

Исследования атмосферного аэрозоля в арктических районах России

© 2013 г. Л.П. Голобокова¹, В.В. Полькин², Д.М. Кабанов², С.А. Терпугова², Д.Г. Чернов²,
Е.В. Чипанина¹, Т.В. Ходжер¹, О.Г. Нецветаева¹, М.В. Панченко², С.М. Сакерин²

¹Лимнологический институт СО РАН, Иркутск; ²Институт оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН, Томск
lg@lin.irk.ru

Статья принята к печати 24 января 2013 г.

Арктика, аэрозоли, воздушные массы, микрофизические характеристики, химический состав.
Aerosols, air mass, Arctic, chemical composition, microphysical characteristics.

Химический состав снега и льда Арктики в значительной мере определяется составом аэрозольных частиц. Проанализированы характеристики атмосферного аэрозоля в приземном слое населённых пунктов Арктики – посёлков Тикси (июнь, 2010 г.) и Баренцбург (апрель–май и июль–август 2011 г.). Приводятся результаты измерения счётной концентрации N_A (для частиц, диаметром больше 0,3 мкм), спектральной аэрозольной оптической толщины атмосферы и химического состава водорастворимой фракции аэрозолей. Уровень концентрации аэрозоля N_A в приземном слое атмосферы исследуемых пунктов невысокий и характеризуется следующими значениями: пос. Тикси – $1,80 \pm 4,5 \text{ см}^{-3}$; пос. Баренцбург – весной $4,95 \pm 3,49 \text{ см}^{-3}$, летом $3,66 \pm 3,13 \text{ см}^{-3}$. При переходе от весеннего периода к летнему концентрации аэрозоля снижались в 1,2–1,4 раза. Результаты наблюдений за спектральной аэрозольной оптической толщиной атмосферы в исследуемые периоды позволяют считать, что прозрачность атмосферы в названных районах высокая. Средняя суммарная концентрация ионов в аэрозолях района Тикси ($2,3 \pm 1,6 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$) сопоставима с суммой ионов аэрозолей для Баренцбурга в весенний период ($2,7 \pm 1,4 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$). В водорастворимой фракции аэрозолей установлены концентрации ионов как морского (Na^+ , Cl^-), так и континентального (NH_4^+ , SO_4^{2-} , NO_3^-) происхождения. На химический состав аэрозолей этих двух районов значительно влияют континентальные источники.

Введение

Аэрозоль в Арктике – естественная составляющая здешней атмосферы. Большую часть года поверхность северных широт Земли скована льдом и покрыта снегом. Практически весь аэрозоль, осаждающийся на поверхность Арктики, имеет антропогенное происхождение. Его источник – промышленные объекты умеренных широт. Попадая на снежный и ледяной покровы, он перераспределяется по всему пространству океана [18]. Таким образом, химический состав снега и льда в значительной мере определяется составом аэрозольных частиц. Изучение каналов обмена и перераспределения аэрозольного вещества в этих широтах – чрезвычайно важная проблема [4]. Пространственно-временная изменчивость параметров аэрозольных частиц приводного слоя северных широт изучалась на протяжении ряда лет [2, 3, 17]. Установлена сезонная изменчивость спектральной аэрозольной оптической толщины атмосферы: отмечалось её уменьшение от весны к осени [14, 23]. Относительно высокое содержание аэрозоля, кратно превышающее осенние значения, характерно для зимне-весеннего периода, что объясняется влиянием синоптических условий на формирование аэрозольной составляющей атмосферы, а также выносами аэрозоля из промышленно развитых и плотно заселённых районов Евразии [6]. На основании 25-летнего ряда данных о переносе воздушных

масс в районах архипелагов Земля Франца Иосифа и Северная Земля показаны изменения циркуляции атмосферы, которые привели к увеличению доли морских воздушных масс над северными островами Евразии. Оценены 20-летний ряд концентраций в воздухе и потоков на поверхность тяжёлых металлов (Pb, Cd, As, Zn, Ni, Cr, Cu) и сажи [5]. Данные о микрофизических характеристиках аэрозолей над акваториями Белого и Карского морей показывают различный вклад моря и континента в формирование их химического состава [24].

Рост антропогенной нагрузки, а также пространственная и временная изменчивости характеристик аэрозоля приводят к необходимости получения новых данных о таких характеристиках, необходимых для прогностических расчётов. В данной работе рассматриваются результаты исследования химического состава растворимой фракции атмосферных аэрозолей в прибрежных районах арктического шельфа. Контроль за состоянием среды позволяет сделать прогностические оценки, необходимые для планирования мероприятий по предотвращению опасных экологических и климатических последствий в районах накопления или транзита загрязняющих веществ. Хороший пример деятельности в этом направлении – создание в рамках международного сотрудничества атмосферной обсерватории климатического монито-

ринга в пос. Тикси и Российского научного центра на архипелаге Шпицберген (РНЦШ) [10].

