флинт<sup>3</sup>, М.Ю. Шиховцев<sup>1,2</sup>, О.И. Хуриганова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия;

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия;

<sup>3</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

\*lg@lin.irk.ru

## Chemical composition of the atmospheric aerosols in arctic regions in the summer of 2021

L.P. Golobokova<sup>1\*</sup>, I.A. Kruglinsky<sup>2</sup>, A.O. Pochufarov<sup>2</sup>, I.I. Marinaite<sup>1</sup>, N.A. Onishchuk<sup>1</sup>,  
M.D. Kravchishina<sup>3</sup>, M.V. Flint<sup>3</sup>, M.Yu. Shikhovtsev<sup>1</sup>, O.I. Khuriganova<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Limnology Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia;

<sup>2</sup>V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia;

<sup>3</sup>Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

lg@lin.irk.ru

Received May 31, 2022 / Revised July 26, 2022 / Accepted October 7, 2022

**Keywords:** Arctic, atmospheric aerosol, elements, ions, polyaromatic hydrocarbons.

### Summary

Atmospheric aerosol is an important characteristic of the state of the atmospheric air, therefore, in the summer of 2021, atmospheric aerosol samples were collected in the expeditions of the Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences to study the chemical composition (ions, trace elements, polyaromatic hydrocarbons) of aerosols in the Arctic atmosphere. The expeditions were carried out on the research ship (RS) Akademik Mstislav Keldysh in the Kara Sea (83rd cruise, June 18 – July 8, 2021), in the Barents Sea and the Norwegian-Greenland Basin (84th cruise, July 24 – August 26, 2021). It is established that the average total concentration of ions in the aerosol of the Kara Sea is  $5.4 \pm 1.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , which corresponds to the average data obtained in previous years. In the aerosol of the Barents Sea and the Norwegian-Greenland basin, the average value of  $5.0 \pm 2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  was considered as potentially possible for the studied region. Concentrations of such ions as  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{Cl}^-$  dominated in the aerosol composition of all regions. The average total concentration of trace elements in the composition of the aerosol of the Barents Sea and the Norwegian-Greenland basin is 1.5 times higher than in the aerosol of the Kara Sea. The predominant concentrations of trace elements in the aerosol of both study areas were Cr, Zn, Al, Fe, Mo, Sr, Ba, Mn, Sn, Ti, Pb, Cu, Ni. As a result of the calculation of the ranking of trace elements by atmospheric pollution in the aerosol of the Kara Sea, Fe, Cu, Ni, Pb are prioritized, and in the aerosol of the Barents Sea and the Norwegian-Greenland basin – Fe, Cu, Sn, Pb. The level of air pollution with trace elements in both areas is low. 13 compounds of polyaromatic hydrocarbons with an average total concentration of  $0.65 \text{ ng}/\text{m}^3$  in aerosol collected in 83 cruise, and  $0.75 \text{ ng}/\text{m}^3$  in 84 one were identified. Compounds of polyaromatic hydrocarbons with two and three benzene rings (naphthalene, phenanthrene and their homologues) coming from petrogenic sources accounted for 92 and 80% of the total amount of polyaromatic hydrocarbons, respectively. Atmospheric aerosol sampling for the study of chemical composition was carried out under conditions of fog of various densities, with precipitation and destruction of seasonal ice.

**Citation:** L.P. Golobokova, I.A. Kruglinsky, A.O. Pochufarov, I.I. Marinaite, N.A. Onishchuk, M.D. Kravchishina, M.V. Flint, M.Yu. Shikhovtsev, O.I. Khuriganova. Chemical composition of the atmospheric aerosols in Arctic regions in the summer of 2021. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2022, 62 (4): 607–620. [In Russian].  
doi: 10.31857/S2076673422040155, edn: miisrg

Поступила 31 мая 2022 г. / После доработки 26 июля 2022 г. / Принята к печати 7 октября 2022 г.

**Ключевые слова:** Арктика, атмосферный аэрозоль, ионы, микроэлементы, полиароматические углеводороды.

Выявлены различия и сходство химического состава (ионы, микроэлементы, ПАУ) приводного атмосферного аэрозоля, собранного в летний период 2021 г. по маршрутам экспедиций НИС «Академик Мстислав Келдыш» в районе Карского моря (второй этап 83-го рейса, 18 июня – 8 июля 2021 г.), в Баренцевом море и Норвежско-Гренландском бассейне (84-й рейс, 24 июля – 26 августа 2021 г.).

## Введение

Оценка состояния таких элементов криосферы, как снежный покров, ледяной покров морей, ледники и вечная мерзлота в арктических районах, указывает на устойчивое изменение температуры воздуха в нижнем слое атмосферы и сокращение объёма ледяного покрова в зимнее время (Семенов и др., 2015; Мелешко и др., 2018). Арктическая зона граничит с пятью развитыми государствами, три из них – Норвегия, Россия и США – добывают нефть и газ севернее Полярного круга. Проведение работ на шельфе и развитие в арктических районах судоходства способствуют росту выбросов в атмосферу парниковых газов  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$  и чёрного углерода, которые играют важную роль в климатических изменениях Арктики (Bond et al., 2013; Group..., 2015). В результате атмосферного переноса в арктические районы поступают аэрозольные примеси из более низких широт. Эти примеси, поглощая и рассеивая солнечную радиацию, влияют не только на многие физико-химические процессы атмосферы, осаждаясь на подстилающую поверхность в арктической зоне, но и становятся источником осадочного вещества в системе «континент–атмосфера–океан» (Шевченко, 2006; Гинзбург и др., 2008).

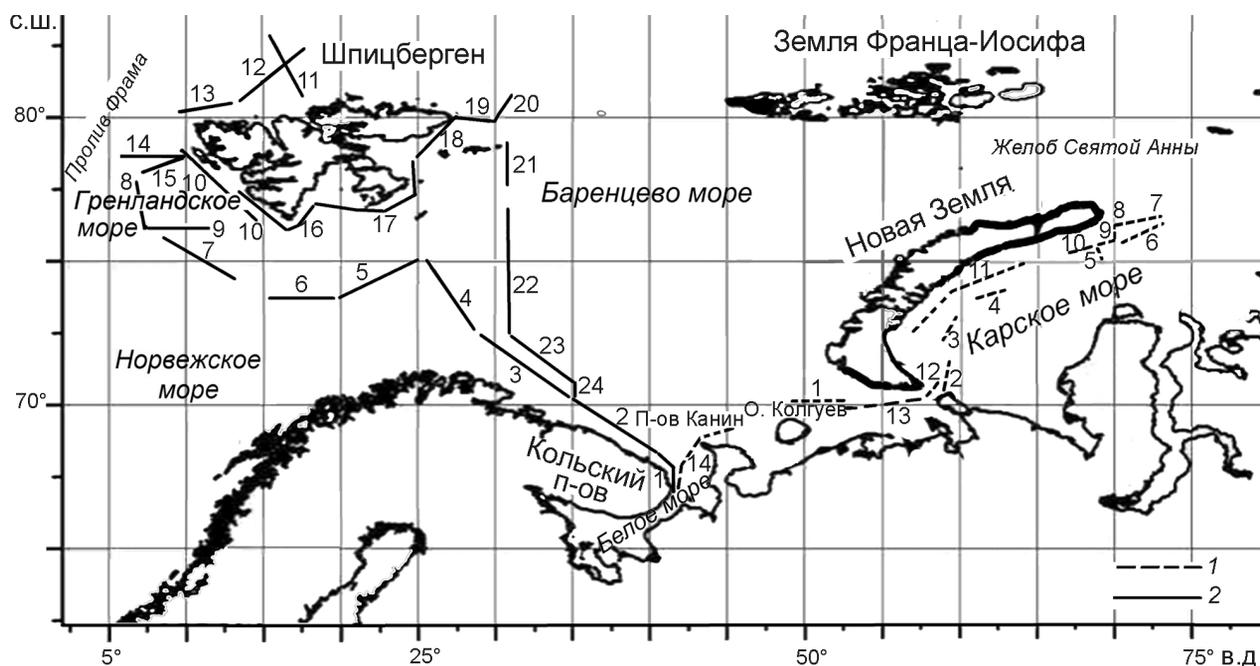
Значительна роль аэрозоля в антропогенном воздействии и на окружающую среду. Проблема дальнего транспорта атмосферного аэрозоля из крупных промышленных центров Северного полушария, и оценка этих эмиссий на арктический бассейн получила развитие в начале 1970-х годов. Организованы круглогодичные наблюдения за уровнем загрязнения атмосферного воздуха на Аляске, в Гренландии, в Канадском, Норвежском и Российском секторах Арктики (Надубович, 1977; Heintzenberg et al., 1981; Barrie et al., 1985; Shaw, 1995). Получены длительные ряды наблюдений за временной и пространственной изменчивостью физико-химических свойств аэрозоля в арктической зоне. В результате российских исследований, несмотря на эпизодичность измерений, установлен ярко выраженный эффект увеличения интегральной оптической толщины атмосферы в весенний период, связанный с максимумом аэрозольного загрязнения воздушной среды Арктики, что совпадает с результатами зарубежных исследова-

