

УДК 551.510.4

## Сравнение средних характеристик аэрозоля в соседних арктических районах

С.М. Сакерин<sup>1</sup>, Л.П. Голобокова<sup>2</sup>, Д.М. Кабанов<sup>1</sup>, В.С. Козлов<sup>1</sup>,  
В.В. Польшкин<sup>1</sup>, В.Ф. Радионов<sup>3</sup>, Д.Г. Чернов<sup>1\*</sup>

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

<sup>2</sup>Лимнологический институт СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3

<sup>3</sup>Арктический и антарктический научно-исследовательский институт  
199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38

Поступила в редакцию 20.03.2018 г.

Обсуждаются результаты сравнения средних физико-химических характеристик аэрозоля в соседних районах: в арктическом пос. Баренцбург (арх. Шпицберген) и над Баренцевым морем. Отмечено небольшое превышение (менее 0,02) аэрозольной оптической толщи атмосферы в островном районе относительно морского. Более значительно различаются микрофизические характеристики аэрозоля в приземном слое: концентрации сажи выше в Баренцбурге (в 4 раза), а концентрации частиц – над морем (в 2,4 раза). Абсолютные концентрации ионов в атмосфере Баренцбурга кратно меньше, чем над морем. Однако по относительному содержанию в обоих районах преобладают ионы  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  и  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , что свидетельствует о равнозначности вклада континентальных и морских источников.

*Ключевые слова:* аэрозоль, сажа, ионный состав, Шпицберген, Баренцево море; aerosol, black carbon, ionic composition, Spitsbergen, Barents Sea.

### Введение

Актуальность изучения арктической атмосферы обусловлена самыми большими климатическими изменениями в высоких широтах и сохраняющимся дефицитом информации о пространственно-временной изменчивости аэрозольного состава. Наиболее многочисленные данные по характеристикам аэрозоля получены на полярных станциях в Barrow (Аляска), Alert (Канада), Ny-Alesund и Hornsund (арх. Шпицберген) [1–7] и др.]. В последнее десятилетие активизировались исследования атмосферного аэрозоля и в Российском секторе Арктики (см. например, [8–11]). Этому способствовали организация наблюдений на береговых станциях («Тикси», «Баренцбург», «Мыс Баранова») [12–14], самолетные эксперименты [15, 16] и ежегодные морские экспедиции [17, 18].

При большой протяженности арктической зоны России трех береговых станций недостаточно для определения географического распределения характеристик аэрозоля. Результаты морских экспедиций в значительной степени отягощены спецификой

погодных условий в короткие периоды измерений в том или ином районе [17]. Поэтому для выявления пространственных различий характеристик аэрозоля необходимы многолетние данные по каждому из районов арктической зоны.

Результаты шестилетнего мониторинга на арх. Шпицберген (Баренцбург) позволили оценить особенности сезонной и межгодовой изменчивости оптических, микрофизических характеристик и ионного состава аэрозоля в современный период (2011–2017 гг.) [19, 20]. По данным шести морских экспедиций (2004–2017 гг.) получены первые оценки пространственного распределения комплекса характеристик аэрозоля над арктическими морями России [21].

В настоящей работе обсуждаются результаты сравнения средних физико-химических характеристик аэрозоля, измеренных в соседних арктических районах – на арх. Шпицберген и в Баренцевом море, для которых накоплено самое большое количество наших экспедиционных данных [17–21].

### 1. Характеристика экспериментальных данных

В измерениях характеристик аэрозоля в Баренцбурге и над Баренцевым морем использовался одинаковый комплект приборов в составе портативного солнечного фотометра SPM, аэталометра МДА и фотоэлектрических счетчиков частиц АЗ-10 или

\* Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru); Людмила Петровна Голобокова (lg@lin.irk.ru); Дмитрий Михайлович Кабанов (dkab@iao.ru); Валерий Степанович Козлов (vkozlov@iao.ru); Виктор Викторович Польшкин (victor@iao.ru); Владимир Федорович Радионов (vradion@ari.ru); Дмитрий Григорьевич Чернов (chernov@iao.ru).

Grimm 1.108. Для каждого часа измерений рассчитывались: аэрозольная оптическая толщина (АОТ,  $\tau_a^a$ ) атмосферы, грубо- и мелкодисперсная составляющие АОТ ( $\tau^c$  и  $\tau_{0,5}^f$  — на длине волны 0,5 мкм), параметр Ангстрема  $\alpha$  и  $\beta$ , массовая концентрация в аэрозоле поглощающего вещества (сажи,  $M_{bc}$ ), счетная концентрация частиц в диапазоне радиусов 0,2–5 мкм ( $N_a$ ), а также в диапазоне размеров мелкодисперсной ( $N_f$ ) и грубодисперсной ( $N_c$ ) фракций.

Кроме измерений оптических и микрофизических характеристик, проводился отбор проб воздуха на фильтры с последующим анализом в Центре коллективного пользования физико-химического ультрамикрoанализа Лимнологического института СО РАН. Отбор проб осуществлялся, как правило, раз в сутки с использованием метода, принятого в международных сетях мониторинга [22], путем прокачки воздуха через фильтры в течение не менее 4 ч. По результатам химического анализа оценивались концентрации в аэрозоле водорастворимых ионов ( $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Cl^-$ ,  $NH_4^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ), а также содержание в воздухе газообразных примесей ( $HCl$ ,  $HNO_3$ ,  $SO_2$ ,  $NH_3$ ). Методики определения физико-химических характеристик аэрозоля более подробно приводились в предшествующих публикациях (см. например, [17, 23]).

