

Химический состав приземного атмосферного аэрозоля в Баренцбурге (архипелаг Шпицберген) по результатам многолетних исследований

© 2020 г. Л.П. Голобокова^{1*}, Т.В. Ходжер¹, Д.Г. Чернов², О.Р. Сидорова³,
О.И. Хуриганова¹, Н.А. Онищук¹, Н.А. Жученко¹, И.И. Маринайте¹

¹Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия; ²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия;

³Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

*lg@lin.irk.ru

Chemical composition of the near-surface atmospheric aerosol in Barentsburg (Svalbard) based on the long-term observations

L.P. Golobokova^{1*}, T.V. Khodzher¹, D.G. Chernov², O.R. Sidorova³, O.I. Khuriganova¹,
N.A. Onischuk¹, N.A. Zhuchenko¹, I.I. Marinaite¹

¹Limnology Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia; ²Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian

Branch, Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia; ³Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

*lg@lin.irk.ru

Received February 13, 2019 / Revised May 7, 2019 / Accepted June 13, 2019

Keywords: Arctic, atmospheric aerosol, Barentsburg, chemical elements, gaseous impurities, ions.

Summary

The chemical composition (ions, elements, polycyclic aromatic hydrocarbons) of aerosol and gaseous impurities (SO₂, HNO₃, HCl, NH₃) in the surface layer of the atmosphere in Barentsburg, located on the Western Svalbard island (Svalbard archipelago), is analyzed. Atmospheric aerosol and gaseous impurities brought to the Arctic from middle latitudes and deposited on snow and ice not only interact with various natural objects, but also spread to long distances with melting dirty snow and ice. Air sampling was carried out following to methodology adopted by the international networks of the atmospheric monitoring programs in South-East Asia (EANET) and Europe (EMEP). In 2011–2015, the observations of the chemical composition of the atmospheric ground layer were performed daily during the light season (April–September), and monthly from April 2016 to 2018. The largest total ion concentrations were observed in 2011–2012. Seasonal variability of ion concentrations in the aerosol was characterized by high values in the cold period (October–February) and low values in the warm one (May–June). High values of the coefficient of correlation between ions Na⁺ and Cl⁻ ($r = 0,93$) as well as between Mg²⁺ and Cl⁻ ($r = 0,81$) throughout the year show that the main source of the aerosol is the sea surface. The significant correlation between ions K⁺, NO₃⁻, NH₄⁺, SO₄²⁻, K⁺, SO₄²⁻ in the polar night point to the influence of local sources: coal mining at the mine and its combustion at thermal power plants. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons and the gaseous impurities (SO₂, HNO₃) into the atmosphere, especially during the polar night, is also influenced by local sources. Among the elements the maximum enrichment of the aerosol was revealed for As, Cr, Zn, Mo, Cd, Sn, Sb, W, and Pb with a low content of Cd, Sn, Sb, W, and Pb in the coal, sludge and on the underlying surface. On the basis of the elemental composition of the aerosol and the back-trajectory analysis, it was shown that the air masses enriched in heavy metals come to the area of the Barentsburg settlement from middle latitudes.

Citation: Golobokova L.P., Khodzher T.V., Chernov D.G., Sidorova 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. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673420010025.

Поступила 13 февраля 2019 г. / После доработки 7 мая 2019 г. / Принята к печати 13 июня 2019 г.

Ключевые слова: Арктика, атмосферный аэрозоль, Баренцбург, газообразные примеси, ионы, ПАУ, химические элементы.

Прослежена межгодовая (2011–2017 гг.) и сезонная (2016–2018 гг.) изменчивость компонентов химического состава (ионы, элементы, полициклические ароматические углеводороды) атмосферного аэрозоля и газообразных примесей (SO₂, HNO₃, HCl, NH₃) в приземной атмосфере западной части Российской Арктики (пос. Баренцбург на Шпицбергене).

Введение

Наиболее динамичная компонента в цепи глобального переноса веществ через атмосферу — аэрозоль. Ледяной покров Арктики слу-

жит своеобразным аккумулятором аэрозольного вещества. Вещества, поступающие с аэрозолем на подстилающую поверхность, могут сохраняться в снежном и ледниковом покровах долгие годы и предоставлять уникальную ин-

формацию о палеоклиматической периодизации, катастрофических событиях Земли и антропогенном воздействии как в прошлом, так и в настоящем. Так, исследование ледяных кернов Гренландии позволило обнаружить не только следы извержений вулканов Лаки (1783 г., Исландия) и Тамбора (1815 г., Индонезия), но и радиоактивные отходы термоядерных испытаний (1952–1954 гг., США; 1961–1962 гг., Россия) [1]. Важное звено в изучении процессов в полярных регионах, влияющих на климатические и экологические изменения, — мониторинговые исследования, позволяющие количественно оценить не только фоновое состояние окружающей среды, в том числе и атмосферы, но и её состояние в результате антропогенного воздействия. Такое сочетание чистых территорий, не тронутых окружающей средой, и промышленных районов характерно для архипелага Шпицберген.

Наши исследования проводились в пос. Баренцбург, расположенном на западном побережье залива Грэнфьорд о. Западный Шпицберген (78°04' с.ш., 13°14' в.д.). В зал. Грэнфьорд большую часть года преобладают юго-восточные и южные ветры, а в июле и августе — северные и северо-западные. Часто, особенно в январе–феврале и мае–июне, на архипелаге бывают штили, способствующие накоплению примесей в атмосфере. В течение всего года наблюдается высокая относительная влажность (83% зимой и 87% летом) [2]. Первые представления о химическом составе атмосферного аэрозоля на Шпицбергене, полученные на территории Норвежского научно-исследовательского центра в Нью-Олесунне, датируются концом 1970-х годов [3]. В составе аэрозоля определены концентрации главных ионов (SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , NH_4^+) и некоторых элементов (Ti, Cr, Mn, Ca, Fe, Cu, Zn, Pb, Ni). В последующие годы список измеряемых параметров расширился и начались регулярные многолетние мониторинговые наблюдения на стационарных станциях [4].

Несмотря на свою удалённость от промышленных районов Европы и Америки, архипелаг Шпицберген подвержен антропогенному влиянию. Одна из основных нагрузок, влияющих на природу архипелага, — добыча угля. Районы с отвалами горной породы угледобывающей промышленности, расположенные в окрестностях

посёлка, способствуют деградации растительного покрова и выветриванию горных пород, что вызывает эрозию поверхности [5]. Источником пылевых и сажевых частиц при соответствующем направлении и скорости ветра становятся участки складирования добытого угля и не покрытая снегом подстилающая поверхность. На юго-западной окраине посёлка находится теплоэлектростанция (ТЭС).

В последнее время нагрузка на экосистему острова возросла за счёт туристической индустрии, развивается и морской порт. Значимую роль в загрязнении атмосферы архипелага оказывают круизные суда. Как показано в [6], в атмосфере Нью-Олесунна во время присутствия судов концентрации Ca^{2+} в аэрозоле увеличивались в среднем в 10 раз, K^+ — в 5 раз, SO_4^{2-} — в 3 раза. В 2002–2010 гг. Северо-Западный филиал Научного производственного объединения «Тайфун» проводил исследования состава атмосферы в районе пос. Баренцбург и прилегающей акватории зал. Грэнфьорд. Получены представительные материалы, отражающие многолетнюю и сезонную изменчивость диоксида серы, азота, оксида углерода, сероводорода, около 80 органических загрязнителей и тяжёлых металлов в составе аэрозоля. Показано соответствие качества атмосферного воздуха в пос. Баренцбург действующим российским гигиеническим нормативам и стандартам загрязнения согласно директиве Совета Европейского союза для воздуха населённых мест. Результаты мониторинга показали, что содержание основных групп загрязняющих веществ в различных природных средах в пос. Баренцбург характерны для районов с угледобывающей промышленностью и носят локальный характер. За пределами посёлка уровни загрязнения природных сред находились на уровне, характерном для района арктических тундр [2].

Наши наблюдения на территории Российского научного центра на Шпицбергене (РНЦШ) в пос. Баренцбург, начатые в 2011 г., продолжают до настоящего времени. Основная цель исследования — изучить изменчивость химического состава аэрозоля и концентраций газообразных примесей для оценки состояния атмосферы в удалённом арктическом районе, подверженном влиянию промышленной деятельности.