ний (Barrie et al., 1985; Русина, Радионов, 2002). По данным В.П. Шевченко и коллег, общее поступление аэрозоля и естественного, и антропогенного происхождения на поверхность Северного Ледовитого океана колеблется от 2,8 до 7,5–8,2 млн т в год (Шевченко и др., 2001). Захораниваясь в ледяном и снежном покровах арктической зоны, аэрозоль создаёт своеобразный архив событий прошлого. Химический анализ состава ледяных и снежных кернов в арктическом регионе позволил обнаружить не только следы вулканических извержений (Wei et al., 2008), но и радиоактивные выбросы Чернобыльской аварии, в результате которой радионуклиды распространились как по всей территории Европы, так и в Арктической зоне (Davidson et al., 1987). В результате послойных исследований кернов ледников островов арктического региона обнаружено, что в период с 1956 по 1977 г. наблюдалось 75%-е увеличение загрязнения воздуха в Арктике, которое связано с заметным увеличением  $\text{SO}_2$  и выбросов  $\text{NO}_x$  в Европе (Barrie et al., 1985). Интенсивное освоение арктической зоны в современный период и расширение судоходства, когда большинство морских судов применяют разрешённое вплоть до 2029 г. тяжёлое дизельное топливо, оставит свой «след» в ледяных и снежных кернах Арктики в будущем (Humpert, 2020).

Исследование физико-химических свойств атмосферного аэрозоля проводится как на стационарных станциях, так и по маршрутам морских экспедиций. Здесь рассматривается химический состав атмосферного аэрозоля, собранного в летний период 2021 г. на маршрутах второго основного этапа 83-го и 84-го рейсов НИС «Академик Мстислав Келдыш» (Флинт и др., 2022; Кравчишина и др., 2022). Цель исследования – оценка современного состояния воздушной среды в арктических экосистемах, подвергающихся влиянию текущих климатических процессов и антропогенному воздействию, для понимания происходящих в регионе изменений.

## Материалы и методы исследования

Атмосферный аэрозоль собирался по маршрутам арктических морских экспедиций научно-исследовательского судна «Академик Мстис-



**Рис. 1.** Схема 83- (1) и 84-го (2) рейсов научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш». Сплошными и пунктирными линиями с номерами проб показаны отрезки маршрутов, по которым собирался атмосферный аэрозоль

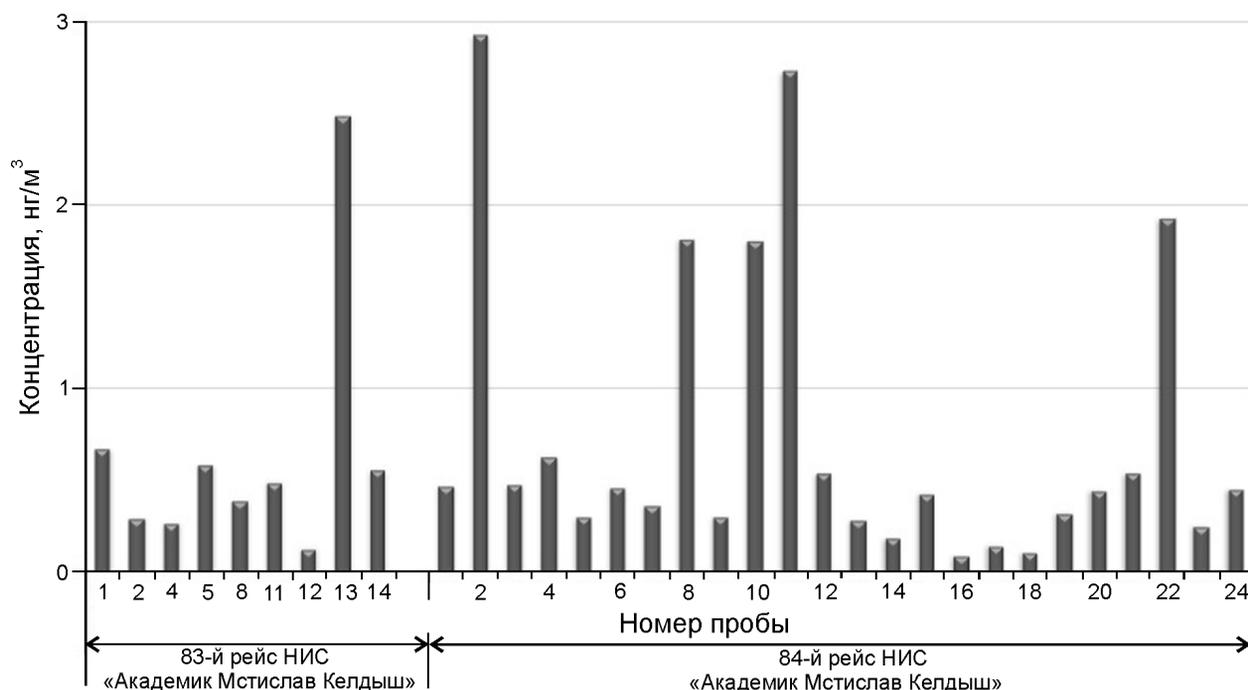
**Fig. 1.** The scheme of the 83<sup>rd</sup> (1) and 84<sup>th</sup> (2) cruises of the Research Vessel «Akademik Mstislav Keldysh». The solid and dotted lines with sample numbers show the sections of the routes along which the atmospheric aerosol was collected

лав Келдыш» на втором этапе 83-го рейса (18 июня – 8 июля 2021 г., 83-й рейс) и в 84-м рейсе (24 июля – 26 августа 2021 г., 84-й рейс). Маршрут 83-й рейс пролегал на северо-восток Карского моря и следовал по границе сезонного льда. В рейсе отобрано 14 проб атмосферного аэрозоля, одна исключена для сравнения результатов в связи с попаданием на фильтр морской воды (сумма ионов  $102 \text{ мкг/м}^3$ ). Исследования в 84-м рейсе выполняли в Баренцевом море и Норвежско-Гренландском бассейне в области контакта холодной полярной и тёплой атлантической водных масс. В 84-м рейсе отобрано 24 пробы атмосферного аэрозоля (рис. 1, рис. 2).

В пробах атмосферного аэрозоля проанализирован состав ионов, микроэлементов и полиароматических углеводородов (ПАУ). Для определения ионного и микроэлементного состава аэрозоль собирали на целлюлозно-бумажные фильтры Whatman-41; для исследования состава ПАУ применяли кварцевые фильтры Whatman QM-A. Для анализа ионного состава фильтр подвергали экстракции бидистиллированной водой в ультразвуковой бане. В профильтрованном полученном растворе определяли ионы

$\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и измеряли величины pH. Ионный состав аэрозоля анализировали на безреагентной системе ICS-3000 (США, Dionex), одобренной Американским Управлением по охране окружающей среды (EPA). Уровень флуктуационных шумов, дрейф нулевого сигнала и отклонение выходного сигнала прибора контролировали с помощью растворов контрольных образцов (Голобокова и др., 2020).

Элементный состав (Li, Be, B, Al, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Sr, Mo, Cd, Sn, Sb, Ba, W, Pb, Th, U, Ag, Tl) в аэрозольных пробах определяли на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Agilent-7500 CE (США, Agilent Technologies Int) с точностью не более 0,2%. Суть метода заключалась в извлечении собранных на фильтр примесей концентрированной азотной кислотой (Xu, Gao, 2014). Образцы подавали с помощью распылителя с микротокком (0,3 мл/мин). Дрейф прибора контролировали с использованием внутреннего стандарта и контрольного образца каждого элемента. Для определения ПАУ (нафталин, 1-метилнафталин 2-метилнафталин, аценафтилен, аце-



**Рис. 2.** Суммарные концентрации соединений полиароматических углеводородов в составе атмосферного аэрозоля, собранного в 83- и 84-м рейсах научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш», нг/м<sup>3</sup>

**Fig. 2.** The total concentrations of polyaromatic hydrocarbon compounds in atmospheric aerosol collected in the 83<sup>rd</sup> and 84<sup>th</sup> cruises of the Research Vessel «Akademik Mstislav Keldysh», ng/m<sup>3</sup>

нафтен, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, ретен, бенз[а]антрацен, хризен, бенз[б]флуорантен, бенз[к]флуорантен, бенз[е]пирен, бенз[а]пирен, перилен, индено[1,2,3-с,d]пирен, бензо[g,h,i]перилен, дибенз[а,h]антрацен) экстракцию из фильтров проводили с помощью 30 мл н-гексана. ПАУ анализировали на хромато-масс-спектрометре с тройным квадратом Agilent Technologies 7890В GC System 7000С GC-MS (Agilent Scientific Instruments, Santa Clara, California, USA) и капиллярной колонкой OPTIMA®17 мс (30 м × 0,25 мм × 0,25 мкм). Предел определения ПАУ в аэрозоле составлял 0,002 нг/м<sup>3</sup>, который оценивался на основе размаха сигнал/шум каждого пика ПАУ, равного 10 (Gorshkov et al., 2021).