Описание районов и методов исследования

Летом 2010 г. и в весенне-летний период 2011 г. проведены три экспедиции и выполнены измерения аэрозольных характеристик воздуха в двух регионах Российской Арктики. Первый летний цикл аэрозольных измерений проведён в июне 2010 г. в 8 км от пос. Тикси (пос. Полярка, $71,6^\circ$ с.ш., $128,8^\circ$ в.д.), на берегу моря Лаптевых, на территории атмосферной обсерватории климатического мониторинга. Весенняя (19 апреля – 26 мая 2011 г.) и летняя (26 июля – 31 августа 2011 г.) аэрозольные экспедиции на архипелаге Шпицберген проведены в районе зональной гидрометеорологической обсерватории (ЗГМО) в пос. Баренцбург ($78,1^\circ$ с.ш., $14,2^\circ$ в.д.). Цикл исследований выполнялся в рамках серии измерений в РНЦШ. Во время экспедиций измеряли интегральную (по всей атмосфере) характеристику τ_λ^a – аэрозольную оптическую толщину атмосферы, а в приземном слое атмосферы – счётную концентрацию частиц аэрозоля N_A (см^{-3}) (для частиц диаметром больше 0,3 мкм), а также массовую концентрацию аэрозоля M_A ($\text{мкг}\cdot\text{м}^{-3}$) (рассчитывалась из N_A по формуле объёмов частиц для плотности $1,5 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$) и «сажи» (микрористаллического углерода) M_{BC} ($\text{мкг}\cdot\text{м}^{-3}$). Кроме того, проводился отбор проб аэрозоля на фильтры для последующего химического анализа.

Один из основных параметров, используемых для характеристики состояния атмосферы и оценки уровня её аэрозольного загрязнения, – спектральная аэрозольная оптическая толщина атмосферы [16], для анализа которой использовали портативный солнечный фотометр SPM. Она измерялась в 11 спектральных участках в общем диапазоне спектра $\lambda = 0,34 \div 2,14$ мкм. Измерение этого параметра для различных длин волн позволяет установить её спектральный ход и оценить селективность аэрозольного ослабления. По спектральному распределению атмосферы можно определить, какие фракции преобладают в аэрозоле: чем больше наклон кривой, тем больше мелких частиц содержится в аэрозоле. Счётная и массовая концентрации приземного аэрозоля измерялись с помощью автоматизированного мобильного аэрозольного комплекса (аэрозольной станции) [12], в состав которого входили фотоэлектрические счётчики частиц GRIMM 1.108, а также трёхволновый дифференциальный аэталометр МДА («сажемер») [8].

Пробы атмосферных аэрозолей отбирались на тефлоновые фильтры (PTFE) с диаметром пор 0,8 мкм [7]. Химический состав водорастворимой фракции аэрозолей анализировался на ионном хроматографе ICS-3000 (Dionex, США). Для определения катионов (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) использовалась

колонка IonPacCS12A, 8 мкм (2×250 мм) [21]; для определения анионов (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) – IonPac AS19 (2×250 мм) [22]. Стандартами служили образцы Six Cation-II Standart и Seven Anion Standart II (Dionex, США). Анализировались обратные трёхсуточные траектории переноса воздушных масс, полученные на основе модели NOAA HYSPLIT [19].

Результаты исследований

Исследования на территории атмосферной обсерватории климатического мониторинга в районе пос. Тикси. Работы вели на берегу моря Лаптевых с 4 по 21 июня 2010 г. Измерительная аппаратура находилась в здании метеостанции. Выходные отверстия воздухозаборников «сажемера» и аэрозольного счётчика располагались на высоте около 2 м над поверхностью земли на расстоянии 70–80 см от стены здания. За период измерений получено около 400 серий часовых измерений интегральных аэрозольных концентраций. Средние значения параметров для приземного аэрозоля за весь период измерений в районе Тикси составили: $M_{\text{BC}} \approx 0,026 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$; $N_A \approx 1,79 \text{ см}^{-3}$; рассчитанная $M_A = 0,16 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$. Их можно считать фоновыми для данного района. Отметим, что в районе Тикси в исследуемый период отмечались сплошная облачность, высокие значения относительной влажности воздуха (среднее значение $RH = 88\%$), туманы, частые атмосферные осадки в виде снега, дождя и мороси, низкие температуры воздуха (среднее значение $T_b = +2,5^\circ\text{C}$). 15 и 17 июня наблюдались максимальные скорости ветра – до 15 м/с. Приход воздушных масс со стороны континента 14–15 июня сопровождался повышением температуры воздуха до 15°C . Туманы и осадки, особенно 9, 10, 17 и 20 июня, привели к резкому уменьшению общей концентрации частиц N_A вследствие их вымывания и ухода из измерительного диапазона при конденсационном росте (рис. 1).

Исследование спектральной аэрозольной оптической толщины атмосферы вели с 8 по 20 июня. В остальные дни наблюдений отмечалась сплошная облачность. Низкие значения этого параметра сопровождалась высокой селективностью его спектрального хода $\tau^a(\lambda)$. Так, в области λ , равной около 0,5 мкм, общий диапазон изменчивости этой величины составил 0,029–0,156 при среднем значении $\tau_{0,5}^a = 0,088 \pm 0,034$. Рассчитанный параметр Ангстрема α изменялся в диапазоне 1,32–2,31, а среднее значение α было равно $1,92 \pm 0,21$. Указанные характеристики свидетельствуют о небольшом содержании аэрозольных частиц в атмосфере, особенно грубодисперсных (см. рис. 1). Общий массив измеренных данных можно разделить на две выборки, соответствующие условиям повышенного замутнения и высокой прозрачности атмосферы. Повышенные замутнения атмосферы наблюдались 10, 14, 15 и 19, 20 июня. Согласно рассчитанным