Материалы и методы исследования

Станция отбора проб воздуха располагалась на окраине юго-западной части пос. Баренцбург. С восточной стороны станция ограничена возвышенностью высотой около 250 м, с западной стороны находится зал. Грэнфьорд. Пробы аэрозоля и газообразных примесей отбирали на четыре фильтра, последовательно закреплённых в фильтродержателе. Аэрозольное вещество собиралось на внешнем (первом) тефлоновом фильтре PTFE с диаметром пор 0,8 мкм. Последующие фильтры ULTIPOR (второй фильтр – полиамидный, диаметр пор 0,45 мкм) и два импрегнированных фильтра «Whatman» с щелочной (третий) и кислой (четвёртый) основой улавливали газообразные примеси. ¼ части первого фильтра экстрагировали деионизированной водой в ультразвуковой бане в течение 30 мин. Растворы фильтровали через ацетат-целлюлозные фильтры с диаметром пор 0,2 мкм. В фильтрате проводили измерение концентраций катионов Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , NH_4^+ , анионов Cl^- , NO_3^- , Br^- , SO_4^{2-} и микроэлементов 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, Na, Mg, K, Ca. В оставшейся части фильтра определяли микроэлементы в твёрдой фракции аэрозоля.

Газообразные примеси HCl, NH_3 , HNO_3 и SO_2 рассчитывали из соответствующих ионов, определённых в экстрактах проб на втором, третьем и четвёртом фильтрах. Ионы анализировали на ионной системе ICS-3000 (Dionex Corporation, США). Внедрение метода определения ионов позволило получить результаты измерений ($P = 0,95$) с точностью до 2–8%. Микроэлементы определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на масс-спектрометре «Agilent 7500 се» (США). Пробы аэрозоля для определения полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) собирали на стекловолоконные фильтры фирмы «Sartorius». Концентрации ПАУ в аэрозоле измеряли по ГОСТ ИСО 12884–2007 методом внутренних стандартов с использованием растворов фенатрена-d10, хризена-d12 и перилена-d12, которые добавляли к пробе перед экстракцией.

Подготовленные образцы анализировали на хромато-масс-спектрометре «Agilent, GC System 7890B, 7000 CGC/MSTripleQuad». Для выяс-

Таблица 1. Период отбора и число отобранных проб

Период отбора	Число отобранных проб
2011 г., 20 апреля–29 августа	37
2012 г.: 26 апреля–5 июня	27
21 июля–25 августа	10
2013 г.: 16–27 апреля	6
20 августа–8 сентября	20
22–30 октября	9
2014 г., 23 апреля–21 июня	59
2015 г., 30 апреля–26 сентября	54
2016 г., 16 апреля–30 декабря	54
2017 г., 3 января–27 декабря	56
2018 г., 2 января–18 апреля	16
<i>Всего</i>	<i>348</i>

нения влияния местных источников на поступление примесей в атмосферу были отобраны пробы угля, отходов угледобывающей промышленности, подстилающей поверхности в районе посёлка и дорожной пыли, в которых определялось содержание микроэлементов. Качество выполняемых анализов неоднократно подтверждалось участием в межлабораторных интеркалибрациях по международным программам под эгидой Всемирной метеорологической организации (ВМО) и EANET, которые вошли в их ежегодные отчёты Глобальной службы атмосферы ВМО (<http://qasac-america.org>) и EANET (<http://www.eanet.asia>). Анализировались обратные трёхсуточные траектории переноса воздушных масс. В качестве исходной информации использованы данные баз Национального управления океанических и атмосферных исследований США на основе модели HYSPLIT с сервера <https://www.ready.noaa.gov/index.php>.

Результаты исследования и обсуждение

Ионный состав приземного атмосферного аэрозоля. Отбор проб приземного атмосферного аэрозоля в пос. Баренцбург в 2011–2015 гг. выполнялся в светлый период года (табл. 1). С апреля 2016 г. наблюдения проводили круглогодично как в светлый период года, так и в период полярной ночи. Полярная ночь в Баренцбурге длится с 26 октября по 15 февраля, полярный

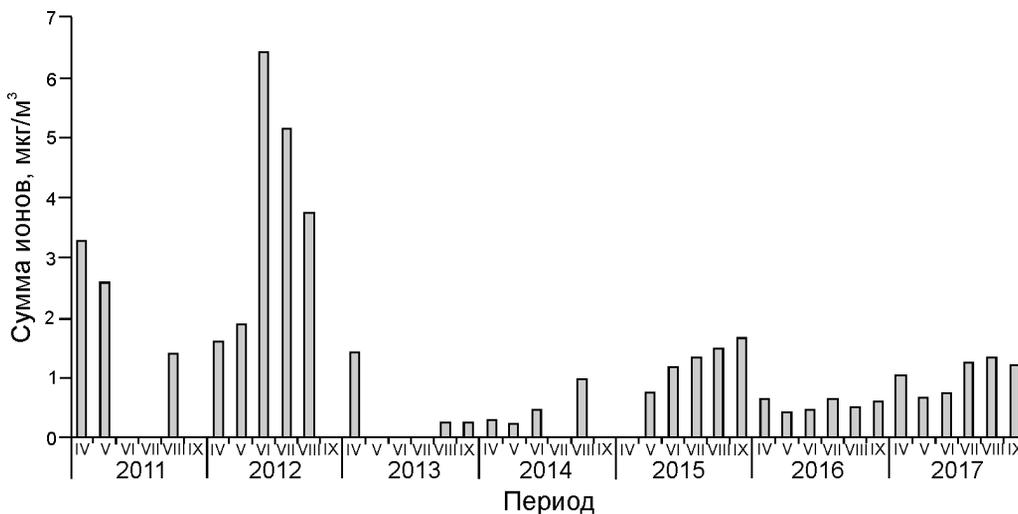


Рис. 1. Изменение суммарного содержания ионов в составе аэрозоля (апрель–сентябрь, 2011–2017 гг.)
Fig. 1. Change of sum of ions in aerosol composition (April–September, 2011–2017)

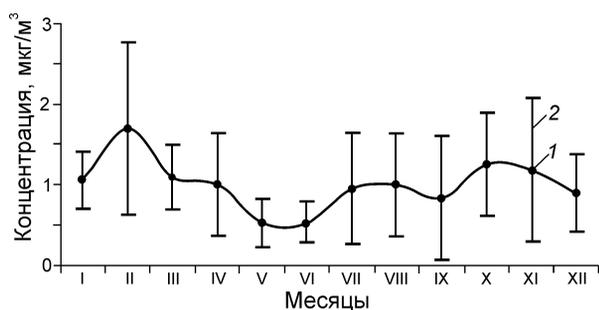


Рис. 2. Сезонная изменчивость суммы ионов (1) и среднеквадратичные отклонения суммы ионов (2) в составе аэрозоля на станции Баренцбург в 2016–2018 гг., мкг/м³

Fig. 2. Seasonal variability of the sum of ions (1) in $\mu\text{g m}^{-3}$ and standard deviation (2) in the aerosol composition at Barentsburg site in 2016–2018

день – с 20 апреля по 23 августа. В светлое время года наиболее высокие суммарные концентрации ионов наблюдались в 2011–2012 гг. (рис. 1). Высокое содержание примесей в атмосфере на территории посёлка в эти годы обусловлено интенсивным строительством и капитальным ремонтом жилья и инфраструктуры. Значительное загрязнение поступало в атмосферу от выбросов угольной ТЭС, состав которых не соответствовал нормативам, введённым с 1 января 2011 г. Норвежской государственной службой по вопросам климата и загрязнения окружающей среды. В 2012 г. на ТЭС были проведены модернизация системы очистки дымовых газов, замена системы удаления золы и пыли, закончены работы по капитальному ремонту и строительству. Как следствие – в 2013–2014 гг. и 2016–

2017 гг. суммарное содержание ионов в составе аэрозоля в светлый период года снизилось в 2–7 раз (см. рис. 1). Рост концентраций ионов в 2015 г. совпал с периодом повышенного общего замутнения атмосферы в этом районе и был связан с выносами воздушных масс с территории Евразии и дыма лесных пожаров на Аляске [7].