В качестве исходной информации для расчёта обратных траекторий применяли данные из баз Национального управления океанических и атмосферных исследований США с сервера <https://www.arl.noaa.gov/>. Расчёты выполняли в программном обеспечении HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) (Stein et al., 2015).

## Результаты исследования и обсуждение

**Химический состав приводного атмосферного аэрозоля, собранного на втором этапе 83 рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш».** Сумма концентраций ионов в составе аэрозоля, собранного в 83-м рейсе, изменялась от 3,8 до 20,5 мкг/м<sup>3</sup>. Выделены четыре района исследований со средними суммами концентраций  $3,9 \pm 0,3$ ,  $7,6 \pm 0,2$ ,  $15,4 \pm 4,7$  и  $15,2 \pm 2,1$  мкг/м<sup>3</sup>. На долю двух первых диапазонов приходится около 73% определений (среднее  $5,4 \pm 1,9$  мкг/м<sup>3</sup>), выполненных над акваторией Карского моря. Аэрозоль с низкой концентрацией ионов в приводной атмосфере собран 21–22 июня (пробы № 1, 2) на маршруте от о. Колгуев до южной оконечности Новой Земли, а также 28–30 июня в районе северной оконечности архипелага (см. рис. 2, 8–10). В этот период прибрежная зона Новой Земли и практически весь район Новоземельской впадины были свободны ото льда, а вся центральная и южная части бассейна Карского моря покрыты сезонным льдом. В районе северной части архипелага наблюдался туман разной плотности. Аэрозоль

Таблица 1. Средние концентрации ионов и их среднеквадратичные отклонения в составе аэрозоля (83-й рейс судна «Академик Мстислав Келдыш» 18 июня–8 июля 2021 г.)

Компонент	Средние концентрации ионов и их среднеквадратичные отклонения в составе аэрозоля, мкг/м <sup>3</sup>			
	3,6–4,3	7,4–7,8	10,9–20,3	13,7–16,7
H <sup>+</sup>	0,011±0,001	0,016±0,003	0,028±0,010	0,020±0,001
Na <sup>+</sup>	0,36±0,05	1,26±0,09	2,81±1,69	3,42±0,55
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	1,25±0,11	1,37±0,19	2,05±0,71	1,37±0,07
K <sup>+</sup>	0,02±0,01	0,04±0,00	0,16±0,06	0,10±0,01
Mg <sup>2+</sup>	0,01±0,00	0,02±0,00	0,09±0,04	0,14±0,03
Ca <sup>2+</sup>	0,07±0,02	0,12±0,02	0,33±0,10	0,26±0,11
Cl <sup>-</sup>	1,88±0,14	4,11±0,20	8,04±2,66	8,30±1,70
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,11±0,04	0,12±0,02	0,17±0,09	0,20±0,17
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,18±0,06	0,54±0,09	0,86±0,66	1,21±0,00

со вторым диапазоном суммы ионов собран над глубоководной северной частью Карского моря в районе восточного отрога жёлоба Св. Анны (26–27 июня, пробы № 6, 7) и при прохождении судна в обратном направлении вдоль острова Северный Новой Земли (1 августа, проба № 11). Некоторому повышению концентраций примесей в атмосфере могли способствовать тепло- и влагообмен с атмосферой в условиях разрушения сезонного льда. Наблюдались выпадение атмосферных осадков в виде мокрого снега и мелкого дождя, а также повышенная влажность воздуха.

Высокие концентрации ионов определены в аэрозоле, отобранном 23–24 июня (15,2–20,3 мкг/м<sup>3</sup>, пробы № 3, 4) и 25 июня в центральной части Карского моря (10,9 мкг/м<sup>3</sup>, проба № 5). При отборе пробы 25 июня отмечено попадание выбросов из трубы судна на пробоотборное устройство, поэтому проба была исключена из дальнейшего рассмотрения. Пробы с повышенным суммарным содержанием ионов в аэрозоле собраны 3–4 июля при прохождении судна от Карских Ворот до п-ва Канина и по акватории северной части Белого моря (13,7–16,7 мкг/м<sup>3</sup>) (см. рис. 2, 13–14) в условиях плотного тумана. Известно, что химический состав аэрозолей определяется их источником, а массовая концентрация – тем, откуда приходят воздушные массы в район измерений – с континента или с моря (Ивлев, 1982). В районе Белого моря анализ переноса воздушных масс свидетельствовал об их поступлении с Кольского полуострова. В табл. 1 показаны средние концентрации ионов в составе аэрозоля для каждого из диапазонов сумм концентраций ионов. Отме-

тим чрезвычайную изменчивость концентраций отдельных ионов. Обращают на себя внимание высокие положительные коэффициенты асимметрии (> 0,5) и эксцесса распределения (> 1,0). Это показывает, что осреднять данные измерений следует геометрически.

Преобладающие ионы в составе аэрозоля во всех диапазонах концентраций – Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> и Cl<sup>-</sup>. Эквивалентное соотношение концентраций ионов показывает, что при низких концентрациях основная доля в формировании ионного состава аэрозоля принадлежала ионам NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (34%) и Cl<sup>-</sup> (45%). Долевое участие ионов Na<sup>+</sup> составляло около 8%. При возрастании суммарных концентраций ионов долевое соотношение концентраций отдельных ионов изменилось. Доля ионов Na<sup>+</sup> возросла до 10–19% в диапазоне 7,4–7,8 мкг/м<sup>3</sup> и до 28% в диапазоне 15,2±4,7 мкг/м<sup>3</sup>, при этом доля ионов NH<sub>4</sub><sup>+</sup> снизилась до 23–26 и 12–16% соответственно. При повышении суммарных концентраций ионов в их составе увеличивался вклад ионов Ca<sup>2+</sup> с 1,8 до 2,7% и SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> – с 2,1 до 5,3%. Долевой вклад ионов Cl<sup>-</sup> был более 40% во всех диапазонах концентраций ионов. Для идентификации возможных источников примесей в атмосфере использовали известную формулу (Ивлев, 1982; Xu, Gao, 2014)

$$KO_i = [(C_i/\mathcal{E})_{\text{аэр}}]/[(C_i/\mathcal{E})_{\text{мв}}], \quad (1)$$

где  $KO_i$  – коэффициент обогащения;  $C_i/\mathcal{E}$  – отношение концентрации  $i$ -го элемента и реперного элемента  $\mathcal{E}$  в аэрозолях (аэр.) и в веществе вероятного источника – морской воде (мв.); в качестве реперного элемента для ионов применяли Na (Millero, 2016).

Обогащение аэрозольного вещества ионами позволяет установить дополнительный вклад разных источников в формирование химического состава аэрозоля. Для периодов с низкими суммарными концентрациями ионов в аэрозоле расчёты отношений по формуле (1) показали повышенные значения КО аэрозоля ионами  $\text{Ca}^{2+}$  ( $K = 4,0 \div 7,5$ ). Соотношение концентраций ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  морского (ss) и неморского (nss) происхождения в аэрозоле, определённое по формулам (2) и (3), также указывает на значительную долю неморской составляющей в составе аэрозолей: 36–65% для ионов  $\text{SO}_4^{2-}$  и 70–87% для ионов  $\text{Ca}^{2+}$  (Keene et al., 1986):

$$\begin{aligned} \text{nss-SO}_4^{2-} &= \text{SO}_4^{2-} - 0,06\text{Na}^+, \\ \text{ss-SO}_4^{2-} &= \text{SO}_4^{2-} - \text{nss-SO}_4^{2-}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{nss-Ca}^{2+} &= \text{Ca}^{2+} - 0,02 \cdot \text{Na}^+, \\ \text{ss-Ca}^{2+} &= \text{Ca}^{2+} - \text{nss-Ca}^{2+}, \end{aligned} \quad (3)$$

где для расчётов применяли мольные концентрации.

Расчёт обогащения ионов в составе аэрозоля с высокими суммарными концентрациями ионов не выявил увеличения их коэффициентов. Соотношение концентраций ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  морского и неморского происхождения показало преобладание морской составляющей для ионов  $\text{SO}_4^{2-}$  (64–100%). В происхождении ионов  $\text{Ca}^{2+}$  отмечены как высокая морская (40–57%), так и континентальная (43–60%) составляющие. Исключение составила проба, отобранная 25 июня (проба № 5) в центральной части Карского моря. Доля неморского  $\text{Ca}^{2+}$  в составе аэрозоля составила 85%, при отборе пробы, как уже отмечалось, было возможное попадание выбросов из трубы судна.