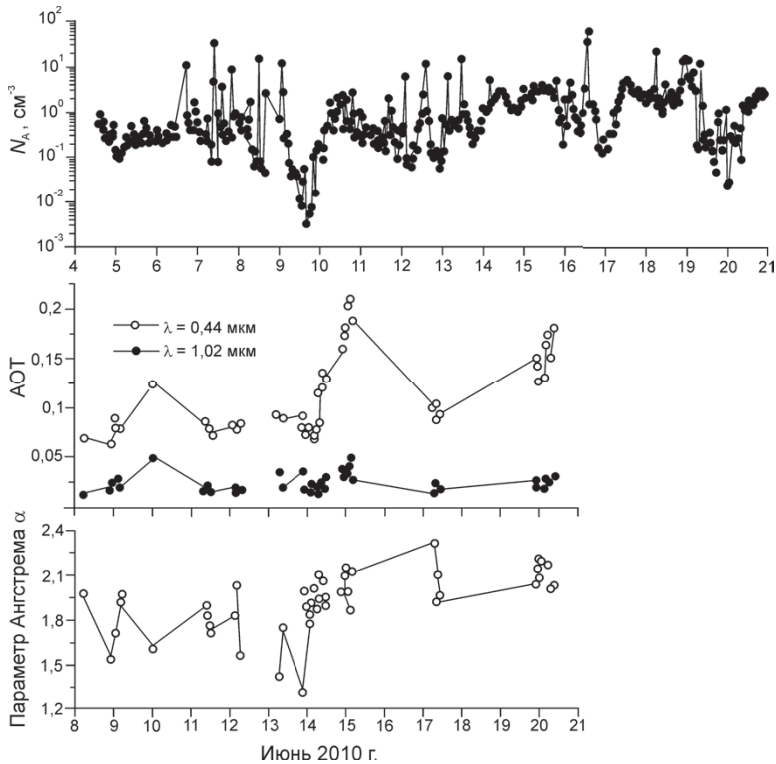


Рис. 1. Временной ход счётной концентрации частиц и характеристик аэрозольной оптической толщины атмосферы (пос. Тикси, июнь 2010 г.)
Fig. 1. Time variation of number concentration particles, and the atmospheric aerosol optical depth (Tiksi, June 2010)

обратным траекториям, 10 июня отмечено вращение воздушных масс над устьем р. Лена, в последующие периоды они поступали в основном с континента.

Спектральные зависимости аэрозольной оптической толщины атмосферы для выделенных ситуаций и всего массива данных представлены на рис. 2. Как видно, этот параметр увеличивается пропорционально на всех длинах волн, что обусловлено ростом в атмосфере числа аэрозольных частиц как субмикронного, так и грубодисперсного диапазонов.

Ранее, в 1995–1998 гг., в районе Тикси уже исследовались химические характеристики аэрозоля. Измерения вели в холодный период года – с сентября по апрель. Анализ направлений атмосферных переносов показал, что здесь преобладали либо переносы из центральных районов Средней Сибири, либо вторжения из западных районов арктического побережья. В составе аэрозоля отмечались значительные концентрации Br, Cl и Na, указывающие на морской источник их происхождения [11]. Сумма ионов в аэрозоле изменялась от 0,04 до 4,6 мкг·м⁻³. Наиболее загрязнённой атмосфера была в феврале–марте 1998 г., в этот период в составе аэрозоля преобладали ионы Na⁺, NH₄⁺, SO₄²⁻, Cl⁻.

Исследования в районе Тикси в июне 2010 г. показали, что среднее значение суммарного содержания ионов в аэрозоле составляет 2,3 мкг/м³, т.е. оно несколько выше, чем в холодный период 1995–1998 гг. (1,8 мкг·м⁻³). Однако максимальная концентрация ионов в Тикси в июне 2010 г. оказалась ниже

(4,4 мкг·м⁻³), чем в ранний период исследований (4,6 мкг·м⁻³) [11]. Наиболее высокие концентрации ионов в аэрозоле района Тикси в 2010 г. установлены в первую половину исследуемого периода, когда его химический состав формировался под влиянием воздушных масс, принесённых с западных районов арктического побережья и морской территории. Наибольшее замутнение атмосферы в этот период наблюдалось 10 июня. В составе аэрозоля преобладали ионы континентального происхождения (Ca²⁺, SO₄²⁻), хотя повышенной была и доля морских ионов (Na⁺, Cl⁻). Воздушные массы, поступающие во вторую половину исследуемого периода (14–20 июня) с континента и с восточного направления арктического побережья, были менее обогащены растворимыми компонентами. Так, суммарная концентрация ионов в аэрозоле, отобранном 14 и 15 июня, была в 5 раз меньше чем в аэрозоле, сформировавшемся под влиянием морских воздушных масс 12 и 13 июня. Высоким значениям спектральной аэрозольной оптической толщины в этот период могли способствовать нерастворимые частицы, содержащиеся в атмосфере, о чём свидетельствует рост числа аэрозольных частиц. Среди ионов в дни с повышенным замутнением атмосферы (14 и 15 июня) в составе аэрозоля преоб-

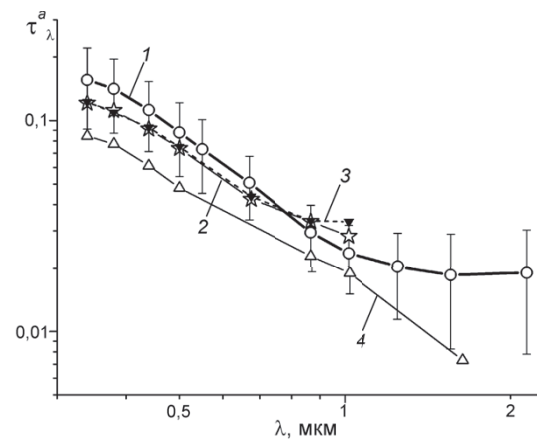


Рис. 2. Сопоставление средних спектральных зависимостей аэрозольной оптической толщины атмосферы в Тикси и на высокоширотных станциях АЭРОНЕТ [20]:

1 – пос. Тикси, 2010 г.; 2 – Барроу, 1999–2009 гг.; 3 – Резолут Бэй, 2006–2009 гг.; 4 – Опал, 2007–2009 гг.