В сравнительном анализе использовались характеристики аэрозоля, полученные в Баренцбурге (2011–2017 гг.) и в шести экспедициях в Баренцевом море: 54-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш» (сентябрь–октябрь 2007 г.); NABOS-2013 на НЭС «Академик Федоров» (август–сентябрь 2013 г.); NABOS-2015 на НЭС «Академик Трешников» (август–октябрь 2015 г.); 66-й и 67-й рейсы НИС «Академик Мстислав Келдыш» (июль–сентябрь 2016 г.), «Арктический плавучий университет» на НИС «Профессор Молчанов» (июль 2017 г.). Основная часть данных в морских экспедициях получена во второй половине полярного дня (примерно июль–сентябрь). Чтобы минимизировать влияние сезонной изменчивости, для этого же периода использовались данные измерений в Баренцбурге. Количество дней и часов измерений анализируемых характеристик приведено в табл. 1.

Заметим, что в чистой арктической атмосфере эпизодически наблюдаются ситуации экстремальных замутнений, обусловленных выносами преимущественно дымового аэрозоля от лесных пожаров в Евразии или Северной Америке. При относительно малой статистике измерений в Баренцевом море такие редкие события могли существенно исказить средние характеристики аэрозоля, типичные для района. Поэтому сравнение проводилось в двух вариантах: по общим массивам данных и с исключенными ситуациями больших замутнений.

Из-за малого числа данных по химическому составу аэрозоля в Баренцевом море они были дополнены данными, полученными в этих же экспедициях в Карском море. Учитывая близость среднего ионного состава аэрозоля над этими морями (различия статистически незначимы) [21], такое объединение можно считать допустимым.

## 2. Аэрозольная оптическая толщина атмосферы

На рис. 1 приведены средние спектральные зависимости АОТ над Баренцевым морем и в Баренцбурге по данным измерений фотометров SPM в диапазоне спектра 0,34–2,14 мкм. Хорошо видно, что учет дымовых замутнений приводит к увеличению АОТ преимущественно в коротковолновой части спектра. Независимо от варианта сравнения («с дымами» или «без дымов») атмосфера Баренцбурга отличается более высокими значениями АОТ в коротковолновой области. В длинноволновой области (> 1 мкм) соотношение АОТ в двух районах меняется на противоположное. Указанное различие АОТ в островном и морском районах обусловлено перераспределением вклада мелко- и грубодисперсного аэрозоля.

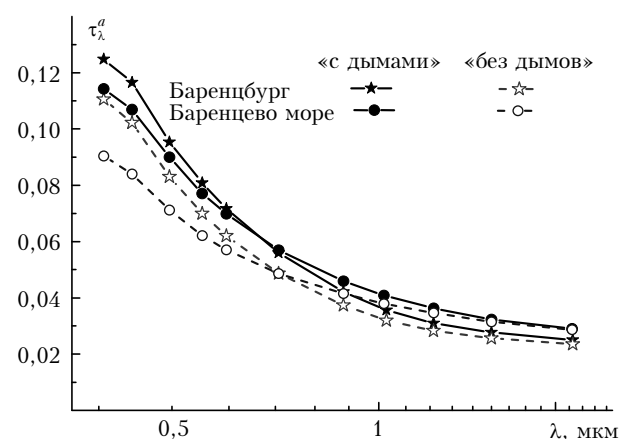


Рис. 1. Средние спектральные зависимости АОТ над Баренцевым морем и в Баренцбурге (июль–сентябрь) по данным измерений солнечных фотометров SPM

Чтобы повысить достоверность оценок АОТ над Баренцевым морем, к данным наших измерений фотометром SPM (21 день) были добавлены данные фотометра Microtops II (13 дней), полученные по проекту Maritime Aerosol Network ([24]; [https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new\\_web/maritime\\_aerosol\\_network.html](https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/maritime_aerosol_network.html)). Средние характеристики АОТ при таком дополнении почти не изменились (табл. 2), но результаты сравнения стали более надежными.

Таблица 1

Количество дней (часов) измерений характеристик аэрозоля в двух районах				
Район	Тип массива	АОТ	Аэрозоль / сажа	Число проб
Баренцбург	общий «с дымами»	142 (697)	232 (4755) / 374 (7668)	238
	«без дымов»	133 (652)	232 (4689) / 374 (7533)	
Баренцево море	общий «с дымами»	21 (66)	66 (1256) / 62 (1069)	82
	«без дымов»	19 (55)	60 (1218) / 56 (954)	

Средние ( $\pm$ СКО) характеристики АОТ над Баренцевым морем и в Баренцбурге

Район	Тип массива	$\tau_{0,5}^f$	$\alpha$	$\beta$	$\tau_{0,5}^f$	$\tau^c$	$\tau_{0,5}^f/\tau_{0,5}^a$
Баренцбург	«без дымов»	$0,070 \pm 0,018$	$1,21 \pm 0,38$	$0,031 \pm 0,012$	$0,047 \pm 0,015$	$0,023 \pm 0,009$	0,67
	«с дымами»	$0,081 \pm 0,031$	$1,21 \pm 0,37$	$0,036 \pm 0,015$	$0,056 \pm 0,028$	$0,025 \pm 0,009$	0,69
Баренцево море	«без дымов»	$0,054 \pm 0,024$	$1,04 \pm 0,39$	$0,029 \pm 0,022$	$0,031 \pm 0,016$	$0,023 \pm 0,020$	0,57
	«с дымами»	$0,063 \pm 0,042$	$1,09 \pm 0,42$	$0,032 \pm 0,024$	$0,040 \pm 0,037$	$0,023 \pm 0,019$	0,63

