

УДК 551.510.4

Результаты измерений физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля на научно-исследовательском стационаре «Ледовая база “Мыс Баранова”» в 2018 г.

С.М. Сакерин¹, Л.П. Голобокова², Д.М. Кабанов¹, Д.А. Калашникова³,
В.С. Козлов¹, И.А. Круглинский⁴, В.И. Макаров⁵, А.П. Макштас⁶,
С.А. Попова⁵, В.Ф. Радионов⁶, Г.В. Симонова³, Ю.С. Турчинович¹,
Т.В. Ходжер², О.И. Хуриганова², О.В. Чанкина⁵, Д.Г. Чернов^{1*}

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

²Лимнологический институт СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3

³Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

⁴Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

⁵Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3

⁶Арктический и антарктический научно-исследовательский институт
199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38

Поступила в редакцию 15.01.2019 г.

Обсуждаются результаты измерений в районе «Мыса Баранова» (арх. Северная Земля) комплекса физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля: аэрозольной оптической толщи, концентраций аэрозоля и сажи, элементного и ионного составов аэрозоля, содержания в нем органического и элементного углерода, а также изотопного состава углерода в пробах аэрозоля и снега. Показано, что средние значения большинства характеристик аэрозоля, измеренных в апреле–июне 2018 г., немного ниже, чем в арктическом пос. Баренцбург (арх. Шпицберген), и в несколько раз меньше, чем на юге Западной Сибири в этот же период.

Ключевые слова: аэрозоль, сажа, ионный, элементный, изотопный состав, Северная Земля; aerosol, black carbon, ionic, elemental, isotopic composition, Northern Earth.

Введение

Проблема исследований природной среды Арктики относится к числу приоритетных и включена в стратегические направления научно-технологического развития Российской Федерации. Одним из компонентов природной среды является атмосферный аэрозоль, который играет важную роль в процессах радиационных переносов и массообмена химическими соединениями в системе «континент – атмосфера – океан». Вследствие высокой изменчивости и многообразия состава аэрозоля (дисперсного, химического) сохраняется неопределенность его харак-

теристик в различных регионах, особенно в труднодоступных полярных районах, отличающихся суровым климатом.

Изучение аэрозоля в Арктике началось в конце 1970-х гг. с измерений аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы и счетных концентраций частиц в приземном слое [1, 2]. В 1990-х гг. исследования расширились в части химического состава (элементного, ионного) аэрозоля благодаря использованию различных методов анализа проб воздуха и осаждаемого вещества [3, 4]. Повышенное внимание стало уделяться измерениям поглощающей компоненты аэрозоля (сажи), содержанию полициклических

* Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru); Людмила Петровна Голобокова (lg@lin.irk.ru); Дмитрий Михайлович Кабанов (dkab@iao.ru); Дарья Андреевна Калашникова (terrezapr@mail.ru); Валерий Степанович Козлов (vkozlov@iao.ru); Иван Александрович Круглинский (ikruglinsky@yandex.ru); Валерий Иванович Макаров (makarov@kinetics.nsc.ru); Александр Петрович Макштас

(maksh@aari.ru); Светлана Анатольевна Попова (makarov@kinetics.nsc.ru); Владимир Федорович Радионов (vradion@aari.ru); Галина Владимировна Симонова (galina_simonova@inbox.ru); Юрий Сергеевич Турчинович (tus@iao.ru); Тамара Викторовна Ходжер (khodzher@lin.irk.ru); Ольга Иннокентьевна Хуриганова (khuriganowa@lin.irk.ru); Ольга Васильевна Чанкина (makarov@kinetics.nsc.ru); Дмитрий Григорьевич Чернов (chernov@iao.ru).

ароматических углеводородов, органического и элементного углерода, а также анализу вклада различных источников и типов аэрозоля (антропогенный, дымовой и др.) [5–12]. Для выявления источников сажевого углерода перспективен метод изотопной масс-спектрометрии, так как продукты сжигания разных видов топлива имеют различия в соотношении стабильных изотопов углерода ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$), которое может служить маркером наличия сажевого углерода [13]. Важную информацию об аэрозольном загрязнении арктической атмосферы представляют модельные расчеты с использованием данных траекторного анализа и географического распределения основных источников аэрозольных эмиссий [14–16].

В последние годы развитию исследований аэрозоля в Российском секторе Арктики способствовало проведение Международного полярного года 2007/2008. Об этом свидетельствуют регулярные наблюдения на полярных станциях в пос. Баренцбурге (арх. Шпицберген) [2, 6], Тикси [17, 18], «Ледовой базе «Мыс Баранова»» (арх. Северная Земля) [19], а также ежегодные морские экспедиции [20–22] и измерения характеристик аэрозоля с борта самолета-лаборатории [23, 24].

Не вдаваясь в детали полученных результатов, приведем несколько выводов общего характера.

1. На характеристики аэрозоля в арктической атмосфере, наряду с морскими источниками, оказывают влияние выносы антропогенного и природного аэрозоля из умеренных широт.

2. Средние значения большинства характеристик аэрозоля в разы меньше, чем в более южных континентальных районах.

3. Сезонная изменчивость АОТ, концентраций аэрозоля и сажи характеризуется спадом с конца зимы до осени.

4. Данные измерений в полярных районах подвержены эпизодическим, но достаточно сильным воздействиям дымов пожаров в бореальной зоне и от локальных источников [21, 25–28].

5. Результаты, полученные в азиатской части Арктики, пока фрагментарны по районам и срокам измерений, т.е. не достигли уровня статистических обобщений.

В настоящей работе представлены результаты первого цикла наших измерений комплекса физико-химических характеристик аэрозоля на научно-исследовательском стационаре «Ледовая база «Мыс Баранова»» (далее «Мыс Баранова») в сравнении с данными параллельных измерений в Баренцбурге и Западной Сибири.

Характеристика экспериментов

Стационар «Мыс Баранова» (79°16' с.ш., 101°45' в.д.) расположен в северной части о-ва Большевик, входящего в состав арх. Северная Земля. В теплое время года ландшафт в этом районе представляет собой каменистую поверхность, частично покрытую мхом и лишайниками.

В измерениях характеристик аэрозоля, как и в других полярных экспедициях [6, 20], использовался комплекс приборов в составе солнечного фотометра SPM, аэталометра МДА-02 и счетчика частиц АЗ-10. С их помощью измерялись и рассчитывались: спектральные АОТ (τ_{λ}°), грубо- (τ°) и мелкодисперсная компоненты АОТ ($\tau_{0,5}^{\circ}$ – на длине волны 0,5 мкм), счетная концентрация частиц радиусом 0,2–5 мкм (N_a) и массовая концентрация в аэрозоле поглощающего вещества – сажи (M_{bc}).