Fig. 2. Correlation of mean spectral dependences of the atmospheric aerosol optical depth in Tiksi and at high latitude stations AERONET [20]:
 1 – Tiksi, 2010; 2 – Barrow, 1999–2009; 3 – Resolute Bay, 2006–2009; 4 – Opal, 2007–2009

Таблица 1. Статистические данные химического состава приземного аэрозоля в районе Тикси в 1995–1998 и 2010 гг.

Компоненты	1995–1998 гг.			2010 г.		
	среднее \pm СКО, $\text{мкг}\cdot\text{м}^{-3}$	min	max	среднее \pm СКО, $\text{мкг}\cdot\text{м}^{-3}$	min	max
<i>Анионы</i>						
Cl^-	0,26 \pm 0,27	0,00	0,98	0,44 \pm 0,24	0,02	0,72
SO_4^{2-}	0,62 \pm 0,47	0,02	2,50	0,59 \pm 0,41	0,08	1,02
NO_3^-	0,12 \pm 0,18	0,00	1,06	0,59 \pm 0,67	0,00	1,36
HCO_3^-	0,20 \pm 0,40	0,00	1,88	0,00 \pm 0,00	—	
Br^-	—			0,004 \pm 0,003	0,000	0,008
PO_4^{3-}				0,003 \pm 0,004	0,000	0,003
<i>Катионы</i>						
Na^+	0,15 \pm 0,14	0,00	0,55	0,12 \pm 0,09	0,04	0,28
NH_4^+	0,33 \pm 0,20	0,00	0,85	0,15 \pm 0,16	0,00	0,36
K^+	0,05 \pm 0,03	0,00	0,24	0,07 \pm 0,06	0,01	0,14
Mg^{2+}	0,04 \pm 0,03	0,00	0,20	0,02 \pm 0,01	0,01	0,03
Ca^{2+}	0,05 \pm 0,06	0,00	0,30	0,35 \pm 0,22	0,06	0,55
H^+	0,001 \pm 0,007	$5,5\cdot 10^{-9}$	$4,07\cdot 10^{-2}$	0,003 \pm 0,001	0,002	0,005
<i>Сумма ионов</i>	1,81 \pm 1,17	0,04	4,55	2,34 \pm 1,61	0,45	4,39

В табл. 1, 3, 4 СКО – средноквадратическое отклонение.

Таблица 2. Средние значения метеопараметров в период аэрозольных исследований в Баренцбурге (по данным с сайта [1])

Метеопараметры	Этапы экспедиции в 2011 г.	
	19 апреля – 26 мая	26 июля – 31 августа
Температура, °С	-2,3 \pm 2,9	+6,2 \pm 2,4
Относительная влажность, %	83 \pm 9,4	82 \pm 11
Давление, мм рт. ст.	755 \pm 6,8	755 \pm 5,7
Скорость ветра, м/с	3,3 \pm 2,6	2,1 \pm 1,1

ладали Ca^{2+} и Cl^- , а 19 и 20 июня – Ca^{2+} , Na^+ и SO_4^{2-} . В эти дни отмечена также повышенная доля ионов H^+ . Установлены высокие коэффициенты корреляции между концентрациями катионов и хлоридов (0,72–0,86), а также катионов и сульфатов (0,93–0,95). Статистические данные по химическому составу водорастворимой фракции аэрозоля в районе Тикси приведены в табл. 1.

Исследования аэрозольных характеристик атмосферы в районе пос. Баренцбург. Весенний цикл исследований атмосферного аэрозоля в районе Баренцбурга проводился с 19 апреля по 26 мая 2011 г., летний – с 26 июля по 31 августа 2011 г. В весеннем цикле приборы аэрозольной станции располагались в рабочей комнате производственного помещения гидрометеорологической обсерватории. В летнем цикле измерения вели в экспедиционном павильоне, расположенном на склоне горы Улаф, в 70 м севернее и на 50 м выше пункта весенних наблюдений. Воздух забирали с высоты 2 м от поверхности земли. Основным локальным источником аэрозольного загрязнения – трубы ТЭЦ, расположенной в морском порту на удалении около 1 км в юго-юго-западном направлении от аэрозольной станции. На данные измерений в летний период влияли также другие факторы, вносившие неопределённость при

отбраковке данных: утренние туманы, низкая облачность, осадки, а также не покрытая снегом подстилающая поверхность, которая при соответствующем направлении и скорости ветра могла быть источником пылевых и сажевых частиц. За период наблюдений получено 816 весенних и 775 летних часовых серий измерений счётной концентрации аэрозоля, а также 807 весенних и 400 летних серий измерений массовой концентрации «сажи».

В районе Баренцбурга в исследуемые периоды преобладали северный и западный (со стороны Гренландии) переносы воздушных масс. В летний период исследований по сравнению с весенним отмечались более высокие температуры воздуха и меньшие скорости ветра. Летом часто наблюдались туманы и пасмурная погода. Атмосферное давление и относительная влажность воздуха в оба периода варьировали в близких диапазонах. Метеопараметры в периоды исследований даны в табл. 2.

Оба измерительных периода имели достаточно высокую прозрачность атмосферы (малое аэрозольное замутнение). Общий диапазон изменчивости спектральной аэрозольной оптической толщины атмосферы на длине волны 0,5 мкм составил 0,048–0,154, а показателя Ангстрема α , рассчитанного для области спектра 0,44–0,87 мкм, – 0,47–1,69. Предварительный анализ результатов показал, что в весенний период замутнение атмосферы значительно. Средняя величина $\tau_{0,5}^a$ летом уменьшилась в 1,56 раза, а показатель α увеличился на 11%. Временная зависимость счётной концентрации аэрозоля N_A показана на рис. 3. Измерения вели с шагом 1 час (светлые кружки). Данные иллюстрируют согласованную изменчивость концентраций, обусловленную сменой синоптических условий. В целом весь период измерений характеризовался достаточно низкими значениями счётной концентрации аэрозоля.