В период круглогодичных наблюдений в 2016–2018 гг. среднее месячное суммарное содержание ионов в составе растворимой фракции аэрозоля изменялось в широком диапазоне: от 0,52 до 1,69 мкг/м³. В межгодовой динамике суммарных концентраций ионов отмечаются три периода снижения и возрастания их концентраций (рис. 2). Максимальные суммарные концентрации ионов наблюдались в феврале, в период полярной ночи, с последующим их уменьшением до минимальных значений в мае–июне. При исследовании повторяемости направлений приземного ветра в период полярной ночи установлена наибольшая частота ветров, дующих с северных, восточных и юго-восточных направлений, а в полярный день ветры чаще всего дули с северных, южных и северо-западных направлений (рис. 3). Основным источником аэрозольных частиц при северном и северо-восточном направлениях ветра были угольные склады, при южном, юго-восточном и юго-западном – шламоотвалы и выбросы ТЭС. Относительный максимум в июле–августе может быть связан с дополнительным влиянием местных источников. Осенний максимум в октябре, вероятно, обусловлен переносом пыли от шламоотвалов. Преобладающими в этот период были ветры юго-восточных

Таблица 2. Средние месячные концентрации и среднеквадратичные отклонения концентраций ионов в составе аэрозоля в пос. Баренцбург в 2016–2018 гг., мкг/м³

Месяц	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Январь	0,18±0,05	0,07±0,07	0,01±0,02	0,02±0,01	0,06±0,03	0,33±0,08	0,03±0,02	0,35±0,28
Февраль	0,35±0,29	0,08±0,05	0,03±0,03	0,06±0,05	0,07±0,05	0,58±0,46	0,06±0,05	0,46±0,29
Март	0,15±0,08	0,12±0,11	0,01±0,01	0,02±0,01	0,09±0,04	0,2±0,14	0,04±0,02	0,46±0,25
Апрель	0,13±0,11	0,10±0,12	0,03±0,03	0,02±0,01	0,05±0,03	0,22±0,21	0,02±0,01	0,43±0,28
Май	0,06±0,05	0,05±0,03	0,01±0,01	0,01±0,01	0,03±0,02	0,12±0,12	0,02±0,02	0,22±0,12
Июнь	0,07±0,05	0,04±0,03	0,01±0,01	0,01±0,01	0,03±0,02	0,17±0,12	0,01±0,01	0,19±0,11
Июль	0,13±0,16	0,05±0,03	0,04±0,07	0,02±0,01	0,06±0,04	0,30±0,32	0,03±0,02	0,32±0,21
Август	0,18±0,15	0,04±0,03	0,02±0,02	0,02±0,01	0,06±0,03	0,36±0,31	0,02±0,02	0,29±0,29
Сентябрь	0,18±0,20	0,04±0,03	0,01±0,01	0,02±0,01	0,05±0,04	0,37±0,41	0,02±0,02	0,14±0,12
Октябрь	0,18±0,12	0,10±0,09	0,03±0,03	0,03±0,03	0,06±0,04	0,32±0,31	0,04±0,04	0,50±0,42
Ноябрь	0,22±0,23	0,06±0,08	0,02±0,02	0,03±0,03	0,08±0,05	0,36±0,34	0,03±0,05	0,37±0,36
Декабрь	0,13±0,10	0,06±0,05	0,01±0,01	0,02±0,01	0,05±0,02	0,22±0,17	0,03±0,01	0,37±0,29

направлений [8]. Повышенные концентрации отдельных ионов (Na⁺, Ca²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻) получены в основном в период полярной ночи, пониженные – в мае–июне (табл. 2).

Для изучения сезонной динамики выделены четыре периода: а) зимний – с декабря по март, когда наблюдалась отрицательная средняя месячная температура воздуха; б) весенний – с апреля по май – период интенсивного снеготаяния (начало полярного дня); в) летний – с июня по август – период наиболее высоких температур воздуха; г) осенний – с сентября по ноябрь (окончание полярного дня) – снижение температуры воздуха и появление льда в зал. Грёнфьорд. Преобладающими ионами в составе растворимой фракции аэрозоля во все периоды были Na⁺, SO₄²⁻ и Cl⁻. Самые высокие их концентрации установлены в холодные зимний и осенний периоды, соответствующие полярной ночи. Отмечено, что концентрация Cl⁻-иона морского происхождения сопоставима с концентрацией SO₄²⁻-иона преимущественно континентального происхождения (рис. 4).

В полярную ночь в составе аэрозоля отмечена высокая корреляция концентраций пар ионов Na⁺ и Cl⁻ ($r = 0,93$), Mg²⁺ и Cl⁻ ($r = 0,81$), что указывает на преимущественно морское происхождение аэрозоля в данный период. Может быть, это связано с переносом воздуха со свободных ото льда частей Баренцева моря, а может быть – с увеличением притока во внутренние районы фьордов о. Западный Шпицберген более тёплых и солёных вод атлантического происхождения, что не способствует установлению устой-

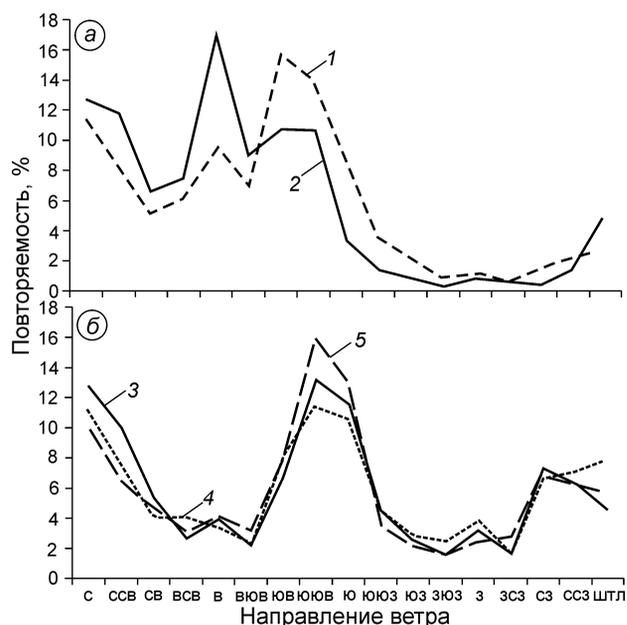


Рис. 3. Повторяемость направлений ветра в районе пос. Баренцбург в период полярной ночи (а) и полярного дня (б) [8] в среднем за периоды:

1 – 26.10.2016–15.02.2017 г.; 2 – 26.10.2017–15.02.2018 г.; 3 – 20.03–23.08.2016 г.; 4 – 20.03–23.08.2017 г.; 5 – 20.03–23.08.2018 г.

Fig. 3. Frequency of wind directions in the region of Barentsburg throughout the polar night (a) and the polar day (b) [8] on average for periods:

1 – 26.10.2016–15.02.2017; 2 – 26.10.2017–15.02.2017; 3 – 20.03–23.08.2016; 4 – 20.03–23.08.2017; 5 – 20.03–23.08.2018

чивого ледяного покрова [9, 10]. Коэффициенты корреляции между концентрациями ионов K⁺ и NO₃⁻ ($r = 0,69$), NH₄⁺ и SO₄²⁻ ($r = 0,57$), K⁺ и SO₄²⁻ ($r = 0,55$) ниже, чем для указанных

