

**ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АЭРОЗОЛЬНОГО
И ГАЗОВОГО СОСТАВА АТМОСФЕРЫ НА МАРШРУТАХ
НЭС «АКАДЕМИК ФЕДОРОВ» И «АКАДЕМИК ТРЁШНИКОВ»
В ПЕРИОД 59-й РАЭ (НОЯБРЬ 2013 – МАЙ 2014 гг.)**

*канд. геогр. наук В.Ф. РАДИОНОВ¹, канд. физ.-мат. наук Д.М.КАБАНОВ²,
канд. физ.-мат. наук В.В. ПОЛЬКИН², мл. науч. сотр. Д.Е. САВКИН²,
д-р физ.-мат. наук С.М. САКЕРИН², канд. физ.-мат. наук Е.Е. СИБИР¹*

¹ — ГИЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, e-mail: vradion@aari.ru, sibrus@aari.ru

² — ФГБУН Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, e-mail: sms@iao.ru

Обсуждаются результаты измерений аэрозольного и газового состава атмосферы, выполненных с борта НЭС «Академик Федоров» и «Академик Трёшников» в 59-й РАЭ. Для отдельных широтных зон Атлантического и Южного океанов представлены средние характеристики спектральной аэрозольной оптической толщины атмосферы, концентраций аэрозоля и «сажи» в приводном слое, общего содержания озона и концентраций некоторых малых газовых составляющих атмосферы. Проведено сопоставление результатов, полученных на прямом и обратном маршруте НЭС «Академик Трёшников», с данными предшествующих экспедиций.

Ключевые слова: аэрозоль, аэрозольная оптическая толщина, малые газовые примеси, пространственное распределение.

ВВЕДЕНИЕ

Измерения параметров аэрозольной составляющей атмосферы в различных акваториях Атлантического и Южного океанов проводились в 1970–1980-е гг. в ходе экспериментов ТРОПЭКС-72 и АТЭП-74 и в рейсах научно-исследовательских судов Гидрометслужбы, включая наблюдения по маршрутам следования из Ленинграда в Антарктиду и обратно. Вблизи Антарктиды в акватории Южного океана наблюдения выполнялись в 1981/82 и 1986/87 гг. Систематизация и анализ данных этих многолетних наблюдений и их обобщение детально представлены в монографии О.Д. Бартеневой с коллегами (Бартенева и др., 1991). В 2004 г. были возобновлены регулярные измерения аэрозольно-оптических характеристик атмосферы по маршрутам следования научно-экспедиционных судов ААНИИ из Санкт-Петербурга в Антарктиду и обратно. В настоящее время они проводятся в рамках реализации программы морских аэрозольных наблюдений глобальной сети AERONET (The Maritime Aerosol Network (MAN) component of AERONET) (Smirnov et al., 2009). Попутно выполняются также измерения микрофизических параметров приводного аэрозоля. В 2014 г. (59-я РАЭ) обычная программа попутных судовых наблюдений, включающая наблюдения аэрозольной составляющей атмосферы и общего содержания озона, была дополнена измерениями концентраций некоторых малых газовых составляющих атмосферы в приводном слое.

ОПИСАНИЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Наблюдения выполнялись на научно-экспедиционных судах (НЭС) «Академик Федоров» и «Академик Трёшников» в акваториях Атлантического и Южного океанов в период сезонных работ 59-й РАЭ. В рейсе НЭС «Академик Федоров» (5 ноября 2013 г. – 16 мая 2014 г.) проводились измерения общего содержания озона (ОСО) фильтровым озонметром М-124 (Методические..., 1981), спектральной аэрозольной оптической толщины (АОТ) и влагосодержания атмосферы портативными солнечными фотометрами SPM и Microtops II. В рейсе НЭС «Академик Трёшников» (1 февраля – 9 июня 2014 г.) измерительный комплекс, кроме солнечных фотометров, включал аэрозольную станцию в составе аэталометра и счетчика частиц для определения дисперсного состава частиц, массовых концентраций аэрозоля и поглощающего вещества («сажи») в субмикронном аэрозоле; газоанализаторы для измерений в приземном слое массовых концентраций малых газовых составляющих (МГС) — CO, NO, NO₂, SO₂ и O₃.

Описания солнечного фотометра SPM, аэрозольной станции и методик измерений представлены во многих публикациях (Сакерин и др., 2012а, 2012б; Козлов и др., 2008; Kozlov et al., 2014; Счетчик..., 2010; Польшин и др., 2013). Перечень измеряемых аэрозольным комплексом и анализируемых характеристик приведен в табл. 1.

Фотометрические наблюдения проводились сериями по 5–10 единичных замеров ежечасно в ситуациях, когда Солнце не было закрыто облачностью. По результатам измерений рассчитывались среднечасовые и средние за день значения АОТ. За период 59-й РАЭ получено следующее количество данных (серий/часов/дней измерений): на НЭС «Академик Федоров» (13 ноября 2013 г. – 28 февраля 2014 г.) — 597/171/33; на НЭС «Академик Трёшников» (12 февраля – 6 июня 2014 г.) — 428/192/38; в обсерватории Мирный (5 ноября 2013 г. – 29 марта 2014 г.) — 612/413/71.

Аэрозольная станция на НЭС «Академик Трёшников» располагалась в контейнере-лаборатории № 4 по правому борту. Забор воздуха осуществлялся на максимально возможном расстоянии от выхлопной трубы и вентиляционных каналов (~15 м), на высоте около 12 м от водной поверхности. Измерения велись круглосуточно с периодичностью 1 час, продолжительность отдельных серий — 10 мин. В соответствии с методикой измерений один раз в сутки осуществлялся контроль и, при необходимости, калибровка приборов. В период с 5 февраля по 28 мая 2014 г. (98 дней) проведено 2394 серии измерений аэрозольных параметров. Управление аэрозольной станцией и регистрация данных измерений счетчика частиц и аэталометра осуществлялись в автоматическом или операторском режиме с ноутбука.