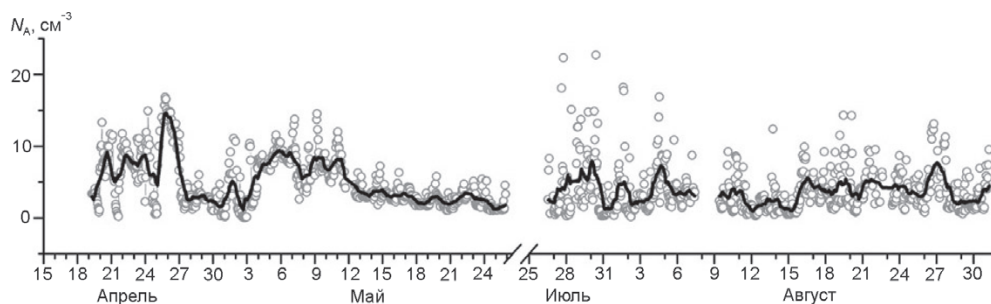


Рис. 3. Временной ход счётной концентрации аэрозоля в пос. Баренцбург, 2011 г.

Жирной линией показан сглаженный межсуточный ход исходных данных

Fig. 3. Time variation of aerosol number concentration in Barentsburg, 2011.

Thick line – the smoothed daily course of the initial data

Таблица 3. Статистические данные химического состава приземного аэрозоля в Баренцбурге, 2011 г.

Компоненты	Весенний период			Летний период		
	среднее \pm СКО, $\text{мкг}\cdot\text{м}^{-3}$	min	max	среднее \pm СКО, $\text{мкг}\cdot\text{м}^{-3}$	min	max
<i>Анионы</i>						
Cl^-	$0,80\pm 0,65$	0,19	2,29	$0,30\pm 0,24$	0,10	0,94
SO_4^{2-}	$0,97\pm 0,60$	0,29	2,58	$0,57\pm 0,53$	0,13	1,96
NO_3^-	$0,19\pm 0,35$	0,00	1,28	$0,07\pm 0,04$	0,01	0,15
Br^-	$0,000\pm 0,001$	0,000	0,005	$0,003\pm 0,007$	0,000	0,028
PO_4^{3-}	$0,048\pm 0,102$	0,000	0,408	$0,022\pm 0,028$	0,001	0,093
<i>Катионы</i>						
Na^+	$0,21\pm 0,16$	0,051	0,55	$0,08\pm 0,04$	0,02	0,15
NH_4^+	$0,29\pm 0,24$	0,047	0,84	$0,13\pm 0,14$	0,00	0,38
K^+	$0,06\pm 0,03$	0,024	0,16	$0,07\pm 0,05$	0,02	0,22
Mg^{2+}	$0,07\pm 0,07$	0,000	0,21	$0,02\pm 0,01$	0,00	0,03
Ca^{2+}	$0,13\pm 0,15$	0,018	0,63	$0,14\pm 0,21$	0,05	0,90
H^+	$0,013\pm 0,007$	0,004	0,03	$0,005\pm 0,002$	0,003	0,011
<i>Сумма ионов</i>	$2,77\pm 1,38$	0,71	5,58	$1,41\pm 1,13$	0,48	4,81

Средняя концентрация суммы ионов в растворимой фракции аэрозоля в апреле–мае 2011 г. была вдвое выше по сравнению с их концентрацией в августе. Максимум концентрации ионов ($5,6 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$) зафиксирован 16 мая, минимум ($0,48 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$) – 2 августа 2011 г. Весной основными в составе аэрозоля были ионы морского и континентального происхождения – Na^+ , NH_4^+ , Cl^- , SO_4^{2-} . Летом в формировании химического состава аэрозоля возросла роль подстилающей поверхности и повысился вклад ионов Ca^{2+} . В оба периода наблюдений в составе аэрозоля отмечалась высокая доля ионов H^+ , что свидетельствует о кислой среде, в которой находятся аэрозольные частицы. Весной существовала значительная корреляционная взаимосвязь концентраций между парами ионов $\text{NH}_4^+ - \text{SO}_4^{2-}$, $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$, $\text{Mg}^{2+} - \text{Cl}^-$, $\text{Ca}^{2+} - \text{NO}_3^-$ с коэффициентами корреляции 0,79, 0,97, 0,96 и 0,90 соответственно. В летний период эта взаимосвязь ослабла (соответственно 0,68, 0,63, 0,61, 0,58), но появилась высокая положительная корреляция между другими парами, особенно между катионами и нитрат- и хлорид-ионами. Химический состав аэрозоля в районе Баренцбурга приведён в табл. 3.