В обоих вариантах сравнения АОТ в Баренцбурге статистически значимо больше, чем над Баренцевым морем, из-за мелкодисперсной составляющей: превышение  $\tau_{0,5}^f$  равно 0,016 (на 30–50%). Различие вклада в АОТ мелкодисперсного аэрозоля характеризуется соотношением  $\tau_{0,5}^f/\tau_{0,5}^a$ . Компонента  $\tau^c$  в двух районах одинакова, а параметры  $\alpha$  и  $\beta$  различаются на 7–16%.

Сопоставление характеристик АОТ в конкретном населенном пункте и в целом над Баренцевым морем может показаться некорректным. Поэтому сошлемся на работу [25], где проведен сравнительный анализ данных квазисинхронных измерений АОТ в трех районах Шпицбергена: Баренцбург, Ny-Alesund и Horsund. Сравнение показало малые отличия АОТ в этих районах при небольшом превышении средних значений (на 0,009–0,012) в более крупном пос. Баренцбург. Повышенные аэрозольные замутнения в Баренцбурге, по-видимому, обусловлены антропогенным фактором. Если исключить эту антропогенную добавку ( $\sim 0,01$ ), то среднее отличие АОТ на трех станциях относительно Баренцева моря сократится примерно в 2 раза. Таким образом, имеющаяся информация свидетельствует о незначительном различии АОТ (менее 0,01) над арх. Шпицберген и Баренцевым морем.

На основе спектральных АОТ путем решения обратной задачи определены средние функции распределений частиц  $(dV/dr)_\tau$  в атмосферной толще морского и островного районов. В расчетах использовался алгоритм, разработанный М.А. Свириденковым (Институт физики атмосферы РАН) [26] при значении показателя преломления  $n = 1,5$ . На рис. 2 приведены средние спектры распределения частиц по объемам для четырех типов данных: Баренцево море без дымов, Баренцбург с дымами и без дымов и отдельно ситуации дымовых выносов.

Самые большие отличия функций распределений во всем диапазоне размеров наблюдаются при вторжениях дымового аэрозоля (см. «дымы» на рис. 2). Однако из-за относительно малого числа таких случаев различие средних функций распределений «с дымами» и «без дымов», приведенное на примере Баренцбурга, оказалось небольшим.

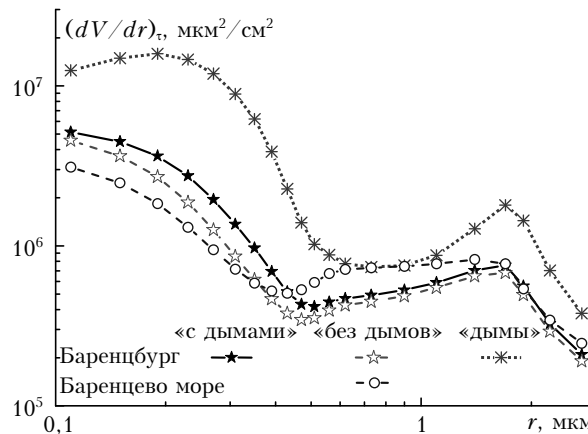


Рис. 2. Средние распределения частиц по размерам  $(dV/dr)_\tau$ , восстановленных по данным обращения спектральных АОТ атмосферы

Сравнение  $(dV/dr)_\tau$  в двух районах показало более высокое содержание над Баренцевым морем грубодисперсного аэрозоля ( $r > 0,5$  мкм), а в атмосфере Баренцбурга – субмикронных частиц.

### 3. Концентрации аэрозоля и сажи в приземном слое атмосферы

Средние характеристики аэрозоля в приземном слое атмосферы приведены в табл. 3 и на рис. 3. В отличие от АОТ концентрации аэрозоля и сажи в морском и островном районах различаются более значительно. Независимо от варианта сравнения («с дымами» или «без дымов») средняя концентрация сажи в Баренцбурге в 4 раза больше, чем над Баренцевым морем. Противоположное соотношение наблюдается в счетных концентрациях частиц – в морском районе  $N_a$  примерно в 2,4 раза выше.

Для сравнения на рис. 3 приведены средние значения  $M_{bc}$  и  $N_a$ , полученные нами в других полярных районах океана. Сопоставление показало, что средний уровень  $M_{bc}$  над Баренцевым морем согласуется с данными над Карским морем [21] и Южным океаном [27], но счетные концентрации в этих районах в  $\sim 1,5$  раза меньше.