Таблица 1

Приборы в составе аэрозольного комплекса и определяемые характеристики	
Наименование прибора	Изменяемые и рассчитываемые характеристики
Солнечный фотометр SPM	АОТ на длинах волн: 0,34; 0,38; 0,44; 0,5; 0,55; 0,67; 0,78; 0,87; 0,94; 1,04; 1,55; 2,14 мкм. Параметры Ангстрема α и β , грубодисперсная и мелкодисперсная компоненты АОТ. Влагосодержание атмосферы W , г/см ²
Аэталометр (Kozlov et al., 2014)	Массовая концентрация «сажи» M_{BC} (мкг·м ⁻³), чувствительность 10 нг·м ⁻³
Фотоэлектрический счетчик частиц АЗ-10 (Счетчик..., 2010)	Массовая M_A (мкг·м ⁻³) и счетная N_A (см ⁻¹) концентрации частиц аэрозоля в 6 диапазонах диаметров от 0,3 до 10 мкм: 0,3–0,4; 0,4–0,5; 0,5–1,0; 1,0–2,0; 2,0–5,0; 5,0–10 мкм. Допустимое отклонение $\pm 30\%$

Таблица 2

Технические характеристики газоанализаторов

Модель газоанализатора	3.02 П-А	P-310A	C-310A	K-100
Анализируемый газ	O ₃	NO и NO ₂	SO ₂	CO
Диапазон концентраций, мг/м ³	0,003–0,5	0,008–1	0,005–2	3–50
Основная погрешность, %	20	25	25	20
Частота измерений, с	15	120	120	30

Для измерения концентраций МГС использовались четыре газоанализатора производства ЗАО «ОПТЭК» (табл. 2), имеющих пороги обнаружения на уровне фоновых концентраций исследуемых газов. Три газоанализатора — хемилюминесцентные (измерение концентраций O₃, SO₂, NO и NO₂) и один электрохимический (измерение CO). Перед экспедицией все приборы были поверены и откалиброваны.

Концентрации МГС измерялись в непрерывном автоматическом режиме круглосуточно с 4 февраля по 8 июня 2014 г. За время экспедиции массив данных для CO, NO, NO₂ и SO₂ составил 114 дней измерений, для O₃ — 109 дней. В дальнейшем анализировались значения концентраций, осредненные за 15 минут. На качестве данных эпизодически сказывалось влияние судна, в первую очередь попадание в измерительный тракт выбросов судовых двигателей. Случаи таких локальных воздействий были исключены из рассмотрения при анализе данных.

АОТ АТМОСФЕРЫ

Несмотря на различие сроков выполнения рейсов НЭС «Академик Федоров» и «Академик Трёшников», распределение величин АОТ над Атлантикой по данным наблюдений на обоих судах при движении и к Антарктиде, и обратно в целом совпадали. На маршруте вблизи Европы среднее значение АОТ на длине волны 0,5 мкм $\tau_{0,5}^a$ составило 0,1. Максимальные замутнения атмосферы наблюдались в зоне выносов пылевого аэрозоля из Сахары. Среднее значение $\tau_{0,5}^a$, рассчитанное для широтной зоны 0–20° с.ш., составило 0,39. В меньшей степени влияние сахарской пыли проявилось вблизи Канарских островов (20–35° с.ш.) — среднее $\tau_{0,5}^a = 0,14$. В атмосфере Южной Атлантики прослеживалось уменьшение АОТ от экватора ($\tau_{0,5}^a \approx 0,15$) к Антарктиде ($\tau_{0,5}^a \approx 0,03$). Эти данные хорошо соответствуют ранее описанному пространственному распределению аэрозольной составляющей атмосферы над Атлантикой (Бартенева и др., 1991; Sakerin et al., 2007; 2008; Сакерин и др., 2013).

По результатам измерений оценивались величины двух составляющих АОТ, характеризующих ослабление солнечной радиации грубодисперсным (τ^c) и мелкодисперсным ($\tau_{0,5}^f$) аэрозолем. Для более детального описания пространственного распределения АОТ весь маршрут был разделен на четыре широтные зоны с условными названиями: «Европа» — участок маршрута, находящийся в зоне выносов аэрозоля со стороны Европы (30–55° с.ш.), «Северный тропик» (0–30° с.ш.), «Южный тропик» (0–30° ю.ш.), «Антарктика» (> 50° ю.ш.). Средние характеристики АОТ атмосферы в указанных зонах представлены на рис. 1 и в табл. 3.

Сравнение результатов измерений АОТ в этих зонах с данными предшествующих рейсов в 2004 и 2009–2013 гг. показало, что в районах «Европа» и «Антарктика» средние значения АОТ (в том числе, τ^c и $\tau_{0,5}^f$), полученные в 59-й РАЭ, несколько меньше их средних многолетних значений. В районах «Северный тропик» и «Юж-

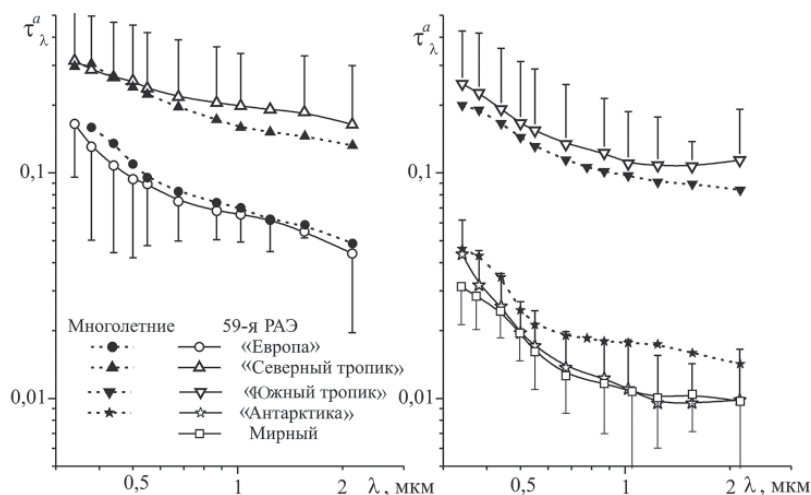


Рис. 1. Средние спектральные зависимости АОТ атмосферы в четырех широтных зонах, полученные в 59-й РАЭ, в сопоставлении со средними многолетними значениями.

Таблица 3

Средние (\pm СКО) характеристики АОТ в четырех широтных зонах, полученные в 59-й РАЭ, и их средние многолетние значения за период 2004 и 2009–2013 гг. (в скобках)

АОТ	«Европа»	«Северный тропик»	«Южный тропик»	«Антарктика»
$\tau_{0,38}^a$	$0,131 \pm 0,080$ (0,159)	$0,315 \pm 0,219$ (0,305)	$0,226 \pm 0,191$ (0,190)	$0,032 \pm 0,013$ (0,043)
$\tau_{0,5}^a$	$0,094 \pm 0,052$ (0,110)	$0,266 \pm 0,201$ (0,240)	$0,166 \pm 0,146$ (0,144)	$0,020 \pm 0,007$ (0,025)
$\tau_{2,14}^a$	$0,044 \pm 0,024$ (0,049)	$0,186 \pm 0,145$ (0,132)	$0,114 \pm 0,078$ (0,084)	$0,010 \pm 0,007$ (0,014)
α	$0,60 \pm 0,56$ (0,93)	$0,46 \pm 0,25$ (0,73)	$0,61 \pm 0,29$ (0,72)	$0,95 \pm 0,75$ (1,23)
β	$0,061 \pm 0,016$ (0,063)	$0,205 \pm 0,162$ (0,158)	$0,108 \pm 0,081$ (0,088)	$0,011 \pm 0,006$ (0,013)
τ^c	$0,041 \pm 0,023$ (0,049)	$0,164 \pm 0,135$ (0,13)	$0,095 \pm 0,066$ (0,076)	$0,007 \pm 0,005$ (0,011)
τ^f	$0,052 \pm 0,058$ (0,061)	$0,102 \pm 0,075$ (0,110)	$0,071 \pm 0,088$ (0,078)	$0,012 \pm 0,005$ (0,013)

ный тропик» они больше. Вместе с тем можно говорить об устойчивости от года к году пространственного распределения аэрозольного замутнения над Атлантикой на протяжении по крайней мере последних 10 лет, поскольку величина различий не превышает среднеквадратические отклонения.