Обсуждение результатов

Среднее за весь период наблюдений значение спектральной аэрозольной оптической толщины атмосферы (0,088) в районе Тикси для длины волны 0,5 мкм почти в 2 раза ниже общего среднего значения для территории России (0,15) за период 1976–2003 гг. [12]. Значения этого параметра для района Тикси сравнивались с аналогичным параметром в других районах. Так, для континентальной части в весенний период (г. Томск) значение $\tau_{0,5}^a = 0,167\pm 0,096$, $\alpha = 1,38\pm 0,37$; в открытом океане умеренных широт эти величины соответственно равны $0,076\pm 0,047$ и $0,59\pm 0,47$; в прибрежной зоне – $0,20\pm 0,10$ и $0,90\pm 0,43$ [1, 9]. Средняя спектральная зависимость аэрозольной оптической толщины атмосферы в районе Тикси (июнь 2010 г.) была сопоставлена также с данными высокоширотных станций сети АЭРОНЕТ (Резолют Бэй – $74^\circ 7'$ с.ш., $94^\circ 9'$ з.д.; Барроу – $71^\circ 3'$ с.ш., $156^\circ 7'$ з.д. и Опал – 80° с.ш., $85^\circ 9'$ з.д.) [20] (см. рис. 2). Результаты сравнения показали достаточно хорошее согласие характеристик в высокоширотных районах как по величине аэрозольной

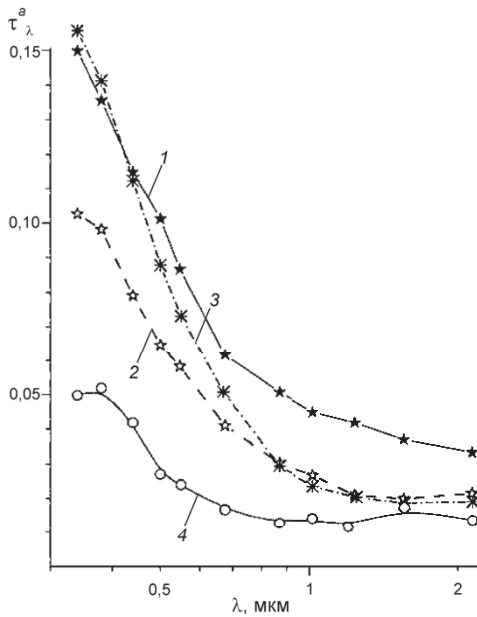


Рис. 4. Средние спектральные зависимости аэрозольной оптической толщины атмосферы в различных высокоширотных районах:

1 – пос. Баренцбург (весна); 2 – пос. Баренцбург (лето); 3 – пос. Тикси; 4 – побережье Антарктиды

Fig. 4. Mean spectral dependences of the atmospheric aerosol optical depth in different high latitude areas:

1 – Barentsburg (spring); 2 – Barentsburg (summer); 3 – Tiksi; 4 – the coastal Antarctica

оптической толщины атмосферы, так и по наклону спектральных зависимостей $\tau^a(\lambda)$.

Вариации аэрозольной оптической толщины атмосферы в районе Баренцбурга (0,048–0,154) согласуются с сезонным спадом аэрозольного замутнения от весны к осени в других высокоширотных районах [2, 9, 14]. Так, по данным [14], среднее значение $\tau_{0,5}^a$ на островах Голомянный и Диксон изменялось от 0,17 в апреле до 0,06 в августе. На рис. 4 приведены средние спектральные зависимости для двух периодов измерений в Баренцбурге, а также данные, полученные в гидрометеорологической обсерватории пос. Тикси (июнь 2010 г.) и в 100-мильной зоне вблизи побережья Антарктиды (53-я РАЭ) [15].

На рис. 4 видно, что при переходе от весны к лету по измерениям в Баренцбурге отмечается почти параллельное смещение спектральных зависимостей $\tau^a(\lambda)$, указывающее на относительное уменьшение спектральной аэрозольной оптической толщины атмосферы примерно в 1,5 раза. По абсолютной величине более существенные изменения наблюдались в УФ-диапазоне спектра. Кривая спектрального хода $\tau^a(\lambda)$ по данным для района Тикси занимала промежуточное положение. Средние значения аэрозольной оптической толщины атмосферы в ИК-диапазоне совпадали с данными для Баренцбурга в

летний период, в УФ-диапазоне – в весенний период. Атмосфера Антарктиды отличалась минимальным уровнем аэрозольного замутнения. В видимой области спектра значения аэрозольной оптической толщины атмосферы в арктических районах более чем вдвое выше. Приведённые в табл. 4 статистические характеристики счётной концентрации аэрозоля N_A показывают, что в атмосфере Баренцбурга общий диапазон изменчивости аэрозольной счётной концентрации для весеннего и летнего периодов измерений $N_A = 0,047 \div 22,7 \text{ см}^{-3}$ ($>0,3 \text{ мкм}$). Средняя величина N_A в Баренцбурге выше, чем в Тикси, но ниже, чем в других высокоширотных районах. При переходе от весеннего сезона к летнему в Баренцбурге счётная концентрация приземного аэрозоля в среднем уменьшается в 1,35 (при радиусе частиц $>0,3 \text{ мкм}$) и 1,56 раза (при радиусе частиц $>0,4 \text{ мкм}$) (см. табл. 4). Такое изменение согласуется с сезонным спадом аэрозольной оптической толщины атмосферы в арктических районах.

Сравнение химического состава аэрозоля, отобранного в Баренцбурге, с аэрозолем, взятым в районе Тикси, показало идентичность их качественного состава. Однако в количественном отношении есть отличия. Содержание нитрат-ионов и кальция в составе аэрозоля района Тикси выше, чем в Баренцбурге как весной, так и летом. В аэрозоле Баренцбурга в весенний период отмечаются более высокие концентрации хлорида натрия и сульфата аммония. Средняя суммарная концентрация ионов в аэрозоле района Тикси количественно ближе к весенней сумме ионов аэрозоля Баренцбурга (см. табл. 1 и 3).