При сравнении результатов измерений 2021 г. с данными предыдущих исследований установлено, что ранее наблюдалась близость концентраций ионов в аэрозоле Карского моря с аналогичными данными в море Лаптевых и Северной Атлантике (Голобокова и др., 2020), однако данные 2021 г. показали рост суммарной концентраций ионов в 1,3–1,5 раза в районе северной оконечности архипелага Новая Земля и в 3,5–6,5 раз в глубоководной и центральной частях Карского моря. Предполагаемые причины этого – разрушение сезонного льда в акватории моря и увеличения вертикального и горизонтального обмена

воздуха в результате интенсификации атмосферного переноса и турбулентного перемешивания в атмосфере. Измерения предыдущих лет вели в более поздние периоды (июль–сентябрь). Больше всего наблюдаемые изменения коснулись повышения концентраций ионов  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ . Характерно, что концентрации ионов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  в районе северной оконечности архипелага Новая Земля были ниже, чем средние для арктического района по маршрутам морских экспедиций 2018–2019 гг. (Голобокова и др., 2020). В целом же сравнение среднего значения суммарной концентрации ионов в составе аэрозоля –  $5,4 \pm 1,9$  мкг/м<sup>3</sup> – сопоставимо с результатами многолетних измерений (Шевченко и др., 2021).

Изменчивость концентраций микроэлементов в составе аэрозоля в атмосфере Карского моря содержит различающееся с ионным составом распределение. Повышенные концентрации микроэлементов определены (пробы № 6–11) преимущественно над глубоководным районом моря у северной части архипелага Новая Земля. Преобладающими микроэлементами с концентрациями в диапазоне 12–194 нг/м<sup>3</sup> в порядке возрастания концентраций были Cr, Zn, Al, Fe. Второй диапазон с концентрациями 1,3–6,0 нг/м<sup>3</sup> составили микроэлементы Mo, Sr, Ba, Mn, Sn, Ti, Pb, Cu, Ni. Концентрации других элементов изменялись в пределах 0,01–0,68 нг/м<sup>3</sup>. Как и для ионов суммарная концентрация элементов в составе аэрозоля в 2021 г. была почти в 8 раз выше, чем средние для арктического района по маршрутам морских экспедиций 2018–2019 гг. (Голобокова и др., 2020).

Коэффициенты обогащения (КО) микроэлементов, рассчитанные по формуле (1), где в качестве реперного элемента применяли Al в составе морской воды (Millero, 2016), показали, что наиболее высокие КО определены для Sn (КО = 1340), входящего во вторую группу элементов по величине концентраций, и для Sb (КО = 1300), концентрация которого находится в диапазоне 0,01–0,68 нг/м<sup>3</sup>. В группу микроэлементов с повышенными (> 10) в порядке возрастания КО вошли Tl, As, Ni, W, Cu, Cr, Cd, Pb, Zn, Mo. Для расчёта приоритетности микроэлементов в атмосфере Карского моря применяли количественную характеристику индекса загрязнения атмосферы (ИЗА) отдельной примесью,

Таблица 2. Концентрации приоритетных микроэлементов и нормированные характеристики концентраций микроэлементов в составе аэрозоля (83-й рейс судна «Академик Мстислав Келдыш»)\*

Микроэлемент	Концентрация, нг/м <sup>3</sup>	ИЗА ( $I_i$ ) отдельным микроэлементом	Вклад микроэлемента в общий уровень загрязнения атмосферы, %
Be	0,04	0,0001	0,3
Al	112,67	0,0007	1,9
Cr	12,86	0,0003	0,8
Mn	3,64	0,0006	1,6
Fe	216,78	0,0308	82,6
Co	0,24	0,0001	0,3
Ni	6,50	0,0013	3,5
Cu	8,83	0,0014	3,8
Zn	29,91	0,0007	1,9
Mo	1,74	0,0001	0,3
Sn	4,52	0,0002	0,5
Ba	3,25	0,0001	0,3
Pb	4,67	0,0009	2,4
КИЗА		0,0373 << 1	

\*ИЗА ( $I_i$ ) – индекс загрязнения атмосферы отдельным микроэлементом, КИЗА – комплексный индекс загрязнения атмосферы.

учитывающей класс опасности вещества (Экологический..., 2015):

$$\text{ИЗА } (I_i) = (C_i / \text{ПДК}_{\text{cc}}) \beta_i,$$

где ИЗА ( $I_i$ ) – индекс загрязнения атмосферы отдельной примесью;  $C_i$  – концентрация микроэлемента в составе аэрозоля, собранного в 83-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш»;  $\text{ПДК}_{\text{cc}}$  – предельно допустимая среднесуточная концентрация микроэлемента в воздухе населённых мест (Предельно..., 2019);  $\beta_i$  – константа для различных классов опасности.

Проведён расчёт ранжирования микроэлементов по загрязнению атмосферы над Карским морем. Наибольший вклад в загрязнение атмосферы вносят 13 элементов, приоритетными из которых были Fe, Cu, Ni, Pb. Рассчитан комплексный индекс загрязнения атмосферы микроэлементами (КИЗА), равный сумме ИЗА ( $I_i$ ) отдельными примесями. В соответствии с существующими методами оценки загрязнения атмосферы уровень загрязнения атмосферы микроэлементами над Карским морем оценивается как низкий (Предельно..., 2019). Данные расчётов приведены в табл. 2.

Проведён анализ проб аэрозоля для определения состава и концентраций полиароматических углеводородов. Из 21 определяемого соединения ПАУ идентифицированы 13: нафталин,

2-метилнафталин, 1-метилнафталин, аценафтилен, аценафтен, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, ретен, бенз(а)антрацен, хризен. Такие соединения, как бенз(б)флуорантен, бенз(к)флуорантен, бенз(е)пирен, бенз(а)пирен, перилен, индено(1,2,3-с,d)пирен, бензо(g,h,i)перилен, дибенз[a,h]антрацен определены на уровне шумов применяемого метода. Суммарное содержание ПАУ в аэрозоле изменялось в основном в пределах от 0,13 до 0,68 нг/м<sup>3</sup> при среднем значении 0,65 нг/м<sup>3</sup>. Повышенные концентрации ПАУ в 83-м рейсе (0,58–0,68 нг/м<sup>3</sup>) определены на начальном и конечном этапах маршрута судна, а также над глубоководной частью Карского моря в условиях разрушающегося льда. Максимальное значение до 2,5 нг/м<sup>3</sup> наблюдалось при прохождении судна от Карских Ворот до п-ва Канина (см. рис. 2).

В составе аэрозоля отмечено преобладание доли ПАУ с двумя и тремя бензольными кольцами, составляющей в среднем 92% общей суммы этих соединений в такой последовательности: нафталин (40%) > фенантрен (25%) > 2-метилнафталин (20%) > 1-метилнафталин (15%) > флуорантен (11%). Соединения ПАУ с двумя или тремя бензольными кольцами (нафталин, фенантрен и их гомологи) поступают от петрогенных источников, к которым относятся разливы нефтепродуктов, а также образуются при

Таблица 3. Средние концентрации ионов и их статистические характеристики в составе аэрозоля (мкг/м<sup>3</sup>) (84-й рейс судна «Академик Мстислав Келдыш» 24 июля–26 августа 2021 г.)

Показатель	Среднее	СКО	Минимальное	Максимальное	Асимметрия	Экссесс
H <sup>+</sup>	0,02	0,01	< 0,01	0,05	0,3	0,3
Na <sup>+</sup>	0,66	0,57	0,21	2,63	2,2	5,1
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,66	0,17	0,45	1,00	0,4	–1,0
K <sup>+</sup>	0,09	0,08	0,03	0,30	1,5	1,3
Mg <sup>2+</sup>	0,07	0,22	0,01	0,87	2,1	4,3
Ca <sup>2+</sup>	0,09	0,08	0,03	0,36	1,9	4,3
Cl <sup>-</sup>	2,65	1,21	1,51	7,02	2,1	5,7
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,12	0,08	0,06	0,39	2,0	4,8
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,37	0,30	0,15	1,54	2,4	7,2

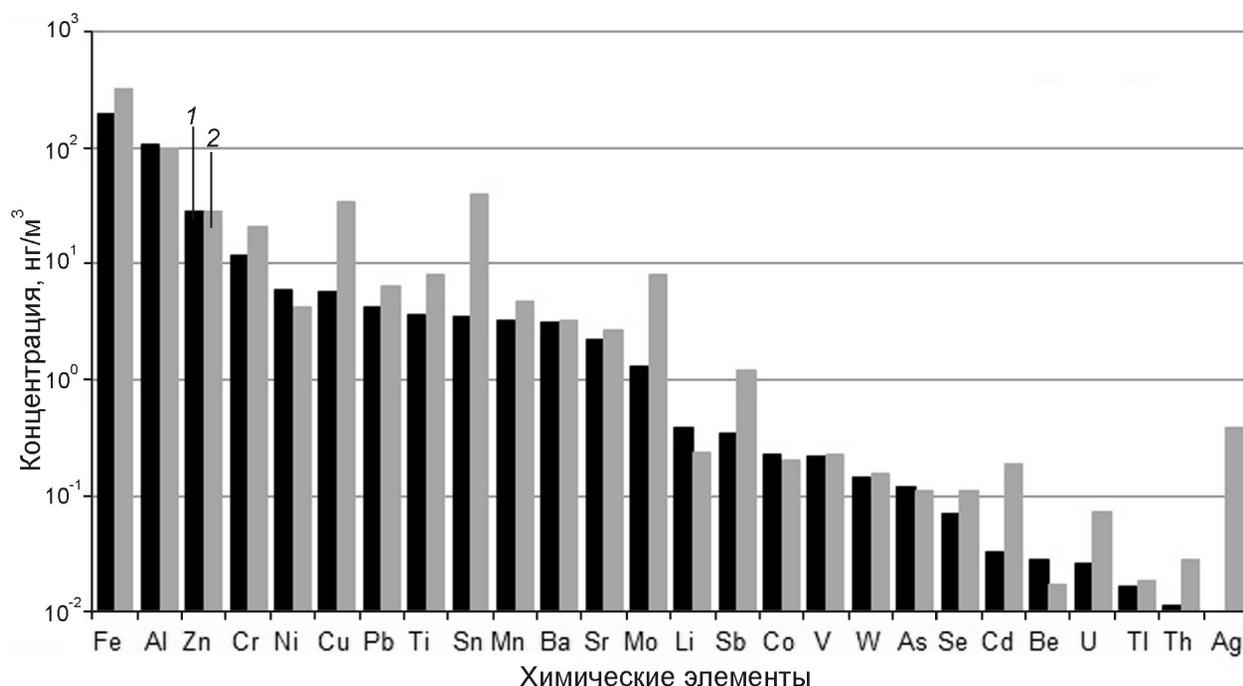
низких и умеренных температурах при процессах сжигания органического топлива или поступают в атмосферу при испарении нефтепродуктов (Morillo et al., 2007).