Сравнение в выделенных зонах показало хорошо выраженное и статистически значимое различие всех характеристик АОТ. По величине аэрозольного замутнения районы распределены в следующей последовательности: «Северный тропик» — «Южный тропик» — «Европа» — «Антарктика». Максимальные значения спектральных АОТ и компонент τ^c , $\tau_{0,5}^f$ между зонами «Северного тропика» и «Антарктики» отличаются на порядок.

Для оценки вклада грубо- и мелкодисперсного аэрозоля в ослабление радиации в разных районах Атлантики были рассмотрены широтные распределения мелкодисперсной компоненты $\tau_{0,5}^f$ и разности мелко- и грубодисперсной составляющих АОТ ($\tau_{0,5}^f - \tau^c$). Результаты представлены на рис. 2. Из него видно, что самые большие значения $\tau_{0,5}^f$ наблюдаются в зоне 10° ю.ш – 25° с.ш. и в Северной Атлантике.

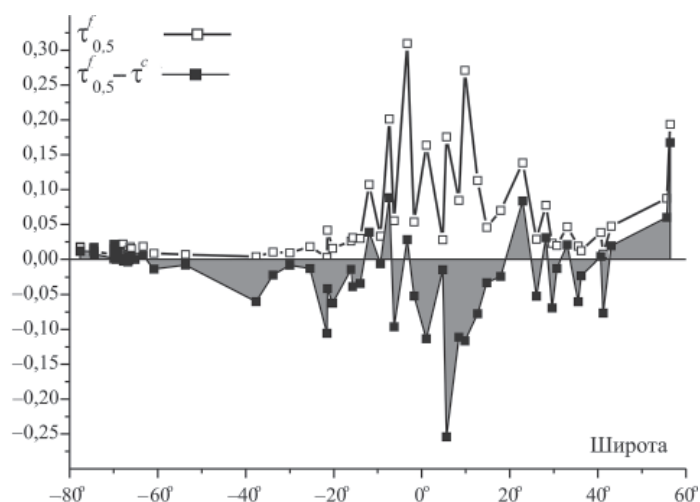


Рис. 2. Широтное распределение величин $\tau_{0,5}^f$ и $(\tau_{0,5}^f - \tau^c)$ в период сезонных работ 59-й РАЭ.

На большей части маршрута (кроме умеренных широт Северного полушария) преобладает вклад грубодисперсного аэрозоля в АОТ (заштрихованная область на рис. 2). Наиболее явно это проявляется в зоне северного пассата, где высокие значения концентраций морского аэрозоля дополняются выносами крупных пылевых частиц. Отметим, что отдельные всплески значений $(\tau_{0,5}^f - \tau^c) > 0$ на широтах $\sim 9^\circ$ ю.ш. и 24° с.ш., возможно, обусловлены специфическими синоптическими условиями в конкретные дни проведения измерений и для подтверждения устойчивого характера их проявлений необходимы дополнительные наблюдения.

Представляется интересным сопоставить результаты многолетних судовых измерений АОТ фотометром SPM около Антарктиды с результатами измерений таким же фотометром на ст. Мирный, которые начались в 2013 г. По данным многолетних наблюдений в видимой области спектра различными солнечными спектрофотометрами в периоды, когда атмосфера не была замутнена продуктами извержений вулканов Эль-Чичон, Пинатубо и Хадсон (1979–1981, 1985–1989, 1996–2008 гг.) (Радионов и др., 2011; Сакерин и др., 2013), было показано, что в изменчивости АОТ на ст. Мирный прослеживается слабовыраженный сезонный ход с минимальными значениями в начале и конце светлого периода года и более высокими — в его середине. Общий диапазон изменения $\tau_{0,5}^a$ находится в пределах от 0,017 в августе и апреле до 0,03 в октябре при среднегодовом значении 0,022. В табл. 4 приведены средние величины АОТ и их среднеквадратические отклонения для начала и конца измерительных периодов (условно — весна и осень) и антарктического лета на ст. Мирный и средние многолетние значения АОТ вблизи антарктического континента.

Хотя ряды наблюдений фотометром SPM в Мирном пока недостаточно продолжительны, тем не менее полученный сезонный ход АОТ аналогичен многолетнему, описанному в работах (Радионов и др., 2011; Сакерин и др., 2013): летние значения АОТ и влагосодержания атмосферы немного больше наблюдавшихся в начале и конце измерительных периодов. Средние величины АОТ в Мирном в сезон 2013/2014 г. были несколько меньше многолетних, но это отличие статистически не значимо.

Таблица 4

Средние характеристики АОТ на ст. Мирный и в Южном океане вблизи Антарктиды

Характеристика	Станция Мирный (2013–2014 гг.)			Средние АОТ вблизи Антарктиды (2009–2014 гг.)
	Антарктические весна и осень (ноябрь и март)	Антарктическое лето (декабрь–февраль)	Общий массив (ноябрь–март)	
$\tau_{0,38}^a$	0,025±0,006	0,031±0,009	0,028±0,008	0,037±0,018
$\tau_{0,5}^a$	0,019±0,005	0,020±0,005	0,019±0,005	0,021±0,013
$\tau_{2,14}^a$	0,008±0,006	0,011±0,005	0,010±0,006	0,012±0,01
α	1,0±0,69	1,24±0,28	1,14±0,50	1,20±0,68
β	0,011±0,004	0,008±0,003	0,009±0,004	0,011±0,001
τ^c	0,007±0,004	0,009±0,003	0,008±0,004	0,009±0,008
τ^f	0,013±0,004	0,011±0,003	0,012±0,004	0,012±0,007

В последнем столбце табл. 4 и на рис. 1 приведены также средние значения АОТ, измеренные фотометрами SPM с борта НЭС в 100-мильной зоне вблизи Антарктиды, которые незначительно превышают (в пределах СКО) данные береговых наблюдений.

Таким образом, сохранение АОТ в Антарктике на стабильно низком уровне ($\tau_{0,5}^a = 0,022 \pm 0,005$) свидетельствует об отсутствии изменений содержания аэрозоля в антарктической атмосфере после извержения вулканов Пинатубо и Хадсон в последние два десятилетия.

МИКРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЭРОЗОЛЯ

В отличие от интегральных характеристик атмосферы (АОТ, влагосодержание и др.), концентрации аэрозоля и «сажи» в приземном слое, в силу своего локального характера, отличались более широким диапазоном изменчивости: счетная концентрация частиц (N_A) на протяжении рейса НЭС «Академик Трёшников» менялась от 0,17 до 195 см⁻³, массовая концентрация аэрозоля (M_A) — от 0,01 до 43 мкг·м⁻³, массовая концентрация «сажи» (M_{BC}) — от 0,004 до 5,2 мкг·м⁻³.

Для выяснения особенностей пространственного распределения характеристик приземного аэрозоля были рассчитаны средние значения N_A , M_A , M_{BC} в пределах 10-градусных широтных зон на прямом и обратном маршрутах. Они сравнивались со средними данными, полученными в предшествующих экспедициях 2004–2013 гг. (Сакерин и др., 2007б; 2008б; Польшкин и др., 2013). Полученные результаты представлены на рис. 3. Видно, что особенности широтного распределения аэрозоля над Атлантикой определяются прежде всего влиянием континентальных выносов со стороны Северной Африки и Европы. Кроме того, в изменении концентраций аэрозоля и «сажи» есть отличия на прямом и обратном маршрутах, которые связаны с сезонным фактором.

В начале рейса (зима в Северном полушарии) самые высокие концентрации N_A и M_A были на широтах 0–30° с.ш., весной (обратный маршрут) их максимумы сместились на юг — в зону 0–30° ю.ш. Несколько иначе по ходу движения изменялось содержание «сажи»: на прямом маршруте высокими значениями M_{BC} выделялась приэкваториальная область с максимумом вблизи экватора; весной концентрация «сажи» в тропической зоне снизилась, а в районе зимнего максимума появился локальный минимум M_{BC} . В результате различие (зима–весна) содержания «сажи» в этом районе превысило два порядка величины.

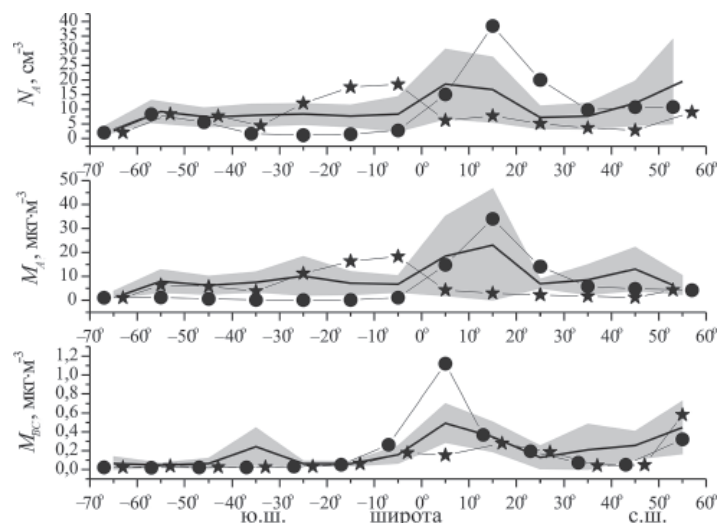


Рис. 3. Сравнение широтных распределений параметров аэрозоля на прямом (кружки) и обратном (звездочки) маршруте НЭС «Академик Трёшников» в 59-й РАЭ с данными предшествующих экспедиций (средние значения — жирная линия, СКО — серый тон).

Для количественной характеристики широтно-сезонной изменчивости сравним данные в четырех широтных зонах, где параметры аэрозоля отличаются наиболее значительно – «Европа», «Антарктика», «Северный тропик» и «Южный тропик» (табл. 5). Самые высокие среднезональные значения параметров N_A , M_A и M_{BC} наблюдались зимой в широтной зоне «Северный тропик». Вторыми по величине (на 20–40 % ниже) были концентрации аэрозоля (N_A , M_A) весной в зоне «Южный тропик». По массовой концентрации «сажи» — на втором месте весенние данные в зоне «Европа». Минимальные средние концентрации аэрозоля и «сажи» наблюдались в широтных зонах «Антарктика» и «Южный тропик» на прямом маршруте.

Сравнение параметров аэрозоля, полученных в 59-й РАЭ, со средними данными семи предшествующих экспедиций (2004–2013 гг.) показывает, что максимальные отличия наблюдаются в зоне тропических широт (см. рис. 3): максимумы N_A , M_A и M_{BC} в «Северном тропике» на прямом маршруте НЭС «Академик Трёшников» и повышенные значения N_A , M_A в «Южном тропике» на обратном маршруте. При усред-

Таблица 5

Средние (\pm СКО) характеристики приземного аэрозоля в различных зонах на прямом (05.02 – 11.03.2014) и обратном (29.04 – 28.05.2014) маршрутах НЭС «Академик Трёшников»

Характеристика	Район, маршрут НЭС			
	«Европа», прямой // обратный	«Северный тропик», прямой // обратный	«Южный тропик», прямой // обратный	«Антарктика» (> 50° ю.ш.)
N_A , см^{-3}	23,9 \pm 27,5 // 19,3 \pm 16,7	40,8 \pm 21,7 // 17,4 \pm 9,20	3,14 \pm 1,99 // 29,1 \pm 12,8	4,47 \pm 4,87
M_A , $\text{мкг}\cdot\text{м}^{-3}$	3,73 \pm 2,71 // 1,99 \pm 1,46	14,75 \pm 9,94 // 2,69 \pm 2,99	0,366 \pm 0,367 // 12,11 \pm 5,47	0,91 \pm 1,36
M_{BC} , $\text{мкг}\cdot\text{м}^{-3}$	0,195 \pm 0,22 // 0,248 \pm 0,57	0,57 \pm 0,57 // 0,20 \pm 0,11	0,066 \pm 0,070 // 0,107 \pm 0,078	0,023 \pm 0,013

нении результатов прямого и обратного маршрутов получаем хорошее согласие со средними многолетними данными. В целом полученные результаты подтверждают существование сезонных отличий в пространственном распределении параметров аэрозоля и требуют необходимости учета этого факта в соответствующих задачах.

Антарктическая атмосфера обеднена собственными источниками аэрозоля и, в силу своей удаленности, наименее подвержена влиянию дальних переносов аэрозоля из других регионов. Поэтому в Антарктике уровни аэрозольного замутнения атмосферы минимальны в целом для земного шара. Результаты измерений N_A , M_A и M_{BC} за 10-летний период в 100-мильной зоне вблизи Антарктиды позволили получить оценки их средних значений в летний (для Южного полушария) период года: $N_A = 2,7 \pm 1,6 \text{ см}^{-3}$; $M_A = 2,4 \pm 1,4 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$; $M_{BC} = 0,06 \pm 0,07 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$.

