

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ
ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.510.4

Зональное распределение физико-химических характеристик аэрозоля в Восточной Атлантике

С.М. Сакерин¹, Л.П. Голобокова², Д.М. Кабанов¹,
В.В. Польшкин¹, В.Ф. Радионов^{3*}

¹ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

² Лимнологический институт СО РАН

664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3

³ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38

Поступила в редакцию 24.10.2017 г.

На основе данных многолетних (2004–2016 гг.) экспедиционных исследований проведены статистическое обобщение и районирование физико-химических характеристик аэрозоля в Восточной Атлантике (от Ла-Манша до Антарктиды). Для шести широтных зон Атлантического и Южного океанов (>45° с.ш., 20–45° с.ш., 0–20° с.ш., 0–20° ю.ш., 20–55° ю.ш., >55° ю.ш.) представлены средние значения основных характеристик аэрозоля: аэрозольной оптической толщи атмосферы, мелко- и грубодисперсной компоненты аэрозольной оптической толщи, счетных концентраций частиц, массовых концентраций аэрозоля, «сажи», водорастворимых ионов (Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , K^+ , Ca^{2+} , NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-}) и газообразных примесей (SO_2 , HCl , HNO_3 , NH_3).

Показано, что диапазон зональной изменчивости оптических и микрофизических характеристик аэрозоля — около одного порядка: самые большие средние значения наблюдаются в тропической зоне, минимальные — над Южным океаном. Зональные различия (от 1,3 до 4,3 раз) концентраций ионов и газообразных примесей существенно меньше и сопоставимы с синоптической изменчивостью. Максимальные концентрации «морских» ионов зафиксированы над Южной Атлантикой, «континентальных» ионов — в тропической и субтропической зонах Северного полушария, а минимальные концентрации всех ионов — над Южным океаном. Отмечена специфика географического распределения газообразных примесей: максимальные концентрации HCl и NH_3 наблюдаются над Южной Атлантикой, SO_2 и HNO_3 — вблизи Европы, а самый низкий уровень — в тропической зоне.

Ключевые слова: аэрозольная оптическая толщина, концентрации аэрозоля, «сажи», ионов и газообразных примесей, пространственное распределение, Восточная Атлантика, Южный океан; aerosol optical depth, concentrations of aerosol, black carbon, ions, and gas admixtures, spatial distribution, Eastern Atlantic, Southern Ocean.

Введение

Несмотря на однородность распределения над океаном собственных источников аэрозоля, многочисленные исследования (например, [1–12]) показали сильную изменчивость его содержания (более двух порядков) как в приводном слое, так и интегрально в столбе атмосферы, т.е. аэрозольной оптической толщи (АОТ). Частично вариации обусловлены зависимостью характеристик аэрозоля от скорости ветра, относительной влажности и прочих факторов, другими словами — от процессов генерации и трансформации. Но основное влияние на

изменение его характеристик оказывают выносы в более чистую (как правило) морскую атмосферу континентального аэрозоля, которые формируют пространственные неоднородности и вариации в масштабе от суточных до сезонных. Наиболее полное представление о распределении источников континентального аэрозоля (в первую очередь аридного), процессов его переноса и седиментации в различных районах Мирового океана было выполнено А.П. Лисицыным [12] на основе многолетних исследований Института океанологии РАН. В частности, над Атлантическим океаном основным источником и фактором пространственных изменений аэрозоля выступают мощные пылевые выносы из Сахары в зоне северного пассата.

По нашим оценкам [13], синоптическая изменчивость АОТ в Атлантике составляет 50–70%, а суточная и сезонная — примерно на порядок меньше. Если исключить (усреднить) короткопериодные вариации, включая синоптические, то общий диапазон

* Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru); Людмила Петровна Голобокова (lg@lin.irk.ru); Дмитрий Михайлович Кабанов (dkab@iao.ru); Виктор Викторович Польшкин (victor@iao.ru); Владимир Федорович Радионов (vradion@aari.ru).