Наряду с измерением оптических и микрофизических характеристик аэрозоля проводился отбор проб путем прокачки воздуха через фильтры. С помощью *первой воздуходувки* (мембранный вакуумный насос-компрессор НВМ-1.2) с октября 2017 г. раз в неделю отбирались пробы для определения ионного состава (K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , Ca^{2+} , NH_4^+ , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) растворимой фракции аэрозоля, а также содержания в воздухе газообразных примесей (SO_2 , HCl , HNO_3 , NH_3). Воздух прокачивался через блок из четырех последовательно соединенных фильтров: тефлоновый PTFE с диаметром пор 0,8 мкм, Ultipor N (полиамидный, диаметр пор 0,45 мкм) и два импрегнированных фильтра Whatman с щелочной и кислой основой для улавливания газообразных примесей. Химический анализ выполнялся методом ионной хроматографии на ионной системе ICS-3000 (Dionex, USA) в ЦКП «Ультрамикрoанализ» Лимнологического института СО РАН [29].

Вторая воздуходувка (помпа BUSCH Type SB 0050 ОНО) использовалась для отбора проб по трем отдельным каналам – на ацетилцеллюлозные АФА-ХА-20, стекловолоконистые Whatman и кварцевые фильтры. Продолжительность прокачки воздуха через фильтры составляла 2–3 сут. Анализ экспонированных фильтров, проведенный в Институте химической кинетики и горения и Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, позволил определить следующие характеристики: 1) массовые концентрации аэрозолей (PM); 2) концентрации в аэрозолях органического (OC) и элементного (EC) углерода; 3) элементный состав аэрозолей; 4) изотопный состав пирогенного и общего углерода в атмосферном аэрозоле.

Концентрации PM измерялись гравиметрическим методом на аналитических весах TE 124S (Sartorius) с чувствительностью 0,1 мг. Фильтры АФА-ХА-20 до и после отбора проб просушивались в стабильной атмосфере при температуре (23 ± 2) °С и влажности $(30 \pm 5)\%$.

Образцы, отобранные на фильтры Whatman, использовались для определения OC и EC термическим методом (реакционной газовой хроматографии) – путем их высокотемпературного разделения в инертной атмосфере [30]. Каждый компонент окисляется до CO_2 , конвертируется в CH_4 и регистрируется пламенно-ионизационным детектором. При нагревании пробы (700 °С) в инертной атмосфере органические вещества испаряются и определяются как органический углерод, а при сгорании в окислительно-инертной атмосфере – как элементный.

Элементный состав проб измерялся методом рентгенофлуоресцентного анализа фильтров АФА-

Количество дней с измерениями характеристик аэрозоля и проб, отобранных на две воздухоудовки (В1 и В2) на «Мысе Баранова» в 2018 г.

Показатель	Период измерений	Количество дней с измерениями (проб)
АОТ	4.04–9.08	23
N_a	2.04–8.05	29
M_{bc}	2.04–6.09	156
В1	17.10.17–3.06.18	31
В2 (фильтры Whatman и АФА-ХА-20)	2.04–5.06	17
В2 (кварцевые фильтры)	2.04–5.06	53

с полярной станции) выполнен только для первого этапа (до 5.06.2018 г.).

Обсуждение результатов

Аэрозольная оптическая толщина атмосферы

Анализ данных фотометрических наблюдений показал, что вариации АОТ проявляются главным образом в коротковолновой части спектра, где основной вклад вносит мелкодисперсная составляющая $\tau_{0,5}^f$. В период измерений зарегистрированы три события, когда $\tau_{0,5}^f$ превышало значение 0,13, а грубодисперсная компонента τ^c всегда сохранялась на низком уровне (менее 0,05). Есть основания полагать, что случаи повышенных замутнений обусловлены дальним переносом мелкодисперсного аэрозоля с континента. На рис. 1 показаны средние спектральные зависимости АОТ для общего массива данных и с исключенными ситуациями континентальных выносов. Видно, что средние АОТ в районе «Мыса Баранова» во всем диапазоне спектра значительно меньше (на 0,01–0,02), чем в арктическом

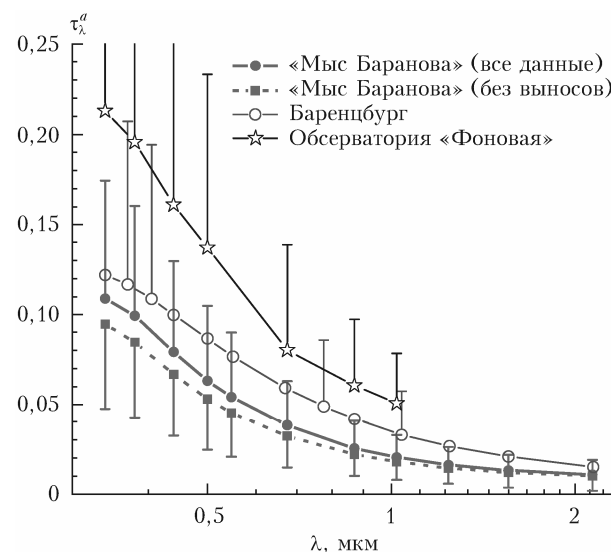


Рис. 1. Средние спектральные зависимости АОТ в апреле–сентябре 2018 г. на двух полярных станциях («Мыс Баранова» и Баренцбург) и в Западной Сибири (обсерватория «Фоновая»)

ХА-20 с использованием синхротронного излучения (РФА–СИ) на станции элементного анализа в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения Института ядерной физики СО РАН на накопителе ВЭПП-3 с энергией возбуждения 23 кэВ. Этот метод [31, 32] позволяет с высокой степенью чувствительности (10^{-7} г/г) определять более 20 элементов в малых (~3 мг) образцах аэрозоля.

Изотопный состав углерода, входящего в аэрозоль, осажденный на кварцевые фильтры, определялся методом изотопной масс-спектрометрии стабильных изотопов легких элементов. Кроме аэрозольных проб, на расстояниях 0,2 и 6 км от стационара взяты несколько проб снега массой около 40 кг каждая. Пробы снега после оттаивания и осаждения на фильтры использовались для оценки изотопного состава углерода, осажденного на снежную поверхность за весь зимний период.

