

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ АЭРОЗОЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРЫ В РАЙОНЕ БАРЕНЦБУРГА (ШПИЦБЕРГЕН)

д-р физ.-мат. наук С.М.САКЕРИН¹, канд. техн. наук Д.Г.ЧЕРНОВ¹,
канд. физ.-мат. наук Д.М.КАБАНОВ¹, канд. физ.-мат. наук В.С.КОЗЛОВ¹,
д-р физ.-мат. наук М.В.ПАНЧЕНКО¹, канд. физ.-мат. наук В.В.ПОЛЬКИН¹,
канд. геогр. наук В.Ф.РАДИОНОВ²

¹ Учреждение Российской академии наук Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева (ИОА) СО РАН, г. Томск, sms@iao.ru

² ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, vradion@aari.ru

Обсуждаются результаты экспедиционных исследований характеристик атмосферного аэрозоля, проведенных весной и летом 2011 г. в районе Баренцбурга (Шпицберген). В измерениях использовались портативный солнечный фотометр (12 спектральных каналов в диапазоне спектра 0,34–2,14 мкм), фотоэлектрический счетчик частиц и дифференциальный аэталометр. Приводятся статистические характеристики вариаций аэрозольной оптической толщины атмосферы, массовой концентрации аэрозоля, «сажи» и счетной концентрации частиц. Результаты измерений сопоставляются с данными в других высокоширотных районах.

Ключевые слова: аэрозоль, «сажа», концентрация, аэрозольная оптическая толщина, Шпицберген.

ВВЕДЕНИЕ

В изучении атмосферного аэрозоля можно выделить три основных аспекта – определение его влияния на радиационные процессы и формирование климата, роль в обменных процессах (перенос вещества в системе «континент–атмосфера–океан») и антропогенное воздействие на окружающую среду. Получение исходной информации по указанным направлениям основывается на измерении концентрации аэрозоля, параметров его микроструктуры, оптических характеристик (рассеяние, поглощение радиации) и химического состава.

Существенная изменчивость, свойственная аэрозолю, обусловлена многообразием типов аэрозольных частиц (химического состава, размеров) и процессов их трансформации в атмосфере под влиянием многочисленных факторов – метеоусловий, атмосферной циркуляции, солнечной инсоляции, а также вида подстилающей поверхности как одного из важных источников аэрозоля. Пространственные отличия геофизических условий, формирующих пространственные неоднородности распределения аэрозоля, приводят к необходимости сбора данных в разных регионах планеты.

Особое значение в последние годы придается исследованиям природной среды, включая аэрозоль, в высокоширотных районах. Это обусловлено повышенным вниманием к арктическому шельфу в связи с его освоением и дефицитом информации

об атмосфере и океане в труднодоступных районах. Важно также отметить, что происходящие климатические изменения более выражены именно в полярных районах.

Первые и наиболее многочисленные экспедиционные измерения характеристик арктического аэрозоля были выполнены российскими учеными в 70–80-х годах прошлого века на дрейфующих станциях «Северный полюс» и высокоширотных островах [Бартенева и др., 1991; Маршунова, Мишин, 1988; Радионов и др., 1994; Русина и др., 2000 и др.]. В результате проведенных исследований было установлено относительно высокое содержание аэрозоля в зимне-весенний период, которое кратно превышает осенние значения. Неожиданность этого факта обусловлена тем, что в Арктике мало не только антропогенных, но и природных источников аэрозоля, так как в значительной степени (по времени и территориально) она покрыта снегом и льдом. Обнаруженная особенность объясняется выносами аэрозоля из промышленно развитых и плотно заселенных районов Евразии и сезонным изменением атмосферной циркуляции. Меридиональные переносы воздушных масс из умеренных широт в высокие наиболее интенсивны в зимний период. Накоплению аэрозоля в высоких широтах способствуют также инверсионная стратификация атмосферы, характерная для холодного периода.

Для более детального изучения свойств и закономерностей изменчивости арктического аэрозоля уже недостаточно эпизодических экспедиционных измерений. В условиях начавшегося освоения Арктики необходима организация мониторинга окружающей среды на сети стационарных станций для получения статистически обоснованных данных об уровне загрязнений, основных источниках и путях переноса аэрозольных и газовых примесей в различные арктические районы. Регулярный контроль состояния среды позволит также получить прогностические оценки, необходимые для планирования мероприятий по предотвращению опасных экологических и климатических последствий в районах накопления или транзита загрязняющих веществ.

Хорошим примером деятельности в этом направлении является создание в рамках международного сотрудничества Атмосферной обсерватории климатического мониторинга в Тикси, прекрасно оснащенной современным научным оборудованием [Иванов и др. 2009]. С этой же целью в настоящее время создается Российский научный центр на Шпицбергене (РНЦШ), через который проходят траектории переноса воздушных масс из промышленных районов Европы и, частично, Северной Америки.

В настоящей работе представлены результаты пробного цикла экспедиционных исследований оптических и микрофизических характеристик атмосферного аэрозоля, выполненных весной и летом 2011 г. в районе создаваемого метеорологического полигона РНЦШ. Заметим, что на архипелаге Шпицберген уже ведутся наблюдения на научных станциях ряда стран – Zeppelin (Норвегия), Hornsund (Польша) и др. [Tomasi et al., 2007], что открывает возможность для взаимного сравнения измеряемых параметров и более полного климато-экологического описания этого региона.

ХАРАКТЕРИСТИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспедиционные измерения характеристик аэрозоля проводились в районе Зональной гидрометеорологической обсерватории (ЗГМО) Баренцбург (78,1° с.ш., 14,2° в.д.), расположенной около восточной части залива Грэн-фьорд. Весенний цикл исследований выполнялся с 19 апреля по 26 мая, летний цикл – с 26 июля по 31 августа 2011 г. В оба периода измерялись спектральная аэрозольная оптическая толщина (АОТ) τ_a^λ , общее влагосодержание атмосферы W [г/см²] и микрофизические характеристики аэрозольных

частиц в приземном слое атмосферы – счетная концентрация частиц аэрозоля N_A [см⁻³]; массовая концентрация аэрозоля M_A [мкг/м³] и массовая концентрация «сажи» (микросталлического углерода) M_{BC} [мкг/м³]. Кроме того, проводился отбор проб аэрозоля на фильтры для последующего химического анализа. Лабораторный анализ химического состава аэрозоля осуществляется в течение нескольких месяцев, поэтому в данной работе не представлен.

В измерениях АОТ и влагосодержания атмосферы использовался портативный солнечный фотометр SPM [16]. Фотометрические наблюдения осуществлялись в 12 спектральных участках в общем диапазоне спектра 0,34–2,14 мкм. Влагосодержание атмосферы рассчитывалось по данным измерений прямой солнечной радиации в полосе поглощения водяного пара 0,94 мкм и соседнем окне прозрачности атмосферы – 0,87 мкм. Методики определения АОТ и влагосодержания описаны в работах [Кабанов, Сакерин, 1997; Кабанов, Сакерин, 1995; Кабанов и др., 2001], а технические характеристики фотометра SPM приведены в таблице 1.

Перед началом экспедиции в Томске была проведена интеркалибровка фотометра SPM путем совместных измерений с радиометром Cimel CE 318 сети AERONET [21]. Результаты сопоставления данных двух фотометров на парных длинах волн показали хорошее согласие: стандартное отклонение различия показаний варьирует в пределах 0,001–0,006 (по относительной величине – от 2 до 7 %).

Измерения прозрачности атмосферы в Баренцбурге проводились в дневное время, с периодичностью не реже одного раза в час (3–10 единичных замеров), в ситуациях, когда Солнце не было закрыто облаками. После обработки результатов наблюдений были рассчитаны среднечасовые и среднедневные значения τ_λ^a , влагосодержания W и параметров Ангстрема α и β , характеризующих спектральную зависимость АОТ: $\tau_\lambda^a = \beta\lambda^{-\alpha}$.

Во время весеннего этапа получены данные за 19 дней наблюдений, количество единичных замеров составило 643, а среднечасовых значений АОТ – 128. В период летней экспедиции объем данных составил: 377 единичных замеров, 66 среднечасовых и 12 среднедневных значений.

В измерениях микрофизических характеристик аэрозоля и «сажи» в приземном слое атмосферы использовалась мобильная аэрозольная станция в составе фотоэлектрического счетчика частиц (ФСЧ) фирмы Grimm (модель 1.108) и трехволнового

Таблица 1

Характеристики солнечного фотометра SPM

Характеристики	Коротковолновые каналы	ИК-каналы
Тип фотодиода	ФДУК-13у (Si)	Hamamatsu G 8373 (InGaAs)
Угол поля зрения, градусы	2–2,5	2,5–3
Количество каналов (длин волн)	9	3
Максимумы полос пропускания фильтров, мкм	0,34; 0,38; 0,44; 0,5; 0,55; 0,67; 0,87; 0,94; 1,02	1,25; 1,56; 2,14
Погрешность измерения АОТ		0,01–0,02
Погрешность измерения влагосодержания, г/см ²		0,02
Объем памяти (количество дней измерений)		15–30

двухканального аэталометра МДА (разработка ИОА СО РАН [Козлов и др., 2008]). Счетчик частиц обеспечивает измерение счетной концентрации и распределения частиц по размерам в диапазоне диаметров 0,3–20 мкм, а также массовой концентрации аэрозоля. В процессе измерений осуществлялась периодическая калибровка ФСЧ Grimm с помощью внутреннего калибратора.

Аэталометром проводились измерения массовой концентрации «сажи» в аэрозоле с концентрационной чувствительностью около 0,01 мкг/м³ при прокачке через прибор 30 л воздуха. Абсолютная калибровка прибора выполнялась в лабораторных условиях с помощью пиролизного генератора сажевых частиц и сопоставления данных синхронных оптических и гравиметрических измерений [Baklanov et al., 1998]. Аэталометр в течение экспедиции дополнительно не калибровался, но проводилась периодическая проверка «нуля» прибора при прокачке чистого воздуха через оптическую ячейку.

Измерения на аэрозольной станции выполнялись в автоматическом режиме, круглосуточно с периодичностью 1 час. Время забора проб воздуха в аэталометр составляло 10–20 мин при скорости прокачки воздуха 2 л/мин. В процессе измерений пробы воздуха отбирались на уровне 5 м весной и 2 м – летом от поверхности и поступали по воздуховодам в измерительные ячейки счетчика частиц и аэталометра. Длина воздуховода аэталометра (шланг с внутренним диаметром 1,5 см) составляла 1 м, что обеспечивало измерение концентрации «сажи» в составе субмикронного (менее 1 мкм) аэрозоля. В воздушной магистрали счетчика Grimm длина воздуховода составляла 0,5 м, что обеспечивало регистрацию крупных частиц.

