

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.510.42

**Оптические и микрофизические характеристики аэрозоля
в приводной атмосфере Белого моря по данным
одновременных корабельных и береговых измерений
в августе 2006 г.**

**В.С. Козлов¹, А.Б. Тихомиров¹, М.В. Панченко¹, В.П. Шмаргунов¹,
В.В. Польшкин¹, С.М. Сакерин¹, А.П. Лисицын², В.П. Шевченко^{2*}**

¹ *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

² *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
117997, г. Москва, Нахимовский пр., 36*

Поступила в редакцию 26.01.2009 г.

Выполнены одновременные измерения оптических и микрофизических характеристик приводного аэрозоля в районе Белого моря во время 80-го рейса НИС «Профессор Штокман» в августе 2006 г. — с борта НИС и в береговой зоне (на территории Унского маяка, южный берег Двинского залива). Исследуется пространственно-временная изменчивость концентраций аэрозоля и сажи в морской атмосфере, и проводится анализ определяющих эту изменчивость геофизических факторов. В период антициклона 20–23 августа при арктической воздушной массе в корабельных и наземных измерениях зафиксированы условия высокой аэрозольной чистоты атмосферы с предельно низкими значениями концентраций аэрозоля и сажи — 1,2–1,7 и 0,01 мкг/м³ соответственно, сопоставимыми со значениями, наблюдаемыми в открытых акваториях океана. Районы центральной акватории Белого моря, Кандалакшского залива и Унского маяка по уровню содержания аэрозоля и сажи в период экспедиции можно отнести к фоновым. По результатам сравнения одновременных корабельных и наземных измерений концентраций аэрозоля и сажи установлена близость их межсезонной изменчивости, свидетельствующая о том, что особенности временных вариаций, по крайней мере в период экспедиции, имеют региональный масштаб и в основном определяются динамикой синоптических процессов смены воздушных масс.

Ключевые слова: аэрозоль, сажа, приводная атмосфера, пространственно-временная изменчивость.

Введение

Известно, что окружающая среда северных районов очень чувствительна к различного рода антропогенным воздействиям. Одним из основных каналов поступления в эти широты загрязнений является атмосфера [1–9]. Важное значение имеет проведение исследований атмосферного переноса вещества в Белом море. Белое море принадлежит к бассейну Северного Ледовитого океана, природные условия в нем сходны с условиями в арктических морях [10]. Акватория моря имеет небольшую площадь по сравнению с площадью других морей Арктики и практически полностью окружена сушей.

Научные исследования Белого моря начались еще в XIX в., однако системный подход к изучению этого моря применяется только с начала XXI в. [11, 12]. Важную роль в этих работах занимают аэрозольные исследования.

С целью изучения пространственно-временной изменчивости параметров аэрозольных частиц приводного слоя морской атмосферы, а также анализа определяющих эту изменчивость геофизических факторов, нами в различных районах Белого моря с 13 по 25 августа 2006 г. были выполнены аэрозольные исследования. В рамках комплексной морской экспедиции, организованной Институтом океанологии РАН, за время 80-го рейса НИС «Профессор Штокман» были проведены измерения массовых концентраций субмикронного аэрозоля и микрористаллического углерода (Black Carbon — ВС, сажа), счетной концентрации, функции распределения частиц по размерам в приводном слое атмосферного воздуха.

В программе комплексного аэрозольного эксперимента, в дополнение к исследованиям предшествующих морских экспедиций (55, 64, 71-й рейсы

* Валерий Степанович Козлов (vkozlov@iao.ru); Алексей Борисович Тихомиров (a9hai@iao.ru); Михаил Васильевич Панченко (pmv@iao.ru); Шмаргунов Владимир Петрович (vpsh@iao.ru); Виктор Викторович Польшкин (victor@iao.ru); Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru); Александр Петрович Лисицын (lisitzin@ocean.ru); Владимир Петрович Шевченко (vshevch@ocean.ru).

НИС «Профессор Штокман») [13, 14], была поставлена еще одна задача – проведение одновременных (параллельно с судовыми) измерений характеристик аэрозоля в водосборе моря – части природного планшета осаждения аэрозолей [15]. Если в море аэрозоли, которые выпадают на водную поверхность и смешиваются в толще вод с водной взвесью, можно исследовать только за короткое время рейсов, то на суше их исследования могут быть круглогодичными, поскольку аэрозольный материал в конечном счете концентрируется в природных архивах (планшетах). Целями синхронных экспериментов являлись получение дополнительной информации о роли различных геофизических факторов в формировании аэрозольных полей морской атмосферы, исследование их изменений во времени, повышение надежности аэрозольных данных.

Аппаратура и методики аэрозольных измерений

Измерения микрофизических характеристик аэрозоля на борту НИС осуществлялись с помощью автоматизированного мобильного аэрозольного комплекса (аэрозольная станция) [16], который располагался в лаборатории по левому борту судна. Аэрозольная станция состояла из модифицированного нефелометра углового рассеяния типа ФАН, аэталометра и фотоэлектрического счетчика частиц АЗ-5.

С помощью нефелометра ФАН измерялся коэффициент направленного аэрозольного рассеяния под углом 45° : $\mu(45^\circ)$ ($\text{км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$) на длине волны $0,52$ мкм. В дальнейшем, используя выражения из эмпирической модели атмосферных дымок ИФА РАН, определяли массовую концентрацию субмикронного аэрозоля M_a ($\text{мкг}/\text{м}^3$) для плотности вещества частиц $1,5 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$: $M_a = 2400\mu(45^\circ)$. Прибор был прокалиброван в лабораторных условиях по известной величине молекулярного рассеяния света чистым воздухом и позволял измерять величину коэффициента направленного рассеяния, начиная с уровня $\sim 0,001 \text{ км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$. Отметим, что нефелометр типа ФАН используется для измерения массовой концентрации аэрозоля и другими группами исследователей [17, 18].

Аэталометр (фотометр поглощения) использовался для измерений массовой концентрации микрористаллического углерода M_{BC} ($\text{мкг}/\text{м}^3$) в атмосферном воздухе. Работа прибора основана на непрерывных измерениях диффузного ослабления света слоем аэрозольных частиц в процессе их осаждения на фильтр из прокачиваемого воздуха. При этом величина регистрируемого диффузного ослабления света слоем частиц прямо пропорциональна поверхностной концентрации ВС на фильтре и, следовательно, его массовой концентрации в воздухе. Прибор откалиброван для измерений массовой концентрации ВС с помощью генератора сажевых частиц. Предельная концентрационная чувствительность аэталометра составляет $0,01 \text{ мкг}/\text{м}^3$ при прокачке 30 л воздуха. При необходимости концентра-

ционная чувствительность прибора может быть улучшена за счет увеличения объема прокачиваемого через прибор воздуха.

Фотоэлектрический счетчик частиц типа АЗ-5 использовался для измерений дисперсного состава аэрозоля (метод гранулометрии): счетной концентрации N_a (см^{-3}) и функции распределения частиц по размерам в диапазоне $0,4$ – 10 мкм.