**Химический состав аэрозоля, собранного в 84-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш».** В составе аэрозоля, собранного в этом рейсе, суммарная концентрация ионов изменялась в диапазоне от 3,0 до 12,4 мкг/м<sup>3</sup> (среднее 5,0±2,1 мкг/м<sup>3</sup>). Несмотря на разброс данных, 96% значений суммарных концентраций ионов в аэрозоле лежат в пределах двух среднеквадратических отклонений. Это означает, что средние концентрации ионов в составе аэрозоля можно рассматривать как потенциально возможные для исследуемого региона. Повышенные суммарные концентрация ионов в атмосфере, равные 6,2–7,9 мкг/м<sup>3</sup>, определены при выходе от Кольского полуострова в Баренцево море (см. рис. 2, 1–2), у границ Гренландского и Норвежского морей (проба № 6), а также у кромки льда в районе Северо-Восточной Земли (проба № 19). Наиболее высокое суммарное содержание ионов в составе аэрозоля зафиксировано 21–22 августа (12,4 мкг/м<sup>3</sup>, проба № 21) при пересечении Баренцева моря от архипелага Шпицберген до Кольского полуострова в условиях встречного ветра до 10 м/с. 74% определений составили значения суммарных концентраций в пределах 3,0–5,8 мкг/м<sup>3</sup> (см. рис. 2, 3–5, 7–18, 20, 22). Наиболее низкие из них (3,0–3,7 мкг/м<sup>3</sup>) определены в атмосфере глубоководной части Гренландского моря (пробы № 7, 9), пролива Фрама (проба № 14) и вокруг островов Западный Шпицберген (проба № 16), Эдж, Белый (проба № 18).

Как и в 83-м рейсе, в составе аэрозоля наблюдалась изменчивость концентраций отдель-

ных ионов, на что указывают высокие положительные коэффициенты асимметрии и эксцесса распределения (табл. 3). В связи с этим использовано геометрическое осреднение результатов измерений. В составе аэрозоля, как и в предыдущем рейсе, преобладали концентрации ионов Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> и Cl<sup>-</sup>. Несмотря на низкие количественные характеристики ионов в аэрозоле, в период до 19 августа при следовании судна по Баренцеву морю, глубоководному Норвежско-Гренландскому бассейну и вокруг островов архипелага Шпицберген отмечалось обогащение аэрозоля ионами калия (КО = 1,8÷15,7). В эти же периоды отмечены повышенные коэффициенты обогащения аэрозоля ионами SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (КО = 1,5÷4,9). Во второй половине рейса – 14–23 августа – в аэрозоле повысились концентрации ионов Mg<sup>2+</sup> с 0,02–0,08 до 0,06–0,87 мкг/м<sup>3</sup>. В этот период повысился вклад морской составляющей для ионов SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> и Ca<sup>2+</sup>. В пробах, собранных при пересечении Баренцева моря 21–22 августа, определены максимальные концентрации Na<sup>+</sup> и Cl<sup>-</sup> (см. табл. 3). Анализ переноса воздушных масс показывает на их преимущественное поступление из районов Северной Атлантики и Северного Ледовитого океана.

Сравнение ионного состав аэрозоля с аналогичными данными предыдущих лет исследований (2007, 2013, 2016–2018 гг.) указывает на наибольшую изменчивость состава ионов континентального и антропогенного происхождения – NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (Сакерин и др., 2018; Голобокова и др., 2020; Шевченко и др., 2021). Концентрации этих ионов в большей степени зависят от места и периода отбора проб. Состав ионов морского происхождения



**Рис. 3.** Концентрации микроэлементов в составе атмосферного аэрозоля, собранного в 83- (1) и 84-м (2) рейсах научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш»,  $\text{нг}/\text{м}^3$

**Fig. 3.** The concentrations of trace elements in atmospheric aerosol collected in the 83<sup>rd</sup> (1) and 84<sup>th</sup> (2) cruises of the Research Vessel «Akademik Mstislav Keldysh»,  $\text{ng}/\text{m}^3$

преимущественно стабилен. Средняя суммарная концентрация ионов в аэрозоле ( $5,0 \pm 2,1 \text{ мкг}/\text{м}^3$ ) близка по величине к аналогичному значению над Карским морем. Анализ результатов измерения концентраций микроэлементов в составе аэрозоля, полученных в 84-м рейсе и проведённый по той же методике, что применялась в предыдущем рейсе, показал следующее: ряд микроэлементов с высокими концентрациями ( $12\text{--}215 \text{ нг}/\text{м}^3$ ) в аэрозоле, полученный в 84-м рейсе, был более длинным – Cr, Cu, Zn, Sn, Fe, Al; число элементов с диапазоном концентраций более низкого порядка ( $1,0\text{--}5,7 \text{ нг}/\text{м}^3$ ) меньше – Sb, Sr, Mo, Ba, Ni, Mn, Pb, Ti. В целом же набор микроэлементов с концентрацией больше  $1,0 \text{ нг}/\text{м}^3$  одинаков в аэрозоле обоих рейсов (рис. 3). Средняя суммарная концентрация микроэлементов в составе аэрозоля, собранного в 84-м рейсе, была выше в 1,5 раза.

В этом материале более высокие концентрации микроэлементов антропогенного происхождения: Mn, Cu, Mo, Cd, Sn, Sb, причём концентрации Sb, Mo, Cu, Cd, Sn выше в 3,5–11,2 раз. Повышенные концентрации элементов содержались в аэрозоле, собранном у гра-

ниц Гренландского и Норвежского морей (проба № 7), в условиях густого тумана у кромки льда в районе архипелага Шпицберген (проба № 11) и вблизи Кольского полуострова (пробы № 2–3, см. рис 2, 24). В районе Кольского полуострова более высокие концентрации элементов и коэффициенты обогащения аэрозольных проб прослеживалась и в 1993–1994 гг., это объяснялось поступлением в район исследований загрязнённых антропогенных выбросов с континента (Шевченко, 2006; 2021). В 2018 г. отмечалось, что повышенные концентрации микроэлементов (в 1,3–20 раз) наблюдались в составе аэрозоля в морях Европейского сектора Северного Ледовитого океана (Голобокова и др., 2020). В 2021 г. средняя концентрация Li, Be, Al, Co, Ni, Zn, As, V в 1,1–1,6 раз была выше в аэрозоле Карского моря (см. рис. 3). Характерно, что в число микроэлементов с повышенными КО ( $> 10$ ) вошли те же компоненты, что и в наблюдениях 83-го рейса (по возрастанию: Tl, As, Ni, W, Cr, Cu, Zn, Pb, Cd, Mo, Sb, Sn). Результаты расчёта приоритетности микроэлементов в атмосфере Баренцева моря показаны в табл. 4. Наиболее приоритетными были элементы Fe,

Таблица 4. Концентрации приоритетных микроэлементов и нормированные характеристики концентраций микроэлементов в составе аэрозоля (84-й рейс судна «Академик Мстислав Келдыш»)\*

Микроэлемент	Концентрация, нг/м <sup>3</sup>	ИЗА ( $I_i$ ) отдельным микроэлементом	Вклад микроэлемента в общий уровень загрязнения атмосферы, %
Al	97,3	0,0006	0,9
Cr	20,8	0,0007	1,1
Mn	4,66	0,0009	1,4
Fe	318	0,0455	69,2
Co	0,20	0,0001	0,1
Ni	4,20	0,0008	1,2
Cu	34,3	0,0125	19,0
Zn	28,6	0,0007	1,0
Mo	8,0	0,0004	0,6
Sn	39,5	0,0020	3,0
Sb	1,20	0,0001	0,1
Ba	3,29	0,0001	0,1
Pb	6,49	0,0015	2,2
Al	97,3	0,0006	0,9
КИЗА	0,0657 << 1		

\*ИЗА ( $I_i$ ) – индекс загрязнения атмосферы отдельным микроэлементом, КИЗА – комплексный индекс загрязнения атмосферы.