Таблица 3

Средние ( $\pm$ СКО) концентрации аэрозоля ( $\text{см}^{-3}$ ) и сажи ( $\text{мкг}/\text{м}^3$ ) в двух районах

Район	Тип массива	$N_a$	$N_f$	$N_c$	$M_{bc}$
Баренцбург	«без дымов»	$1,33 \pm 1,39$	$1,24 \pm 1,30$	$0,08 \pm 0,10$	$0,137 \pm 0,201$
	«с дымами»	$1,51 \pm 2,37$	$1,41 \pm 2,31$	$0,10 \pm 0,15$	$0,171 \pm 0,353$
Баренцево море	«без дымов»	$3,21 \pm 2,79$	$3,10 \pm 2,75$	$0,12 \pm 0,20$	$0,035 \pm 0,028$
	«с дымами»	$3,28 \pm 2,89$	$3,18 \pm 2,85$	$0,12 \pm 0,20$	$0,042 \pm 0,055$

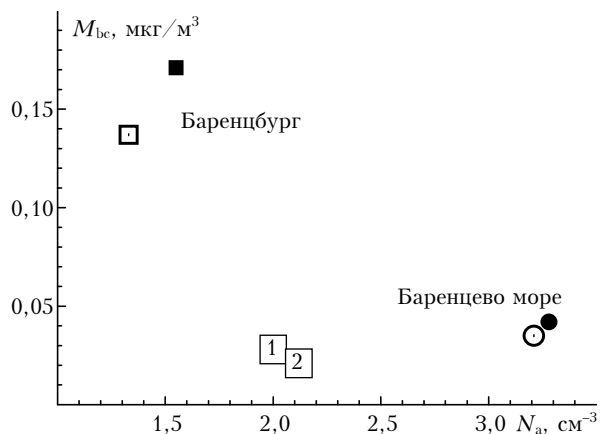


Рис. 3. Средние концентрации  $N_a$ ,  $M_{bc}$  над Баренцевым морем и в Баренцбурге (черные значки – «с дымами», полые – «без дымов»; 1, 2 – средние  $N_a$ ,  $M_{bc}$  над Карским морем [21] и Южным океаном [27] соответственно)

Средние концентрации сажи в Баренцбурге оказались в несколько раз выше, чем на соседней станции Zeppelin (Ny-Elesund) [3] и станции Barrow (Аляска) [7]. Совокупность рассмотренных фактов свидетельствует о наличии в относительно крупном пос. Баренцбург дополнительного источника поглощающего аэрозоля – антропогенного и/или пылевого.

Более детальное представление о дисперсном составе аэрозоля в двух районах дают функции распределения частиц по объемам ( $dV/dr$ ). Из рис. 4 видно, что Баренцево море отличается более высокими значениями  $dV/dr$  во всем диапазоне размеров частиц.

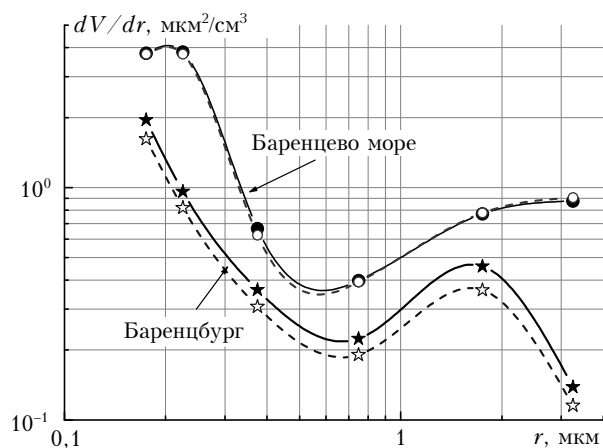


Рис. 4. Средние объемные функции распределения частиц над Баренцевым морем и в Баренцбурге (черные значки – «с дымами», полые – «без дымов»)

В интервале мелких частиц ( $r = 0,225$  мкм) максимальные отличия достигают 4-х раз, а у самых крупных ( $r = 3,25$  мкм) – 7-ми раз. При учете дымов средние распределения  $dV/dr$  увеличиваются незначительно из-за относительно небольшого числа таких ситуаций. Отметим, что в диапазоне субмикронных частиц наблюдается противоположное соотношение функций распределения частиц в приземном слое (рис. 4) и функций ( $dV/dr$ ), в столбе атмосферы (см. рис. 2) между Баренцбургом и Баренцевым морем. Этот вопрос требует дополнительных исследований.

#### 4. Ионный состав аэрозоля и содержание газообразных примесей

В ионном составе аэрозоля в морском и островном районах проявились различия абсолютных концентраций (табл. 4): содержание большинства ионов в атмосфере Баренцбурга в несколько раз меньше, чем в среднем над Баренцевым и Карским морями (для краткости далее – «Баренцево море»). Преобладающими в обоих районах являются пары ионов с высокой корреляцией концентраций ( $R > 0,8 \div 0,9$ ) –  $Na^+$ ,  $Cl^-$  и  $NH_4^+$ ,  $SO_4^{2-}$ .

Для выяснения причин и достоверности различий ионного состава аэрозоля в Баренцбурге и над «Баренцевым морем» проведено сравнение с результатами исследований других авторов в аналогичных районах. Средние концентрации ионов в Баренцбурге соответствуют многолетним данным на арктических станциях Ny-Alesund (Шпицберген) [28, 29], Barrow (Аляска) [30], Nord (Гренландия) [31], Alert (Канада) [32]. По концентрациям  $Na^+$  и  $Cl^-$  есть также согласие с данными месячного цикла наших измерений на станции «Тикси» [23]. Однако в «Тикси» отмечены более высокие концентрации ионов  $NH_4^+$ ,  $NO_3^-$  и  $SO_4^{2-}$ , что обусловлено большим влиянием континента.