Анализ талой воды на изотопный состав кислорода и водорода проводился с помощью системы GasBench II и изотопного масс-спектрометра DELTA V Advantage (Томский региональный центр коллективного пользования) методом уравнивания [33]. Изотопный анализ углерода в составе аэрозоля и дисперсной фракции атмосферных взвесей, осевших на снежный покров, осуществлялся с помощью элементного анализатора Flash 2000 и изотопного масс-спектрометра DELTA V Advantage.

Изотопный состав, в соответствии с международным стандартом (углерод – PDB (Pee Dee Belemnite), кислород и водород – VSMOW (стандарт воды)), рассчитывался по формуле

$$\delta^{\prime} X = [(R_{\text{sample}} - R_{\text{st}}) / R_{\text{st}}] \cdot 1000,$$

где δ – изотопный состав ‰; $^{\prime} X$ – изотопы $^2\text{H}(\text{D})$, ^{13}C или ^{18}O ; R_{sample} и R_{st} – отношение тяжелого изотопа к легкому в исследуемом образце и стандарте соответственно.

Предварительно проведенные эксперименты [34] показали, что изотопный состав сажи, выделенной при сгорании автомобильного топлива, составляет $\delta^{13}\text{C} \approx -29\%$, а при сгорании угля и древесины – варьирует в диапазоне от -23 до -26% .

Изотопный состав кислорода и водорода талой воды определялся по градуировочным графикам, полученным методом уравнивания с газом-стандартом по международным стандартным образцам VSMOW, GISP и SLAP. Погрешность результатов анализа изотопного состава углерода $\delta^{13}\text{C}$ не превышала $\pm 0,25\%$, кислорода $\delta^{18}\text{O} \leq \pm 0,4\%$, водорода $\delta\text{D} \leq \pm 1\%$.

Для уменьшения влияния локальных источников аэрозоля измерительные приборы и воздухозаборные устройства были расположены в двух деревянных павильонах, удаленных на 200–300 м от жилых и производственных сооружений. Период измерений разных характеристик аэрозоля и объем полученных данных приведены в табл. 1.

Заметим, что счетчик частиц АЗ-10 проработал только один месяц и вышел из строя. Кроме того, анализ аэрозольных проб (из-за задержки доставки

пос. Баренцбург, и в 2 раза меньше, чем на юге Западной Сибири (обсерватория «Фоновая» ИОА СО РАН, на 60 км западнее г. Томска).

Из-за малого числа измерений АОТ средние характеристики были рассчитаны для всего массива данных (апрель – август). В табл. 2 приведены средние значения $\tau_{0,5}^f$ и τ^c по измерениям на «Мысе Баранова» в сравнении с аналогичными данными в Баренцбурге. В скобках указаны также модальные (наиболее вероятные) значения АОТ.

Таблица 2

Характеристики аэрозоля на двух полярных станциях: средние (модальные) значения \pm СКО в 2018 г.

Характеристики	«Мыс Баранова»	Баренцбург
$\tau_{0,5}^f$	0,052 (0,038) \pm 0,039	0,072 (0,035) \pm 0,064
τ^c	0,011 (0,013) \pm 0,008	0,015 (0,009) \pm 0,011
M_{bc} , мкг/м ³	0,07 \pm 0,26	0,10 \pm 0,23
N_a (апрель), см ⁻³	10,8 \pm 6,1	13,3 \pm 9,2

Из табл. 2 следует, что различие АОТ на двух полярных станциях в основном обусловлено меньшим содержанием мелкодисперсного аэрозоля ($\tau_{0,5}^f$) на «Мысе Баранова». Однако модальные значения $\tau_{0,5}^f$ в этих районах практически одинаковы.

Концентрации аэрозоля и сажи

Массовая концентрация сажи в приземном слое атмосферы варьировала в диапазоне от 0,004 до 4,2 мкг/м³, а среднее значение за апрель – сентябрь составило 0,07 мкг/м³. Полученная величина хорошо согласуется с данными измерений в Тикси [28], где среднемесячные значения M_{bc} в мае – сентябре 2012–2014 гг. указаны в диапазоне от 0,045 до 0,1 мкг/м³. Однако средняя концентрация сажи на «Мысе Баранова» оказалась в 1,5 раза меньше, чем в апреле – сентябре 2018 г. в Баренцбурге (см. табл. 2). Счетные концентрации частиц N_a на «Мысе Баранова», измеренные в апреле, в среднем тоже меньше.

С начала измерений и до 15 мая концентрации сажи на «Мысе Баранова» не превышали 0,8 мкг/м³ и во временном ходе хорошо проявилась тенденция спада максимальных, средних и минимальных значений M_{bc} . С приближением лета диапазон вариаций M_{bc} существенно расширился: регулярно стали наблюдаться высокие концентрации – 1–4 мкг/м³. В поведении среднемесячных значений M_{bc} (рис. 2) тоже наблюдался весенний спад, в июле проявился летний максимум и затем снижение концентраций к осени. Качественно аналогичная сезонная изменчивость (при более высоких значениях M_{bc}) отмечена и в Баренцбурге. Отличие состоит в том, что в сентябре концентрация сажи в Баренцбурге снова увеличилась и стала в 6 раз больше, чем на «Мысе Баранова». Увеличение M_{bc} в Баренцбурге в начале осени отмечалось и ранее [35]. Вероятной причиной является переход к отопительному сезону и более частые выносы дымового аэрозоля с континента.

Большое различие средних M_{bc} на двух станциях в сентябре могло быть обусловлено также малой продолжительностью измерений на «Мысе Баранова» (только до 6.09.2018 г.).

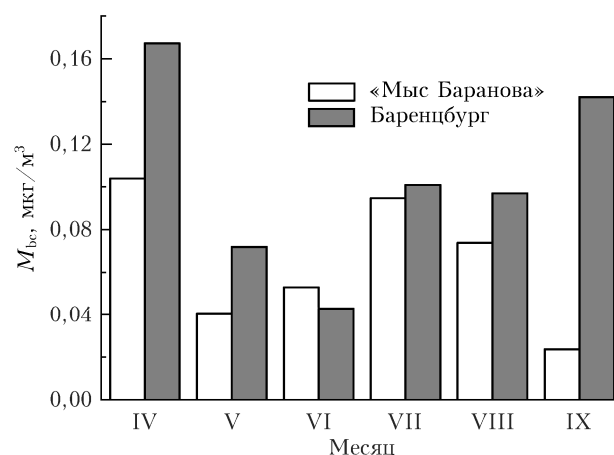


Рис. 2. Изменение средних M_{bc} на двух полярных станциях в апреле – сентябре 2018 г.