пространственных вариаций параметров аэрозоля можно характеризовать следующими значениями [14]: АОТ (0,5 мкм) меняется от 0,02 до 0,5; счетные концентрации частиц — от 0,8 до 19 см⁻³; массовые концентрации поглощающего вещества («сажи») в составе аэрозоля — в пределах 0,026–0,700 мкг/м³. Соотношение максимальных и минимальных значений указанных параметров равно примерно 25. При таком большом диапазоне пространственной изменчивости необходимость районирования характеристик аэрозоля над океаном очевидна, но для получения достоверных оценок требуется накопление данных в течение продолжительного периода.

Особенности географического распределения оптических характеристик и типов аэрозоля над океаном были впервые систематизированы О.Д. Бартовой с соавторами [1, 15] и К.С. Шифринным с соавторами [2, 3, 16–18]. Результаты многолетних исследований АОТ в различных районах океана обобщались в обзорных статьях [11, 19]. Отметим также монографию [20], в которой представлена «широтно-долготная концепция» районирования АОТ, основанная на модели зонального (0–30°, 30–50°, 50–70°, 70–90° с.ш.) распределения термодинамических параметров атмосферы.

Несмотря на достигнутые успехи в экспедиционных исследованиях аэрозоля над океаном, следует все же отметить фрагментарность полученных данных по районам и срокам, разнородность характеристик аэрозоля и методов измерений и в целом недостаточную статистическую обеспеченность для разработки региональных эмпирических моделей.

В последнее 10-летие систематизированному накоплению данных способствовали создание морской компоненты сети AERONET – Maritime Aerosol Network [21] – и проведение ежегодных измерений комплекса физико-химических характеристик аэрозоля на прямом (ноябрь–декабрь) и обратном (апрель–май) маршрутах Российских антарктических экспедиций (РАЭ) в Восточной Атлантике [22–24]. В число измеряемых характеристик входили: спектральные АОТ атмосферы, счетная концентрация частиц в диапазоне диаметров от 0,4 до 10 мкм, массовая концентрация в аэрозоле поглощающего вещества («сажи»), а также концентрации ионов и газообразных примесей. Измерения характеристик аэрозоля выполнялись стандартными для наших морских экспедиций [23–25] методами и приборами: солнечным фотометром SPM и/или Microtops II [26], фотоэлектрическим счетчиком частиц АЗ-10, аэталометром МДА [27] и заборником проб воздуха на фильтры.

Обобщение результатов исследований аэрозоля в 13 экспедициях (2004–2015 гг.) на одном и том же маршруте — от Ла-Манша до берегов Антарктиды (рис. 1) — позволило детально проанализировать среднее широтное распределение различных параметров аэрозоля с шагом (усреднением) 5° [14]. Наряду с различиями широтно-сезонной изменчивости отдельных параметров явно проявились и общие закономерности их пространственного распределения, которые создали предпосылки для районирования.

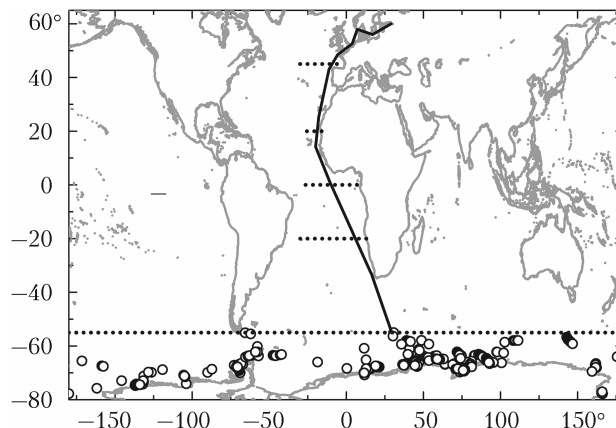


Рис. 1. Карта маршрута РАЭ в Восточной Атлантике (пунктиром показаны выделенные широтные зоны, кружками — районы измерений АОТ в Южном океане)

На основе результатов [14] и с привлечением данных новых экспедиционных измерений (61-я РАЭ, 2015/2016 гг.) в настоящей работе оцениваются границы «аэрозольных» районов, для них приводятся средние характеристики аэрозоля, которые можно рассматривать в качестве эмпирической статистической модели.