Исследуемый воздух забирался на высоте 4 м от водной поверхности и поступал по воздуховодам длиной 2 – 3 м в измерительные ячейки приборов. С помощью нефелометра и аэталометра анализировались характеристики только субмикронного аэрозоля (размером менее 1 мкм), так как более крупные частицы осаждались в заборных воздуховодах. Для регистрации крупных частиц счетчиком АЗ-5 длина заборного воздуховода была сокращена до $0,5 \text{ м}$.

Вся аппаратура, входящая в состав аэрозольной станции, была модернизирована таким образом, чтобы процесс измерений, контроль и регистрация осуществлялись в автоматическом или операторском режиме с персонального компьютера. Измерения проводились круглосуточно, синхронно для трех приборов с периодичностью 30 мин . Время забора проб аэрозоля, в основном, составляло 10 мин . В компьютер заносились значения измеряемых характеристик, усредненные за время забора пробы.

Согласно методике измерений один раз в сутки производились контроль и, при необходимости, калибровка приборов станции. Для нефелометра использовались измерения по калибровочной призме, а также прокачка кюветы чистым воздухом с измерением суммарного сигнала молекулярного рассеяния и фона измерительной камеры. Калибровка АЗ-5 осуществлялась с помощью внутреннего калибратора. Аэталометр в течение экспедиции дополнительно не калибровался, однако неоднократно производилась проверка «нуля» при заборе воздуха через аэрозольный фильтр.

Более подробное описание приборов, принципов их работы и методик измерений представлено в [16, 19, 20].

В береговых условиях аэрозольные исследования выполнялись на территории Гидрометеорологической станции «Унский маяк» (Летний берег). Расположение района наблюдений отмечено на рис. 1 звездочкой.

Измерения выполнялись с помощью нефелометра типа ФАН и аэталометра (аэрозольная станция), которые аналогичны приборам, входящим в состав судового измерительного комплекта аппаратуры. Наземный измерительный комплект располагался в лаборатории деревянного одноэтажного дома на расстоянии 100 м от береговой черты. Анализируемый аэрозоль поступал в оптические ячейки нефелометра и аэталометра через заборные устройства (воздуховоды), которые были выведены через окно дома наружу и размещены на удалении $2,5 \text{ м}$ от стены дома на высоте 2 м над землей.

Из-за отсутствия на метеостанции стационарной сети электроснабжения электропитание приборов осуществлялось от бензоагрегата АБ-1-230-в.

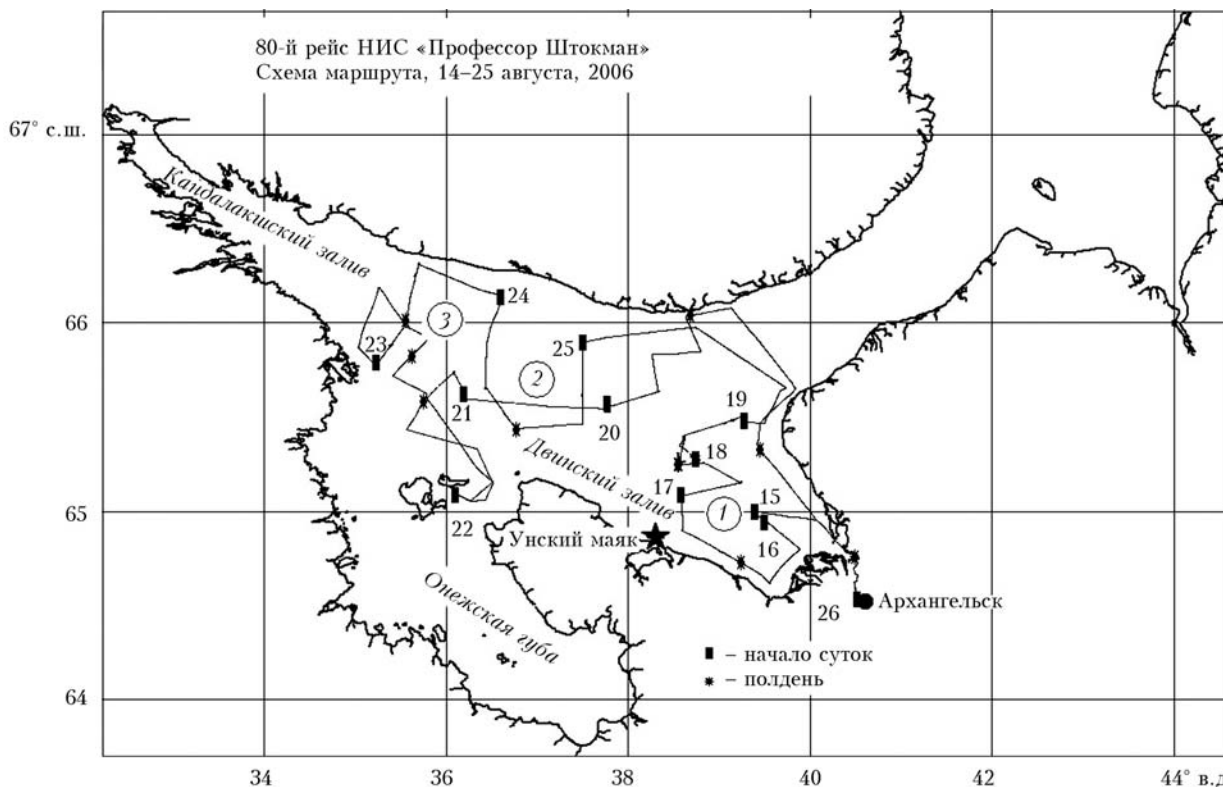


Рис. 1. Карта маршрута рейса (★ – расположение берегового пункта измерений; цифрами обозначены календарные сутки августа 2006 г.)

В связи с этим время непрерывных измерений было сокращено до 10 ч/сут (с 10–11 до 20 ч). Измерения нефелометром и аэталометром проводились в автоматическом режиме с периодичностью 0,5 ч, продолжительность забора проб аэрозоля составляла 15 или 30 мин. Полученные данные усреднялись за время забора проб аэрозоля.

Контроль и при необходимости калибровка приборов станции при измерениях выполнялись ежедневно аналогично процедурам, описанным выше для судового комплекта аппаратуры.