Для сравнения приведем результаты двух экспериментов, проведенных весной и летом 2018 г. в Сибири (обсерватория «Фоновая», пос. Киреевск Томской обл.). Первый эксперимент (20–23 апреля) проходил в условиях палов прошлогодней растительности, содержание сажи в аэрозоле достигало значительной величины – 7 мкг/м³. Во время летнего эксперимента (7–8 июня) концентрация сажи составила в среднем 0,4 мкг/м³, что немного превышает среднее многолетнее значение для этого периода (0,31 мкг/м³) [36]. В любом случае эти данные свидетельствуют о гораздо больших значениях и диапазоне изменчивости M_{bc} в бореальной зоне в сравнении с арктической.

Ионный состав аэрозоля

Отбор проб для определения ионного состава аэрозоля на «Мысе Баранова» начался раньше других измерений – с октября 2017 г. Среднее суммарное содержание ионов за общий период измерений (17.10.2017–03.06.2018 г.) $\Sigma_{ions} = (0,82 \pm 0,69)$ мкг/м³, что примерно в 1,5 раза меньше аналогичной характеристики, полученной нами в азиатском секторе Северного Ледовитого океана в конце лета 2013 г. [20]. Преобладающими в составе аэрозоля, как и в [20], были ионы Na^+ , Cl^- и SO_4^{2-} .

Более детально рассмотрен ионный состав аэрозоля для периода полярной ночи (зима) и начала полярного дня (весна). Среднее суммарное содержание ионов оказалось немного больше в зимний период за счет ионов Na^+ , Cl^- и K^+ (табл. 3). Высокое содержание ионов морского происхождения именно зимой согласуется с результатами измерений на полярной ст. «Алерт» (Канада) [37] и в Гренландии [38]. Авторы [38, 39] считают, что одним из источников

Na⁺ и Cl⁻ в зимний период становятся морской лед и снежный покров в арктических районах.

Таблица 3

Средние (\pm СКО) концентрации ионов и газообразных примесей для двух периодов измерений на «Мысе Баранова», мкг/м³

Ионы и примеси	Средние концентрации (количество проб)	
	17.10.2017–31.03.2018 г. (23)	1.04–3.06.2018 г. (8)
<i>Водорастворимые ионы</i>		
H ⁺	0,006 \pm 0,002	0,006 \pm 0,004
Na ⁺	0,177 \pm 0,169	0,092 \pm 0,147
NH ₄ ⁺	0,00	0,013 \pm 0,011
K ⁺	0,050 \pm 0,025	0,002 \pm 0,003
Mg ²⁺	0,008 \pm 0,005	0,00
Ca ²⁺	0,017 \pm 0,013	0,029 \pm 0,028
Cl ⁻	0,416 \pm 0,369	0,186 \pm 0,233
NO ₃ ⁻	0,016 \pm 0,013	0,019 \pm 0,015
SO ₄ ²⁻	0,160 \pm 0,110	0,362 \pm 0,454
Σ_{ions}	0,850 \pm 0,707	0,709 \pm 0,895
<i>Газообразные примеси</i>		
HCl	2,12 \pm 1,31	6,84 \pm 4,58
HNO ₃	0,03 \pm 0,02	0,00
SO ₂	0,58 \pm 0,49	1,79 \pm 1,33
NH ₃	0,37 \pm 0,26	0,93 \pm 0,58

В начале полярного дня концентрации морских ионов уменьшились с одновременным ростом концентраций континентальных ионов (NH₄⁺, Ca²⁺ и SO₄²⁻), на содержание которых дополнительное влияние оказывают почвенные источники. Кроме того, проявился небольшой рост концентраций NO₃⁻, по-видимому, под влиянием солнечной радиации, способствующей фотохимическим процессам [40].

С наступлением полярного дня в атмосфере существенно увеличилось (в 2,5–3,2 раза) и содержание газообразных примесей. Исключением является HNO₃, концентрация которой была предельно низкой в оба периода. Самые высокие концентрации определены для HCl и SO₂. Одним из механизмов образования HCl могут быть химические реакции на кристаллах морской соли в составе льда и снега [41]. Локальным источником SO₂, скорее всего, были выбросы дизельной электростанции.

Для периода полярной ночи 2017/18 гг. проведено сравнение ионного состава аэрозоля в районе «Мыса Баранова» и пос. Баренцбург. Среднее суммарное содержание ионов в атмосфере Баренцбурга оказалось в 1,7 раза выше за счет больших концентраций ионов Ca²⁺, SO₄²⁻, Mg²⁺ и NO₃⁻. Так как зимой вся подстилающая поверхность покрыта снегом, то причиной повышенных концентраций этих ионов в Баренцбурге является антропогенный фактор. Характерно, что в большинстве проб аэрозоля, отобранных на «Мысе Баранова», в отличие от Баренцбурга, преобладали ионы Na⁺, Cl⁻ и K⁺. Следовательно, морской фактор – основной в формировании ионного состава аэрозоля на «Мысе Баранова».

Среди газообразных примесей в атмосфере Баренцбурга, как и на «Мысе Баранова», доминируют HCl и SO₂, но их концентрации в 3,7 и 15,3 раза больше. Высокие концентрации SO₂ – еще одно свидетельство антропогенного воздействия в пос. Баренцбург.

PM, OC, EC и элементный состав аэрозолей

На рис. 3 показана временная изменчивость EC, OC и PM весной 2018 г. на «Мысе Баранова». Средние значения концентраций EC, OC и PM в сравнении с аналогичными характеристиками, измеренными в этот же период на юге Западной Сибири (пос. Ключи в 12 км от Новосибирского Академгородка), приведены в табл. 4. Сравнение показало, что в арктическом районе все характеристики значительно меньше: PM – в 4 раза, OC – в 5,1 раза, EC – почти в 17 раз. Относительная изменчивость (коэффициенты вариаций) PM, OC и EC в двух районах примерно одинакова и находится в диапазоне 40–70%.