Сравнение химического состава аэрозоля района Тикси с аэрозолями, отобранными авторами над Белым (2003–2008 гг.) и Карским (2007 г.) морями, показало, что в аэрозоле прибрежного района концентрации ионов ниже. Наибольшие различия (в 10–22 раза) отмечены для концентраций ионов морского происхождения (Na^+ , Mg^{2+} , Cl^-), которые выше в аэрозоле над морской поверхностью. Содержание ионов, указывающих на континентальный источник, – NH_4^+ и SO_4^{2-} в аэрозоле Тикси почти в 6 раз ниже по сравнению с аэрозолем Белого моря и почти в 2 раза ниже, чем в аэрозоле Карского моря. Белое море фактически относится к внутреннему и поэтому испытывает большее воздействие континентальных источников [13]. Такая же тенденция отмечена и для аэрозолей Баренцбурга, особенно в летний период.

Проведено сравнение химического состава аэрозолей арктического (Баренцбург, Тикси) и антарктического (Новолазаревская–Молодежная–Прогресс–Мирный) районов. Ранее было установлено, что суммарное содержание ионов в аэрозоле прибрежных районов Антарктиды изменялось от 1,6 до 9,9 $\text{мкг}\cdot\text{м}^{-3}$ при среднем значении $3,75 \pm 1,95 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$ [7]. Более высокое среднее суммарное содержание ионов в со-

Таблица 4. Статистические характеристики счётной концентрации аэрозоля N_A в атмосфере районов Баренцбурга, Тикси, Карского, Белого морей и вблизи Антарктиды (53-я РАЭ)

Район исследований	Среднее \pm СКО N_A , см ⁻³	min–max	Число измерений
Белое море, август 2003–2007 гг.	8,22 \pm 6,9	0,018–76,2	1460
Карское море, 2007 г.	5,36 \pm 5,23	0,069–30,48	1089
Вблизи Антарктиды, 2007 г.	2,16 \pm 3,2	0,16–14,4	720
Район Тикси, июнь 2010 г.	0,41 \pm 1,1*	0,0006–1,53	378
	1,8 \pm 4,5	0,003–59	378
Район Баренцбурга, апрель–май 2011 г.	4,95 \pm 3,49	0,047–16,8	744
	1,65 \pm 1,46	0,008–8,04	744
Район Баренцбурга, июль–август 2011 г.	1,06 \pm 1,0	0,041–9,5	729
	3,66 \pm 3,13	0,183–22,7	729

*В числителе – для диаметра частиц > 0,4 мкм, в знаменателе – для диаметра частиц > 0,3 мкм.

ставе аэрозолей антарктического района обусловлено ионами Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} , преобладающими в морской воде. Сопоставление усреднённых концентраций аналогичных ионов в аэрозоле двух полярных районов указывает на их преобладание в аэрозоле прибрежных станций Антарктиды. В аэрозоле арктических станций более высокими оказались концентрации Ca^{2+} и SO_4^{2-} , присутствие которых в атмосфере может быть следствием как эрозионных процессов, так и антропогенного воздействия. Следовательно, на формирование химического состава аэрозоля на арктическом шельфе большее влияние оказывают континентальные источники, а на антарктическом побережье – морские.

Заключение

Уровень концентраций аэрозоля в приземном слое атмосферы исследуемых участков имеет следующие значения счётной концентрации (для частиц, диаметром больше 0,3 мкм): для Тикси – $N_A = 1,80 \pm 4,5$ мкг·см⁻³, Баренцбурга – весной $N_A = 4,95 \pm 3,49$ мкг·см⁻³; летом – $N_A = 3,66 \pm 3,13$ см⁻³. При переходе от весеннего к летнему периоду концентрации аэрозоля уменьшались в 1,2–1,4 раза. Аэрозольная оптическая толщина атмосферы в районе Тикси летом 2010 г. и Баренцбурга весной и летом 2011 г. характеризовалась достаточно низкими значениями и малой изменчивостью по сравнению с континентальными районами умеренных широт. Средняя величина спектральной аэрозольной оптической толщины атмосферы в области 0,5 мкм от весны к лету уменьшалась с 0,101 до 0,065, а в ИК-диапазоне спектра – с 0,03 до 0,02. Сезонное изменение этого параметра в Баренцбурге согласуется с ранее полученными данными в арктических районах. Средняя величина показателя селективности Ангстрема весной составила 1,28, летом – 1,42. Результаты сравнения характеристик спектральной аэрозольной оптической толщины атмосферы в

районе Тикси и Баренцбурга в летний период позволяют отнести эти районы наблюдений к регионам с высокой прозрачностью атмосферы.

Химический состав водорастворимой фракции приземного аэрозоля районов Тикси и Баренцбурга однороден по качественному составу, но различен в количественных характеристиках. Средняя суммарная концентрация ионов в аэрозоле района Тикси ($2,3 \pm 1,6$ мкг·м⁻³) количественно ближе к сумме ионов аэрозоля Баренцбурга весеннего периода ($2,7 \pm 1,4$ мкг·м⁻³). В водорастворимой фракции аэрозоля преобладали ионы как морского (Na^+ , Cl^-), так и континентального (NH_4^+ , SO_4^{2-} и NO_3^-) происхождения. Сравнение химического состава аэрозолей над Белым и Карским морями с аэрозолями районов Тикси и Баренцбург показало большее влияние морской составляющей в формировании их состава над окраинными морями и континентальных источников над акваторией Белого моря. Аэрозоль арктических станций испытывает большее влияние континента при формировании своего химического состава, чем аэрозоль станций антарктического побережья.

Работа выполнена при поддержке проекта № 23 программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные проблемы океанологии: физика, геология, биология, экология».