Для повышения достоверности измерений аэрозольных характеристик в судовых и наземных условиях перед началом 80-го рейса НИС «Профессор Штокман» была проведена интеркалибровка нефелометров и аэталометров. Интеркалибровочные измерения, проведенные в Архангельске, представлены на рис. 2

Эти измерения в целом показали, что данные приборов из двух комплектов аппаратуры хорошо коррелируют между собой. В г. Архангельске интеркалибровка выполнялась 9 и 10 августа в течение

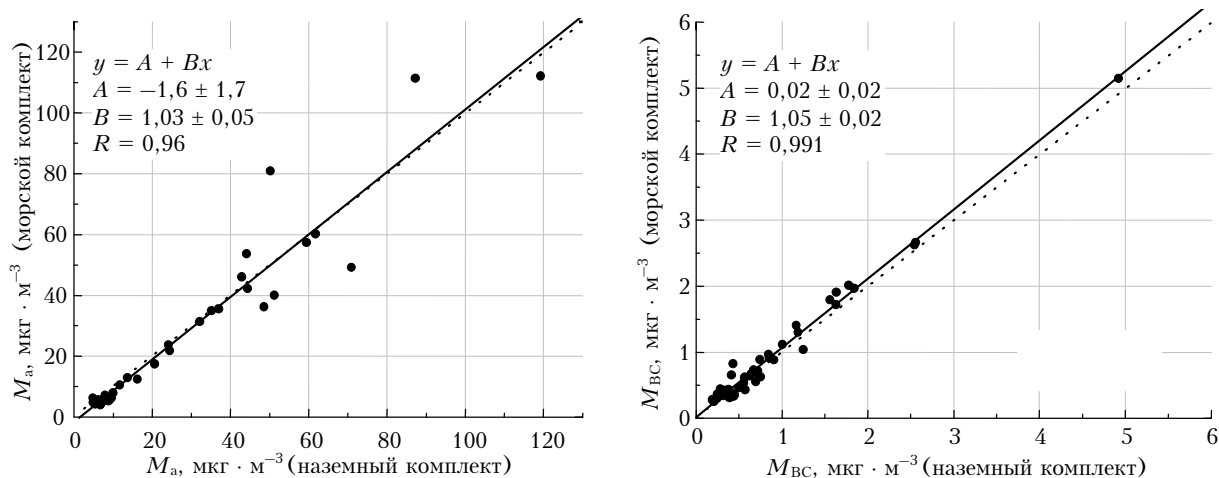


Рис. 2. Корреляция между показаниями нефелометров ФАН (слева) и аэталометров (справа) из наземного и морского комплектов аппаратуры (09.08.2006, г. Архангельск); R – коэффициент корреляции

Средние значения и СКО аэрозольных характеристик в различных районах (Д – Двинский залив; Ц – центральная часть Белого моря; К – Кандалакшский залив; В – рейс в целом)

Характеристика	Среднее				СКО				Минимальное				Максимальное				Количество измерений			
	Д	Ц	К	В	Д	Ц	К	В	Д	Ц	К	В	Д	Ц	К	В	Д	Ц	К	В
M_a , мкг · м ⁻³	7,5	6,6	10,4	8,2	4,2	3,1	0,6	4,2	1,2	1,7	9,4	1,2	16,2	12,6	11,7	24,2	112	120	33	308
M_{BC} , мкг · м ⁻³	0,17	0,04	0,03	0,12	0,13	0,02	0,01	0,13	0,04	0,01	0,015	0,013	0,9	0,1	0,05	0,9	112	99	30	284
N_a , см ⁻³	6,3	5,6	7,0	7,2	3,7	2,3	1,0	5,0	1,2	1,5	5,7	1,2	16,2	11,0	9,2	37,8	99	98	28	267

20 ч на территории научной базы Северо-западного отделения Института океанологии РАН (о. Соломбала).

Отметим, что в период калибровочных экспериментов (см. рис. 2) пределы изменения M_a , M_{BC} превысили общий диапазон вариаций этих характеристик во время 80-го рейса НИС «Профессор Штокман» (табл. 1).

Интеркалибровка подтвердила хорошее согласие между показаниями «морского» и «наземного» комплектов аппаратуры. Сдвиг калибровочной прямой относительно нуля, обусловленный температурным дрейфом фотоприемника в «морском» аэталометре (см. рис. 2), составил небольшое значение – в среднем 0,015 мкг · м⁻³, оно было учтено в дальнейших измерениях массовой концентрации сажи.

Районы судовых измерений

Полный измерительный период за время морской экспедиции составил 12 сут – с 14 по 25 августа 2006 г. Акваторию Белого моря, где проводились исследования, условно можно разделить на три района (см. рис. 1): 1 – Двинский залив (14–18 августа и вторая половина суток 25 августа), 2 – центральная часть Белого моря (20–22 и 24 августа), 3 – Кандалакшский залив (22–24 августа).

Маршрут 80-го рейса НИС «Профессор Штокман» с указанием сроков наблюдения приведен на рис. 1. Сложность маршрута обусловлена необходимостью проведения системных исследований, во время которых судно находилось в дрейфе. В такие периоды аэрозольные измерения были подвержены влиянию локальных источников аэрозоля (выхлопная труба судна, вентиляционные каналы и пр.) и требовали проведения процедуры выбраковки по определенным критериям.

Синоптическая и метеорологическая ситуация во время измерений

Метеорологические условия в период исследований характеризовались данными, приведенными на рис. 3. Общий диапазон изменчивости метеопараметров составил: температура воздуха 5–20 °С; атмосферное давление 754,0–768,5 мм рт. ст.; относительная влажность 60–97%; скорость ветра 0–11 м/с.

Дадим краткую характеристику погодных условий с 13 по 25 августа. По данным Гидрометеорологической станции Унского маяка (рис. 3) и метеостанции на борту НИС, в период одновременных аэрозольных измерений дважды менялись воздушные массы. Отметим, что по тенденциям изменения давления и температуры данные двух метеостанций хорошо согласуются между собой (см. рис. 3, а, б). В первые два дня экспедиции измерения проводились в условиях установившегося арктического антициклона – с невысокой температурой воздуха (до 5 °С), ясной безоблачной погодой, слабым ветром и штилем на море. С 14 по 16 августа происходила постепенная смена арктической воздушной массы на умеренную (антициклон – циклон с юго-запада), сопровождавшаяся снижением давления, повышением температуры воздуха до 14 °С, резким возрастанием 16 августа скорости ветра до 8–9 м/с и волнения моря до 3 баллов (высота волны 0,9 м).

С 17 до 19 августа установился циклон – сплошная облачность, дождливая погода, высокая влажность воздуха, малая скорость ветра и низкий балл волнения моря. Вторая смена воздушной массы произошла 19 августа (циклон – антициклон) и завершилась 20 августа ростом скорости ветра и волнения моря. В период 21–23 августа снова установился антициклон с ясной безоблачной погодой и слабым ветром. С 21 августа до конца экспедиции преобладала солнечная ясная погода со средней температурой 13 °С. Отметим, что 19 августа с 4 до 13 ч в районе береговых измерений сформировался плотный водный туман. По-видимому, этому способствовала повышенная влажность воздуха.

Синоптическая ситуация, наблюдаемая на протяжении экспедиции, хорошо согласуется с картами погоды, взятыми с сайта «Погода и климат» [21]. Их рассмотрение показало, что антициклон, пришедший 21 августа на смену циклона, покрыл всю акваторию Белого моря и продержался до конца экспедиции.

Результаты судовых измерений

Для анализа характеристик аэрозоля была проведена процедура отбраковки исходных данных. Из всего массива аэрозольных данных (около 550 серий) после отбраковки для анализа было оставлено около 300 серий измерений. На рис. 4 показана совместная изменчивость аэрозольных характеристик, очищенных от влияния локальных источников.