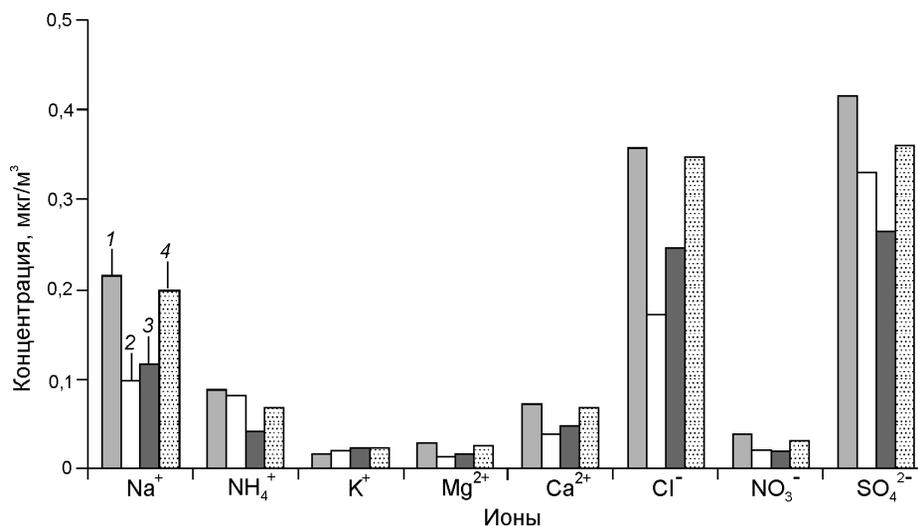


Рис. 4. Сезонная динамика концентраций ионов в составе приземного аэрозоля в районе пос. Баренцбург, 2016–2018 гг., мкг/м³:

1 – декабрь–март; 2 – апрель–май; 3 – июнь–август; 4 – сентябрь–ноябрь

Fig. 4. Seasonal dynamics of ion concentrations of near-ground aerosol composition in the area of the settlement of Barentsburg, 2016–2018, mcg/m³:

1 – December–March; 2 – April–May; 3 – June–August; 4 – September–November

ранее пар ионов. Поскольку подстилающая поверхность находится под снежным покровом, с большой вероятностью можно предположить их локальное антропогенное происхождение, связанное с сжиганием угля на ТЭС. В летний период коэффициенты корреляции концентраций пар ионов K⁺ и NO₃⁻, а также NH₄⁺ и SO₄²⁻ ($r = > 0,7$) возросли, что указывает на дополнительный источник примесей, поступающих с подстилающей поверхности.

Проведено сравнение средней концентрации суммы ионов в Баренцбурге в августе–сентябре 2016–2018 гг. с нашими данными по другим арктическим районам. Средняя суммарная концентрация ионов в Баренцбурге (0,93 мкг/м³) согласуется с данными, полученными в августе–сентябре 2013 г. в атмосфере азиатского сектора Северного Ледовитого океана (1,38 мкг/м³) [11]. Концентрация ионов в аэрозоле над акваторией Баренцева моря больше почти в 3,5 раза (3,42 мкг/м³) [12]. В более южных морях, примыкающих к континенту, различие значительнее: над субарктическим Белым морем – более чем в 16 раз (17,1 мкг/м³), над Карским морем – более чем в 8 раз (8,9 мкг/м³) [13]. Атмосфера над этими морями испытывает большее влияние континентальных источников аэрозоля. Их вклад для Белого моря составляет около 38%,

для центральных районов Карского моря – 30%, а для его прибрежных акваторий – 60–80% [13]. Сравнение суммарной концентрации ионов в аэрозоле Баренцбурга второй половины полярного дня 2016–2017 гг. с данными, полученными в период 58-й РАЭ (2012 г.) в районе антарктических станций Молодёжная (0,29 мкг/м³) и Мирный (0,50 мкг/м³), указывает на большее загрязнение атмосферы арктической станции [14].

Микроэлементный состав приземного атмосферного аэрозоля. Результаты анализа показали разнообразие состава и большой диапазон вариаций абсолютных концентраций элементов, достигающий четырёх порядков величины как в растворимой, так и в твёрдой фракциях аэрозоля. Преобладающими в составе растворимой фракции аэрозоля со средней концентрацией $> 1,0$ нг/м³ были Sr, Al, Fe, Zn, в составе твёрдой фракции – Ba, Mn, Sr, Zn, Cr, Al, Fe. Наименьшие концентрации ($< 0,010$ нг/м³) в обеих фракциях определены для Th, Tl, Ag, Be, U.

Для идентификации влияния локальных источников на состав анализируемых аэрозольных частиц проанализированы пробы угля, отходов угледобывающей промышленности, подстилающей поверхности и автодорожного покрытия. Расчёт концентрации элементов в составе этих образцов, в отличие от аэрозольного веще-

ства (нг/м^3), проводился на килограмм массы отобранных проб (мг/кг). Отмечаются как идентичность состава элементов в пробах угля, отходов угледобычи, подстилающей поверхности и дорожного покрытия, так и вариации диапазонов их концентраций. В составе проб преобладали Ca, Ti, Na, Mg, K, Fe, Al с диапазоном концентраций 1500–75 000 мг/кг , с максимальными значениями для K, Fe, Al. Концентрации таких элементов, как Mn, Li, V, Sr, B, Ba, варьировали в пределах 100–900 мг/кг ; Th, Co, As, Cu, Ni, Cr, Zn – в пределах 6–90 мг/кг . Концентрации последней группы элементов были ниже в пробах отходов угледобывающей промышленности.

Следующую группу элементов составили W, Be, Se, Sn, Mo, U с концентрациями 0,85–5,40 мг/кг . Наиболее низкие концентрации характерны для Ag, Cd, Sb с пределами концентраций 0,19–0,64 мг/кг . Отметим, что доминирующие в составе аэрозоля концентрации элементов ($> 1,0 \text{ нг/м}^3$) преобладают в составе угля, шлама и подстилающей поверхности. Ag, Cd и Sb, составляющие группу с минимальными концентрациями в образцах угля, шлама и подстилающей поверхности, в составе аэрозоля содержатся в диапазоне средних концентраций: в растворимой фракции – от 0,001 до 0,1 нг/м^3 , в твёрдой – до 1,0 нг/м^3 .

Для определения степени влияния естественных и антропогенных источников на формирование химического состава аэрозоля используются количественные оценки различия соотношений концентраций элементов относительно иона

натрия в аэрозоле (aer) и морской воде (sw) для растворимой фракции по формуле [15]

$$K_i = [(C_i/\text{Na}^+)_{\text{aer}}]/[(C_i/\text{Na}^+)_{\text{sw}}]$$

и кларков элементов в земной коре (Earth) относительно Al для твёрдой фракции по формуле

$$K_i = [(C_i/\text{Al})_{\text{aer}}]/[(C_i/\text{Al})_{\text{Earth}}],$$

где (C_i/Na^+) и (C_i/Al) – концентрация i -го элемента относительно Na^+ или Al соответственно; K_i – коэффициент обогащения i -го элемента [15].

Считают, что коэффициент обогащения от 1 до 10 свидетельствует о морском или литофильном происхождении элемента, больше 10 – о наличии дополнительного источника поступления элемента в воздушную среду. Расчёты показали, что растворимая фракция аэрозоля в меньшей степени обогащена B, Li, Ni, As, Se, Sr, Ba, Pb, U, Mo, Co ($K_i < 1$). Средние значения коэффициентов от 1 до 10 установлены для V, Mn, Sb, Cu, Cd. Наибольшее обогащение аэрозоля отмечено для таких элементов, как Al, Zn, Ti, Be, Fe ($K_i = 18 \div 86$), максимальное – для Cr ($K = 109$). В твёрдой фракции наименьшее обогащение определено для Ti ($K < 1$), литофильное происхождение имеют V, Fe, Co, Mn, Ba, Th, U ($K_i = 2 \div 10$). Для элементов Ni, Li, B, Cu, Sr коэффициенты обогащения изменялись от 11 до 82. Высокое обогащение установлено для As, Cr, Zn, Mo, Cd, Sn, W, Pb ($K_i = 143 \div 665$), максимальное – для Sb ($K = 2803$) и Se ($K = 5176$) (рис. 5). Коэффициенты обогащения элемен-