Во время весенней экспедиции аэрозольная станция располагалась в рабочей комнате здания ЗГМО. В период с 19 апреля по 26 мая 2011 г. получены данные для 38 дней измерений. Количество часовых серий измерений счетной концентрации аэрозоля и массовой концентрации «сажи» приведены в таблице 2.

Таблица 2

Количество часовых серий измерений параметров приземного аэрозоля, полученных во время весенней и летней экспедиций 2011 г. (Баренцбург)

Параметр	Исходные (очищенные) данные, полученные в весенний период (19 апреля – 26 мая)	Исходные (очищенные) данные, полученные в летний период (26 июля – 31 августа)
N_A	816 (744)	778 (729)
M_A	816 (741)	778 (753)
M_{BC}	807 (731)	393 (363)

Из-за ремонта здания ЗГМО измерения на летнем этапе проводились в экспедиционном домике, расположенном на склоне горы Улаф, на удалении 70 м севернее и на 50 м выше пункта весенних наблюдений. Объем данных по концентрациям аэрозоля составил 36 дней измерений.

Как известно, средства локальных измерений очень чувствительны к воздействию местных источников аэрозоля, преимущественно антропогенной природы. Поэтому для получения достоверных данных из исходного массива были исключены замеры, в которых проявлялось явное влияние локальных источников. Основным источником аэрозольного загрязнения в районе исследований являются трубы ТЭЦ, расположенной на удалении около 1 км в юго-юго-западном направлении. Результаты измерений в летний период были отягощены дополнительным воздействием других

Таблица 3

Средние (\pm СКО) значения метеорологических параметров в период аэрозольных исследований в Баренцбурге (по данным <http://rp5.ru/10205/ru>)

Этап экспедиции	Температура, °С	Относительная влажность, %	Давление, мм рт. ст.	Скорость ветра, м/с
Весна	$-2,3 \pm 2,9$	83 ± 9	$755 \pm 6,8$	$3,3 \pm 2,6$
Лето	$+6,2 \pm 2,4$	82 ± 11	$755 \pm 5,7$	$2,1 \pm 1,1$

факторов: 1) утренние туманы, низкая облачность и осадки вносили неопределенность при отбраковке данных; 2) не покрытая снегом подстилающая поверхность при соответствующем направлении и скорости ветра могла быть источником пылевых и сажевых частиц. Количество часовых замеров концентрации аэрозоля и «сажи» после проведенной отбраковки данных приведено в таблице 2 в скобках.

Метеорологические условия, в которых проводились измерения характеристик аэрозоля, представлены в таблице 3. Основные отличия летнего цикла от весеннего – более высокие температуры воздуха, меньшие скорости ветра и отсутствие снежного покрова. Атмосферное давление и относительная влажность воздуха варьировали примерно в одном диапазоне, но летом наблюдались частые туманы и пасмурная погода.

АЭРОЗОЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ТОЛЩИНА АТМОСФЕРЫ

Вариации спектральной АОТ, показателя селективности Ангстрема и влагосодержания атмосферы в районе Баренцбурга иллюстрируются на рис. 1. В целом оба измеритель-

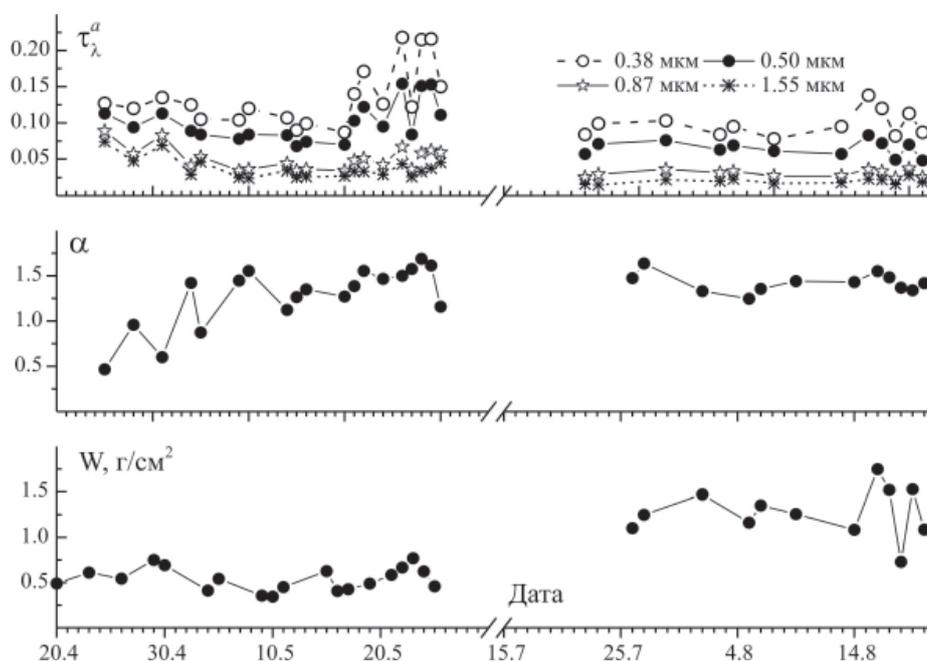


Рис. 1. Временная изменчивость средневесенних значений τ_{λ}^a , показателя селективности α и влагосодержания W в районе Баренцбурга весной и летом 2011 г.