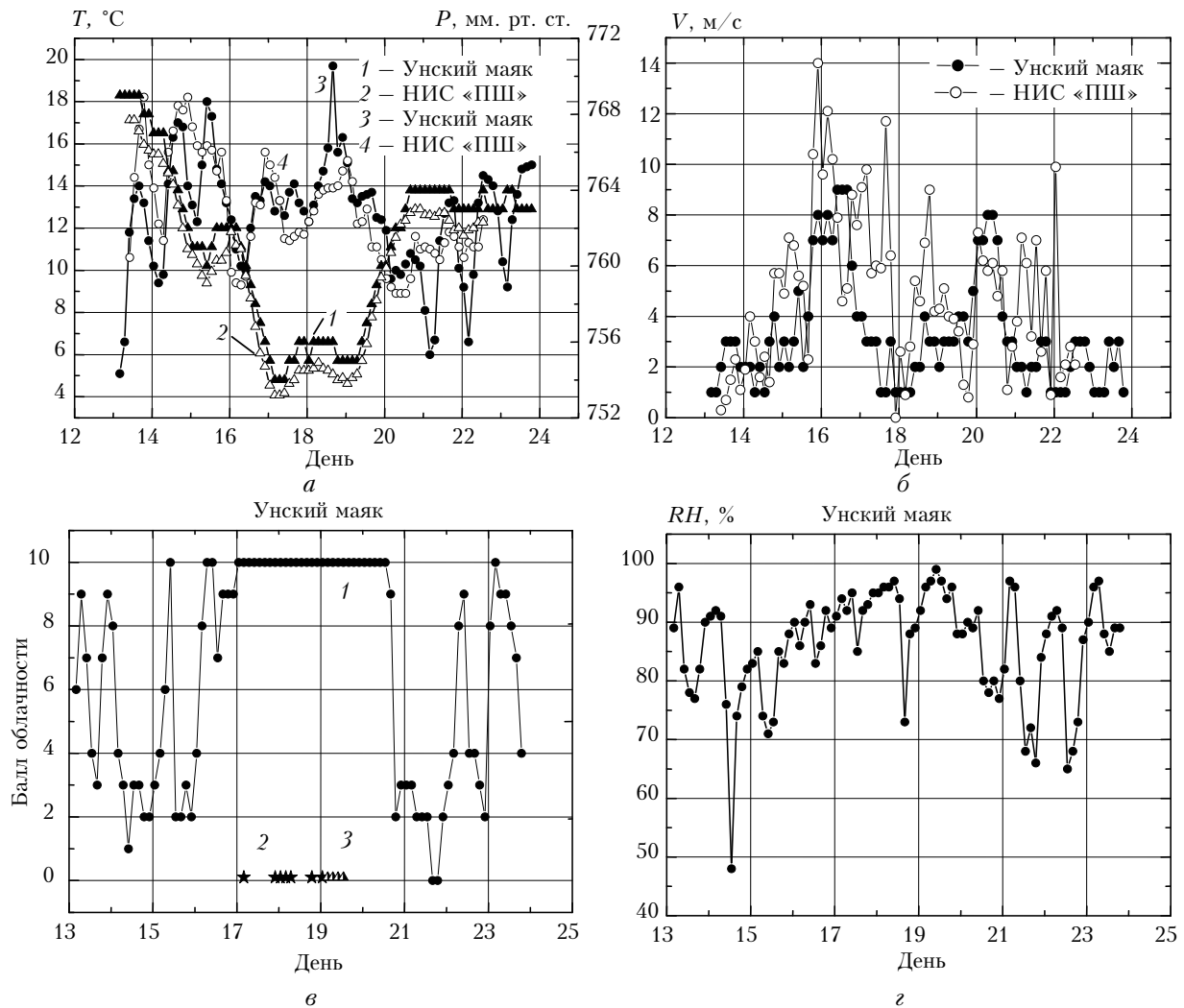


Рис. 3. Временной ход метеопараметров в районе Унского маяка и на борту НИС «Профессор Штокман» (август 2006 г.): а – давления (1, 2) и температуры воздуха (3, 4); б – скорости ветра; в – балла облачности (1), наблюдения дождей (2) и тумана (3); г – относительной влажности воздуха

Из рисунка явно видна корреляция между полученными данными, которая проявляется в их взаимосогласованной короткопериодной изменчивости. Кроме того, видны длительные временные тренды изменчивости, связанные, по-видимому, с изменениями географического положения судна и сменой метеорологических ситуаций в течение экспедиции.

Рассмотрим подробнее поведение аэрозольных характеристик и их связь с воздействием различных геофизических факторов. В первый день экспедиции на графиках временной изменчивости (рис. 4) проявилось влияние антропогенного аэрозоля со стороны промышленно развитого района побережья Двинского залива (г. Архангельск и Северодвинск). Так, 15 августа около 05:30 (во время якорной стоянки судна) был зарегистрирован пик массовой концентрации аэрозоля – $13,3 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$, сажи – $0,26 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ и счетной концентрации аэрозоля – 12 см^{-3} . Еще один пик концентрации наблюдался 19 августа после полуночи – при приближении судна к восточному берегу Белого моря.

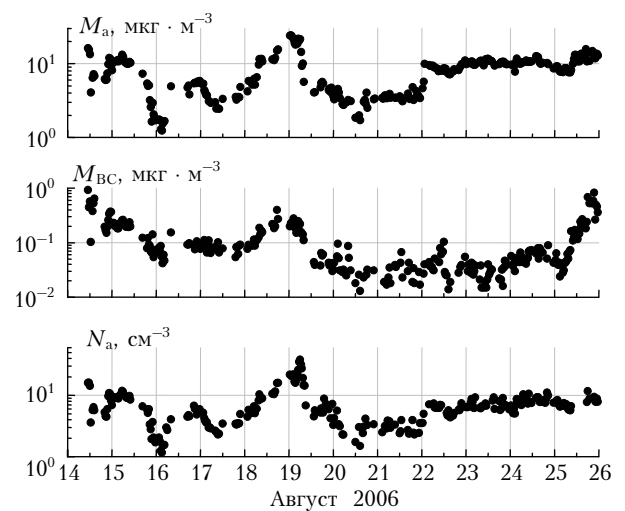


Рис. 4. Временной ход концентраций аэрозоля (M_a , N_a) и сажи (M_{BC}) в приводном слое по данным, полученным с борта НИС «Профессор Штокман»

Массовые концентрации аэрозоля и сажи составили 24 и 0,28 мкг · м⁻³ соответственно, счетная концентрация аэрозоля — 37 см⁻³.

Особо следует отметить ситуацию в период с полудня 19 до полуночи 22 августа, когда приводная атмосфера была наиболее чистой. Максимальные концентрации аэрозоля и сажи, зарегистрированные в это время, составили 5,5 и 0,1 мкг · м⁻³, минимальные — 1,7 и 0,013 мкг · м⁻³ соответственно. Такие малые значения, скорее всего, были обусловлены следующими факторами:

— нахождением судна в центральной части Белого моря, где влияние выносов континентального и антропогенного аэрозоля минимально;

— вымыванием аэрозоля за счет атмосферных осадков, наблюдавшихся в эти дни.