ОБЩЕЕ СОДЕРЖАНИЕ ОЗОНА

Распределение, изменчивость и тенденции изменений ОСО над различными районами земного шара подробно рассматриваются в (Scientific Assessment..., 2014). Далее мы рассмотрим результаты измерений ОСО, выполненных во время рейсов НЭС «Академик Федоров» в Антарктику в последнее десятилетие, начиная с 2005 г. Анализ некоторой части этих измерений (с 2005 по 2008 г.) ранее проводился, пожалуй, только в (Русина и др., 2011).

На рис. 4 представлены осредненные по 5-градусным широтным зонам результаты измерений ОСО в период работы судна в 59-й РАЭ и осредненные в этих же широтных зонах средние за предшествующие 10 антарктических рейсов НЭС значения ОСО и их СКО.

Значения ОСО, измеренные на прямом и обратном маршрутах 59-й РАЭ, отличаются от средних за последнее десятилетие величин в основном менее чем на одно СКО. Обращает на себя внимание отсутствие существенной широтной изменчивости ОСО на пути в Антарктиду и в период движения судна в антарктических водах в декабре–марте (рис. 4а) и наличие значительного широтного хода в период возвращения судна, т.е. осенью в Южном и, соответственно, весной в Северном полушарии (рис. 4б). Широтный ход осредненных за 10 лет значений ОСО хорошо описывается полиномами второй степени. Максимальные значения ОСО наблюдаются в весенний период в умеренных широтах Северного полушария (рис. 4, табл. 6). Самые низкие значения ОСО отмечаются в районе южного тропика осенью в Южном полушарии. Обращает на себя внимание, что ОСО, измеренное вблизи Антарктиды, выше, чем в тропиках. Это связано с тем, что в Южном океане судно находилось достаточно длительный период, охватывающий лето и первую половину осени Южного полушария, когда над

Таблица 6

Средние величины ОСО на прямом и обратном маршруте НЭС «Академик Федоров» в 59-й РАЭ и средние значения ОСО за 2005–2015 гг. и их СКО (ед. Добсона)

Характеристика	Район, маршрут НЭС			
	«Европа», прямой // обратный	«Северный тропик», прямой // обратный	«Южный тропик», прямой // обратный	«Антарктика» (> 50° ю.ш.)
ОСО, 59-я РАЭ	291±34 // 355±27	282±6 // 297±20	298±12 // 270±6	309±28
ОСО, среднее за 2005–2015 гг.	287±32 // 358±34	282±27 // 284±24	293±28 // 263±17	308±29

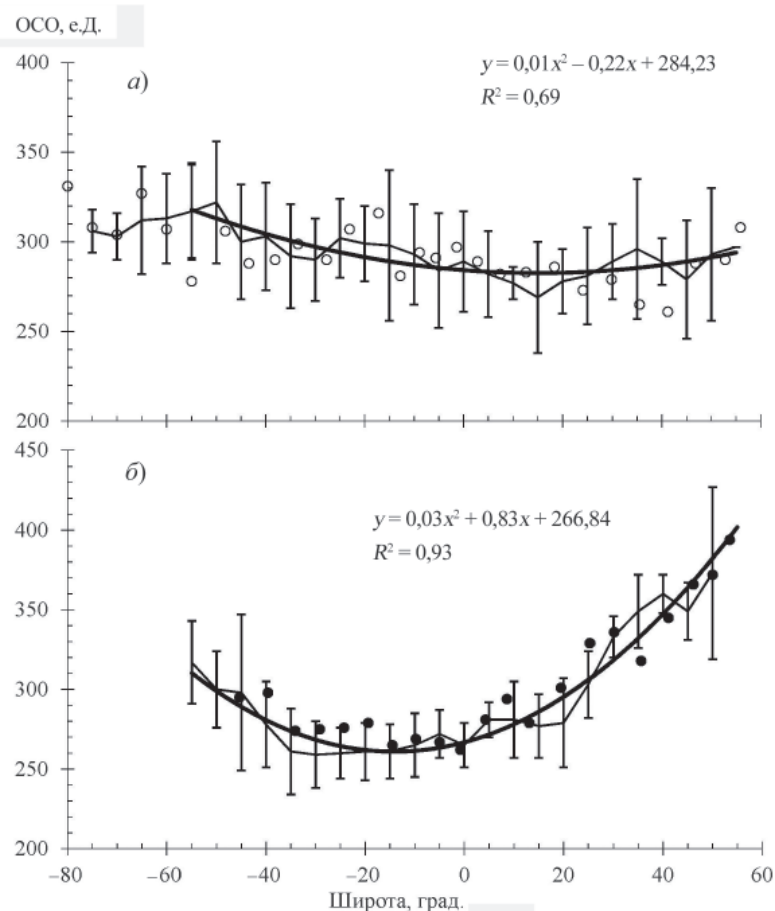


Рис. 4. Широтный ход общего содержания озона на прямом (а) и обратном (б) маршруте НЭС «Академик Федоров». Пустые и заполненные кружки — средние по 5-градусным широтным зонам значения ОСО в 59-й РАЭ; тонкая сплошная линия — средние многолетние значения ОСО и их среднеквадратические отклонения; жирная сплошная линия — аппроксимация средних многолетних значений ОСО.

Антарктидой и над Южным океаном происходит рост ОСО после его весеннего минимума. Различия величин ОСО на прямом и обратном маршрутах судна возрастают по мере движения судна на север, особенно в широтах севернее 30° с.ш. Это связано с характером внутригодовой изменчивости ОСО в умеренных широтах Северного полушария, где минимум в годовом ходе наблюдается осенью, а максимум — весной.

КОНЦЕНТРАЦИИ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ АТМОСФЕРЫ

Как уже указывалось, в приводном слое воздуха измерялись концентрации следующих МГС: озон (O_3), оксиды азота ($NO_x = NO + NO_2$), окись углерода (CO) и диоксид серы (SO_2).

Окись азота, окись углерода и двуокись серы являются первичными загрязнителями атмосферы, т.е. могут непосредственно поступать в атмосферу как из есте-

ственных источников (вулканическая деятельность, процессы окисления соединений биогенного происхождения, лесные пожары и т.д.), так и из антропогенных источников (сжигание ископаемого и жидкого топлива и т.д.). Так, оксиды азота имеют в основном антропогенное происхождение (более 90 %), а промышленные источники сернистого газа по интенсивности давно превзошли вулканы и сейчас сравнялись с суммарной интенсивностью всех естественных источников (Ровинский, Егоров, 1986).

Приземный озон является вторичным загрязнителем атмосферы, его большие концентрации свидетельствуют о сильном загрязнении воздуха продуктами высокотемпературного сгорания. Основным источником O_3 в приземном слое являются фотохимические реакции с участием NO_x , летучих органических соединений и других веществ. Под действием ветра они могут распространяться на сотни километров. Концентрации O_3 в континентальной атмосфере характеризуются высокой пространственной и временной изменчивостью (Logan, 1985; Oltnans, Komhyr, 1986; Crutzen, 1988). В чистом морском воздухе не наблюдается значительных вариаций концентраций O_3 , однако континентальные выносы могут вносить существенные неоднородности в его распределение и над океаном.