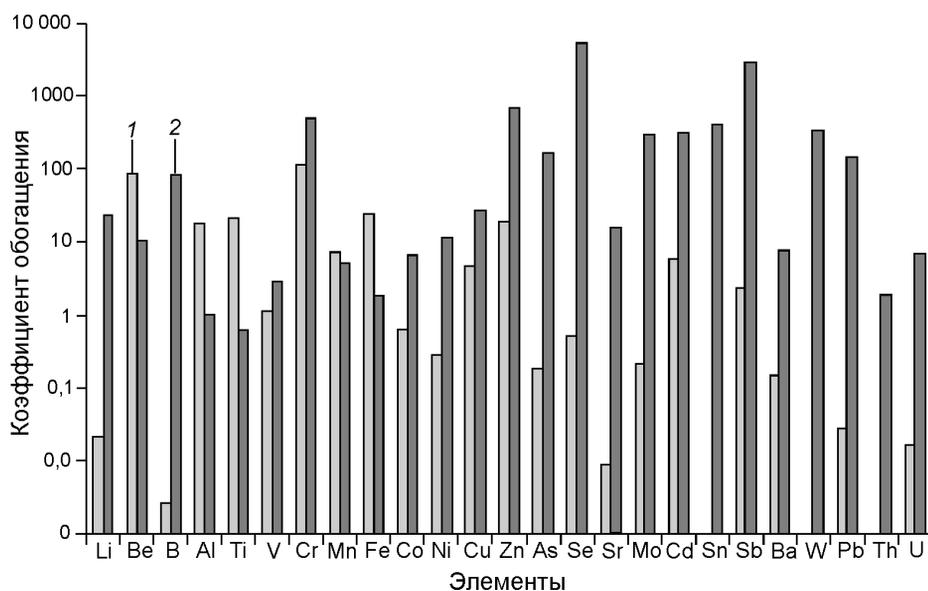


Рис. 5. Коэффициенты обогащения элементов растворимой (1) и твёрдой (2) фракций аэрозоля (2012–2018 гг.)
Fig. 5. Element enrichment coefficients of Soluble (1) and solid (2) aerosol fractions (2012–2018)

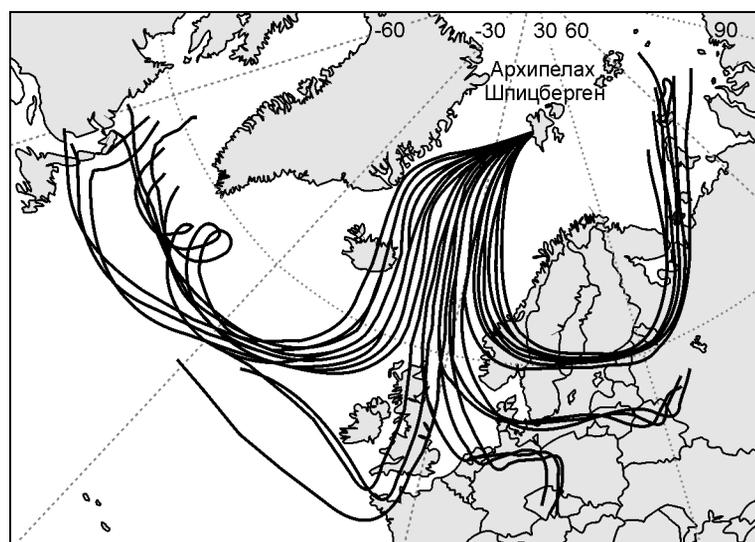


Рис. 6. Обратные траектории переноса воздушных масс на высоте 10 м на территорию пос. Баренцбург при отборе пробы аэрозоля 9–10 февраля 2017 г. [18]

Fig. 6. Back trajectories of air mass transferring at altitude 10 m to the territory of the settlement of Barentsburg that took place during aerosol sampling on February 9–10, 2017 [18]

тов в составе угля, шлама и подстилающей поверхности, рассчитанные относительно содержания в земной коре и нормированные на Al, свидетельствуют об их преимущественно литофильном происхождении, за исключением В ($K = 12 \div 58$) и Se ($K = 31 \div 62$).

Необходимо учитывать, что выбросы в атмосферу от местных источников не всегда определяют состав аэрозоля в атмосфере Арктики. Как уже отмечалось, максимальные коэффициенты обогащения элементов в аэрозоле (>100) указывают на их перенос из других регионов. Так, в атмосферу стран Западной Европы происходит выброс As, Cd, Cr, Pb, Mn, Hg, Ni, V, в Европейской части России их спектр несколько иной – Pb, Cd, As, Zn, Ni, Cr, Cu [16]. Около 8% мирового производства металлического Cd обеспечивает Канада. Лидер Cd на европейском рынке – Бельгия, а в России – предприятия Уральской горно-металлургической компании. Такие элементы, как Cd, Ni, Cu, V, Pb, As, Fe, Co преобладают в шлейфах загрязнения с территории Кольского полуострова [17]. На возможное поступление воздушных масс на территорию архипелага из континентальных источников с высокой вероятностью свидетельствует анализ обратных траекторий переноса воздушных масс. В качестве примера на рис. 6 приведена трёхсуточная траектория переноса воздушных масс на высоте 10 м при отборе пробы аэрозоля 9–10 февраля 2017 г. со следующим содержанием, нг/м^3 : Cr – 7,42, Fe – 12,14, Ni – 0,06, Cu – 0,16, Cd – 0,03, As – 0,19, Mo – 0,11, Pb – 0,81, Zn – 5,87. Сум-

марная концентрация ионов в аэрозоле на эти даты составила $2,7 \text{ мкг/м}^3$ при средней величине $1,2 \pm 0,7 \text{ мкг/м}^3$ в период полярной ночи.

Полициклические ароматические углеводороды в приземном аэрозоле. Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), относящиеся к стойким органическим загрязнителям, имеющим мутагенные и канцерогенные свойства, представляют собой класс важных показателей загрязнения воздуха. Пробы аэрозоля для определения ПАУ отбирали с 28 сентября по 8 октября 2017 г. Идентифицированы следующие ПАУ: нафталин, аценафтилен, аценафтен, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, бенз(а)антрацен, хризен, бенз(б)флуорантен, бенз(к)флуорантен, бенз(е)пирен, бенз(а)пирен, индено(1,2,3-с,д)пирен, бенз(г,х,и)перилен, дибенз(а,х)антрацен. Их суммарные концентрации определены на уровне от $0,36$ до $1,7 \text{ нг/м}^3$ (табл. 3). Повышенное содержание суммы ПАУ зафиксировано в пробе воздуха 7–8 октября 2017 г. при юго-юго-восточном ветре со стороны ТЭС ($1,7 \text{ нг/м}^3$). Низкие значения суммы ПАУ установлены 5–6 октября 2017 г. при восточном ветре ($0,37 \text{ нг/м}^3$) и 28–30 сентября 2017 г. в период дождей, когда атмосфера очистилась ($0,36 \text{ нг/м}^3$). Полученное содержание суммы ПАУ в воздухе исследуемого района сравнимо с данными норвежских исследователей и НПО «Тайфун» ($0–4,4 \text{ нг/м}^3$) [2].

Небольшое увеличение концентрации бенз(а)пирена зафиксировано 7–8 октября 2017 г. при юго-юго-восточном ветре со стороны ТЭС и согласуется с данными НПО «Тайфун»

Таблица 3. Содержание ПАУ в приземном аэрозоле на территории пос. Баренцбург 28 сентября – 8 октября 2017 г., нг/м³

ПАУ	28–30 сентября	30 сентября – 1 октября	1–2 октября	5–6 октября	7–8 октября
Нафталин	0,05	0,08	0,01	0,03	0,05
Аценафтилен	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
Аценафтен	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Флуорен	0,01	0,03	0,03	0,01	0,03
Фенантрен	0,07	0,13	0,14	0,07	0,18
Антрацен	0,01	0,02	0,02	0,01	0,04
Флуорантен	0,05	0,08	0,10	0,06	0,24
Пирен	0,03	0,05	0,07	0,04	0,15
Бенз(а)антрацен	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08
Хризен	0,01	0,01	0,02	0,01	0,06
Бенз(б)флуорантен	0,04	0,06	0,08	0,04	0,27
Бенз(к)флуорантен	0,02	0,03	0,03	0,02	0,14
Бенз(е)пирен	0,02	0,02	0,02	0,01	0,09
Бенз(а)пирен	0,01	0,01	0,02	0,02	0,13
Индено(1,2,3-с,д)пирен	0,01	0,02	0,02	0,01	0,11
Бенз(г,н,и)перилена	0,01	0,02	0,01	0,01	0,08
Дибенз(а,н)антрацен	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
<i>Сумма</i>	<i>0,36</i>	<i>0,60</i>	<i>0,59</i>	<i>0,37</i>	<i>1,7</i>

летне-осеннего периода 2008 г., когда максимальные концентрации ПАУ варьировали от 0,1 до 2,4 нг/м³ [2].