В табл. 1 приведены результаты расчета статистических характеристик M_a , M_{BC} и N_a для трех районов Белого моря и для рейса в целом. Из таблицы следует, что минимальное содержание сажи (в среднем) наблюдалось в Кандалакшском заливе, чуть выше в центральной части Белого моря — 0,03 и 0,04 мкг · м⁻³ соответственно. Массовое содержание сажи в Двинском заливе оказалось в 4–6 раз выше. По массовой и счетной концентрации аэрозоля различия между районами небольшие — в пре-

делах СКО. Тем не менее обратим внимание, что максимальная концентрация аэрозоля — M_a и N_a (в отличие от сажи) наблюдалась в Кандалакшском заливе.

Сопоставление с результатами в других экспедициях показывает (табл. 2), что счетная концентрация аэрозоля мало меняется год от года и среднее значение $N_a = 7,2 \div 7,9$ см⁻³ можно считать типичным для этого периода наблюдений (несколько выше N_a были в 71-м рейсе, но величина отличия меньше СКО). Счетная концентрация аэрозоля в акватории Белого моря примерно в 1,5 раза выше, чем в наиболее чистых районах Мирового океана (см. Южный океан), но ниже, чем в зонах выносов континентального аэрозоля (см. Северный пассат) [22].

Несколько иной результат следует из сравнения массового содержания сажи. Среднее значение M_{BC} в 80-м рейсе примерно в 5 раз меньше, чем наблюдалось в предшествующих экспедициях, и близко к значениям, характерным для удаленных районов океана. Возможно, это было связано с преобладанием арктических антициклонов над акваторией Белого моря во время экспедиции. В целом можно заключить, что влияние антропогенного фактора на атмосферу исследованного района проявляется незначительно.

Таблица 2

Сравнение основных характеристик аэрозоля (средние ± СКО) в различных рейсах

Характеристика	Белое море				19-й рейс НИС «Академик Сергей Вавилов»	
	80-й рейс	71-й рейс	64-й рейс	55-й рейс	Южный океан	Северный пассат
M_a , мкг · м ⁻³	8,2 ± 4,2	9,2 ± 7,9	—	—	—	—
M_{BC} , мкг · м ⁻³	0,12 ± 0,13	0,64 ± 0,5	—	0,55 ± 0,6	0,04 ± 0,02	0,19 ± 0,14
N_a , см ⁻³	7,2 ± 5,0	13,2 ± 9,6	7,7 ± 6	7,9 ± 12	5,1 ± 3,2	8,8 ± 4,6

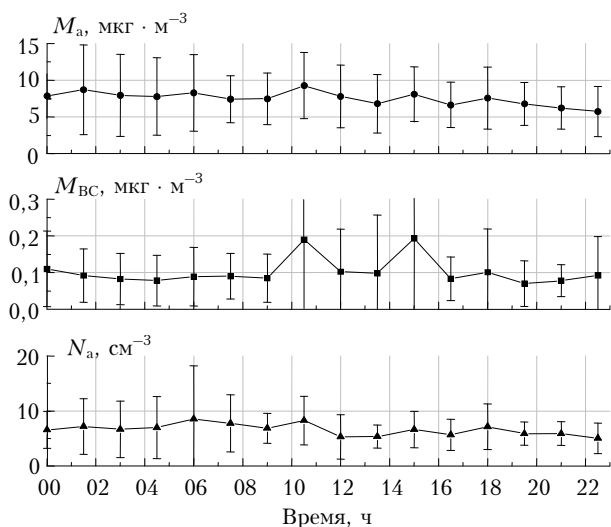


Рис. 5. Суточная изменчивость концентраций аэрозоля (M_a , N_a) и сажи (M_{BC}) в приводном слое

Оценки внутрисуточной изменчивости характеристик аэрозоля, полученные на основе осреднения всего массива данных, показали, что явного суточного хода не наблюдается (рис. 5). Более существенное влияние на вариации аэрозоля оказывают синоптические условия и пространственные неоднородности.

На рис. 6 представлены среднесуточные распределения дифференциальной концентрации аэрозоля (N_i) по размерам частиц, измеренные счетчиком АЗ-5. Приведенные распределения N_i показывают, что спектр размеров аэрозоля в большинстве случаев содержит фракцию мелкодисперсных частиц с модальным радиусом менее 0,2 мкм, среднедисперсную фракцию с модальным радиусом 0,6–0,7 мкм и грубодисперсную ~ 4–5 мкм. В отдельные дни (например, 23 августа) среднедисперсная фракция проявляется слабо. Каких-либо заметных особенностей в поведении функций распределения не выявлено.

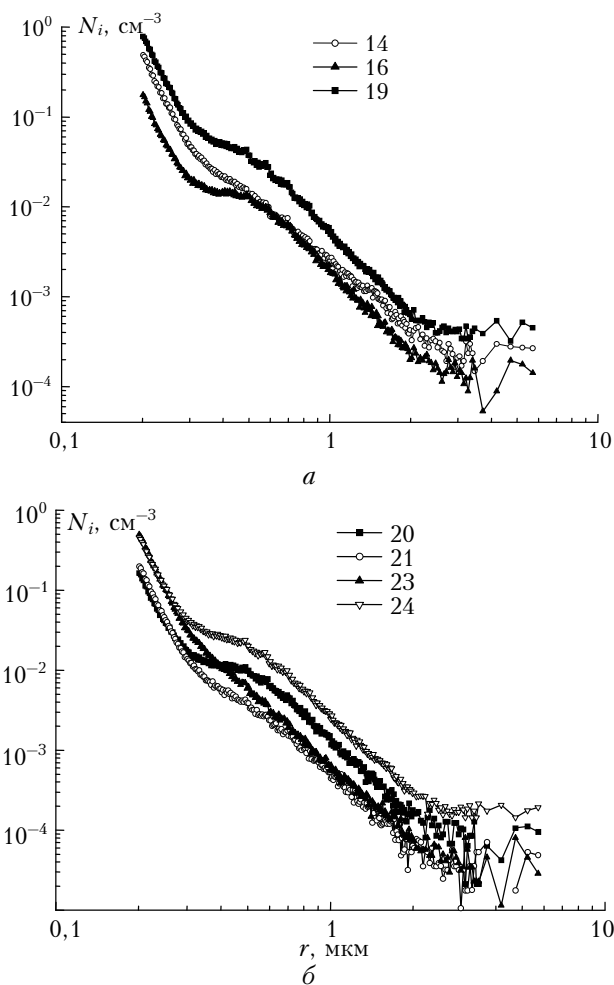


Рис. 6. Среднесуточные распределения счетной концентрации частиц приводного аэрозоля по размерам

Результаты наземных измерений атмосферного аэрозоля в районе Унского маяка

Как уже отмечалось, отличительной особенностью экспедиционных исследований в 2006 г. было проведение измерений характеристик аэрозоля не только с борта судна, но и в береговых условиях — на территории гидрометеорологической станции Унского маяка.