Важным аспектом, определяющим практический интерес к пространственно-временному распределению и динамике МГС атмосферы, является также их отрицательное воздействие на здоровье человека, биоту и различные материалы. Количество информации об их концентрациях и характеристиках изменчивости, за исключением приземного озона и окиси углерода, невелико.

Выбор этих газов для исследования связан с тем, что они играют важную роль в химии атмосферы, оказывают (в различной степени) влияние на формирование климата и входят в пятерку важнейших загрязнителей атмосферы, по которым Всемирная организация здравоохранения рекомендует оценивать качество воздуха (Звягинцев и др., 2010; Ровинский, Егоров, 1986). Газовый состав атмосферы над океаном имеет существенные отличия от континентальной части, что обусловлено отсутствием мощных антропогенных источников загрязнений и слабым, практически однородным стоком над водной поверхностью. Содержание указанных МГС в приземном слое воздуха изучено гораздо в меньшей степени и представлено результатами эпизодических судовых измерений (Еланский, Маркова, 1995).

Временной ход концентраций МГС, измеренных в рейсе НЭС «Академик Трёшников», приведен на рис. 5. Из рис. 5 следует, что распределение концентраций первичных загрязнителей крайне неравномерно и претерпевало значительные колебания, связанные с особенностями распределения источников и динамикой поступления примесей в атмосферу вдоль маршрута движения. В целом наиболее высокие концентрации приходится на время стоянок в портах и районах антарктических станций во время вертолетных операций при погрузочно-разгрузочных работах. Случаи собственного влияния судна, когда в пробы анализируемого воздуха попадали выбросы от выхлопной трубы при определенном направлении ветра, исключались при анализе данных.

Для оценки особенностей пространственного распределения исследуемых МГС были рассчитаны их средние концентрации в пределах тех же четырех широтных зон, в которых анализировались характеристики аэрозоля. Результаты расчетов на прямом (зима в Северном полушарии) и обратном (весна в Северном полушарии) маршруте приведены в табл. 7.

По данным, представленным в табл. 7, можно отметить следующие особенности:

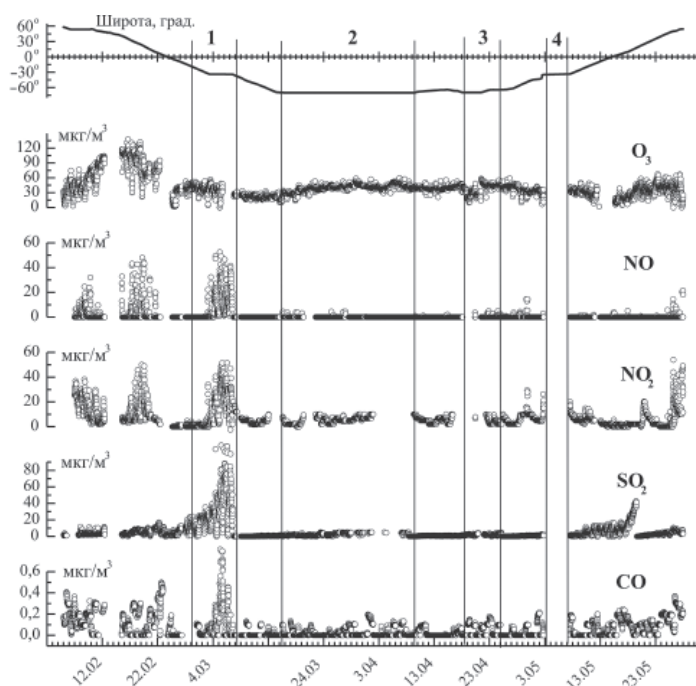


Рис. 5. Временной ход концентраций МГС, измеренных с борта НЭС «Академик Трешников» в 59-й РАЭ (цифрами обозначены: 1, 4 — Кейптаун на прямом и обратном маршруте; 2, 3 — районы антарктических станций Новолазаревская и Прогресс).

– максимальные значения концентраций окислов азота наблюдались в районе побережья Португалии и Западной Африки, что связано с высокой антропогенной нагрузкой на этих территориях и интенсивным судоходством возле их берегов. Также обращают на себя внимание относительно высокие концентрации окислов азота в районе «Антарктика» — большие, чем в тропической зоне. По-видимому, в этой

Таблица 7

Средние (\pm СКО) концентрации МГС ($\text{мкг}\cdot\text{м}^{-3}$) на прямом и обратном маршруте НЭС «Академик Трешников» (59-я РАЭ)

МГС	Район, маршрут НЭС			
	«Европа», прямой // обратный	«Северный тропик», прямой // обратный	«Южный тропик», прямой // обратный	«Антарктика» ($> 50^\circ$ ю.ш.)
O_3	$88,9 \pm 19,9$ // $37,0 \pm 10,8$	$82,2 \pm 19,8$ // $26,9 \pm 11,1$	$35,4 \pm 11,1$ // $30,8 \pm 6,5$	$37,5 \pm 8,5$
NO	$15,9 \pm 12,8$ // $9,1 \pm 6,6$	$9,1 \pm 4,2$ // $2,1 \pm 1,5$	$0,4 \pm 0,04$ // $0,9 \pm 0,5$	$3,1 \pm 1,0$
NO_2	$8,0 \pm 5,6$ // $8,1 \pm 6,8$	$12,1 \pm 9,5$ // $3,1 \pm 2,7$	$1,4 \pm 0,7$ // $4,4 \pm 2,3$	$3,8 \pm 2,4$
SO_2	$3,6 \pm 1,5$ // $4,5 \pm 1,9$	$6,8 \pm 3,3$ // $9,3 \pm 4,5$	$7,9 \pm 4,7$ // $6,5 \pm 3,1$	$2,9 \pm 0,9$
CO	160 ± 100 // 150 ± 80	160 ± 150 // 100 ± 60	60 ± 40 // 60 ± 40	50 ± 40

зоне сказывалось локальное влияние судна во время стоянок вблизи антарктических станций и проведения разгрузочно-погрузочных работ;

– общим для NO , NO_2 и CO являются их более высокие концентрации в Северном полушарии с максимальными значениями в зоне «Северного тропика» на прямом маршруте и несколько меньшими значениями в районе «Европы». Этот факт свидетельствует о преобладающем влиянии антропогенных выбросов на формирование уровней концентраций/содержаний этих газов в Северном полушарии. Так, установлено, что концентрация CO в фоновых районах в настоящее время значительно возросла по сравнению с доиндустриальным периодом (Белан, 2010). Сейчас ее значение оценивается в среднем величиной 100 млрд^{-1} ($\approx 116 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$) (Atmosphere trace gases..., 1990), хотя в (Кароль, 2002) имеется уточнение, что в Северном полушарии концентрация CO в среднем составляет 140 млрд^{-1} ($\approx 163 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$), а в Южном — 50 млрд^{-1} ($\approx 58 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$). Данные наших наблюдений, с учетом вариаций, вписываются в эти пределы;

– отличительной особенностью SO_2 является рост концентраций от высоких широт к экватору. Эта закономерность проявилась в обоих полушариях на прямом и обратном маршруте. Это можно объяснить более активной фотохимической трансформацией биогенных предшественников в диоксид серы, т.к. для экватора и тропических широт обоих полушарий характерным является наличие наибольшего разнообразия жизненных форм по сравнению с другими частями Атлантического океана. В этих же районах, по данным (Исидоров, 2001), максимального значения достигает отношение SO_4/SO_2 , что можно объяснить увеличением скорости фотохимического окисления SO_2 , инициируемого озоном и радикалами;

– максимальные приземные концентрации озона наблюдались в умеренных широтах Северного полушария, а минимальные — в зоне «Северный тропик» на обратном маршруте.