1. Определение границ «аэрозольных» районов

Физико-географическое районирование климатических характеристик, к которым можно отнести и аэрозоль, предусматривает оценку пространственных масштабов и положения районов с однотипными и близкими характеристиками. Анализ результатов многолетних измерений различных параметров аэрозоля на маршруте РАЭ выявил общие закономерности их пространственной изменчивости в Восточной Атлантике [14]: в Северном полушарии хорошо проявилась зональность широтного распределения — чередующиеся области повышенных и пониженных значений, а в Южном полушарии преобладает продолжительный монотонный спад от экватора до Антарктиды. Такое распределение характеристик аэрозоля определяется особенностями общей циркуляции атмосферы (чередованием зон преобладающих переносов) в сочетании с географическим расположением континентальных источников аэрозоля (тип, мощность). В частности, западный перенос, господствующий в умеренных широтах Атлантики, меняется на северо-восточные и юго-восточные пассаты в тропической зоне.

Схожесть характера широтного распределения параметров аэрозоля послужила основой для районирования и определения границ «аэрозольных» районов. Вместе с тем для каждого параметра аэрозоля можно отметить неопределенность (до 5°) оценки границ, обусловленную сезонной и межгодовой изменчивостью. Тем более бессмысленно искать строгие границы для совокупности характеристик аэрозоля, имеющих индивидуальные особенности географического распределения. Поэтому для

районирования были выбраны простые подходы, основанные на использовании средних многолетних данных (подробнее см. [28]): широтные границы оценивались по результатам судовых измерений комплекса параметров аэрозоля, а долготные — по данным спутниковых наблюдений АОТ.

1.1. Широтные границы

Для определения широтных границ «аэрозольных» районов были выбраны пять основных и относительно независимых (не имеющих прямой связи) характеристик аэрозоля: грубо- и мелкодисперсная компоненты АОТ, счетные концентрации грубо- и мелкодисперсных частиц и массовая концентрация «сажи». Для них рассчитаны нормированные (на среднее) широтные распределения отдельно для прямого и обратного маршрутов. На основе этих нормированных значений была определена средняя широтная зависимость, обобщенная для пяти параметров аэрозоля: $A(\varphi) = \sum_i A_i(\varphi)$ (рис. 2). Для Северной Атлантики дополнительно учитывалось среднее широтное распределение первой производной $A'_i(\varphi)$ [28].

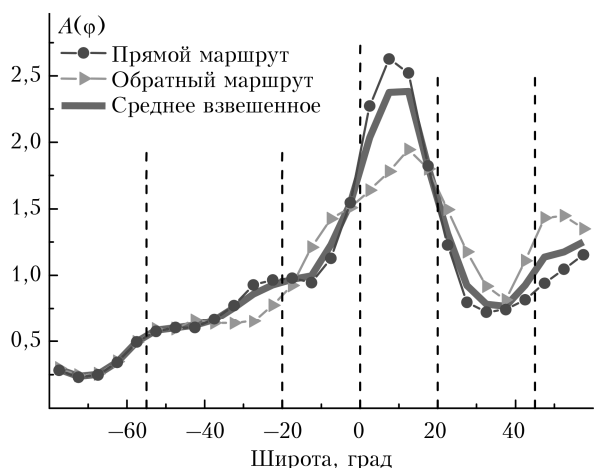


Рис. 2. Среднее широтное распределение $A(\varphi)$ для прямого и обратного маршрутов РАЭ (границы «аэрозольных» районов обозначены вертикальными пунктирными линиями)

В Северном полушарии проявились две зоны повышенных значений параметров, обусловленные выносами аэрозоля из Сахары и Европы, а между ними — область с относительно низким содержанием аэрозоля. Границы этих широтных зон для прямого маршрута (ноябрь—декабрь) проходят примерно по 0° , 20° и 45° с.ш. На обратном маршруте (апрель—май) широтные границы несколько смещаются, но из-за меньшего статистического веса этих данных общая картина не меняется (полуширная кривая, рис. 2). С учетом географии континентального влияния выделенные районы условно можно назвать: 1) «Европа» — периферия Бискайского залива и вблизи побережья Европы ($>45^\circ$ с.ш.); 2) «Гибралтар» — вблизи берегов Северной Африки и юга Западной Европы ($20\text{--}45^\circ$ с.ш.); 3) «Северный пассат» — зона мощных пылевых

выносов ($0\text{--}20^\circ$ с.ш.). Линейная протяженность (север—юг) выделенных широтных зон составляет примерно 1650–2200 км.