На результаты измерений аэлометра и нефелометра сильное влияние оказывают локальные источники аэрозоля. Поэтому обязательной процедурой является выбраковка данных, отягощенных таким воздействием. Так, в полуденное время 15, 20, 21 и 23 августа при слабом ветре наблюдались эпизоды резкого кратковременного возрастания концентрации аэрозоля (20 мкг/м^3 и выше) и сажи за счет влияния печного отопления. А 17 августа зарегистрированы максимальные за весь период измерений концентрации, обусловленные выбросами бензоагрегата. Кроме вышеперечисленных из исходного массива была исключена часть данных за 18 и 19 августа. Наблюдавшийся 18 августа рост аэрозоль-

ных концентраций (M_a более 20 мкг/м^3) происходил при южном ветре, т.е. со стороны водосбора. Расчет обратной трехсуточной траектории движения воздушной массы по модели NOAA HYSPLIT [23] показал, что в этом случае воздушная масса сначала двигалась к Белому морю с востока и затем, повернув на север, прошла через лесной массив и достигла пункта измерений с южного направления. Отметим, что высокие концентрации аэрозоля 19 августа наблюдались при плотном тумане (дальность видимости 0,2 км). За период с 13 по 23 августа проведено 318 измерений массовой концентрации аэрозоля и 190 измерений массовой концентрации сажи. Выбраковка данных с учетом влияния локальных источников загрязнений (дымы печей и бензоагрегата) составила около 20–30% от полного количества реализаций.

На рис. 7 иллюстрируется временная изменчивость концентраций M_a , M_{BC} , очищенных от влияния локальных источников. Анализ данных показал, что вариации аэрозольных характеристик хорошо скоррелированы и определяются динамикой метеорологических условий. Основные особенности межсуточной изменчивости аэрозольных концентраций тесно связаны с синоптическими процессами и, в первую очередь, со сменой воздушной массы. Кроме того, наличие отдельных экстремумов концентраций можно объяснить сменой направления ветра.

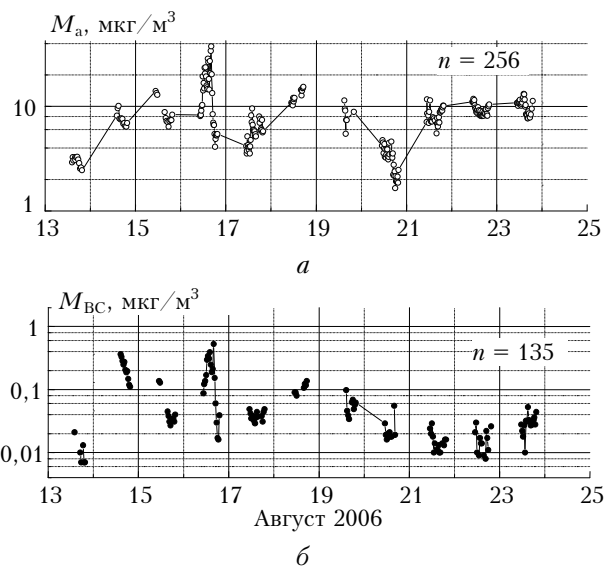


Рис. 7. Временной ход массовой концентрации аэрозоля (а) и сажи (б) в районе Унского маяка (очищенный массив данных); n — количество измерений

Рассмотрим два типа синоптических ситуаций: 1) антициклон (13–15 и 20–23 августа) с вторжением арктического воздуха (северный ветер со стороны моря); 2) циклональный тип погоды (16–19 августа), умеренная воздушная масса, направление ветра преимущественно с континента. Из сравнения характеристик (табл. 3) видно, что концентрации аэрозоля и сажи во второй ситуации более высокие.

Таблица 3

Среднедневные значения, СКО и пределы изменения концентраций аэрозоля и сажи ($\text{мкг} \cdot \text{м}^3$) в условиях антициклона (АЦ), циклона (Ц) и для всего периода измерений (В)

Характеристика	Среднее			СКО			Минимальное			Максимальное			Количество измерений		
	АЦ	Ц	В	АЦ	Ц	В	АЦ	Ц	В	АЦ	Ц	В	АЦ	Ц	В
M_a	7,3	8,5	7,8	3,0	3,6	3,3	1,7	3,5	1,7	13,1	16,7	16,7	154	89	243
M_{BC}	0,052	0,095	0,072	0,082	0,10	0,094	0,008	0,016	0,008	0,36	0,53	0,53	70	60	130

Примечание. При статистических оценках M_a исключена часть данных за 16 августа со значениями более $20 \text{ мкг}/\text{м}^3$, обусловленных антропогенным воздействием.

Таким образом, в летний период арктический воздух по содержанию аэрозоля и сажи является более чистым в сравнении с «умеренным», что согласуется с известными сезонными особенностями аэрозольного наполнения арктических воздушных масс.

Наименьшие значения концентраций аэрозоля и сажи были зафиксированы 13 и 20 августа при устойчивом ветре с моря ($1,65$ и $0,008 \text{ мкг}/\text{м}^3$), а максимальные – 16 августа при ветре с континента ($16,7$ и $0,53 \text{ мкг}/\text{м}^3$). Таким образом, условия наиболее чистой атмосферы зафиксированы нами при установившихся в районе измерений арктических антициклонах. Отметим, что 16 августа были зарегистрированы даже более высокие значения концентрации аэрозоля и сажи – $37,5$ и $0,60 \text{ мкг}/\text{м}^3$. Этот случай рассматривается нами как ярко выраженный эпизод антропогенного воздействия – поступления аэрозоля в район измерений с восточного направления (со стороны гг. Архангельска и Северодвинска), что согласуется с расчетом обратной трехсуточной траектории движения воздушной массы по модели NOAA HYSPLIT [23]. Обратим также внимание на более низкий, чем в прошлых экспедициях, средний уровень концентрации сажи – менее $0,1 \text{ мкг}/\text{м}^3$.

Предварительный анализ показал, что из-за ограниченного времени суточных измерений, часто воздействия локальных источников аэрозоля и малой продолжительности экспедиции выявления особенностей дневного хода исследуемых характеристик представляется сложным. Тем не менее в данных, полученных 21–23 августа в условиях антициклона, прослеживается полуденный минимум концентраций аэрозоля и сажи, обычно наблюдаемый в континентальных условиях в суточных ходах аэрозольных характеристик за счет конвективного выноса аэрозоля в верхние слои воздуха.