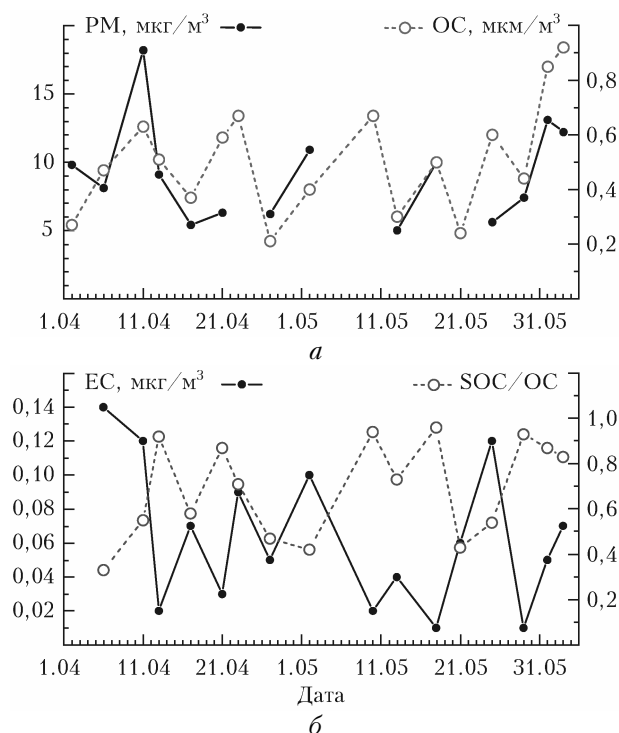


Рис. 3. Вариации концентраций PM и OC (а), EC и SOC/OC (б) весной 2018 г. на полярной станции «Мыс Баранова»

Таблица 4

Средние (\pm СКО) концентрации PM, OC, EC и SOC на «Мысе Баранова» и в пос. Ключи

Концентрация, мкг/м ³	«Мыс Баранова» (апрель – май)	пос. Ключи, 20.04–20.05.2018 г.
PM	9,1 \pm 3,7	36,1 \pm 16,6
OC	0,51 \pm 0,20	2,6 \pm 1,2
EC	0,06 \pm 0,04	1,00 \pm 0,65
SOC	0,38 \pm 0,23	1,30 \pm 0,94

Существенно меньшие значения PM, OC и EC (как и ранее рассмотренных AOT, M_{bc} и др.) в арктической зоне объясняются не только удаленностью от основных источников аэрозоля, но и тем фактом, что зима в высоких широтах в апреле – мае еще не закончилась и вся подстилающая поверхность покрыта льдом и снегом.

Анализ траекторий движения воздушных масс, выполненный с использованием программы HYSPLIT (<http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>), показал, что в рассматриваемый период в районе «Мыса Баранова» доминировали переносы воздуха с акватории Северного Ледовитого океана и отсутствовали антропогенные выносы со стороны Норильска и от других мощных источников. То есть состав аэрозоля определялся естественными процессами для этого региона, отражающими его фоновое состояние.

Дополнительно, с использованием метода EC-трассера [42], оценен относительный уровень концентраций вторичного органического углерода (secondary organic carbon – SOC). Расчеты показали (см. рис. 3, б), что его относительная величина в апреле – мае на «Мысе Баранова» находилась на достаточно высоком уровне – в среднем 75% от OC. Интересно, что между SOC и EC наблюдается высокая отрицательная корреляция ($r = -0,78$). Данный факт позволяет предположить, что основным фактором формирования SOC является доступность летучих органических соединений (прекурсоров) вследствие их высокой концентрации и, соответственно, химической трансформации в атмосфере.

На рис. 4 приведены средние концентрации элементов для семи проб, отобранных на «Мысе Баранова» (2–21.04.2018 г.) и в пос. Ключи. Из этих данных следует, что содержание элементов в аэрозоле обоих районов расположено в следующей убывающей последовательности: высокие концентрации (более 10 нг/м^3 для «Мыса Баранова» и более 100 нг/м^3 для пос. Ключи) у Ca, K, Fe, Br, Zn и Ti; средние концентрации ($<10 \text{ нг/м}^3$ и $<100 \text{ нг/м}^3$ соответственно) у Cr, Ni, Cu, Mn, Pb, Sr; самые низкие ($<1 \text{ нг/м}^3$) – у элементов V, Co, Se,

Rb, Zr, Mo, Nb и Y. При схожем характере распределения концентрации всех элементов в арктическом районе примерно на порядок ниже. Исключение составляет Br, концентрация которого на «Мыса Баранова» оказалась в 6 раз больше, чем в пос. Ключи.

Изотопный состав углерода в пробах аэрозоля и снега

Как уже отмечалось, изотопный состав углерода на «Мысе Баранова» определялся как в пробах атмосферного аэрозоля ($\delta^{13}\text{C}_{AA}$), так и в дисперсной фракции атмосферных взвесей ($\delta^{13}\text{C}_{DF}$), осажденных на снежный покров за весь зимний период. Вариации $\delta^{13}\text{C}_{AA}$ в весенний период 2018 г. показаны на рис. 5. Среднее значение $\delta^{13}\text{C}_{AA} = (-27,4 \pm 0,4)\%$, а у снежных проб $\delta^{13}\text{C}_{DF} = (-26,4 \pm 0,1)\%$. Более тяжелый состав $\delta^{13}\text{C}_{DF}$, возможно, связан с периодическим сжиганием мусора на полярной станции или с дальними переносами атмосферного аэрозоля из континентальных районов [4, 43].

Параллельно с измерениями в арктической зоне проведены сравнительные эксперименты в Сибири (обсерватория «Фоновая»). В период весеннего эксперимента (20–23 апреля) в аэрозоле наблюдалось высокое содержание сажи (M_{bc} до 7 мкг/м^3) и в пробах зафиксировано значение $\delta^{13}\text{C}_{AA} = (-25,8 \pm 0,25)\%$. Эта величина соответствует изотопному составу сажевого углерода, образующегося при горении биомассы. Во время летнего эксперимента (7–8 июня) указанные характеристики составили: $M_{bc} = 0,4 \text{ мкг/м}^3$; $\delta^{13}\text{C}_{AA} = (-28,3 \pm 0,15)\%$. Такая величина $\delta^{13}\text{C}_{AA}$ означает, что основным источником углерода являлись продукты нефтепереработки.

В двух пробах снега, отобранных на «Мысе Баранова», определены следующие значения изотопного состава кислорода и водорода талой воды: $\delta^{18}\text{O} = -26,3$ и $-29,1\%$; $\delta\text{D} = -177,1$ и $-205,6\%$.