Средние концентрации ионов  $Cl^-$ ,  $Na^+$ ,  $SO_4^{2-}$  и  $Mg^{2+}$  над «Баренцевым морем» хорошо согласуются с многолетними данными в Восточной Атлантике, Южном океане [27] и Дальневосточных морях [17] (находятся в середине диапазона их средних значений). Отличие «Баренцева моря» проявилось в 2 раза больших концентрациях  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  и  $NH_4^+$  и дефиците ионов  $NO_3^-$ . Отметим также, что повышенные концентрации ряда ионов над «Баренцевым морем» могли быть обусловлены тем обстоятельством, что примерно третья часть проб была отобрана в зоне континентального влияния (вблизи Кольского п-ва, Новой Земли, Ямала).

Таблица 4

Средние ( $\pm$ СКО) концентрации ионов в двух районах Арктики ( $мкг/м^3$ )

Район	$Na^+$	$K^+$	$Mg^{2+}$	$Cl^-$	$NH_4^+$	$Ca^{2+}$	$NO_3^-$	$SO_4^{2-}$
Баренцбург (2013–2017 гг.)	$0,10 \pm 0,16$	$0,02 \pm 0,04$	$0,01 \pm 0,01$	$0,22 \pm 0,30$	$0,03 \pm 0,04$	$0,04 \pm 0,04$	$0,03 \pm 0,07$	$0,23 \pm 0,25$
«Баренцево море»	$0,56 \pm 0,50$	$0,20 \pm 0,39$	$0,06 \pm 0,12$	$1,74 \pm 1,52$	$0,20 \pm 0,29$	$0,22 \pm 0,30$	$0,02 \pm 0,05$	$0,63 \pm 0,72$

Относительное содержание ионов в аэрозоле оценивалось по долевым факторам  $FM_{\text{cont}}$  и  $FM_{\text{ocean}} = (1 - FM_{\text{cont}})$  [33], а также с помощью коэффициентов обогащения  $K$  [17], которые характеризуют отличие соотношений концентраций разных ионов относительно иона натрия в составе аэрозоля и морской воде.

Расчет долевого фактора показал близкие значения  $FM_{\text{cont}}$  и  $FM_{\text{ocean}}$  в морском и островном районах: например,  $FM_{\text{ocean}} = 0,52$  в Баренцбурге и  $0,53$  — над «Баренцевым морем». То есть континентальные и морские источники вносят практически одинаковый вклад в формирование ионного состава аэрозоля в этих районах.

Самыми большими коэффициентами обогащения (рис. 5) отличаются ионы кальция  $K(\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+) > 10$ , что свидетельствует об их континентальном происхождении. Отметим также высокие значения  $K(\text{K}^+/\text{Na}^+)$  над «Баренцевым морем» и  $K(\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+)$  в Баренцбурге. Соотношение концентраций в аэрозоле ( $\text{Cl}^-/\text{Na}^+$ ) и ( $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ ) в обоих районах близко к их содержанию в морской воде.

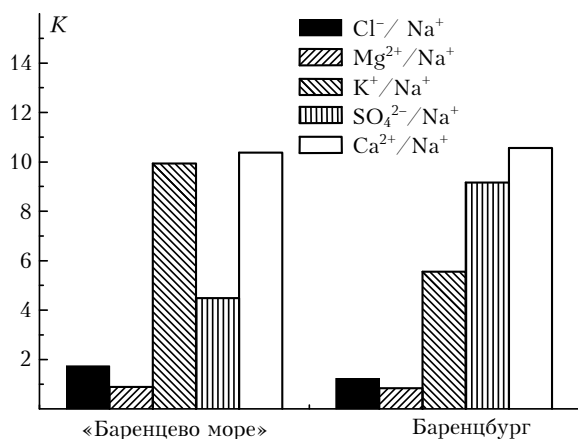


Рис. 5. Средние коэффициенты обогащения аэрозоля ионами  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{Ca}^{2+}$

Сравнение содержания в воздухе газообразных примесей (табл. 5) показало, что средние концентрации  $\text{HCl}$  и  $\text{SO}_2$  в морском и островном районах одинаковы. Основное отличие состоит в более высоких (в 4,8 раза) концентрациях  $\text{NH}_3$  над «Баренцевым морем». Это объясняется тем, что океан является глобальным источником эмиссии  $\text{NH}_3$  [34, 35]. Кроме того, Баренцево море отличается высокой продуктивностью биологических ресурсов, поэтому биохимические процессы продуцирования и деструкции органического вещества способствуют образованию многих газов, в том числе  $\text{NH}_3$  [36].

Второе отличие касается более высоких (в 2 раза) концентраций  $\text{HNO}_3$  в атмосфере Баренцбурга, обусловленных антропогенным фактором — выбросами оксидов азота и серы от ТЭЦ и круизных судов [29]. Особенности рельефа и частые штилевые условия, особенно осенью (до 18%) [37], не способствуют рассеянию этих веществ в атмосфере. Накапливающиеся оксиды азота в течение нескольких часов трансформируются в долгоживущую газообразную  $\text{HNO}_3$ , а оксиды серы — в  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и сульфаты [38].