С использованием диагностических отношений отдельных ПАУ и процентных профилей мы попытались идентифицировать источники загрязнения исследуемой территории ПАУ. Известно, что отношение концентраций флуорантена к сумме концентраций флуорантена и пирена для петрогенных источников ниже 0,4; если эта величина выше 0,4, то источники относятся к пирогенным [19]. На территории пос. Баренцбург это соотношение указывало на пирогенные источники (0,59–0,63). Отношение концентраций индено(1,2,3-с,д)пирена к сумме концентраций индено(1,2,3-с,д)пирена и бенз(г,н,и)перилена ниже 0,5 указывает на сжигание жидкого топлива, а выше 0,5 – на горение каменного угля и древесины [19]. Учитывая, что в Баренцбурге это отношение меняется от 0,52 до 0,57, локальные загрязнения вызывает горение угля. Считается, что отношение концентраций бенз(а)пирена к концентрации бенз(г,н,и)перилена ниже 0,6 указывает на выбросы автотранспорта, выше 0,6 – на наличие стационарных источников [20]. Содержание ПАУ в аэрозоле Баренцбурга отвечает выбросам от стационарных источников (0,76–1,75). Согласно данным работы [20], для

аэрозольных проб, взятых вблизи источников загрязнения, отношение концентраций бенз(е)пирена к сумме бенз(е)пирена и бенз(а)пирена равно 0,50–0,57; на значительном расстоянии от источников ПАУ это отношение составляет 0,70–0,83. Рассчитанные отношения бензпиренов в воздухе над пос. Баренцбург определены на уровне от 0,42 до 0,59.

По данным исследования [21], нафталин и фенантрен присутствуют в выбросах электростанций, использующих ископаемое (уголь) топливо. В аэрозолях пос. Баренцбург обнаружено 26–33% этих соединений. Расчёт процентного содержания индивидуальных ПАУ от их общего количества показал, что количество флуорантена и пирена, связанное с горением угля [22], в аэрозоле в зимний период достигало 22–30% (см. табл. 2). Содержание хризена – доминирующего вещества при горении биомассы в атмосфере посёлка [22] – изменялось в пределах 2–3% суммы обнаруженных ПАУ. Суммарное количество бенз(г,н,и)перилена, индено(1,2,3-с,д)пирена и дибенз(а,н)антрацена – индикаторов загрязнения городской атмосферы автомобильным транспортом [22] – достигало 5–13% (см. табл. 2).

Газообразные примеси в приземной атмосфере пос. Баренцбург. Сезонная динамика газообразных примесей в атмосфере пос. Баренцбург про-

Таблица 4. Средние месячные концентрации и среднеквадратичные отклонения газообразных примесей в приземной атмосфере пос. Баренцбург в 2016–2018 гг., мкг/м³

Месяц	HCl	HNO ₃	SO ₂	NH ₃
Январь	6,04±4,30	0,05±0,06	1,41±2,25	0,06±0,08
Февраль	5,60±2,90	0,09±0,15	17,83±20,60	0,14±0,37
Март	4,88±4,54	0,07±0,13	8,95±11,63	0,15±0,14
Апрель	2,60±3,27	0,03±0,03	3,93±5,65	0,64±0,62
Май	1,13±0,99	0,01±0,02	1,06±1,08	0,65±0,44
Июнь	1,20±1,23	0,06±0,03	2,66±3,63	2,57±1,73
Июль	1,76±1,13	0,14±0,06	2,39±2,78	2,33±2,63
Август	2,54±1,64	0,14±0,07	2,95±3,92	1,40±1,57
Сентябрь	2,33±1,88	0,07±0,07	1,62±1,37	0,52±0,30
Октябрь	2,61±1,91	0,17±0,18	6,24±6,91	0,31±0,16
Ноябрь	4,74±4,25	0,09±0,13	6,95±8,61	0,11±0,08
Декабрь	4,53±3,42	0,04±0,06	8,02±11,01	0,07±0,03

анализирована по данным о средних месячных концентрациях (табл. 4). Наблюдается выраженный годовой ход концентраций SO₂ с более высокими значениями в холодный период года. Очевидно, что изменение концентраций этого газа зависит от работы ТЭС, интенсивность которой возрастает зимой, а температурные инверсии, характерные для этого периода, способствуют накоплению примесей. Противоположная динамика отмечена в изменении концентраций NH₃, содержание которого повышалось в тёплое светлое время года. Источники этого газа – открытая морская поверхность и свободная от снежного покрова подстилающая поверхность острова. Прослеживается схожесть в годовом ходе HCl и HNO₃ с динамикой диоксида серы. Повышенные концентрации этих газов наблюдались в период полярной ночи. Оксиды азота накапливаются в нижних слоях атмосферы при сжигании биомассы. Регенерированный диоксид азота может вновь вступить в реакцию. Процесс многократно повторяется до полного превращения NO₂ в азотную кислоту. Однозначных данных об источниках повышенного содержания HCl нет, хотя известно, что один из механизмов образования HCl – фракционирование морской соли из снега и льда [23, 24]. Отмечалось повышение концентраций HNO₃ в июле–августе 2017 г. Известно, что концентрации оксидов азота, а следовательно, и HNO₃ зависят от интенсивности солнечной радиации, которая возрастает в период полярного дня [8, 25].

Заключение

На протяжении 2011–2018 гг. в приземной атмосфере угледобывающего района в Российском секторе Арктике (пос. Баренцбург на архипелаге Шпицберген) проанализирована сезонная и межгодовая изменчивость различных компонентов химического состава атмосферного аэрозоля и газообразных примесей. Орографические особенности Баренцбурга и метеорологические условия региона способствуют накоплению в нижних слоях атмосферы различных примесей как естественного, так и антропогенного происхождения. Максимальные концентрации суммы ионов в аэрозоле зарегистрированы на станции Баренцбург в 2011–2012 гг. и в значительной степени связаны с влиянием локальных источников. Окончание строительных работ на территории посёлка и модернизация очистных сооружений на ТЭС способствовали снижению суммарного содержания ионов в составе аэрозоля в среднем в четыре раза. Ежемесячный мониторинг атмосферы (2016–2018 гг.) на станции Баренцбург позволил установить три периода роста концентраций суммы ионов в аэрозоле (в период полярной ночи: в феврале, в октябре–ноябре; в период полярного дня: в июле–августе), а также три периода снижения: в мае–июне, сентябре и декабре. В аэрозоле доминировали ионы Na⁺, NH₄⁺, Ca²⁺, SO₄²⁻, Cl⁻, их наиболее высокие концентрации установлены в холодные зимний и осенний периоды.

В период полярной ночи отмечена высокая корреляция концентраций пар ионов Na⁺ и Cl⁻ ($r = 0,93$), Mg²⁺ и Cl⁻ ($r = 0,81$), K⁺ и NO₃⁻ ($r = 0,69$), NH₄⁺ и SO₄²⁻ ($r = 0,57$), K⁺ и SO₄²⁻ ($r = 0,55$). Высокие коэффициенты первых двух пар ионов отражают влияние морского фактора, трёх других свидетельствуют об антропогенном происхождении и влиянии почвенно-эрозионного фактора, роль которого возрастает в летний период.

Среди элементов терригенного происхождения наиболее высокие концентрации характерны для Al, Ba, Fe; среди элементов антропогенного происхождения повышены концентрации Cr, Co, Cu, Ni, Zn, Cd, Mn, As. Арктический аэрозоль в меньшей степени обогащён такими элементами, как Ni, Sr, Ba, Pb, но сильнее обогащён As, Cr, Zn, Mo, Cd, Sn, Sb, W, Pb Li, B, Cu, Sr при низком содержании Cd, Sn, Sb, W, Pb в

угле, шламе и подстилающей поверхности. На возможное вторжение загрязнённых воздушных масс на территорию архипелага из континентальных областей указывает анализ обратных траекторий переноса воздушных масс. Определены фоновые значения концентраций полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в атмосферном аэрозоле, совпадающие с данными наблюдений, выполнявшихся НПО «Тайфун» в 2002–2010 гг. Рассчитанные отношения индивидуальных ПАУ указывают на наличие локального их источника на территории посёлка.