Сопоставление результатов измерений характеристик атмосферного аэрозоля с борта судна и в береговых условиях

Анализ корабельных и береговых измерений аэрозольных характеристик был проведен как для средних значений, так и для одновременных еди-

ничных замеров концентраций. Сравнение средних значений концентраций аэрозоля и сажи (см. табл. 1 и 3) показывает, что полученные характеристики соответствуют фоновым значениям, хорошо согласуются между собой, а отличие находится в пределах СКО. Для полного периода экспедиции массовая концентрация аэрозоля в береговом районе составила ($7,8 \pm 3,3$), а на корабле ($8,2 \pm 4,2$) $\text{мкг}/\text{м}^3$. Наилучшее согласие средних береговых данных наблюдается при их сравнении с корабельными измерениями в Двинском заливе – ($7,5 \pm 4,2$) $\text{мкг}/\text{м}^3$. Близкими являются и соответствующие значения для минимальных [$(1,7 \pm 1,2) \text{ мкг}/\text{м}^3$] и для максимальных [$(16,7 \pm 16,2) \text{ мкг}/\text{м}^3$] значений концентраций аэрозоля.

Средние значения концентрации сажи в береговых условиях – $M_{BC} = (0,072 \pm 0,094) \text{ мкг}/\text{м}^3$, несколько меньше корабельных данных – ($0,12 \pm 0,13$) $\text{мкг}/\text{м}^3$. Средняя концентрация сажи в судовых измерениях лучше согласуется с данными береговых наблюдений в период циклона – $M_{BC} = (0,1 \pm 0,1) \text{ мкг}/\text{м}^3$. Хорошее согласие наблюдается также при сравнении результатов береговых измерений при ветре с моря – $M_{BC} = (0,05 \pm 0,08) \text{ мкг}/\text{м}^3$, и корабельных данных в центральной, наиболее «чистой», зоне Белого моря – $M_{BC} = (0,04 \pm 0,02) \text{ мкг}/\text{м}^3$.

На рис. 8 иллюстрируется временной ход концентраций аэрозоля и сажи по данным одновременных двухточечных измерений за весь период экспедиции.

Видно согласие качественных и количественных особенностей изменчивости аэрозольных характеристик в наземных и корабельных данных. Наиболее отчетливо это прослеживается в межсуточной изменчивости, обусловленной изменением синоптических условий. Так, 18–19 августа на зависимостях наблюдается максимум концентраций. Общей особенностью является и наличие минимума концентраций 20–23 августа в условиях антициклона (прихода арктического воздуха). Некоторые количественные отличия в концентрациях аэрозоля и сажи следует объяснять влиянием пространственных неоднородностей содержания аэрозоля в двух районах, обусловленных различием траекторий и неполной синхронностью переносов воздушных масс в районы наблюдений.

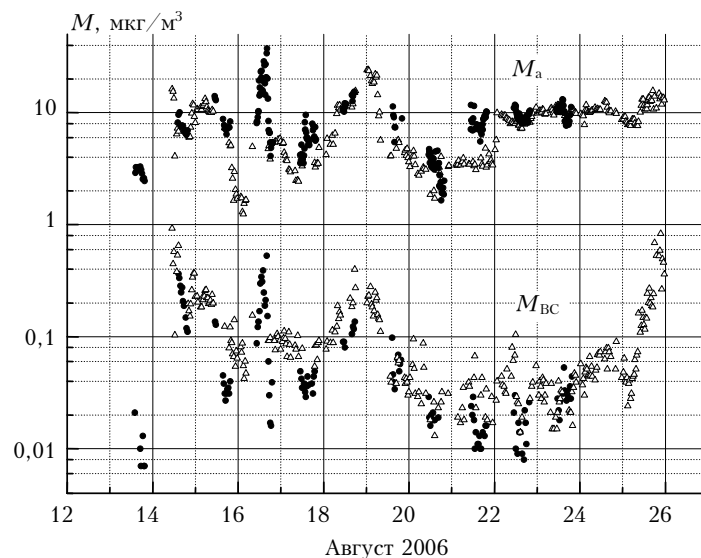


Рис. 8. Сравнение временных ходов массовых концентраций аэрозоля M_a и сажи M_{bc} , измеренных с борта судна (светлые треугольники) и в районе Унского маяка (черные точки)

Таким образом, полученные результаты показали, что за период 80-го рейса НИС «Профессор Штокман» по содержанию аэрозоля и сажи оба пункта наблюдений (НИС и Унский маяк) могут быть отнесены к фоновым и различие характеристик невелико. Наиболее низкие концентрации аэрозоля и сажи в корабельных и наземных измерениях были зарегистрированы в условиях арктической воздушной массы (преимущественный ветер северного направления) — 1,2–1,7 и 0,01 мкг/м³, что сопоставимо с данными в удаленных районах океана. Из согласованной межсуточной изменчивости аэрозольных характеристик следует, что именно синоптические процессы смены арктической и умеренной воздушных масс, охватывающие оба района наблюдений, являются основным геофизическим фактором, регулирующим динамику аэрозольных характеристик. Роль других метеорологических факторов (осадки, облачность и др.) была менее значительна.

Заключение

Выполнен цикл исследований оптических и микрофизических характеристик аэрозоля в районе Белого моря — с борта НИС «Профессор Штокман», и одновременно в береговой зоне — на территории Унского маяка. За период экспедиции средние значения концентрации аэрозоля составили $(7,8 \pm 3,3)$ и $(8,2 \pm 4,2)$ мкг/м³ для наземных и для корабельных измерений соответственно. Более высокая концентрация аэрозолей над морем, видимо, связана с поступлением в атмосферу частиц морской соли. Соответствующие значения для концентрации сажи были равны $(0,072 \pm 0,094)$ и $(0,12 \pm 0,13)$ мкг/м³. Счетная концентрация частиц в морских измерениях составила $(7,2 \pm 5,0)$ см⁻³. Районы центральной акватории Белого моря и Унского маяка по уровню содержания аэрозоля и сажи в период экспедиции относятся к фоновым.

В условиях антициклона 20–23 августа при арктической воздушной массе в корабельных и наземных измерениях зафиксированы условия высокой аэрозольной чистоты атмосферы с предельно низкими значениями концентраций аэрозоля и сажи — 1,2–1,7 и 0,01 мкг/м³ соответственно, сопоставимыми с их значениями, наблюдаемыми в открытых акваториях океана.

По результатам сравнения одновременных корабельных и наземных измерений концентраций аэрозоля и сажи установлена близость их межсуточной изменчивости, свидетельствующая о том, что особенности временных вариаций, по крайней мере в период экспедиции, имеют региональный масштаб и в основном определяются динамикой синоптических процессов смены воздушных масс.

Авторы выражают благодарность экипажу НИС «Профессор Штокман», С.Н. Красильникову и сотрудникам гидрометеорологической станции «Унский маяк», а также В.Б. Коробову за помощь в организации и проведении экспериментальных аэрозольных исследований в акватории Белого моря и в районе Унского маяка.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 06–05–64393 и 07–05–00691), Президиума РАН (программа № 17 фундаментальных исследований) и Отделения наук о Земле РАН (проект «Наночастицы во внешних и внутренних сферах Земли»).