Cu, Sn, Pb, уровень загрязнения атмосферы микроэлементами, как и над Карским морем, оценивается как низкий.

В пробах, собранных в атмосфере Баренцева моря и Норвежско-Гренландского бассейна суммарное содержание ПАУ изменялось от 0,09 до 2,93 нг/м<sup>3</sup> (при среднем значении 0,75 нг/м<sup>3</sup>) (см. рис. 2). Повышенные концентрации характерны для проб № 8 (1 августа), № 10 (7–8 августа), № 11 (9 августа), № 22 (21–22 августа). Суммарная концентрация ПАУ, равная 1,82 нг/м<sup>3</sup>, наблюдалась в аэрозоле, собранном 1 августа (проба № 7). Сумма ПАУ, равная 1,93 нг/м<sup>3</sup>, зафиксирована 21–22 августа на заключительном этапе рейса. Максимальное значение до 2,93 нг/м<sup>3</sup> наблюдалось в пробе № 2 от 26 июля в период следования судна от Кольского полуострова в Баренцево море. Доля соединений ПАУ с двумя и тремя бензольными кольцами составила 80% суммы ПАУ в такой последовательности: фенантрен (40%) > нафталин (18%) > флуорантен (16%) > 2-метилнафталин (8%) > 1-метилнафталин (6%).

Обнаруженные концентрации суммы ПАУ в ходе рейсов 83 и 84 ниже летне-осенних значений 2018 г. для приводной атмосферы моря Лаптевых, Баренцева и Карского морей (0,57–7,75 нг/м<sup>3</sup>, среднее значение 1,31 нг/м<sup>3</sup>), при этом сравнимы с концентрациями ПАУ в воз-

духе Западной части Российской Арктики (пос. Баренцбург, архипелаг Шпицберген) – 0,36–1,7 нг/м<sup>3</sup> в сентябре–октябре 2017 г. (Голобокова и др., 2020).

### Заключение

Для оценки современного состояния воздушной среды в арктических природных комплексах во втором основном этапе 83-го и в 84-м рейсах научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» по маршрутам на северо-восток Карского моря в районе Баренцева моря и Норвежско-Гренландского бассейна, отобраны пробы атмосферного аэрозоля для исследования его химического состава (ионы, микроэлементы, ПАУ).

В результате исследований над акваторией Карского моря выделены зоны с различным суммарным содержанием ионов в составе аэрозоля: у южной и северной оконечностей архипелага Новая Земля – 3,9±0,3 мкг/м<sup>3</sup>, в северном глубоководном и центральном районах Карского моря – 7,6±0,2 и 15,4±4,7 мкг/м<sup>3</sup> соответственно. Из выполненных определений около 73% (среднее 5,4±1,9 мкг/м<sup>3</sup>) приходится на долю первых двух диапазонов. В аэрозоле Баренцева моря и Норвежско-Гренландского бассейна 96%

значений суммарных концентраций ионов находились в пределах двух среднеквадратических отклонений, в связи с чем их среднее значение  $5,0 \pm 2,1$  мкг/м<sup>3</sup> рассматривалось как потенциально возможное для исследуемого региона. Наиболее высокое суммарное содержание ионов, равное  $12,4$  мкг/м<sup>3</sup>, определено при пересечении Баренцева моря от архипелага Шпицберген до Кольского полуострова, наиболее низкие концентрации ( $3,0$ – $3,7$  мкг/м<sup>3</sup>) – в атмосфере над глубоководной частью Гренландского моря, проливом Фрама, вокруг островов Западный Шпицберген, Эдж и Белый. В составе аэрозоля в обоих районах исследования преобладали концентрации ионов Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> и Cl<sup>-</sup>. Средние суммарные концентрации ионов в аэрозоле, собранном и в 83-м, и в 84-м рейсах, находятся в близких диапазонах концентраций.

Средняя суммарная концентрация микроэлементов в составе аэрозоля Баренцева моря и Норвежско-Гренландского бассейна выше в 1,5 раза, чем в аэрозоле Карского моря. Отмечается схожесть набора микроэлементов с концентрацией больше  $1,0$  нг/м<sup>3</sup> – Cr, Zn, Al, Fe, Mo, Sr, Ba, Mn, Sn, Ti, Pb, Cu, Ni. В аэрозоле Карского моря средние концентрации микроэлементов Sb, Mo, Cu, Cd, Sn в 3,5–11,2 раза ниже, чем микроэлементов Li, Be, Al, V, Co, Ni, Zn, As, W и при этом в 1,1–1,6 раза выше, чем в аэрозоле Баренцева моря и Норвежско-Гренландского бассейна. Расчёт ранжирования микроэлементов по загрязнению атмосферы позволил выявить элементы, вносящие наибольший вклад в загрязнение атмосферы. Таковыми в атмосфере Карского моря были Fe, Cu, Ni, Pb, в атмосфере Баренцева моря – Fe, Cu, Sn, Pb. Уровень загрязнения атмосферы микроэлементами в обоих районах исследования оценивался как низкий.

В аэрозоле, собранном в 83-м рейсе, суммарная концентрация идентифицированных соединений ПАУ изменялась от  $0,13$  до  $0,68$  нг/м<sup>3</sup> при среднем значении  $0,65$  нг/м<sup>3</sup> и максимальным значении до  $2,5$  нг/м<sup>3</sup>, которое наблюдалось в атмосфере от Карских Ворот до п-ва Канина. Средняя суммарная концентрация ПАУ в составе аэрозоля, собранного в 84-м рейсе, в 1,2 раза выше, чем в 83-м рейсе. Суммарное содержание ПАУ изменялось в более широком диапазоне – от  $0,09$  до  $2,93$  нг/м<sup>3</sup> при среднем значении  $0,75$  нг/м<sup>3</sup>. Наиболее высокие суммы ПАУ определены вбли-

зи Кольского полуострова. Соединения ПАУ с двумя и тремя бензольными кольцами (фенантрен, нафталин, флуорантен), образующиеся при низкотемпературных процессах сжигания органического топлива или поступающие в атмосферу при испарении нефтепродуктов, составили 92 и 80% общей суммы ПАУ соответственно.

Суммарная концентрация ионов и микроэлементов в составе аэрозоля Карского моря в 2021 г. выше, чем средние значения для арктического района по маршрутам морских экспедиций 2018–2019 гг. Средняя суммарная концентрация ионов, равная  $5,4 \pm 1,9$  мкг/м<sup>3</sup>, сопоставима со средними многолетними данными (2007–2016 гг.). Сравнение ионного состава аэрозоля Баренцева моря и Норвежско-Гренландского бассейна с аналогичными данными предыдущих лет указывает на большую изменчивость состава ионов континентального и антропогенного происхождения – NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Состав ионов морского происхождения преимущественно стабилен. В морях Европейского сектора Северного Ледовитого океана концентрации микроэлементов выше. Концентрации суммы ПАУ в ходе рейсов 83- и 84-го рейсов были ниже, чем в арктическом районе по маршрутам летне-осенних экспедиций 2018–2019 гг.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 21–77–20025 «Атмосферный аэрозоль в высокоширотных районах Мирового океана: физико-химический состав, географическое распределение, основные источники и факторы изменчивости». Авторы благодарны экипажу научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» за помощь при выполнении экспедиционных работ. За предоставленную возможность провести траекторный анализ, пользуясь моделью HYSPLIT, авторы признательны сотрудникам Лаборатории воздушных ресурсов Американской национальной администрации по исследованию океана и атмосферы (NOAA).

**Acknowledgments.** This study was supported by the project of the Russian Science Foundation (RSF) № 21–77–20025 «Atmospheric aerosol in high-latitude regions of the World Ocean: physicochemical composition, geographic distribution, main sources and variability factors». The authors are grateful to the crew of the research vessel «Akademik Mstislav

Keldysh» for help in execution of the expedition work. The authors are grateful to the staff of the Air Resources Laboratory of the National Oceanic and

Atmospheric Administration (NOAA) for providing an opportunity to perform the trajectory analysis using the HYSPLIT model.