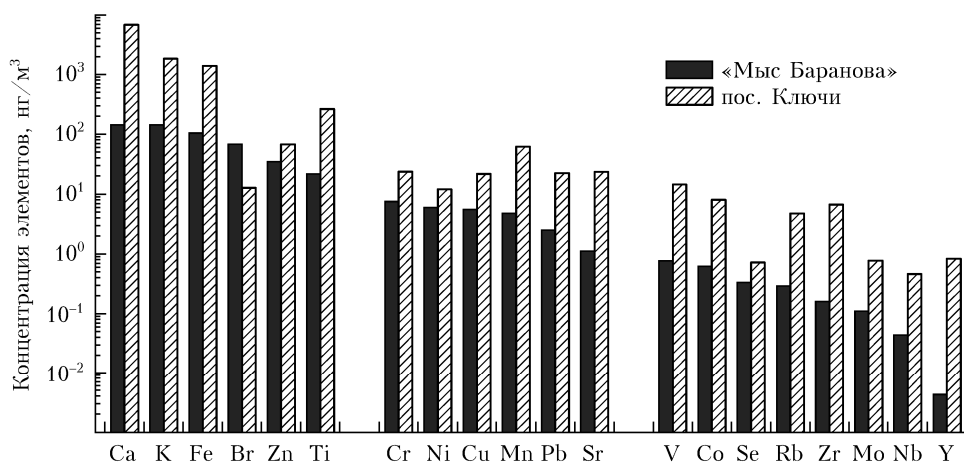


Рис. 4. Средний элементный состав аэрозоля на «Мысе Баранова» и в пос. Ключи Томской обл.

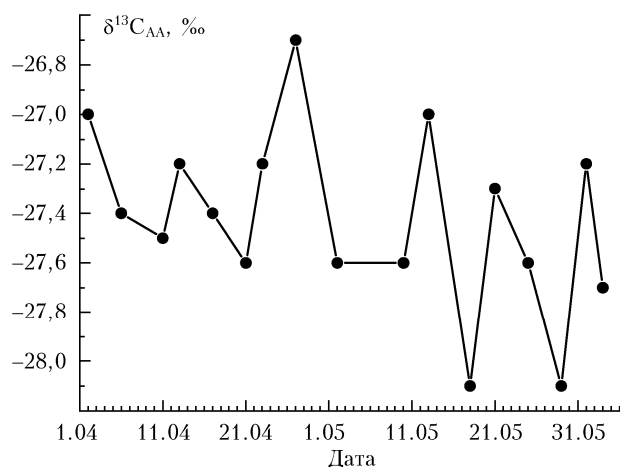


Рис. 5. Вариации изотопного состава углерода в аэрозоле на «Мысе Баранова» 2018 г.

Аналогичные характеристики у пробы снега, взятой в обсерватории «Фоновая», составили: $\delta^{18}\text{O} = -23,6\text{‰}$; $\delta\text{D} = -158,8\text{‰}$. $\delta^{18}\text{O}$ и δD талой воды в районе «Мыса Баранова» более легкие, чем в Сибири, что согласуется с их географическим положением.

Заключение

Выполнен анализ физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля, измеренных в 2018 г. на научно-исследовательском стационаре «Ледовая база «Мыс Баранова»», в сравнении с аналогичными данными в пос. Баренцбург и в фоновых районах Западной Сибири (вблизи Томска и Новосибирска).

Приведем основные выводы сравнительного анализа.

1. Средние значения характеристик аэрозоля в исследованный период составили: $\tau_{0,5}^a = 0,063$ (в том числе $\tau_{0,5}^a = 0,052$; $\tau^c = 0,011$), концентрация частиц (апрель) $N_a = 10,8 \text{ см}^{-3}$, $M_{bc} = 0,07 \text{ мкг/м}^3$, $\text{PM} = 9,1 \text{ мкг/м}^3$, $\text{OC} = 0,51 \text{ мкг/м}^3$, $\text{EC} = 0,06 \text{ мкг/м}^3$, $\text{SOC} = 0,38 \text{ мкг/м}^3$, $\Sigma_{\text{ions}} = 0,85 \text{ мкг/м}^3$ (зимой) и $0,71 \text{ мкг/м}^3$ (весной). Полученные значения характеристик немного ниже, чем в Баренцбурге, и в несколько раз меньше, чем на юге Западной Сибири в этот же период.

2. В ионном составе аэрозоля в период полярной ночи преобладали ионы преимущественно морского происхождения (Na^+ , Cl^- и K^+), что согласуется с данными в других районах Арктики. С наступлением полярного дня концентрация морских ионов снизилась, но увеличилась концентрация континентальных (NH_4^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-}), а также содержание в воздухе газообразных примесей (HCl , SO_2 , NH_3). В сравнении с Баренцбургом (подверженным антропогенному влиянию) отмечены более низкие концентрации SO_4^{2-} , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} и NH_4^+ .

3. Основной вклад в элементный состав ($> 10 \text{ нг/м}^3$) аэрозоля на «Мысе Баранова» вносят K, Ca, Fe, Br, Zn и Ti. Концентрации Cr, Ni, Cu, Mn, Pb и Sr находятся в диапазоне $1\text{--}10 \text{ нг/м}^3$,

самое низкое содержание ($< 1 \text{ нг/м}^3$) отмечено у элементов V, Co, Se, Rb, Zr, Mo, Nb и Y. Такая же группировка элементов наблюдается и в Западной Сибири (пос. Ключи), но концентрации примерно на порядок выше. Исключением являются более низкие (в 6 раз) концентрации Br.

4. Изотопный состав углерода в пробах аэрозоля, отобранных весной ($\delta^{13}\text{C}_{AA} = -27,4\text{‰}$), оказался легче состава дисперсной фракции взвесей, осажденных на снег за всю зиму ($\delta^{13}\text{C}_{DF} = -26,4\text{‰}$). Причиной таких значений $\delta^{13}\text{C}_{DF}$, по-видимому, является зимнее накопление продуктов сгорания мусора на полярной станции или дальние переносы с континента.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ААНИИ М.А. Лоскутовой и Д.Д. Ризе за участие в измерениях, а также С.А. Турчиновичу и В.П. Шмаргунову за подготовку приборов. Работа выполнялась при поддержке Комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН II.1 (проекты № АААА-Ф18-118012500294-9, АААА-А18-118012490017-8, АААА-А18-118122190007-8 и АААА-А17-117122190017-8), проекта RFMEFI61617X0076 Минобрнауки России и Подпрограммы 4 «Организация и обеспечение работ и научных исследований в Арктике и Антарктике» госпрограммы РФ «Охрана окружающей среды» на 2012–2020 гг.