Более детально широтное распределение концентраций приводного озона в период рейса представлено на рис. 6. На нем приведены осредненные по широтным зонам 5-градусные значения приводной концентрации озона (ПКО) и их стандартные отклонения на прямом и обратном маршрутах через Атлантический океан НЭС «Академик Трёшников». На прямом маршруте минимальные значения ПКО наблюдались в экваториальной зоне и в высоких широтах Южного полушария, высокие — в зоне умеренных широт Северного полушария, что согласуется с ранее проведенными исследованиями (Еланский и др., 1995; Егоров, 1995; Johnson et al., 1990; Winkler, 1988). На прямом (зима) маршруте ярко выделяется асимметрия в содержании озона: в Северном полушарии оно было существенно выше, чем в Южном. На обратном маршруте (весна) широтное распределение стало иным. Средний уровень ПКО в Северном и Южном полушарии стал практически одинаковым ($\sim 30 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$) с отклонениями не более $15 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$. Эти различия в меридиональных профилях, полученных в разные месяцы, отражают сезонные вариации ПКО над Атлантическим океаном.

Высокие концентрации озона на широтах $30\text{--}50^\circ$ с.ш. могут быть связаны с положением субтропической высотной фронтальной зоны и со стратосферно-тропо-сферным обменом во время перестройки циркуляционных процессов в зимне-весенний период в Северном полушарии. С ним же связано повышение ПКО на обратном ходе в широтной зоне $45\text{--}70^\circ$ ю.ш.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пространственное распределение характеристик аэрозоля, полученных в 59-й РАЭ, хорошо согласуется с предшествующими многолетними данными судовых

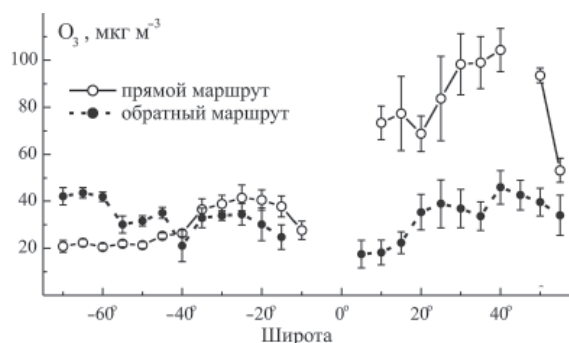


Рис. 6. Широтный ход концентрации озона в приземном слое атмосферы на прямом и обратном маршруте НЭС «Академик Трешников».

наблюдений. В целом средние значения АОТ убывают по районам в последовательности: «Северный тропик» (0–30° с.ш.) — «Европа» (30–55° с.ш.) — «Южный тропик» (0–30° ю.ш.) — «Антарктика» (> 50° ю.ш.). Например, средние значения АОТ (0,5 мкм) в этих районах составляют 0,266; 0,166; 0,094 и 0,02 соответственно. На ст. Мирный — 0,019. Вместе с тем в распределении средних концентраций аэрозоля по этим районам проявляются сезонные отличия — на обратном маршруте (весна) — самые большие значения наблюдались в зоне «Южный тропик».

В изменении приземной концентрации озона (ПКО) при движении судна от умеренных широт Северного полушария до Антарктиды (февраль–март) наблюдался пятикратный спад ПКО, что согласуется с данными ранее проведенных исследований. На обратном маршруте (вторая половина апреля–мая) широтное распределение под влиянием сезонного фактора трансформировалось: средний уровень ПКО в Северном и Южном полушарии стал практически одинаковым — в среднем 30 мкг·м⁻³.

В поведении концентраций других МГС отметим следующие особенности:

– самый большой диапазон широтно-сезонного изменения концентраций у окиси азота — почти два порядка;

– общим для NO, NO₂ и CO являются более высокие концентрации в Северном полушарии с максимальными значениями в зоне «Северного тропика» на прямом маршруте и немного ниже в районе «Европа». Этот факт свидетельствует о преобладании антропогенных выбросов в Северном полушарии;

– отличительной особенностью SO₂ является рост концентраций от высоких широт к экватору в обоих полушариях как на прямом, так и на обратном маршрутах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бартенева О.Д., Никитинская Н.И., Сакунов Г.Г., Веселова Л.К. Прозрачность толщи атмосферы в видимой и ближней ИК-области спектра. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 224 с.

Белан Б.Д. Озон в тропосфере / Под ред. д-ра физ.-мат. наук В.А. Погодаева. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2010. 488 с.

Егоров В.И. Пространственное распределение озона в пограничном слое атмосферы открытых районов Тихого и Индийского океанов // Изв. АН. ФАО. 1995. Т. 31. № 1. С. 104–108.

Еланский Н.Ф., Беликов И.Б., Березина Е.В. и др. Состав атмосферы над Северной Евразией: эксперименты TROICA / Под ред. Н.Ф. Еланского. М.: Изд-во Агростас, 2009. 81 с.

Еланский Н.Ф., Маркова Т.А. Концентрация озона в приземном слое атмосферы над Атлантическим океаном и морем Уэдделла // Изв. АН. ФАО. 1995. Т. 31. № 1. С. 92–103.

Звягинцев А.М., Какаджанова Г., Тарасова О.А. Изменчивость приземного озона и других малых газовых составляющих атмосферы в мегаполисе и сельской местности // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 1. С. 32–37.

Исидоров В.А. Экологическая химия: Учебное пособие для вузов. СПб.: Химиздат, 2001. 304 с.

Кароль И.Л. Современное состояние проблемы малых примесей в атмосфере и оценка их влияния на изменение глобального климата // Изменения климата и их последствия. СПб.: Наука, 2002. С. 36–44.

Козлов В.С., Шмаргунов В.П., Польшин В.В. Спектрофотометры для исследования характеристик поглощения света аэрозольными частицами // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 5. С. 155–157.

Методические указания по производству и обработке наблюдений за общим содержанием атмосферного озона. 3-е изд. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 48 с.