Литература

1. Баренцбург // Website: <http://tr5.ru/10205/ru>
2. Бартенева О.Д., Никитинская Н.И., Сакунов Г.Г., Веселова Л.К. Прозрачность толщ атмосферы в видимой и ближней ИК-области спектра. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 224 с.
3. Биненко В.И., Иванов В.А., Петрухин В.А. Аэрозольные измерения в Арктике и в районе вулканов // Первый глобальный эксперимент ПИГАП. Т. 2. Л.: Гидрометеоздат, 1981. С. 101–106.
4. Ваганов Е.А., Бриффа К.А., Наурызбаев М.М., Швейнгербер Ф.Г., Шиятов С.Г., Шишов В.В. Длительные климатические изменения в арктической области Северного полушария // ДАН. 2000. Т. 375. № 1. С. 103–106.

5. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Источники и стоки антропогенных микроэлементов в атмосфере Арктики: тенденции изменения с 1981 по 2005 гг. // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 6. С. 471–480.
6. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Антропогенный перенос антропогенных примесей в арктические районы России (1986–2010 гг.) // Оптика атмосферы и океана, 2012. Т. 25. № 6. С. 475–483.
7. Голобокова Л.П., Филиппова У.Г., Чипанина Е.В., Польшкин В.В., Терпугова С.А., Тихомиров А.Б. Химический состав приводного аэрозоля в районе Антарктиды // Лёд и Снег. 2011. № 4. С. 105–111.
8. Козлов В.С., Шмаргунов В.П., Польшкин В.В. Спектрофотометры для исследования характеристик поглощения света аэрозольными частицами // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 5. С. 155–157.
9. Маришнова М.С., Мишин А.А. Мониторинг прозрачности атмосферы в полярных областях // Мониторинг климата Арктики. Л.: Гидрометеиздат, 1988. С. 132–140.
10. Международная обсерватория климатического мониторинга в п. Тикси, Республика Саха (Якутия) // Website: <http://www.polarf.dev.diogenes.ru/stations/216>.
11. Оболкин В.А., Потемкин В.Л., Ходжер Т.В. Сравнительные данные о химическом составе аэрозолей континентальных и арктических районов Восточной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 6. С. 632–635.
12. Плахина И.Н., Махоткина Е.Л., Панкратова Н.В. Вариации аэрозольной оптической толщины атмосферы на территории России в 1976–2003 гг. // Метеорология и гидрология. 2007. № 2. С. 19–31.
13. Польшкин 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.: Паулсен, 2011. С. 199–214.
14. Русина Е.Н., Маришнова М.С., Ламакин М.В., Пиманова Ю.Е. Аэрозольно-оптическая толщина атмосферы на арктических и среднеширотных станциях России // Тр. ААНИИ. 2000. Т. 440. С. 158–167.
15. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Радионов В.Ф., Слуцкер И.А., Смирнов А.В., Терпугова С.А., Холбен Б.Н. О результатах исследований аэрозольной оптической толщи атмосферы во время экспедиции вокруг Антарктиды (53 РАЭ) // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21. № 12. С. 1032–1037.
16. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ростов А.П., Турчинович С.А. Портативный солнечный фотометр // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 2. С. 181–182.
17. Сакунов Г.Г., Тимерев А.А., Бартенева О.Д. Аэрозольно-оптические характеристики атмосферы арктических районов // Метеорология и гидрология. 1990. № 2. С. 65–71.
18. Шевченко В.П. Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. М.: Наука, 2006. 226 с.
19. Draxler R.R., Rolph G.D. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY // Website, 2003. NOAA AirResources Laboratory, Silver Spring, MD. <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>.
20. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Remote Sensing of Environment. 1998. V. 66. № 1. P. 1–16.
21. Product manual for IonPac AG12 Guard Column. IonPac CS12 Analytical Column // Dionex Corporation. Document № 065003, 2005. 65 p.
22. Product manual for IonPac AG19, IonPac AS19 // Dionex Corporation. Document № 031132, 2008. 34 p.
23. Shaw G.E. Atmospheric turbidity in the polar regions // Journ. of Applied Meteorology. 1982. V. 21. № 8. P. 1080–1088.
24. Terpugova S.A., Polkin V.V., Panchenko M.V., Golobokova L.P., Kozlov V.S., Shmargunov V.P., Shevchenko V.P., Lisitzin A.P. Microphysical and chemical characteristics of near-water aerosol over White and Kara Seas // Geophys. Research Abstracts. EGU2009-11824, 2009. EGU General Assembly, 2009. V. 11.

Summary

Chemical composition of snow and ice in the Arctic depends, to a considerable extent, on chemical composition of aerosol particles. Analysis of atmospheric aerosol characteristics in the boundary layer near Arctic settlements Tiksi (Summer 2010) and Barentsburg (Spring–Summer 2011) have been investigated. The results contain the outcome of number concentration measure (N_A), aerosol optical thickness of the atmosphere, and chemical composition of the water soluble aerosol fraction. Level of aerosol concentration in the boundary layer of the tested points is rather low, and characterized by the following number concentration values: in Tiksi – $N_A = 1,80 \pm 4,5 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, in Barentsburg – spring – $4,95 \pm 3,49 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, summer – $3,66 \pm 3,13 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Aerosol optical thickness of the atmosphere is characterized by rather low values, and low changeability as compared with continental areas of middle latitudes. Seasonal changes in the aerosol optical thickness of the atmosphere near Barentsburg conforms with earlier obtained data in the Arctic regions. Mean value of Ångström selectivity indicator amounted to 1.28 in spring, and to 1.42 in summer. Mean total concentration of ions in aerosols near Tiksi ($2.4 \pm 1.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) is quantitatively correlated with ions total in aerosols near Barentsburg for spring season ($2.8 \pm 1.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). In the water soluble fraction of aerosols is dominated the concentration of ions both marine (Na^+ , Cl^-), and continental (NH_4^+ , SO_4^{2-} , NO_3^-) origin. Chemical composition of aerosols in Tiksi and Barentsburg is similar to aerosols composition in the Antarctic coast regions.