1. Бартенева О.Д., Никитинская Н.И., Сакунов Г.Г., Веселова Л.К. Прозрачность толщи атмосферы в видимой и ближней ИК-области спектра. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 224 с.
2. 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. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.001>.
3. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А., Смирнов В.В., Серова В.В., Штайн Р. Аэрозоли Арктики – результаты десятилетних исследований // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13, № 6–7. С. 551–576.
4. 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.
5. Eleftheriadis K., Vratolis S., Nyeki S. Aerosol black carbon in the European Arctic: Measurements at Zeppelin station, Ny-Elesund, Svalbard from 1998–2007 // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. DOI: 10.1029/2008GL035741.
6. Сакерин С.М., Чернов Д.Г., Кabanov Д.М., Козлов В.С., Панченко М.В., Полькин В.В., Радионов В.Ф. Предварительные результаты исследований аэрозольных характеристик атмосферы в районе Баренцбурга (Шпицберген) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 1(91). С. 20–31.

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 // *Elem. Sci. Anth.* 2014. V. 2. P. 27 p. DOI: 10.12952/journal.elementa.000027.
8. Schmeisser L., Backman J., Ogren J.A., Andrews E., Asmi E., Starkweather S., Uttal T., Fiebig M., Sharma S., Eleftheriadis K., Vratolis S., Bergin M., Tunved P., Jefferson A. Seasonality of aerosol optical properties in the Arctic // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18, N 16. P. 11599–11622.
9. Шевченко В.П., Стародымова Д.П., Виноградова А.А., Лисицын А.П., Макаров В.Н., 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. РАН. 2015. Т. 461, № 1. С. 70–74.
10. Singh D.K., Kawamura K., Yanase A., Barrie L.A. Distributions of polycyclic aromatic hydrocarbons, aromatic ketones, carboxylic acids, and trace metals in Arctic aerosols: Long-range atmospheric transport, photochemical degradation/production at polar sunrise // *Environ. Sci. Technol.* 2017. V. 51. P. 8992–9004. DOI: 10.1021/acs.est.7b01644.
11. Lange R., Dall'Osto M., Skov H., Nuijgaard J.K., Nielsen I.E., Beddows D.C.S., Simo R., Harrison R.M., Massling A. Characterization of distinct Arctic aerosol accumulation modes and their sources // *Atmos. Environ.* 2018. V. 183. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.03.060>.
12. Popovicheva O., Diapouli E., Makshtas A., Shonija N., Manousakas M., Saraga D., Uttal T., Eleftheriadis K. East Siberian Arctic background and black carbon polluted aerosols at HMO Tiksi // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 655. P. 924–938. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.165>.
13. Widory D. Combustibles, fuels and their combustion products: A view through carbon isotopes // *Combust. Theory Modell.* 2006. V. 10. P. 831–841.
14. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Атмосферный перенос антропогенных примесей в арктические районы России (1986–2010) // *Оптика атмосф. и океана.* 2012. Т. 25, № 6. С. 475–483; Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Atmospheric transport of anthropogenic impurities to the Russian arctic (1986–2010) // *Atmos. Ocean. Opt.* 2012. V. 25, N 6. P. 414–422.
15. Виноградова А.А., Смирнов Н.С., Коротков В.Н., Романовская А.А. Лесные пожары в Сибири и на Дальнем Востоке: эмиссии и атмосферный перенос черного углерода в Арктику // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 6. С. 512–520. DOI: 10.15372/AOO20150603; Виноградова А.А., Смирнов Н.С., Коротков В.Н., Романовская А.А. Forest fires in Siberia and the Far East: Emissions and atmospheric transport of black carbon to the Arctic // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 6. P. 566–574.
16. 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; Виноградова А.А., Васильева А.В. Black carbon in air over northern regions of Russia: Sources and spatiotemporal variations // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 6. P. 533–541.
17. Макитас А.П., Уттал Т. Начало совместных Российско-американских атмосферных наблюдений в Тикси // *Рос. поляр. исслед.* 2010. № 2. С. 35–38.
18. Asmi E., Kondratyev V., Brus D., Laurila T., Lihavainen H., Backman J., Vakkari V., Aurela M., Hatakka J., Viisanen Y., Uttal T., Ivaakhov V., Makshtas A. Aerosol size distribution seasonal characteristics measured in Tiksi, Russian Arctic // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 1271–1287. DOI: 10.5194/acp-16-1271-2016.
19. Макитас А.П., Соколов В.Т. Научно-исследовательский стационар «Ледовая база “Мыс Баранова”» – летний полевой сезон 2014 г. // *Рос. поляр. исслед.* 2014. № 3(17). С. 10–12.
20. 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.
21. Popovicheva O.B., Evangeliou N., Eleftheriadis K., Kalogridis A.C., Sitnikov N., Eckhard S., Stohl A. Black carbon sources constrained by observations in the Russian High Arctic // *Environ. Sci. Technol.* 2017. V. 51, N 7. P. 3871–3879. DOI: 10.1021/acs.est.6b05832.
22. Sakerin S.M., Kabanov D.M., Pol'kin V.V., Golobokova L.P., Zenkova P.N., Kessel A.S., Pol'kin Vas.V., Radionov V.F., Terpugova S.A., Urazgildeeva A.V., Khodzher T.V., Khuriganova O.I. Features of spatial distribution of aerosol characteristics over Arctic seas // *Proc. SPIE.* 2018. V. 10833, N 39. DOI: 10.1117/12.2502013.
23. 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., Nédélec Ph., Paris J.-D., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Вертикальное распределение газовых и аэрозольных примесей воздуха над российским сектором Арктики // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 12. С. 1043–1052; Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.В., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Nédélec Ph., Paris J.-D., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Vertical distributions of gaseous and aerosol admixtures in air over the Russian Arctic // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 3. P. 300–310.
24. Курин Д.В., Крутиков Н.О., Лукьянов А.Н., Струнин А.М., Струнин М.А. Результаты сравнительного анализа распространения аэрозольных примесей в атмосфере регионов Арктики и Московской области по данным самолетных исследований в 2014–2015 годах // *Тр. Воен.-косм. акад. им. А.Ф. Можайского.* 2018. Вып. 662. С. 219–223.
25. Stohl A., Andrews E., Burkhart J.F., Forster C., Herber A., Hoch S.W., Kowal D., Lunder C., Mefford T., Ogren J.A., Sharma S., Spichtinger N., Stebel K., Stone R., Ström J., Tørseth K., Wehrli C., Yttri K.E. Pan-Arctic enhancements of light absorbing aerosol concentrations due to North American boreal forest fires during summer 2004 // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111, N D22214. DOI: 10.1029/2006JD007216.
26. Eck T.F., Holben B.N., Reid J.S., Sinyuk A., Hyer E.J., O'Neill N.T., Shaw G.E., Vande Castle J.R., Chapin F.S., Dubovik O., Smirnov A., Vermote E., Schafer J.S., Giles D., Slutsker I., Sorokine M., Newcomb W.W. Optical properties of boreal region biomass burning aerosols in central Alaska and seasonal variation of aerosol optical depth at an Arctic coastal site // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114, N D11201. DOI: 10.1029/2008JD010870.