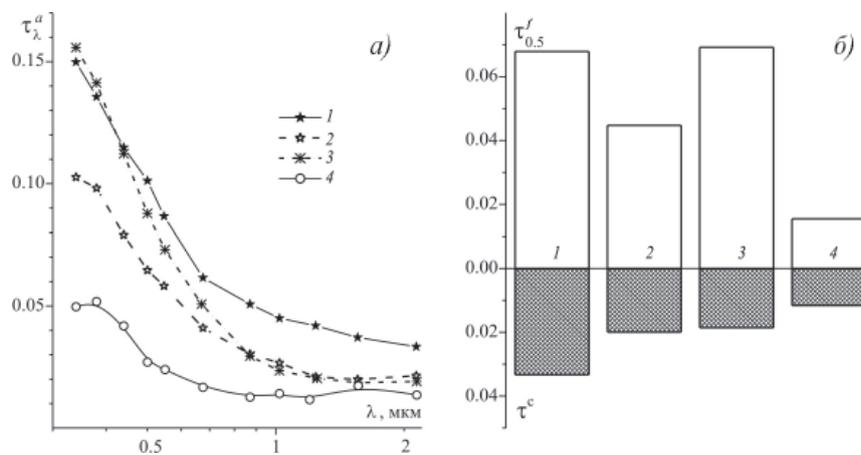


Рис. 2. Средние спектральные зависимости АОТ (а) и значения τ^c , $\tau^f_{0.5}$ (б) в различных высокоширотных районах: Баренцбург весной (1), летом (2), Тикси (3) и вблизи Антарктиды (4).

ных периода характеризовались достаточно высокой прозрачностью атмосферы (малым аэрозольным замутнением). Несколько большие значения АОТ в коротковолновой части спектра наблюдались в последние декады измерений. Общий диапазон изменчивости АОТ атмосферы на длине волны 0,5 мкм составил 0,048–0,154, показателя Ангстрема α , рассчитанного для области спектра 0,44–0,87 мкм, –0,47–1,69. Статистические характеристики для двух периодов измерений приведены в таблице 4.

Таблица 4

Средние (\pm СКО) значения основных характеристик атмосферной толщи в Баренцбурге

Этапы	$\tau^a_{0.5}$	$\tau^a_{0.87}$	α	β	$\tau^f_{0.5}$	τ^c	W
Весна	0,101 \pm 0,027	0,051 \pm 0,016	1,28 \pm 0,34	0,041 \pm 0,016	0,068 \pm 0,027	0,033 \pm 0,013	0,54 \pm 0,13
Лето	0,065 \pm 0,011	0,03 \pm 0,005	1,42 \pm 0,11	0,024 \pm 0,004	0,045 \pm 0,009	0,020 \pm 0,004	1,27 \pm 0,27

Предварительный анализ полученных результатов показал, что весенний период отличался более высоким замутнением атмосферы при меньшей селективности спектрального хода τ^a_λ : средняя величина $\tau^a_{0.5}$ летом снизилась в 1,56 раза, а показатель α увеличился на 11 % по сравнению с весенними значениями. Такое поведение АОТ атмосферы согласуется с сезонным спадом аэрозольного замутнения от весны к осени и в других высокоширотных районах [Бартенева и др. 1991; Маршунова, Мишин, 1988; Радионов и др., 1994; Русина и др., 2000; Сакерин и др., 2011б]. Например, по данным [Русина и др., 2000], среднее значение $\tau^a_{0.5}$ на островах Голомянный и Диксон уменьшается от 0,17 в апреле до 0,06 в августе. Влагосодержание атмосферы с апреля по август увеличилось в 2,35 раза, что соответствует годовому ходу влажности в этих широтах.

На рис. 2а приведены средние спектральные зависимости для двух периодов измерений в Баренцбурге в сопоставлении с нашими данными, полученными в других высокоширотных районах: метеорологической обсерватории Тикси (июнь 2010 г., [Сакерин и др., 2011б]) и в 100-мильной зоне вблизи побережья Антарктиды (55-я РАЭ, [Сакерин и др., 2010б]). Из рисунка видно, что при переходе от весны к лету на Шпицбергене произошло почти параллельное смещение спектральных зависимо-

стей τ_λ^a – относительное уменьшение АОТ примерно в 1,5 раза, но по абсолютной величине более существенные изменения наблюдались в УФ-диапазоне спектра. Кривая спектрального хода τ_λ^a в Тикси занимает промежуточное положение: средние АОТ в ИК-диапазоне совпадают с данными в Баренцбурге в летний период, а в УФ-диапазоне – в весенний период. Минимальным уровнем аэрозольного замутнения отличается Антарктида. В видимой области спектра значения АОТ атмосферы в арктических районах превышают антарктические не менее чем в 2 раза.