## Литература

## References

- Гинзбург А.С., Губанова Д.П., Минашкин В.М. Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // Российский химический журнал. 2008. Т. 52. № 5. С. 112–119.
- Голобокова Л.П., Ходжер Т.В., Изосимова О.Н., Зенкова П.Н., Почуфаров А.О., Хуриганова О.И., Онищук Н.А., Маринайте И.И., Польшкин В.В., Радионов В.Ф., Сакерин С.М., Лисицын А.П., Шевченко В.П. Химический состав атмосферного аэрозоля в арктическом районе по маршрутам морских экспедиций 2018–2019 гг. // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 6. С. 421–429. doi: 10.15372/AOO20200601.
- Голобокова Л.П., Ходжер Т.В., Чернов Д.Г., Сидорова О.Р., Хуриганова О.И., Онищук Н.А., Жученко Н.А., Маринайте И.И. Химический состав приземного атмосферного аэрозоля в Баренцбурге архипелага Шпицберген) по результатам многолетних исследований // Лёд и Снег. 2020 а. Т. 60. № 1. С. 85–97. doi: 10.31857/S2076673420010025.
- Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. 368 с.
- Кравчишина М.Д., Ключиткин А.А., Володин В.Д., Глуховец Д.И., Дубинина Е.О., Круглинский И.А., Кудрявцева Е.А., Матуль А.Г., Новичкова Е.А., Политова Н.В., Саввичев А.С., Силкин В.А., Стародымова Д.П. Системные исследования осадкообразования в Европейской Арктике в 84-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» // Океанология. 2022. Т. 62. № 4. С. 660–663. doi: 10.31857/S0030157422040062.
- Мелешко В.П., Катцов В.М., Мирвис В.М., Байдин А.В., Павлова Т.В., Говоркова В.А. Существует ли связь между сокращением морского льда в Арктике и ростом повторяемости аномально холодных зим в Евразии и Северной Америке? Синтез современных исследований // Метеорология и гидрология. 2018. № 43. С. 743–755. doi: 10.3103/S1068373918110055.
- Надубович Ю.А. Поляризационные эффекты во время вспышек оптического излучения, лучистых форм сияний и сумерек // Физические явления в атмосфере высоких широт. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1977. С. 40–49.
- Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений: Гигиенические нормативы, с изменениями, утв. постановлением
- Ginzburg A.S., Gubanov D.P., Minashkin V.M. Influence of natural and anthropogenic aerosols on the global and regional climate. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*. Russian Chemical Journ. 2008, 52 (5): 112–119. [In Russian].
- Golobokova L.P., Khodzher T.V., Izosimova O.N., Zenkova P.N., Pochuyfarov A.O., Khuriganova O.I., Onischuk N.A., Marinaite I.I., Pol'kin V.V., Radionov V.F., Sakerin S.M., Lisitsin A.P., Shevchenko V.P. Chemical composition of atmospheric aerosol in the Arctic region along the routes of the research cruises in 2018–2019. *Optika Atmosfery i Okeana*. Atmospheric and Oceanic Optics. 2020, 33 (06): 421–429. doi: 10.15372/AOO20200601 [In Russian].
- Golobokova L.P., Khodzher T.V., Chernov D.G., Sidорова O.R., Khuriganova O.I., Onischuk N.A., Zhuchenko N.A., Marinaite I.I. Chemical composition of the near–surface atmospheric aerosol in Barentsburg (Svalbard) based on the long-term observations. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2020, 60 (1): 85–97. doi: 10.31857/S2076673420010025. [In Russian].
- Ivlev L.S. *Khimicheskiy sostav i struktura atmosferynykh aerorozoley*. Chemical composition and structure of atmospheric aerosols. Leningrad: Leningrad University Press. 1982: 368 p.
- Kravchishina M. D., Klyuvitkin A.A., Volodin V.D., Glukhovets D.I., Dubinina E.O., Kruglinskiy I.A., Kudryavtseva E.A., Matul A.G., Novichkova E.A., Politova N.V., Savvichev A.S., Silkin V.A., Starodymova D.P. Systems Research of Sedimentation in the European Arctic in the 84th Cruise of the Research Vessel Akademik Mstislav Keldysh . *Okeanologiya*. Oceanology. 2022, 62 (4): 660–663. doi: 10.31857/S0030157422040062. [In Russian].
- Meleshko V.P., Kattsov V.M., Mirvis V.M., Baidin A.V., Pavlova T.V., Govorkova V.A. Is there a link between Arctic Sea ice loss and increasing frequency of extremely cold winters in Eurasia and North America? Synthesis of current research. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2018, 43: 743–755. doi: 10.3103/S1068373918110055. [In Russian].
- Nadubovich Yu.A. Polarization effects during flashes of optical radiation, radiant aurora forms and twilight. *Phizicheskie yavleniya v atmosfere bysokih shirot*. Physical phenomena in the atmosphere of high latitudes. Yakutsk: USSR Academy of Sciences, 1977: 40–49. [In Russian].
- Pre-del'no dopustimyye kontsentratsii (PDK) zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosfernom vozdukh gorodskikh i sel'skikh poseleniy: Gigiyenicheskiye normativy, s izmeneniyami, utverzhdennyye postanovleniyem glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha Rossiyskoy Federatsii 31.05.2018. Maximum permissible concentrations (MPC) of pollutants in the atmospheric air of urban and rural settlements:

- ем Главного государственного санитарного врача Российской Федерации 31.05.2018 № 37. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2019. 55 с.
- Rusina E.N., Radionov V.F.* Оценка «доиндустриальной» оптической толщины атмосферы при полярной дымке в Арктике и современного вклада антропогенных выбросов // *Метеорология и гидрология*. 2002. № 5. С. 35–39.
- Sakerin S.M., Golobokova L.P., Kabanov D.M., Kozlov V.S., Pol'kin V.V., Radionov V.F., Chernov D.G.* Сравнение средних характеристик аэрозоля в соседних арктических районах // *Оптика атмосферы и океана*. 2018. Т. 31. № 08. С. 640–646. doi: 10.15372/AOO20180807.
- Semenov V.A., Martin T., Berens L.K., Latif M., Astafieva E.S.* Изменения площади арктических морских льдов в ансамблях климатических моделей CMIP3 и CMIP5 // *Лёд и Снег*. 2017. Т. 57. № 1. С. 77–107. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-77-107.
- Флинт М.В., Поярков С.Г., Римский–Корсаков Н.А., Мирошников А.Ю.* Экосистемы морей Сибирской Арктики – 2021: Экосистема Карского моря в период схода сезонного льда 83-й рейс научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» // *Океанология*. 2022. Т. 62. № 1. С. 158–161. doi: 10.31857/S0030157422010051.
- Шевченко В.П.* Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. М.: Наука, 2006. 226 с.
- Шевченко В.П., Голобокова Л.П., Сакерин С.М., Лисицын А.П., Кabanov D.M., Новигатский А.Н., Панченко М.В., Политова Н.В., Польшкин В.В., Поповичева О.Б., Ходжер Т.В.* Рассеянное осадочное вещество атмосферы над Баренцевым морем // *Система Баренцева моря / Ред. А.П. Лисицын*. М.: Изд-во ГЕОС. 2021. С. 127–142.
- Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А., Серова В.В., Штайн Р.* Потоки аэрозолей на поверхность Северного Ледовитого океана и их роль в осадконакоплении и в формировании природной среды Арктики // *Опыт системных океанологических исследований в Арктике*. М.: Научный мир, 2001. С. 385–393.
- Экологический мониторинг: Методические указания к самостоятельной работе студентов по направлению «Техносферная безопасность» (20.03.01). / Составители: Г.В. Маврин, Р.М. Падемирова, Д.А. Харлямов. Набережные Челны: изд. ИНЭКА, 2015. 61 с.
- Barrie L.A., Fisher D., Koerner R.M.* Twentieth century trends in Arctic air pollution revealed by conductivity and acidity observations in snow and ice in the Canadian high Arctic // *Atmospheric Environment*. 1985. V. 19. P. 2055–2063.
- Bond, T.C., Doherty S.J., Fahey D.W., Forster P.M., Bernsten T., DeAngelo B.J., Flanner M.G., Ghan S., Kärcher B., Koch D., Kinne S., Kondo Y., Quinn P.K., Sarofim M.C., Schulz M.G., Schulz M., Venkataraman C., Zhang H., Zhang S., Bellouin N., Guttikunda S.K., Hopke P.K., Jacobson M.Z., Hygienic standards, as amended, approved by Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation 31.05.2018 № 37. Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor. 2019: 55 p.*
- Rusina E.N., Radionov V.F.* Estimation of "preindustrial" optical depth of the atmosphere in a polar haze in the Arctic and recent contribution of anthropogenic emissions. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2002, 5: 35–39. [In Russian].
- Sakerin S.M., Golobokova L.P., Kabanov D.M., Kozlov V.S., Pol'kin V.V., Radionov V.F., Chernov D.G.* Comparison of Average Aerosol Characteristics in Neighboring Arctic Regions. *Optika Atmosfery i Okeana*. Atmospheric and Oceanic Optics. 2018, 31 (8): 640–646. doi: 10.1134/S1024856019010147. [In Russian].
- Semenov V.A., Martin T., Behrens L.K., Latif M., Astafieva E.S.* Arctic sea ice area changes in CMIP3 and CMIP5 climate models' ensembles. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017, 57 (1): 77–107. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-77-107. [In Russian].
- Flint M.V., Poyarkov S.G., Rimsky-Korsakov N.A., Miroshnikov A.Yu.* Ecosystems of Siberian Arctic Seas – 2021: Ecosystem of the Kara Sea in a Period of Seasonal Ice Melting (83 Cruise of Research Vessel «Akademik Mstislav Keldysh». *Okeanologiya*. Oceanology. 2022, 62 (1): 158–161. doi: 10.31857/S0030157422010051. [In Russian].
- Shevchenko V.P.* Vliyanie aerorozoley na okruzhayushchuyu sredu i morskoye osadkonakopleniye v Arktike. The influence of aerosols on the oceanic sedimentation and environmental conditions in the Arctic. Moscow: Nauka, 2006: 226 p. [In Russian].
- Shevchenko V.P., Golobokova L.P., Sakerin S.M., Lisitsyn A.P., Kabanov D.M., Novigatsky A.N., Panchenko M.V., Politova N.V., Polkin V.V., Popovicheva O.B., Khodzher T.V.* Scattered sedimentation over the Barents Sea. *Sistema Barentseva moray*. Barents Sea System. Edited by A.P. Lisitsyn. Moscow: GEOS, 2021: 127–142. [In Russian].
- Shevchenko V.P., Lisitsyn A.P., Vinogradova A.A., Serova V.V., Stein R.* Aerosol fluxes on the surface of the Arctic Ocean and their role in sedimentation and in the formation of the natural environment of the Arctic. *Opyt sistemnykh okeanologicheskikh issledovaniy v Arktike*. Experience of systematic oceanological research in the Arctic. Moscow: Scientific world, 2001: 385–393. [In Russian].
- Ekologicheskij monitoring: Metodicheskiye ukazaniya k samostoyatel'noy rabote studentov po napravleniyu «Tekhnosfernaya bezopasnost'» (20.03.01)*. Environmental monitoring: Methodological instructions for students' independent work in the field of «Technosphere safety». Compiled by: G.V. Mavrin, R.M. Pademirova, D.A. Kharlyamov. Naberezhnye Chelny: INEKA, 2015: 61 p. [In Russian].
- Barrie L.A., Fisher D., Koerner R.M.* Twentieth century trends in Arctic air pollution revealed by conductivity and acidity observations in snow and ice in the Canadian high Arctic. *Atmospheric Environment*. 1985, 19: 2055–2063.
- Bond T. C., Doherty S.J., Fahey D.W., Forster P.M., Bernsten T., DeAngelo B.J., Flanner M.G., Ghan S., Kärcher B., Koch D., Kinne S., Kondo Y., Quinn P.K., Sarofim M.C., Schulz M.G., Schulz M., Venkataraman C., Zhang H., Zhang S., Bellouin N., Guttikunda S.K., Hopke P.K., Jacobson M.Z.,*