## Заключение

На основе результатов многолетних измерений проведено сравнение средних характеристик аэрозоля над арх. Шпицберген и соседним Баренцевым морем. Оно показало, что различающиеся природные условия островного и морского районов оказывают разное (иногда противоположное) влияние на отдельные характеристики аэрозоля в приземном слое и во всей толще атмосферы.

1. Независимо от варианта сравнения «с дымами» или «без дымов» различие АОТ в двух районах составляет малую величину (не более 0,02) и проявляется в коротковолновой части спектра — за счет большего содержания мелкодисперсного аэрозоля в атмосфере Баренцбурга.

2. Более значительно отличаются микрофизические характеристики в приземном слое: в Баренцбурге в сравнении с Баренцевым морем наблюдаются в 4 раза большие концентрации сажи, но в 2,4 раза меньшие счетные концентрации частиц аэрозоля.

4. Абсолютные концентрации ионов в морском и островном районах различаются в несколько раз, и каждая из них соответствует многолетним данным в эквивалентных районах: данные в Баренцбурге согласуются с другими арктическими станциями, а в «Баренцевом море» — с другими районами океана. (Исключением являются повышенные концентрации  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{NH}_4^+$  над «Баренцевым морем» из-за отбора проб вблизи Кольского п-ва, Новой Земли, Ямала.)

5. Несмотря на отличие абсолютных концентраций, в обоих районах преобладают пары ионов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  и  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , которые служат индикаторами поступления аэрозоля от морских и континентальных источников. Долевые факторы свидетельствуют о равнозначности вклада этих источников в ионный состав аэрозоля. Коэффициенты обогащения аэрозольных частиц указывают на преобладание примесей континентального происхождения, образующихся как в результате естественных процессов, так и вследствие антропогенного воздействия.

Таблица 5

Средние концентрации газообразных примесей в двух районах Арктики ( $\text{мкг}/\text{м}^3$ )

Район	$\text{HCl}$	$\text{HNO}_3$	$\text{SO}_2$	$\text{NH}_3$
Баренцбург (2013–2017)	$2,85 \pm 2,68$	$0,25 \pm 0,57$	$1,85 \pm 3,72$	$1,23 \pm 2,52$
«Баренцево море»	$2,86 \pm 6,56$	$0,11 \pm 0,17$	$1,88 \pm 3,92$	$5,90 \pm 5,66$

Авторы выражают благодарность А.В. Губину, П.Н. Зенковой, А.С. Кессель, К.Е. Лубо-Лесниченко, Вас.В. Полькину, А.Н. Прахову, А.П. Ростову, О.Р. Сидоровой, С.А. Терпуговой, С.А. Турчиновичу, Ю.С. Турчиновичу, А.В. Уразильдеевой, В.П. Шмаргунову за участие в измерениях и приборное обеспечение, а также В. Holben, А. Smirnov, L. Istomina, L. Yurganov, M. Heller, S. Kinne за возможность использования данных с сайта MAN-AERONET.

Работа выполнена в рамках программы Российской научной арктической экспедиции на архипелаге Шпицберген (РАЭ-Ш) ФГБУ «ААНИИ» и при финансовой поддержке проектов № 0368-2018-0014 и 0345-2018-0002 Комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН II.1.

1. Tomasi C., Kokhanovsky A.A., Lupi A., Ritter C., Smirnov A., Mazzola M., Stone R.S., Lanconelli C., Vitale V., Holben B.N., Nyeki S., Wehrli C., Altonen V., de Leeuw G., Rodriguez E., Herber A.B., Stebel K., Stohl A., O'Neill N.T., Radionov V.F., Zielinski T., Petelski T., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Xue Y., Mei L., Istomina L., Wagener R., McArthur B., Sobolewski P.S., Butler J., Kivi R., Courcoux Y., Larouche P., Broccardo S., Piketh S.J. Aerosol remote sensing in polar regions // *Earth-Sci. Rev.* 2015. V. 140. P. 108–157.
2. Shantz N.C., Gulpepe I., Andrews E., Zelenyuk A., Earle M.E., Macdonald A.M., Liu P.S.K., Leaitch W.R. Optical, physical, and chemical properties of springtime aerosol over Barrow Alaska in 2008 // *Int. J. Climatol.* 2014. V. 34. P. 3125–3138. DOI: 10.1002/joc.3898.
3. Eleftheriadis K., Vratolis S., Nyeki S. Aerosol black carbon in the European Arctic: Measurements at Zeppelin Station, NyElesund, Svalbard from 1998–2007 // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. P. L02809. DOI: 10.1029/2008GL035741.
4. Herber A., Thomson L.W., Gernandt H., Leiterer U., Nagel D., Schulz K., Kaptur J., Albrecht T., Noholt J. Continuous day and night aerosol optical depth observations in the Arctic between 1991 and 1999 // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. P. 4097. DOI: 10.1029/2001JD000536.
5. Croft B., Martin R.V., Leaitch W.R., Tunved P., Breider T.J., D'Andrea S.D., Pierce J.R. Processes controlling the annual cycle of Arctic aerosol number and size distributions // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 3665–3682. DOI: 10.5194/acp-16-3665-2016.
6. Chen Y.-C., Hamre B., Frette Q., Muyimbwa D., Blindheim S., Stebel K., Sobolewski P., Toledano C., Starnes J. Aerosol optical properties in Northern Norway and Svalbard // *Appl. Opt.* 2016. V. 55, N 4. P. 660–672. DOI: 10.1364/AO.55.000660.
7. Stone R.S., Sharma S., Herber A., Eleftheriadis K., Nelson D.W. A characterization of Arctic aerosols on the basis of aerosol optical depth and black carbon measurements // *Elementa. Sci. Anth.* 2014. V. 2. 27 p. DOI: 10.12952/journal.elementa.000027.
8. Шевченко В.П., Виноградова А.А., Лисицын А.П., Навигатский А.Н., Горюнова Н.В. Атмосферные аэрозоли как источник осадочного вещества и загрязнений в Северном Ледовитом океане // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2009. С. 150–172.
9. Шевченко В.П., Стародымова Д.П., Виноградова А.А., Лисицын А.П., Макаров В.И., Попова С.А.,