Измерения спектральной прозрачности атмосферы в ИК-диапазоне спектра ($\lambda > 1$ мкм) дали возможность дополнительно определить грубодисперсную τ^c и мелкодисперсную $\tau_{0.5}^f$ компоненты АОТ атмосферы. Процедура расчета τ^c и $\tau_{0.5}^f$ приведена в работе [Сакерин и др., 2010а]. Сравнение средних значений τ^c и $\tau_{0.5}^f$ представлено на рис. 2б. Грубодисперсная компонента АОТ в арктических районах очень мала и близка к данным вблизи Антарктиды [Сакерин и др., 2010б]. Несколько выше весеннее значение τ^c в Баренцбурге – оно приближается к минимальным средним τ^c в районах умеренных широт, где проводились аналогичные исследования [Сакерин и др., 2011а]; в августе в Томске и Охотском море $\tau^c \approx 0,04$. Мелкодисперсная составляющая $\tau_{0.5}^f$ в высокоширотных районах Северного полушария в 3–4,5 раза выше, чем в Южном. Очевидным объяснением является удаленность Антарктиды от континентов, над которыми содержание мелкодисперсного аэрозоля (природного и антропогенного) больше, чем над океаном.

ХАРАКТЕРИСТИКИ АЭРОЗОЛЯ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

Временные зависимости массовой концентрации «сажи» M_{BC} , счетной N_A и массовой M_A концентраций аэрозоля представлены на рис. 3. Массовая концентрация аэрозоля рассчитывалась по данным о дифференциальных значениях счетной концентрации ΔN по формуле $M_A = \rho \sum \pi (4/3) r_i^3 \Delta N_i$, где r_i – среднее значение радиуса для i -го интервала размеров, ΔN_i – счетная концентрация частиц в i -м интервале, $\rho = 1,5$ г/см³ – плотность аэрозольного вещества.

Временные развертки почасовых данных M_{BC} , N_A и M_A иллюстрируют согласованную изменчивость концентраций, обусловленную сменой синоптических условий.

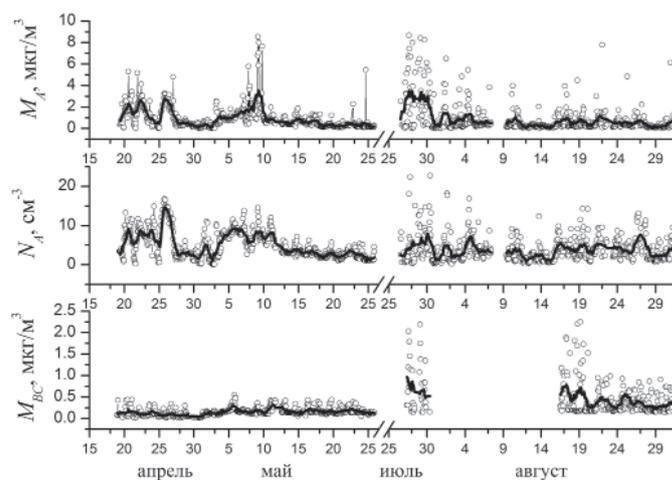


Рис. 3. Временные ходы массовой концентрации «сажи» M_{BC} , счетной N_A и массовой M_A концентраций частиц аэрозоля с диаметром $d > 0,3$ мкм в апреле–августе 2011 г. в Баренцбурге.

Таблица 5

**Статистические характеристики массовой M_A , счетной N_A
концентраций аэрозоля и массовой концентрации «сажи» M_{BC} , измеренных
в Баренцбурге, Тикси, Карском, Белом морях и вблизи Антарктиды (53-я РАЭ)**

Район	M_A , мкг·м ⁻³ среднее ± СКО; min-max; (кол-во серий измерений)	M_{BC} , мкг·м ⁻³ среднее ± СКО; min-max; (кол-во серий измерений)	N_A , см ⁻³ среднее ± СКО; min-max; (кол-во серий измерений)
Белое море, август 2003–2007 гг.	6,3 ± 4,5; 0,16–35,7; (1289)	0,31 ± 0,23; 0,003–4,68; (1026)	8,22 ± 6,9; 0,018–76,2; (1460)
Карское море, 2007 г.	2,6 ± 2,7; 0,007–15,7; (698)	0,09 ± 0,21; 0,001–1,92; (910)	5,36 ± 5,23; 0,069–30,48; (1089)
Вблизи Антарктиды, 2007 г.	1,24 ± 1,7; 0,012–25,4 (627)	0,065 ± 0,11; 0,002–0,895; (470)	2,16 ± 3,2; 0,16–14,4; (720)
Тикси, июнь 2010 г.	0,16 ± 0,34*; 0,0002–4,1; (378*)	0,026 ± 0,036; 0,001–4,43; (371)	0,411 ± 1,1; 0,0006–1,53; (378); 1,8 ± 4,5*; 0,003–59; (378*)
Баренцбург, апрель–май 2011г.	0,922 ± 1,03*; 0,003–8,53; (741*)	0,149 ± 0,085; 0,008–0,551; (731)	1,649 ± 1,46; 0,008–8,04; (744); 4,95 ± 3,49*; 0,047–16,8; (744*)
Баренцбург, июль–август 2011 г.	0,764 ± 1,27*; 0,015–8,65; (753*)	0,432 ± 0,42; 0,133–3,73; (363)	1,06 ± 1,0; 0,041–9,5; (729); 3,66 ± 3,13*; 0,183–22,7; (729*)

Примечание: значком * обозначены значения M_A и N_A для диаметров части более 0,3 мкм, без значка – для диаметров более 0,4 мкм.