27. 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.
28. Виноградова А.А., Титкова Т.Б., Иванова Ю.А. Эпизоды аномально высокой концентрации черного углерода в приземном воздухе в районе станции Тикси, Якутия // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 10. С. 837–844. DOI: 10.15372/AOO20181010; Vinogradova A.A., Titkova T.B., Ivanova Yu.A. Episodes with anomalously high black carbon concentration in surface air in the Region of Tiksi Station, Yakutiya // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 1. P. 94–102.
29. Голобокова Л.П., Полькин В.В., Онищук Н.А., Хуриганова О.И., Тихомиров А.Б., Терпугова С.А., Полькин В.В., Турчинович Ю.С., Радионов В.Ф. Изменчивость химического состава аэрозоля в приземном слое атмосферы переходной зоны «материк–океан» в районе Восточной Антарктиды // Лед и снег. 2016. Т. 56, № 2. С. 177–188.
30. Makarov V.I., Koutsenogii K.P., Koutsenogii P.K. Daily and seasonal changes of organic and inorganic carbon content in atmospheric aerosol Novosibirsk region // J. Aerosol Sci. 1999. V. 30. P. S255–S256.
31. Piminov P.A., Baranov G.N., Bogomyagkov A.V., Berkaev D.E., Borin V.M., Dorokhov V.L., Karnaeov S.E., Kiselev V.A., Levichev E.B., Meshkov O.I., Mishnev S.I., Nikitin S.A., Nikolaev I.B., Sinyatkin S.V., Vobly P.D., Zolotarev K.V., Zhuravlev A.N. Synchrotron radiation research and application at VEPP-4 // Phys. Proc. 2016. V. 84. P. 19–26. DOI: 10.1016/j.phpro.2016.11.005.
32. Kulipanov G.N., Mezentsev N.A., Pindyurin V.F. Synchrotron radiation in Novosibirsk: The first 13 years // J. Struct. Chem. 2016. V. 57, N 7. P. 1277–1287. DOI: 10.1134/S0022476616070015.
33. Лебедев А.Т. Масс-спектрометрия для анализа объектов окружающей среды. М.: Техносфера, 2013. 632 с.
34. Simonova G., Volkov Yu., Kozlov V., Shmargunov V., Kalashnikova D. Atmospheric air pollution studies using the isotope mass-spectrometry // 18th Intern. Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018: Conf. Proc. Bulgaria. 2018. V. 18, iss. 4.2. P. 343–348. DOI: 10/5593/sgem2018/4.2.
35. Радионов В.Ф., Кабанов Д.М., Козлов В.В., Сакерин С.М., Сидорова О.Р., Чернов Д.Г. Оптические и микрофизические характеристики аэрозоля в районе Баренцбурга (2011–2017) // Комплексные исследования природы Шпицбергена и прилегающего шельфа: Тез. докл. XIV Всерос. науч. конф. с междунар. участием (Мурманск, 30 октября – 2 ноября 2018 г.). Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2018. 133 с. DOI: 10.25702/KSC.978.5.91137.374.0.
36. Kozlov V.S., Panchenko M.V., Shmargunov V.P., Chernov D.G., Yausheva E.P., Pol'kin V.V., Terpugova S.A. Long-term investigations of the spatiotemporal variability of Black Carbon and aerosol concentrations in the troposphere of West Siberia and Russian Subarctic // Chemistry for Sustainable Development. 2016. V. 24, N 4. P. 423–440.
37. Xie Y.-L., Hopke P.K., Paatero P., Barrie L.A., Li S.-M. Identification of source nature and seasonal variations of arctic aerosol by positive matrix factorization // J. Atmos. Sci. 1999. V. 56. P. 240–260.
38. Oyabu I., Matoba S., Yamasaki T., Kadota M., Iizuka Y. Seasonal variations in the major chemical species of snow at the South East Dome in Greenland // Polar Sci. 2016. V. 10. P. 36–42.
39. Pempkowiak J., Zieliński T., Petelski T., Zaborska A., Beldowski J. Recent alterations of aerosol concentration, mercury distribution and organic matter deposition in the Arctic // Papers on Global Change. 2011. V. 18. P. 23–33.
40. Parker B.C., Zeller E.J., Gow A.J. Nitrogenous chemical composition of Antarctic ice and snow // Antarctic J. U.S. 1982. V. 14, N 5. P. 80–82.
41. 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 // J. Geophys. Res. Atmos. D. 1999. V. 104, N 7. P. 8429–8440. DOI: 10.1029/1998JD100084.
42. Cabada J.C., Pandis S.N., Subramanian R., Robinson A.L., Polidori A., Turpin B. Estimating the secondary organic aerosol contribution to PM_{2.5} using the EC tracer method // Aerosol. Sci. Technol. 2004. V. 38. P. 140–155. DOI: 10.1080/02786820390229084.
43. Winiger P., Andersson A., Eckhardt S., Stohl A., Gustafsson Ö. The sources of atmospheric black carbon at a European gateway to the Arctic // Nat. Commun. 2016. N 12776. DOI: 10.1038/ncomms12776/www.nature.com/naturecommunications.

S.M. Sakerin, L.P. Golobokova, D.M. Kabanov, D.A. Kalashnikova, V.S. Kozlov, I.A. Kruglinsky, V.I. Makarov, A.P. Makshtas, S.A. Popova, V.F. Radionov, G.V. Simonova, Yu.S. Turchinovich, T.V. Khodzher, O.I. Khuriganova, O.V. Chankina, D.G. Chernov. **Measurements of physical-chemical characteristics of atmospheric aerosol at “Ice Base Cape Baranov” in 2018.**

We discuss the results of measurements in the region of Cape Baranov (the Severnaya Zemlya archipelago) of the set of physical-chemical characteristics of atmospheric aerosol: aerosol optical depth, aerosol and black carbon concentrations, elemental and ion composition of aerosol, organic and elemental carbon contents in aerosol, and isotopic composition of carbon in the aerosol and snow samples. It is shown that the average values of the most aerosol characteristics, measured in April–June 2018, are much lower than in the Arctic settlement Barentsburg (Spitsbergen archipelago) and several-fold smaller than in the south of Western Siberia in the same period of time.