Сивонен В.В., Сивонен В.П. Элементный и органический углерод в атмосферном аэрозоле над северо-западным побережьем Кандалакшского залива Белого моря // Докл. АН. 2015. Т. 461, № 1. С. 70–74.

10. Стародымова Д.П., Виноградова А.А., Шевченко В.П., Захарова Е.В., Сивонен В.В., Сивонен В.П. Элементный состав приземного аэрозоля у северо-западного побережья Кандалакшского залива Белого моря // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 11. С. 956–961; Starodumova D.P., Vinogradova A.A., Shevchenko V.P., Zakharova E.V., Sivonen V.V., Sivonen V.P. Elemental composition of near-ground aerosol near the northwestern coast of Kandalaksha Bay of the White Sea // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 2. P. 181–186.
11. Виноградова А.А., Васильева А.В. Черный углерод в воздухе северных районов России: источники, пространственные и временные вариации // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 6. С. 467–475; Vinogradova A.A., Vasileva A.B. Black carbon in air over northern regions of Russia: Sources and spatiotemporal variations // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 6. P. 533–541.
12. Макутас А.П., Уттал Т. Начало совместных Российско-американских атмосферных наблюдений в Тикси // *Российские полярные исследования.* 2010. № 2. С. 35–38.
13. Саватюгин Л.М., Соловьянова И.Ю. Российский научный центр на архипелаге Шпицберген // *Российские полярные исследования.* 2011. № 1. С. 13–15.
14. Макутас А.П., Соколов В.Т. Научно-исследовательский стационар «Ледовая база “Мыс Баранова”» – летний полевой сезон 2014 г. // *Российские полярные исследования.* 2014. № 3. С. 10–12.
15. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Nedelec Ph., Paris J.-D., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Вертикальное распределение газовых и аэрозольных примесей воздуха над российским сектором Арктики // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 12. С. 1043–1052.
16. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Воронцовская Н.Г., Головки А.К., Давыдов Д.К., Козлов А.С., Певнева Г.С., Симоненков Д.В., Фофонов А.В. Органический аэрозоль в атмосфере Сибири и Арктики. Ч. 1. Географические особенности и временная динамика // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 8. С. 716–722.
17. 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 // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15, iss. 21. P. 12413–12443. DOI: 10.5194/acp-15-1-2015.
18. Терпугова С.А., Зенкова П.Н., Кabanov Д.М., Полькина В.В., Голобокова Л.П., Панченко М.В., Сакерин С.М., Лисицын А.П., Шевченко В.П., Политова Н.В., Козлов В.С., Ходжер Т.В., Шмаргунов В.П., Чернов Д.Г. Результаты исследований характеристик аэрозоля в атмосфере Карского и Баренцева морей в летне-осенний период 2016 г. // *Оптика атмосф. и океана.* 2018. Т. 31, № 5. С. 391–402.
19. Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Кabanov Д.М., Козлов В.С., Радионов В.Ф., Сидорова О.Р., Турчинович Ю.С., Ходжер Т.В., Хуриганова О.И., Чернов Д.Г.