На рисунках жирными линиями отмечены кривые с плавным сглаживанием исходных данных в течение 24 ч, которые характеризуют межсуточную изменчивость концентраций аэрозоля и «сажи». Максимумы на кривых соответствуют данным для 26 апреля, 6–9 мая, 17 и 23 мая, 28 и 30 июля, 16, 19, 22, 25 и 27 августа. В целом весь период измерений характеризовался достаточно низкими значениями счетной и массовой концентраций аэрозоля. В табл. 5 приведены статистические характеристики аэрозольных концентраций для весеннего и летнего периодов измерений. Общий диапазон изменчивости концентраций превышает два порядка величины и составляет: $M_A (> 0,3 \text{ мкм}) = 0,015\text{--}8,64 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$, $N_A (> 0,3 \text{ мкм}) = 0,047\text{--}22,7 \text{ см}^{-3}$, $M_{BC} = 0,04\text{--}9,5 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$.

Сравнительный анализ полученных результатов показал, что средние концентрации аэрозоля в Баренцбурге занимают промежуточное положение между данными в Тикси и более высокими значениями M_A , N_A в других высокоширотных районах. При переходе от весеннего к летнему сезону в Баренцбурге наблюдается уменьшение массовой и счетной концентраций приземного аэрозоля в среднем в 1,21 раз для M_A , а для N_A – в 1,35 (>0,3 мкм) и в 1,56 раза (>0,4 мкм) (табл. 5, рис. 3). Такое изменение согласуется с сезонным спадом АОТ атмосферы в арктических районах. Обращает на себя внимание высокая относительная изменчивость концентраций аэрозоля в Баренцбурге – коэффициенты вариации около 100 % и более.

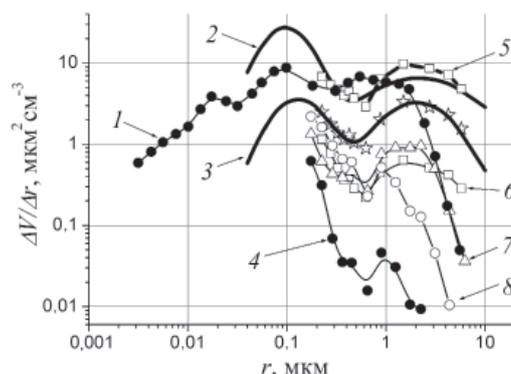


Рис. 4. Объемные распределения $\Delta V/\Delta r$ аэрозольных частиц по размерам для различных высокоширотных районов Арктики и Антарктики: 1 – о. Циглера (Земля Франца-Иосифа, март–апрель, 1994 [Смирнов и др., 2000]); 2 – Белое море (2003–2007 гг. [Полькин и др., 2008; Polkin et al., 2009]); 3 – Карское море (2007 г. [Полькин и др., 2008; Polkin et al., 2009]); 4 – Тикси (июнь 2010 г. [Полькин и др., 2010]); 5 – Южный океан (53-я РАЭ, 2007 г. [Терпугова и др., 2008]); 6 – вблизи Антарктиды (53-я РАЭ [Терпугова и др., 2008]); 7 – Баренцбург (июль, 2011); 8 – Баренцбург (апрель, 2011).

По содержанию «сажи» наблюдалось противоположное изменение при переходе от весны к лету – средняя массовая концентрация увеличилась в 2,9 раза. Летние значения M_{BC} в Баренцбурге оказались самыми высокими по сравнению с результатами в других высокоширотных районах наших исследований. Этот предварительный результат не согласуется с данными наблюдений на других научных станциях Шпицбергена. Так, в мониторинговых измерениях в 1998–2007 гг. на станции Zeppelin (78,9° с.ш., 11,9° в.д., Норвегия) было получено, что среднемесячные концентрации «сажи» в течение года уменьшаются от максимальных значений ~80 нг/м³ в феврале–марте до минимальных ~0–10 нг/м³ в июне–сентябре [Eleftheriadis et al., 2009].

Наиболее вероятной причиной повышенных летних значений M_{BC} в Баренцбурге в наших измерениях является неучтенное влияние локальных факторов. Как уже отмечалось, летний период отличался частыми утренними туманами и низкой облачностью в пункте измерений. Не исключено, что в таких условиях происходило устойчивое накопление «сажи» в аэрозоле, в том числе от местных источников. Кроме того, в летний период при свободной от снега подстилающей поверхности возрастает ветровое поступление пыли в приземный слой воздуха. Известно, что пыль дает вклад в аэрозольное поглощение, фиксируемое аэталометром как некое увеличение концентрации «сажи». Нельзя также исключить влияние выносов угольной пыли от угольной шахты и узкоколейки, расположенных вблизи измерительного пункта. Возможно, химический анализ проб аэрозоля позволит прояснить этот вопрос и оценить соответствие фоновым условиям выбранного пункта измерений.