Среди газообразных примесей наиболее высокие концентрации SO_2 , HCl , HNO_3 наблюдались в период полярной ночи. Рост концентраций NH_3 отмечается во время полярного дня. Исследование химического состава аэрозолей и газообразных примесей в приземной атмосфере на архипелаге Шпицберген, осаждающихся на подстилающую поверхность, снежный и ледяной покровы региона, показало влияние антропогенных источников на состояние атмосферного воздуха в пос. Баренцбург. В зимний период арктический аэрозоль также испытывает влияние антропогенных источников, находящихся в умеренных широтах.

Благодарности. Работа выполнялась в рамках Комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН II.1 (проекты № 0345-2018-

0002, 0368-2018-0014), программы работ Российской научной арктической экспедиции на архипелаге Шпицберген (РАЭ-Ш) ФГБУ «АНИИ», подпрограммы 4 «Организация и обеспечение работ и научных исследований в Арктике и Антарктике» государственной программы Российской Федерации «Охрана окружающей среды» на 2012–2020 гг. Аналитические работы выполнены по проекту № 0345–2019–0008 в приборном центре коллективного пользования физико-химического ультрамикрoанализа ЛИИ СО РАН. Авторы выражают благодарность С.А. Турчиновичу за участие в измерениях.

Acknowledgements. The work was carried out within frameworks of the Fundamental researches complex program of the SB RAS II.1 (projects № 0345-2018-0002, 0368-2018-0014), of Russian Scientific Arctic expedition on Svalbard archipelago work program (RAE-S), of Federal State budgetary Institution «AARI», subprogram 4 «Organization and support of work and research in the Arctic and Antarctic» of the state program of the Russian Federation «Environmental Protection» for 2012–2020. Analytical studies were carried out according to the project № 0345–2019–0008 on the basis of the instrumental center for collective use for physical-chemical ultramicroanalysis at Limnological Institute of the SB RAS. Authors thank to Mr. S.A. Turchionovich for participating in the measurements.

Литература

1. Clausen H.B., Hammer C.U. The Laki and Tambora Eruptions as Revealed in Greenland Ice Cores from 11 Locations // *Annals of Glaciology*. 1988. V. 10. P. 16–22. doi: org/10.3189/S0260305500004092.
2. Демин Б.Н., Граевский А.П., Демешкин А.С., Власов С.В., Крылов С.С., Лалетин Н.А. Состояние и тенденции изменения загрязнения окружающей среды в местах хозяйственной деятельности российских предприятий на архипелаге Шпицберген (пос. Баренцбург и сопредельные территории) за период 2002–2010 годов. СПб.: Изд. АНИИ, 2011. 316 с.
3. Heintzenberg J., Hansson H.-C., Lannefors H. The chemical composition of arctic haze at Ny–Alesund, Spitsbergen // *Tellus*. 1981. V. 33. № 2. P. 162–171. doi: 10.3402/tellusa.v33i2.10705.
4. AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo: Norway, 1998. 859 p.

References

1. Clausen H.B., Hammer C.U. The Laki and Tambora Eruptions as Revealed in Greenland Ice Cores from 11 Locations. *Annals of Glaciology*. 1988, 10: 16–22. doi: org/10.3189/S0260305500004092.
2. Dyomin B.N, Graevskiy A.P., Demeshkin A.S., Vlasov S.V., Krylov S.S., Laletin N.A. *Sostoyaniye i tendehtsii izmeneniya zagryazneniya okruzhayushchey sredy v mestakh khozyaystvennoy deyatel'nosti rossiyskikh predpriyatiy na arhipelaghe Shpitsbergen (pos. Barentsburg i sopredelnye territorii) za period 2002–2010 gg.* The state and trends of the environmental pollution in the places of economic activity of Russian enterprises on the Svalbard archipelago (Barentsburg and adjacent territories) for the period of 2002–2010. St. Petersburg: AARI, 2011: 316 p. [In Russian].
3. 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.

5. Tomczyk A. M., Ewertowski M. Changes of arctic lands cape due to human impact, north part of Billefjorden area, Svalbard // *Quaestiones Geographicae*. 2010. V. 29. № 1. P. 75–83. doi: 10.2478/v10117-010-0008-3.
6. Zhan J., Gao Y., Li W., Chen L., Lin H., Lin Q. Effects of ship emissions on summertime aerosols at Ny–Alesund in the Arctic // *Atmospheric Pollution Research*. 2014. V. 5. P. 500–510.
7. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Радионов В.Ф., Чернов Д.Г., Турчинович Ю.С., Лубо-Лесниченко К.Е., Прахов А.Н. Обобщение результатов измерений аэрозольной оптической толщины атмосферы на арх. Шпицберген в 2011–2016 гг. // *Оптика атмосферы и океана*. 2017. Т. 30. № 11. С. 948–955.
8. Электронный ресурс: Архив погоды в Баренцбурге. <http://www.rp5.ru>.
9. Nilsen F., Cottier F., Skogseth R., Mattsson S. Fjord-shelf exchanges controlled by ice and brine production: the interannual variation of Atlantic Water in Isfjorden, Svalbard // *Continental Shelf Research*. 2008. V. 28. № 14. P. 1838–1853. doi: 10.1016/j.csr.2008.04.015.
10. Tislenko D.I., Ivanov B.V. Long-term variability of Atlantic water temperature in the Svalbard fjords in conditions of past and recent global warming // *Czech Polar Reports*. 2015. V. 5. № 2. P. 134–142. doi: 10.5817/CPR2015-2-12.
11. Sakerin S.M., Bobrikov A.A., Bukin O.A., Golobokova L.P., Polkin Vas.V., Polkin Vik.V., Shmirko K.A., Kabanov D.M., Khodzher T.V., Onischuk N.A., Pavlov A.N., Potemkin V.L., Radionov V.F. On measurements of aerosol-gas composition of the atmosphere during two expeditions in 2013 along Northern Sea Route // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2015. V. 15. № 21. P. 12413–12443. doi: 10.5194/acp-15-1-2015.
12. Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Кабанов Д.М., Козлов В.С., Полькин В.В., Радионов В.Ф., Чернов Д.Г. Сравнение средних характеристик аэрозоля в соседних арктических районах // *Оптика атмосферы и океана*. 2018. Т. 31. № 8. С. 640–646.
13. Полькин В.В., Панченко М.В., Голобокова Л.П., Филиппова У.Г., Ходжер Т.В., Лисицын А.П., Шевченко В.П. Приводный аэрозоль Белого и Карского морей в августе–сентябре 2007 г. // *Метеорологические и геофизические исследования*. М.: ООО «Паулсен», 2011. С. 199–214.
14. Голобокова Л.П., Полькин В.В., Онищук Н.А., Хуриганова О.И., Тихомиров А.Б., Терпугова С.А., Полькин Вас.В., Турчинович Ю.С., Радионов В.Ф. Изменчивость химического состава аэрозоля в приземном слое атмосферы переходной зоны «материк–океан» в районе Восточной Антарктиды // *Лёд и Снег*. 2016. Т. 56. № 2. С. 177–188. doi: 10.15356/2076-6734-2016-2-177-188.
15. Xu G., Gao Y. Atmospheric trace elements in aerosols observed over the Southern Ocean and coastal East
4. AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, Norway, 1998: 859 p.
5. Tomczyk A.M., Ewertowski M. Changes of arctic lands cape due to human impact, north part of Billefjorden area, Svalbard. *Quaestiones Geographicae*. 2010, 29 (1): 75–83. doi: 10.2478/v10117-010-0008-3.
6. Zhan J., Gao Y., Li W., Chen L., Lin H., Lin Q. Effects of ship emissions on summertime aerosols at Ny–Alesund in the Arctic. *Atmospheric Pollution Research*. 2014, 5: 500–510.
7. Sakerin S.M., Kabanov D.M., Radionov V.F., Chernov D.G., Turchinovich Yu.S., Lubo-Lesnichenko K.E., Prakhov A.N. Generalization of measurement results of atmospheric aerosol optical depth on Spitsbergen Archipelago in 2011–2016. *Optika Atmosfery i Okeana*. Atmospheric and Ocean Optics. 2017, 30 (11): 948–955. [In Russian].
8. Weather Archive in Barentsburg. <http://www.rp5.ru>.
9. Nilsen F., Cottier F., Skogseth R., Mattsson S. Fjord–shelf exchanges controlled by ice and brine production: the interannual variation of Atlantic Water in Isfjorden, Svalbard. *Continental Shelf Research*. 2008, 28 (14): 1838–1853. doi: 10.1016/j.csr.2008.04.015.
10. Tislenko D.I., Ivanov B.V. Long-term variability of Atlantic water temperature in the Svalbard fjords in conditions of past and recent global warming. *Czech Polar Reports*. 2015, 5 (2): 134–142.
11. Sakerin S.M., Bobrikov A.A., Bukin O.A., Golobokova L.P., Polkin Vas.V., Polkin Vik.V., Shmirko K.A., Kabanov D.M., Khodzher T.V., Onischuk N.A., Pavlov A.N., Potemkin V.L., Radionov V.F. On measurements of aerosol-gas composition of the atmosphere during two expeditions in 2013 along Northern Sea Route. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2015, 15 (21): 12413–12443. doi: 10.5194/acp-15-1-2015.
12. Sakerin S.M., Golobokova L.P., Kabanov D.M., Kozlov V.S., Polkin V.V., Radionov V.F., Chernov D.G. Comparison of average aerosol characteristics in the neighboring Arctic regions. *Optika Atmosfery i Okeana*. Atmospheric and Ocean Optics. 2018, 31 (8): 640–646. [In Russian].
13. Polkin V.V., Panchenko M.V., Golobokova L.P., Filip-pova U.G., Khodzher T.V., Lisitsyn A.P., Shevchenko V.P. Surface aerosol of the White and Kara Seas in August–September 2007. *Meteorologicheskiye i geofizicheskiye issledovaniya*. Meteorological and geophysical studies. М.: Paulsen, 2011: 199–214. [In Russian].
14. Golobokova L.P., Polkin V.V., Onischuk N.A., Khuriganova O.I., Tikhomirov A.B., Terpugova S.A., Polkin V.V., Turchinovich U.S., Radionov V.F. Chemical composition of aerosol in the atmospheric surface layer of the East Antarctica coastal zone. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 56 (2): 177–188. doi: 10.15356/2076-6734-2016-2-177-188. [In Russian].
15. Xu G., Gao Y. Atmospheric trace elements in aerosols observed over the Southern Ocean and coastal