- Kaiser J.W., Klimont Z., Lohmann U., Schwarz J.P., Shindell D., Storelvmo T., Warren S.G., Zender C.S. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment // *Journ. of Geophys. Research: Atmosphere*. 2013. V. 118. P. 5380–5552. doi: 10.1002/jgrd.5017.
- Davidson C.I., Harrington J.R., Stephenson M.J., Monaghan M.C., Pudykiewicz J., Schell W.R. Radioactive cesium from the Chernobyl accident in the Greenland Ice Sheet // *Science*. 1987. V. 237. I. 4815. P. 633–634. doi: 10.1126/science.3603043.
- Gorshkov A.G., Izosimova O.N., Kustova O.V., Marinaite I.I., Galachyants Y.P., Sinyukovich V.N., Khodzher T.V. Wildfires as a Source of PAHs in Surface Waters of Background Areas (Lake Baikal, Russia) // *Water*. 2021. V. 13. 2636. P. 1–16. doi: 10.3390/w13192636.
- Group of Experts on Climate Change Impacts and Adaptation for Transport Networks and Nodes Seventeenth session (Geneva). 2015 // Электронный ресурс. <https://unece.org/7th-session-22> Дата обращения: 20.05.2022.
- Heintzenberg J., Hansson H.C., Lannefors H. The chemical composition of arctic haze at Ny-Alesund, Spitsbergen // *Tellus*. 1981. V. 33. P. 162–171.
- Humpert M. IMO Moves Forward with Ban of Arctic HFO But Exempts Some Vessels Until 2029. 2020 // Электронный ресурс. <https://www.highnorthnews.com/en/imo-moves-forward-ban-arctic-hfo-exempts-some-vessels-until-2029>. Дата обращения: 20.05.2022.
- Keene W.C., Pszenny A.A.P., Galloway J.N., Hawley M.E. Sea-salt corrections and interpretation of constituent ratios in marine precipitation // *Journ. of Geophys. Research*. 1986. V. 91 № D6. P. 6647–6658.
- Millero F.J. *Chemical Oceanography*. 4<sup>th</sup> ed. Boca Raton: CRC Press. Florida. 2016. 591 p.
- Morillo E., Romero A.S., Maqueda C., Madrid L., Ajmone-Marsan F., Grerman H., Davidson C.M., Hursthouse A.S., Villaverde J. Soil pollution by PAHs in urban soils: a comparison of three European cities // *Journ. of Environ. Monit. Assess*. 2007. V. 9. № 9. P. 1001–1008. doi: 10.1039/b705955hSEARCH SSC.
- Shaw G.E. The Arctic haze phenomenon // *Bull. Amer. Meteorol. Society*. 1995. V. 76. № 12. P. 2403–2414.
- Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system // *Bull. Amer. Meteorol. Society*. 2015. V. 96. P. 2059–2077. doi: 10.1175/BAMS-D-14-00110.1.
- Wei L., Mosley-Thompson E., Gabrielli P., Thompson L.G., Barbante C. Synchronous deposition of volcanic ash and sulfate aerosols over Greenland in 1783 from the Laki eruption (Iceland) // *Geophys. Research Letters*. 2008. V. 35. L16501. doi: 10.1029/2008GL035117.
- Xu G., Gao Y. Atmospheric trace elements in aerosols observed over the Southern Ocean and coastal East Antarctica // *Polar Research*. 2014. V. 33. 23973 p. doi: 10.3402/polar.v33.23973.
- M. G., Schulz M., Venkataraman C., Zhang H., Zhang S., Bellouin N., Guttikunda S.K., Hopke P.K., Jacobson M.Z., Kaiser J.W., Klimont Z., Lohmann U., Schwarz J.P., Shindell D., Storelvmo T., Warren S.G., Zender C.S. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journ. of Geophys. Research: Atmosphere*. 2013, 118: 5380–5552. doi: 10.1002/jgrd.5017.
- Davidson C.I., Harrington J. R., Stephenson M.J., Monaghan M.C., Pudykiewicz J., Schell W.R. Radioactive Cesium from the Chernobyl Accident in the Greenland Ice Sheet. *Science*. 1987, 237 (4815): 633–634. doi: 10.1126/science.3603043.
- Gorshkov A.G., Izosimova O.N., Kustova O.V., Marinaite I.I., Galachyants Y.P., Sinyukovich V.N., Khodzher T.V. Wildfires as a source of PAHs in surface waters of background areas (Lake Baikal, Russia). *Water*. 2021, 13 (2636): 1–16. doi: 10.3390/w13192636.
- Group of Experts on Climate Change Impacts and Adaptation for Transport Networks and Nodes Seventeenth session (Geneva). 2015. <https://unece.org/7th-session-22>. (Last access: 20 May 2022).
- Heintzenberg J., Hansson H.C., Lannefors H. The chemical composition of arctic haze at Ny-Alesund, Spitsbergen. *Tellus*. 1981, 33 (2): 162–171. doi: 10.3402/tellusa.v33i2.10705.
- Humpert M. The IMO agreed on a draft regulation which would phase out the use and carriage of HFO in the Arctic starting in 2024. Environmental groups criticize loopholes which delay the ban until 2029 for Arctic-flagged vessels. 2020. <https://www.highnorthnews.com/en/imo-moves-forward-ban-arctic-hfo-exempts-some-vessels-until-2029> (last access: 20 May 2022).
- Keene W.C., Pszenny A.A.P., Galloway J.N., Hawley M.E. Sea-salt corrections and interpretation of constituent ratios in marine precipitation. *Journ. of Geophys. Research*. 1986, 91 (D6): 6647–6658.
- Millero F.J., *Chemical Oceanography*. 4<sup>th</sup> ed. Boca Raton: CRC Press. Florida. 2016: 591 p.
- Morillo E., Romero A.S., Maqueda C., Madrid L., Ajmone-Marsan F., Grerman H., Davidson C.M., Hursthouse A.S., Villaverde J. Soil pollution by PAHs in urban soils: a comparison of three European cities. *Journ. of Environ. Monit. Assess*. 2007, 9: 1001–1008. doi: 10.1039/b705955h.
- Shaw G.E. The Arctic haze phenomenon. *Bull. Amer. Meteorol. Soc*. 1995, 76 (12): 2403–2414.
- Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bull. Amer. Meteorol. Society*. 2015, 96: 2059–2077. doi: 10.1175/BAMS-D-14-00110.1.
- Wei L., Mosley-Thompson E., Gabrielli P., Thompson L.G., Barbante C. Synchronous deposition of volcanic ash and sulfate aerosols over Greenland in 1783 from the Laki eruption (Iceland). *Geophys. Research Letters*. 2008, 35: L16501. doi: 10.1029/2008GL035117.
- Xu G., Gao Y. Atmospheric trace elements in aerosols observed over the Southern Ocean and coastal East Antarctica. *Polar Res*. 2014, 33: 23973. doi: 10.3402/polar.v33.23973.