На рис. 4 приведено сопоставление средних распределений частиц по объемам, полученных в Баренцбурге (весна и лето), с результатами наблюдений в последнее десятилетие в других высокоширотных районах – Карское [Полькин и др., 2008], Белое [Polkin et al., 2009] моря, п. Тикси [Полькин и др., 2010], Южный океан и вблизи побережья Антарктиды [Терпугова и др., 2008], а также на Земле Франца-Иосифа в 1994 г. [Смирнов и др., 2000]. Как видно, во всех регионах в распределениях частиц

в диапазоне более 0,1 мкм присутствуют две основные фракции – мелкодисперсная и крупнодисперсная. При этом в летний период по сравнению с весенним в Баренцбурге наблюдается пониженное содержание мелкодисперсного аэрозоля (размером менее 0,5 мкм), но более высокое (в 10 раз) содержание крупных частиц размером 2–3 мкм. Возможно, с этими крупными частицами и связана повышенная пылевая нагрузка и большое содержание «сажи» в летний период.

Из сравнения представленных на рис. 4 распределений частиц следует, что в среднем объемные концентрации частиц, а следовательно, и масса аэрозоля в приземном слое воздуха в Баренцбурге сопоставимы с наблюдавшимися вблизи побережья Антарктиды. При этом они были существенно меньше значений, измеренных над акваториями Карского и Белого морей, над Южным океаном и на Земле Франца-Иосифа, и существенно больше, чем в районе Тикси. Обратим внимание, что концентрации мелкодисперсных частиц размером около 0,2 мкм в рассмотренных районах различаются в среднем в 20 раз, а отличие концентраций крупных частиц (около 2 мкм) составляет более трех порядков величины. Одной из причин такого различия является разное содержание крупных частиц морского аэрозоля в рассматриваемых районах. В частности, низкое содержание грубодисперсного аэрозоля в Тикси было обусловлено тем, что море и побережье в период измерений там еще были покрыты льдом и снегом [Полькин и др., 2010; Сакерин и др., 2011б].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

АОТ атмосферы в районе Баренцбурга весной и летом 2011 г. характеризовалась достаточно низкими значениями и малой изменчивостью в сравнении с континентальными районами умеренных широт. Средняя величина АОТ атмосферы в области 0,5 мкм от весны к лету уменьшилась с 0,101 до 0,065, в ИК-диапазоне спектра с 0,03 до 0,02. Сезонное изменение АОТ в Баренцбурге согласуется с ранее полученными данными в других арктических районах. Средняя величина показателя селективности Ангстрема весной составила 1,28, летом – 1,42.

Уровень средних концентраций аэрозоля в приземном слое атмосферы Баренцбурга сравнительно невысок и характеризуется следующими значениями: массовая концентрация аэрозоля весной $M_A = 0,92 \pm 1,03$ мкг·м⁻³, летом $M_A = 0,76 \pm 1,27$ мкг·м⁻³; счетная концентрация весной $N_A = 4,95 \pm 3,49$ мкг·м⁻³, летом $N_A = 3,66 \pm 3,13$ см⁻³. При переходе от весеннего к летнему сезону массовая и счетная концентрации аэрозоля уменьшаются в 1,2–1,4 раза. Средняя массовая концентрация «сажи» весной и летом 2011 г. составила $0,15 \pm 0,09$ и $0,43 \pm 0,42$ мкг·м⁻³ соответственно. Повышенные летние значения концентрации «сажи» (в 2,9 раза больше, чем весной), вероятно, связаны с большим содержанием крупнодисперсных частиц пылевой (угольной) природы. Средние объемные распределения частиц по размерам в п. Баренцбург сопоставимы с данными вблизи Антарктиды и существенно выше концентраций аэрозоля в п. Тикси, которые были минимальными в летний период для рассмотренных высокоширотных регионов.