- Antarctica // *Polar Research*. 2014. V. 33. P. 23973. doi: org/10.3402/polarv.33.23973.
16. *Виноградова А.А., Котова Е.И., Топчая В.Ю.* Атмосферный перенос тяжелых металлов в районы севера европейской территории России // *География и прир. ресурсы*. 2017. № 1. С. 108–116. doi: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-1(108-116).
 17. *Virkkula A., Hillamo R.E., Kerminen V.-M., Stohl A.* The influence of Kola Peninsula, continental European and marine sources on the number concentrations and scattering coefficients of the atmospheric aerosol in Finnish Lapland // *Boreal Environment Research*. 1997. V. 2. P. 317–336.
 18. Электронный ресурс: ARL NOAA. Atmospheric Resource Laboratory NOAA. URL: <http://www.arl.noaa.gov>.
 19. *Tobiszewski M., Namiesnik J.* PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources // *Environmental Pollution*. 2012. V. 162. P. 110–119. doi: 10.1016/j.envpol.2011.10.025.
 20. *Omar N.Y.V.J., Abas M.R.B., Ketuly K.A., Tahir N.M.* Concentrations of PAHs in atmospheric particles (PM-10) and roadside soil particles collected in Kuala Lumpur, Malaysia // *Atmospheric Environment*. 2002. V. 36. № 2. P. 247–254.
 21. *Ravindra K., Sothi R., Grieken R.* Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: Source attribution, emission factors and regulation // *Atmospheric Environment*. 2008. V. 42. № 13. P. 2895–2921. doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.12.010.
 22. *Masclat P., Hoyau V., Jaffrezo J.L., Cachier H.* Polycyclic aromatic hydrocarbon deposition on the ice sheet of Greenland. Part I: superficial snow // *Atmospheric Environment*. 2000. V. 34. P. 3195–3207. doi: 10.1016/S1352-2310(99)00196-X.
 23. *Keene W.C., Khalil M.A.K., Erickson III D.J., McCulloch A., Graedel T.E., Lobert J.M., Aucott M.L., Gong S.L., Harper D.B., Kleiman G., Midgley P., Moore R.M., Seuzaret C., Sturges W.T., Benkovitz C.M., Koropalov V., Barrie L.A., Li Y.F.* Composite global emissions of reactive chlorine from anthropogenic and natural sources: Reactive Chlorine Emissions Inventory // *Journ. of Geophys. Research. Atmospheres*. 1999. V. 104. № D7. P. 8429–8440. doi: 10.1029/1998JD100084.
 24. *Domine F., Sparapani R., Ianniello A., Beine H.J.* The origin of sea salt in snow on Arctic sea ice and in coastal regions // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2004. № 4. P. 2259–2271. doi: 10.5194/acp-4-2259-2004.
 25. *Vitt F.M., Armstrong T.P., Cravens T.E., Dreschho G.A.M., Jackman C.H., Laird C.M.* Computed contributions to odd nitrogen concentrations in the Earth's polar middle atmosphere by energetic charged particles // *Journ. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2000. V. 62. P. 669–683. doi: 10.1016/S1364-6826(00)00048-1.
 16. *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. *Geografiya i prirodnye resursy*. Geography and Natural Resources. 2017, 1: 108–116. doi: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-1(108-116). [In Russian].
 17. *Virkkula A., Hillamo R.E., Kerminen V.-M., Stohl A.* The influence of Kola Peninsula, continental European and marine sources on the number concentrations and scattering coefficients of the atmospheric aerosol in Finnish Lapland. *Boreal Environment Research*. 1997, 2: 317–336.
 18. ARL NOAA. Atmospheric Resource Laboratory NOAA. <http://www.arl.noaa.gov>.
 19. *Tobiszewski M., Namiesnik J.* PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources. *Environmental Pollution*. 2012, 162: 110–119. doi: 10.1016/j.envpol.2011.10.025.
 20. *Omar N.Y.V.J., Abas M.R.B., Ketuly K.A., Tahir N.M.* Concentrations of PAHs in atmospheric particles (PM-10) and roadside soil particles collected in Kuala Lumpur, Malaysia. *Atmospheric Environment*. 2002, 36 (2): 247–254.
 21. *Ravindra K., Sothi R., Grieken R.* Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: Source attribution, emission factors and regulation. *Atmospheric Environment*. 2008, 42 (13): 2895–2921. doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.12.010.
 22. *Masclat P., Hoyau V., Jaffrezo J.L., Cachier H.* Polycyclic aromatic hydrocarbon deposition on the ice sheet of Greenland. Part I: superficial snow. *Atmospheric Environment*. 2000, 34: 3195–3207. doi: 10.1016/S1352-2310(99)00196-X.
 23. *Keene W.C., Khalil M.A.K., Erickson III D.J., McCulloch A., Graedel T.E., Lobert J.M., Aucott M.L., Gong S.L., Harper D.B., Kleiman G., Midgley P., Moore R.M., Seuzaret C., Sturges W.T., Benkovitz C.M., Koropalov V., Barrie L.A., Li Y.F.* Composite global emissions of reactive chlorine from anthropogenic and natural sources: Reactive Chlorine Emissions Inventory. *Journ. of Geophys. Research. Atmospheres*. 1999, 104 (D7): 8429–8440. doi: 10.1029/1998JD100084.
 24. *Domine F., Sparapani R., Ianniello A., Beine H.J.* The origin of sea salt in snow on Arctic sea ice and in coastal regions. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2004, 4: 2259–2271. doi: 10.5194/acp-4-2259-2004.
 25. *Vitt F.M., Armstrong T.P., Cravens T.E., Dreschho G.A.M., Jackman C.H., Laird C.M.* Computed contributions to odd nitrogen concentrations in the Earth's polar middle atmosphere by energetic charged particles. *Journ. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2000, 62: 669–683. doi: 10.1016/S1364-6826(00)00048-1.