Польшин В.В., Польшин Вас. В., Голобокова Л.П., Панченко М.В., Терпугова С.А., Тихомиров А.Б. О межгодовой изменчивости широтного распределения микрофизических и химических характеристик приземного аэрозоля в восточной Атлантике в 2006–2010 годах // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 6. С. 519–524.

Радионых В.Ф., Русина Е.Н., Сакерин С.М., Сибир Е.Е., Смирнов А.В. Составляющие радиационного баланса и аэрозольно-оптические параметры атмосферы в Антарктике в период МПГ на фоне их многолетней изменчивости // Вклад России в Международный полярный год 2007/08. Метеорологические и геофизические исследования. М.; СПб.: ООО «Паулсен», 2011. С. 158–169.

Ровинский Ф.Я., Егоров В.И. Озон, окислы азота и серы в нижней атмосфере. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 183 с.

Русина Е.Н., Радионых В.Ф., Сибир Е.Е. О возможности анализа данных наблюдений за общим содержанием озона и суммарной солнечной радиацией на движущихся платформах // Проблемы Арктики и Антарктики. 2011. № 4 (90). С. 39–50.

Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Козлов В.С., Панченко М.В., Польшин В.В., Тихомиров А.Б., Власов Н.И., Радионых В.Ф., Смирнов А.В., Холбен Б.Н., Слуцкер И.А., Голобокова Л.П. Результаты исследований характеристик аэрозоля в 52-й РАЭ // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 77. С. 67–75.

Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Радионых В.Ф., Slutsker I.A., Smirnov A.V., Терпугова С.А., Holben B.N. О результатах исследований аэрозольной оптической толщины атмосферы во время кругосветной экспедиции вокруг Антарктиды (53-я РАЭ) // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21. № 12. С. 1032–1037.

Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ростов А.П., Турчинович С.А., Князев В.В. Солнечные фотометры для измерений спектральной прозрачности атмосферы в стационарных и мобильных условиях // Оптика атмосферы и океана. 2012а. Т. 25. № 12. С. 1112–1117.

Сакерин С.М., Чернов Д.Г., Кабанов Д.М., Козлов В.С., Панченко М.В., Польшин В.В., Радионых В.Ф. Предварительные результаты исследований аэрозольных характеристик атмосферы в районе Баренцбурга (Шпицберген) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012б. № 1 (91). С. 20–31.

Сакерин С.М., Власов Н.И., Кабанов Д.М., Лубо-Лесниченко К.Е., Прахов А.Н., Радионых В.Ф., Турчинович Ю.С., Holben B.N., Smirnov A. Результаты спектральных измерений аэрозольной оптической толщины атмосферы солнечными фотометрами в 58-й Российской антарктической экспедиции // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 27. № 12. С. 1059–1067.

Счетчик аэрозольных частиц АЗ-10: Руководство по эксплуатации. ЭКИТ 7.830.000 РЭ. М., 2010. 13 с.

Atmosphere trace gases that are radioactively active and significant to global change // *Earth Quest*. 1990. Vol. 4. № 2. P. 10–11.

Crutzen P.J. Tropospheric ozone: an overview // *Tropospheric Ozone: Regional and Global Scale Interactions* / Ed. Isaksen I.S.A. Dordrecht: Reidel, 1988. P. 3–22.

Johnson J.E., Gammon R.H., Larsen J., Bates T.S., Oltmans S.J., Farmer J.C. Ozone in the marine boundary layer over the Pacific and Indian oceans: Latitudinal gradients and diurnal cycles // *J. Geophys. Res.* 1990. Vol. 95. P. 11847–11866.

Kozlov V.S., Yausheva E.P., Terpugova S.A., Panchenko M.V., Chernov D.G., Shmargunov V.P. Optical-microphysical properties of smoke haze from Siberian forest fires in summer 2012 // *International Journal of Remote Sensing*. 2014. Vol. 35. № 15. P. 5722–5741.

Logan J.A. Tropospheric ozone: seasonal behaviour, trends, and anthropogenic influences // *J. Geophys. Res.* 1985. Vol. 90. P. 10463–10482.

Oltmans S.J., Komhyr W.D. Surface ozone distributions and variations from 1973–1984 measurements at the NOAA geophysical monitoring for climatic change baseline observatories // *J. Geophys. Res.* 1986. Vol. 91. P. 5229–5236.

Sakerin S.M., Smirnov A.V., Kabanov D.M., Polkin V.V., Holben B.N., Panchenko M.V., Kopelevich O.V. Aerosol optical and microphysical properties over the Atlantic Ocean during the 19th cruise of the research vessel “Akademik Sergey Vavilov” // *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112. D10220. doi: 10.1029/2006JD007947.

Sakerin S.M., Kabanov D.M., Smirnov A.V., Holben B.N. Aerosol optical depth of the atmosphere over ocean in the wavelength range 0.37–4 μm // *International J. Remote Sensing*. 2008. Vol. 29. Issue 9. P. 2519–2547. doi: 10.1080/01431160701767492.

Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014. WMO Global Ozone Research and Monitoring Project. Geneva. Switzerland. Report No. 55. 416 p.

Smirnov A., Holben B.N., Slutsker I., Giles D.M., McClain C.R., Eck T.F., Sakerin S.M., Macke A., Croot P., Zibordi G., Quinn P.K., Sciare J., Kinne S., Harvey M., Smyth T.J., Piketh S., Zielinski T., Proshutinsky A., Goes J.I., Nelson N.B., Larouche P., Radionov V.F., Goloub P., Krishna Moorthy K., Matarrese R., Robertson E.J., Jourdin F. Maritime Aerosol Network as a component of Aerosol Robotic Network // *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114. D06204. doi:10.1029/2008JD011257.

Winkler P. Surface ozone over the Atlantic ocean // *J. Atmos. Chem.* 1988. Vol. 7. P. 73–91.

*V.F. RADIONOV, D.M. KABANOV, V.V. POLKIN, D.E. SAVKIN,
S.M. SAKERIN, E.E. SIBIR*

VARIABILITY OF CHARACTERISTICS OF AEROSOL AND GAS COMPOSITION OF THE ATMOSPHERE ALONG THE ROUTES OF RVS “AKADEMIK FEDOROV” AND “AKADEMIK TRESHNIKOV” IN PERIOD OF 59th RUSSIAN ANTARCTIC EXPEDITION

Measurements of aerosol-gas composition of the atmosphere, performed onboard RVs “Akademik Fedorov” and “Akademik Treshnikov” during 59th RAE, are discussed. For separate latitudinal zones in the Atlantic and Southern Oceans we presented the average characteristics of atmospheric aerosol optical depth, concentrations of aerosol and black carbon particles in the near-ground layer, total ozone content, as well as the concentrations of minor gas constituents of the atmosphere. We compare the results obtained on the forward and backward routes of RV “Akademik Treshnikov” with the data from previous expeditions.

Keywords: aerosol, aerosol optical depth, trace gases, spatial distribution.