Авторы выражают благодарность организаторам и руководству экспедиции «Шницберген-2011» Л.М.Саватюгину и И.Ю.Соловьяновой за помощь в проведении аэрозольных исследований. Со стороны Российской академии наук исследования были поддержаны проектами № 21.1 и № 21.7 Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 23.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. *Иванов Н.Е., Макитас А.П., Шутилин С.В., Гунн Р.М.* Многолетняя изменчивость характеристик климата района гидрометеорологической обсерватории Тикси // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 1 (81). С. 24–41.
3. *Кабанов Д.М., Сакерин С.М.* О методике определения аэрозольной оптической толщи атмосферы в ближнем ИК-диапазоне спектра // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 8. С. 866–874.
4. *Кабанов Д.М., Сакерин С.М.* Результаты исследований общего влагосодержания атмосферы методом оптической гигрометрии. Ч.1. Анализ методики и результатов калибровки // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 6. С. 852–860.
5. *Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Турчинович С.А.* Солнечный фотометр для научного мониторинга (аппаратура, методики, алгоритмы) // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14. № 12. С. 1162–1169.
6. *Козлов В.С., Шмаргунов В.П., Полькин В.В.* Спектрофотометры для исследования характеристик поглощения света аэрозольными частицами // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 5. С. 155–157.
7. *Мариунова М.С., Мишин А.А.* Мониторинг прозрачности атмосферы в полярных областях // Мониторинг климата Арктики. Л.: Гидрометеоздат, 1988. С. 132–140.
8. *Полькин В.В., Панченко М.В., Грищенко И.В., Коробов В.Б., Лисицын А.П., Шевченко В.П.* Исследования дисперсного состава приводного аэрозоля Белого моря в конце летнего сезона 2007 г. // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21. № 10. С. 836–840.
9. *Полькин В.В., Терпугова С.А., Кабанов Д.М., Шмаргунов В.П., Сакерин С.М., Панченко М.В., Голобокова Л.П., Ходжер Т.В., Филиппова У.Г.* Предварительные результаты исследований характеристик аэрозоля на побережье моря Лаптевых (Тикси) // XVII Рабочая группа «Аэрозоли Сибири»: Тезисы докладов. Томск: Изд. ИОА СО РАН, 2010. С. 8.
10. *Радионов В.Ф., Мариунова М.С., Русина Е.Н., Лубо-Лесниченко К.Е., Пиманова Ю.Е.* Аэрозольная мутность атмосферы в полярных районах // Известия РАН. ФАО. 1994. Т. 30. № 6. С. 797–801.
11. *Русина Е.Н., Мариунова М.С., Ламакин М.В., Пиманова Ю.Е.* Аэрозольно-оптическая толщина атмосферы на арктических и среднеширотных станциях России // Труды ААНИИ. 2000. Т. 440. С. 158–167.
12. *Сакерин С.М., Афонин С.В., Энгель М.В., Кабанов Д.М., Полькин В.В., Турчинович Ю.С., Букин О.А., Павлов А.Н.* Пространственно-временная изменчивость аэрозольной оптической толщи атмосферы в Приморье и прилегающих морях в августе 2010 г. // Оптика атмосферы и океана. 2011а. Т. 24. № 9. С. 731–736.
13. *Сакерин С.М., Веретенников В.В., Журавлева Т.Б., Кабанов Д.М., Насртдинов И.М.* Сравнительный анализ радиационных характеристик аэрозоля в ситуациях дымов пожаров и обычных условиях // Оптика атмосферы и океана. 2010а. Т. 23. № 6. С. 451–461.
14. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Николашкин С.В., Терпугова С.А., Holben B., Smirnov A., Sorokin M., Кустов В.Ю.* Результаты исследований аэрозольной оптической толщи атмосферы в Якутии // Материалы IX Сибирского совещания по климато-экологическому мониторингу, Томск, 3–6 октября 2011. Томск, 2011б. С. 72–74.
15. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Полькин В.В., Smirnov A., Радионов В.Ф., Slutsker I., Власов Н.И., Полькин В.В.* О результатах исследований аэрозольной оптической толщи атмосферы в 55-й Российской антарктической экспедиции // 7 Всероссийский симпозиум «Контроль окружающей среды и климата: КОСК-2010», Томск, 5–7 июля 2010. Томск, 2010б. С. 242–244.
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. Смирнов В.В., Пронин А.А., Радионов В.Ф., Савченко А.В., Шевченко В.П. Внутрисезонные факторы изменчивости аэрозольного и ионного состава полярных атмосфер // Известия АН. ФАО, 2000. Т. 36. № 5. С. 639–649.
18. Терпугова С.А., Полькин В.В., Панченко М.В., Шмаргунов В.П. Исследования атмосферного аэрозоля в 53 Российской Антарктической экспедиции // Шестая международная конференция «Естественные и антропогенные аэрозоли»: Тезисы докладов. Санкт-Петербург. 7–10 октября 2008. СПб., 2008. С. 68–69.
19. Baklanov A.M., Kozlov V.S., Panchenko M.V., Ankilov A.N., Vlasenko A.L. Generation of soot particles in submicron range // J. Aerosol Sci. 1998. Vol. 29. Suppl. 1. P. 919–920.
20. Eleftheriadis K., Vratolis S., Nyeki S. Aerosol black carbon in the European Arctic: measurements at Zeppelin station, Ny-Ålesund, Svalbard from 1998–2007/ Geophysical Research Letters. Vol. 36. L02809, doi:10.1029/2008GL035741, 2009.
21. 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 // Rem. Sens. Env. 1998. Vol. 66(1). P. 1–16.
22. Polkin V.V., Panchenko M.V., Golobokova L.P., Kozlov V.S., Shmargunov V.P., Khodzher T.V., Shevchenko V.P., Lisitzin A.P. Average characteristics of microphysical and chemical compositions of near-water aerosol over White and Kara Seas // V International Conference «Current Problems in Optics of Natural Waters» (ONW'2009). St.-Peterburg. Russia. September 8–11, 2009. Proceedings. 2009. P. 299–304.
23. Tomasi C., Vitale V., Lupi A., Di Carmine C. et al. Aerosols in polar regions: A historical overview based on optical depth and in situ observations // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112. D16205 (doi: 10.1029/2007JD008432).

S.M.SAKERIN, D.G.CHERNOV, D.M.KABANOV, V.S.KOZLOV,
M.V.PANCHENKO, V.V.POLKIN, V.F.RADIONOV

**PRELIMINARY RESULTS OF STUDYING THE AEROSOL
CHARACTERISTICS OF THE ATMOSPHERE IN THE REGION
OF BARENTSBURG, SPITSBERGEN**

The expedition studies of characteristics of the atmospheric aerosol, performed in spring and summer of 2011 in the region of Barentsburg, Spitsbergen, are discussed. In the measurements, we used a portable sun photometer (12 wavelength channels in the wavelength range 0,34–2,14 μm), photoelectric particle counter, and differential aethalometer. We present the statistical characteristics of variations in the atmospheric aerosol optical depth, mass concentrations of aerosol and «black carbon», and particle number concentration. The results of the measurements are compared with data in other high-latitude regions.

Keywords: aerosol, black carbon, concentration, aerosol optical depth, Spitsbergen.