1. *Rahn K.* Atmospheric, riverine and oceanic sources of seven trace constituents to the Arctic Ocean // *Atmos. Environ.* 1981. V. 15. N 8. P. 1507–1516.
2. *Barrie L.A., Barrie M.J.* Chemical components of lower tropospheric aerosols in the high Arctic: Six years of observations // *J. Atmos. Chem.* 1990. V. 11. N 3. P. 211–226.
3. *Bigg K.E., Leck C.* Properties of the aerosol over the central Arctic Ocean // *J. Geophys. Res. D.* 2001. V. 106. N 23. P. 32101–32109.

4. Slater J.F., Currie L.A., Dibb J.E., Benner B.A. Distinguishing the relative contribution of fossil fuel and biomass combustion aerosols deposited at Summit, Greenland through isotopic and molecular characterization of insoluble carbon // *Atmos. Environ.* 2002. V. 36. N 26. P. 4463–4477.
5. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А., Смирнов В.В., Серова В.В., Штайн Р. Аэрозоли Арктики – результаты десятилетних исследований // *Оптика атмосфер. и океана.* 2000. Т. 13. № 6–7. С. 551–576.
6. Vinogradova A.A. Anthropogenic pollutants in the Russian Arctic atmosphere: sources and sinks in spring and summer // *Atmos. Environ.* 2000. V. 34. N 29–30. P. 5151–5160.
7. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Очищение арктической атмосферы путем выноса загрязнений в средние широты // *Оптика атмосфер. и океана.* 2001. Т. 14. № 6–7. С. 505–509.
8. Shevchenko V.P. The influence of aerosols on the oceanic sedimentation and environmental conditions in the Arctic // *Berichte zur Polar- und Meeresforschung.* 2003. N 464. 149 p.
9. Шевченко В.П. Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. М.: Наука, 2006. 226 с.
10. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.
11. Лисицын А.П. Новые возможности четырехмерной океанологии и мониторинга второго поколения – опыт двухлетних исследований на Белом море // *Актуальные проблемы океанологии* / Гл. ред. Н.П. Лаверов. М.: Наука, 2003. С. 503–556.
12. Lisitzin A.P., Shevchenko V.P., Gordeev V.V. Multidisciplinary studies in the White Sea in the frame of the LOIRA project. Arctic Coastal Dynamics. Report of the 4th International Workshop. VNIIOkeangeologia, St. Petersburg (Russia), 10–13 November 2003 // *Berichte zur Polar- und Meeresforschung.* 2004. N 482. P. 124–130.
13. Польшкин В.В., Голобокова Л.П., Погодаева Т.В., Козлов В.С., Коробов В.Б., Лисицын А.П., Панченко М.В., Пескова М.А., Ходжер Т.В., Шевченко В.П. Состав аэрозолей приповерхностного слоя атмосферы над Белым морем во второй половине августа 2003 и 2004 гг. // *Фундаментальные исследования океанов и морей* / Гл. ред. Н.П. Лаверов. Кн. 2. М.: Наука, 2006. С. 413–439.
14. Kozlov V.S., Panchenko M.V., Pol'kin V.V., Lisitzin A.P., Shevchenko V.P. Investigations of aerosol and black carbon concentrations in the near-water air layer of the White Sea during the 71-st cruise of the RV «Professor Shtokman» (August 2005) // *Abstracts of Sixteenth Int. Conf. on Marine Geology.* November 14–18, 2005, Moscow, Russia. Moscow: GEOS. P. 33–34.
15. Козлов В.С., Тихомиров А.Б., Панченко М.В., Польшкин В.В., Лисицын А.П., Шевченко В.П. Одновременные корабельные и прибрежные измерения концентраций аэрозоля и сажи в атмосфере Белого моря в августе 2006 г. // XIII Рабочая группа «Аэрозоли Сибири»: Тезисы докл. Томск: Изд-е ИОА СО РАН, 2006. С. 12.
16. Козлов В.С., Панченко М.В., Польшкин В.В., Шмаргунов В.П. Мобильный аппаратный комплекс для оперативных измерений концентраций аэрозоля и сажи в приземном слое воздуха // XIII Рабочая группа «Аэрозоли Сибири»: Тезисы докл. Томск: Изд-е ИОА СО РАН, 2006. С. 58.
17. Ван Ген Чен, Гречко Е.И., Емиленко А.С., Конейкин В.М., Фокеева Е.В. Результаты совместных измерений окиси углерода в толще атмосферы и субмикронного аэрозоля в приземном слое в Пекине // *Оптика атмосфер. и океана.* 2003. Т. 16. № 1. С. 45–51.
18. Бизин М.А., Куценогий П.К., Куценогий К.П., Макаров В.И. Автоматизация нефелометрических измерений массовой концентрации субмикронных атмосферных аэрозолей // *Оптика атмосфер. и океана.* 2007. Т. 20. № 3. С. 291–296.
19. Козлов В.С., Шмаргунов В.П., Польшкин В.В. Спектрофотометры для исследования характеристик поглощения света аэрозольными частицами // *Приборы и техн. эксперим.* 2008. № 5. С. 155–157.
20. Шмаргунов В.П., Польшкин В.В. Аэрозольный счетчик на базе АЗ-5 // *Приборы и техн. эксперим.* 2007. № 2. С. 165.
21. <http://pogoda.ru.net/maps.htm>
22. Pol'kin V.V., Panchenko M.V., Kozlov V.S. Microphysical investigations of near-water aerosol of Atlantic in 19-th cruise of the research vessel «AKADEMIK SERGEY VAVILOV» // XII Joint International Symposium «Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics». Tomsk: IAO SB RAS, 2005. P. 158–159.
23. <http://www.ready.noaa.gov/ready/hysplit4.html>

Kozlov V.S., Tikhomirov A.B., Panchenko M.V., Shmargunov V.P., Pol'kin V.V., Sakerin S.M., Lisitzin A.P., Shevchenko V.P. Optical and microphysical parameters of aerosol in the near-water atmosphere of the White Sea as assessed from the data of simultaneous shipborne and coast-based measurements in August 2006.

Simultaneous measurements of optical and microphysical parameters of near-water aerosol were performed over White Sea in August 2006 during 80-th cruise of RV «Professor Shtokman» from onboard the vessel and in the coastal zone (on the territory of Unskii beacon, southern coast of Dvina Bay). Spatial-temporal variability of the concentrations of aerosol and soot in the marine atmosphere are studied, and the geophysical factors determining this variability are analyzed. The conditions of extremely low aerosol content in the atmosphere with the concentrations of aerosol and soot $1.2\text{--}1.7\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $0.01\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively, were observed both in shipborne and coast-based measurements on August 20–23 in anticyclonic conditions in Arctic air mass. Such values are comparable with the values observed in open ocean areas. The regions of central area of White Sea, Kandalaksha Bay and Unskii beacon can be considered as background during the period of the experiment according to the contents of aerosol and soot. The results of comparison of simultaneous shipborne and coast-based measurements of the concentrations of aerosol and soot revealed similarity of their inter-day variability, which is evidence of the fact that the peculiarities of temporal variations, at least during the experiment, have regional scale and are principally determined by the dynamics of synoptic processes of the change of air masses.