- Сезонная и межгодовая изменчивость характеристик аэрозоля в арктическом поселке Баренцбург (арх. Шпицберген, 2011–2017) // Оптика атмосф. и океана. Физ. атмосф.: Материалы XXIV Междунар. симпози. 2–5 июля 2018 г. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2018. С67–С71.
20. 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 спектральной аэрозольной оптической толщины атмосферы на арх. Шпицберген в 2011–2016 гг. // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 11. С. 948–955. DOI: 10.15372/AOO20171107; Sakerin S.M., Kabanov D.M., Radionov V.F., Chernov D.G., Turchinovich Yu.S., Lubo-Lesnichenko K.E., Prakhov A.N. Generalization of results of atmospheric aerosol optical depth measurements on Spitsbergen Archipelago in 2011–2016 // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 2. P. 163–170.
  21. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Полькин В.В., Голобокова Л.П., Зенкова П.Н., Кессель А.С., Полькин Вас.В., Радионов В.Ф., Терпугова С.А., Уразильдеева А.В., Ходжер Т.В., Хуриганова О.И. Особенности пространственного распределения характеристик аэрозоля над арктическими морями // Оптика атмосф. и океана. Физ. атмосф.: Материалы XXIV Междунар. симпози. 2–5 июля 2018 г. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2018. С22–С26.
  22. Manual for sampling and chemical analysis, EMEP Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe, NILU: EMEP/CCC-Report 1/95, Reference: 0-7726. EMEP, 1996. 176 p.
  23. Голобокова Л.П., Полькин В.В., Кабанов Д.М., Терпугова С.А., Чернов Д.Г., Чипанина Е.В., Ходжер Т.В., Невцетмаева О.Г., Панченко М.В., Сакерин С.М. Исследования атмосферного аэрозоля в арктических районах России // Лед и Снег. 2013. № 2 (122). С. 129–136.
  24. Smirnov A., Holben B.N., Slutsker I., Giles D., McClain C.R., Eck T.F., Sakerin S.M., Macek A., Croot P., Zibordi G., Quinn P., Sciare J., Kinne S., Harvey M., Smyth T., Piketh S., Zielinski T., Proshutinsky A., Goes J., Seigel D.A., Larouche P., Radionov V.F., Goloub P., Krishnamoorthy K., Matarrese R., Robertson L., Jourdin F. Maritime aerosol network as a component of Aerosol Robotic Network // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. P. D06204. DOI: 10.1029/2008JD011257.
  25. Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Круглинский И.А., Ritter C., Sobolewski P.S., Zielinski T. Сравнение аэрозольных оптических толщ атмосферы, измеряемых разными фотометрами в трех районах архипелага Шпицберген // Оптика атмосф. и океана. Физ. атмосф.: Материалы XXIV Междунар. симпози. 2–5 июля 2018 г. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2018. С137–С140.
  26. Свириденков М.А. Определение характеристик атмосферного аэрозоля по спектральным измерениям прозрачности и малоуглового рассеяния // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14, № 12. С. 1115–1118.
  27. Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Кабанов Д.М., Полькин В.В., Радионов В.Ф. Зональное распределение физико-химических характеристик аэрозоля в Восточной Атлантике // Оптика атмосф. и океана. 2018, Т. 31, N 4. С. 303–312.
  28. Yamagata S., Kobayashi D., Ohta S., Murao N., Shiobara M., Wada M., Yabuki M., Konishi H., Yamanouchi T. Properties of aerosols and their wet deposition in the arctic spring during ASTAR2004 at Ny-Alesund, Svalbard // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9. P. 261–270.
  29. Udisti R., Bazzano A., Becagli S., Bolzacchini E., Caiazzo L., Cappelletti D., Ferrero L., Frosini D., Giardi F., Grotti M., Lupi A., Malandrino M., Mazzola M., Moroni B., Severi M., Traversi R., Viola A., Vitale V. Sulfate source apportionment in the Ny-Alesund (Svalbard Islands) Arctic aerosol // Rend. Fiz. Acc. Lincei. 2016. V. 27. P. 85–94. DOI: 10.1007/s12210-016-0517-7.
  30. Quinn P.K., Bates T.S., Schulz K., Shaw G.E. Decadal trends in aerosol chemical composition at Barrow, Alaska: 1976–2008 // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9. P. 8883–8888.
  31. Fenger M., Sorensen L.L., Kristensen K., Jensen B., Nguyen Q.T., Nøjgaard J.K., Massling A., Skov H., Becker T., Glasius M. Sources of anions in aerosols in northeast Greenland during late winter // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13. P. 1569–1578.
  32. Sirois A., Barrie L.A. Arctic lower troposphere aerosol trends and composition at Alert, Canada: 1980–1995 // J. Geophys. Res. 1999. V. 104, N D9. P. 11599–11618.
  33. Полькин В.В., Щелканов Н.Н., Голобокова Л.П., Панченко М.В. Сравнение методик оценки вклада континентальных и морских источников в ионный состав приводного аэрозоля Белого моря // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 1. С. 23–26.
  34. Bouwman A.F., Lee D.S., Asman W.A.H., Dentener F.J., van der Hoeck K.W., Olivier J.G.J. A global high-resolution emission inventory for ammonia // Global Biogeochem. Cycles. 1997. № 11. P. 561–587.
  35. Behera S.N., Sharma M., Aneja V.P., Balasubramanian R. Ammonia in the atmosphere: A review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies // Environ. Sci. Pollut. Res. 2013. V. 20, N 11. P. 8092–131. DOI: 10.1007/s11356-013-2051-9.
  36. Алекин О.А., Ляхин Ю.И. Химия океана. Л.: Гидрометеониздат, 1984. 342 с.
  37. Архив погоды в Баренцбурге. [Электронный ресурс]. URL: <http://gr5.ru/> (дата обращения: 4.12 2017).
  38. Исидоров В.А. Экологическая химия. СПб.: Химиздат, 2001. 304 с.

S.M. Sakerin, L.P. Golobokova, D.M. Kabanov, V.S. Kozlov, V.V. Pol'kin, V.F. Radionov, D.G. Chernov.

#### Comparison of average aerosol characteristics in the neighboring Arctic regions.

We discuss the results of comparison of the average physical-chemical aerosol characteristics in the neighboring regions: in the Arctic settlement Barentsburg (Spitsbergen Archipelago) and over the Barents Sea. A small (less than 0.02) excess of the atmospheric aerosol optical depth in the island area over the maritime region is noted. The aerosol microphysical characteristics differ stronger in the near-ground layer: the black carbon concentrations are (a factor of 4) larger in Barentsburg, and particle concentrations are (a factor of 2.4) larger over sea. The absolute concentrations of ions in the atmosphere of Barentsburg are several-fold smaller than over sea. However, with respect to the relative content,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  and  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  ions predominate in both regions, indicating equivalent contributions of continental and maritime sources.