В Южном полушарии преобладает монотонный спад параметров аэрозоля без чередующихся экстремумов. По аналогии здесь тоже были выделены три района, ориентируясь на климатические зоны и характер изменения аэрозольных параметров: 4) «Южный пассат» ($0\text{--}20^\circ$ ю.ш.), где наблюдается быстрое уменьшение $A(\varphi)$; 5) «Южная Атлантика» ($20\text{--}55^\circ$ ю.ш.) с менее интенсивным спадом $A(\varphi)$ и сезонными особенностями; 6) «Южный океан» ($>55^\circ$ ю.ш.) — зона с самым низким содержанием аэрозоля.

Заметим, что широтная зона Южного океана рассматривалась целиком, без долготных границ [14]. Ранее проведенные исследования [22, 29] показали малые значения АОТ (0,02–0,05) и их пространственные отличия в отдельных секторах Южного океана, что обусловлено низким содержанием аэрозоля и слабым влиянием его дальних переносов с континентов.

1.2. Долготные границы

Из-за отсутствия корабельных измерений параметров аэрозоля на разных расстояниях от континентов для оценки долготных границ «аэрозольных» районов использовались данные многолетних спутниковых наблюдений АОТ на длине волны 0,55 мкм, находящихся в свободном доступе ([30], <http://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov>): MODIS/Aqua&Terra, коллекция 6, 2002–2015 гг. Среднее пространственное распределение АОТ рассчитывалось с шагом 1° по долготе для трех широтных зон ($45\text{--}50^\circ$ с.ш., $10\text{--}15^\circ$ с.ш., $15\text{--}20^\circ$ ю.ш.) и двух месяцев (апрель и ноябрь). Один из примеров средней зависимости АОТ от долготы (при удалении от континента) приведен на рис. 3.

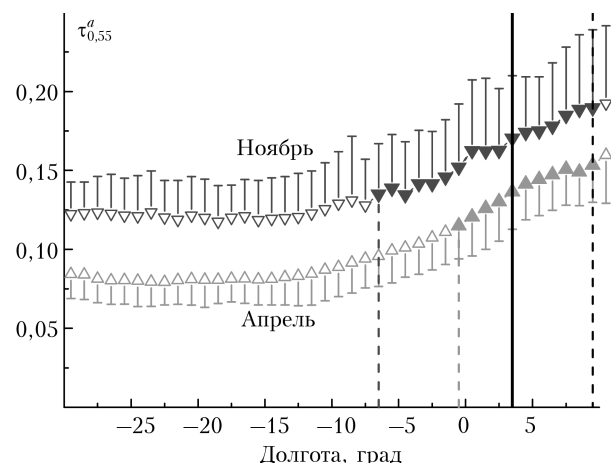


Рис. 3. Средняя зависимость АОТ (0,55 мкм) от долготы в широтной зоне $15\text{--}20^\circ$ ю.ш.: полуширной вертикальной линией обозначена долгота маршрута РАЭ, пунктиром — оценки долготных границ «аэрозольных» районов

Расчеты показали [28], что с удалением от континентов происходит примерно линейное

уменьшение АОТ. Самый сильный спад наблюдается в зоне «Северный пассат» (10–15° с.ш.), умеренный – в «Южном пассате» (15–20° ю.ш.), а на широтах Бискайского залива (45–50° с.ш.) АОТ с удалением от континента практически не меняется. Последнее, по-видимому, обусловлено сопоставимым содержанием аэрозоля над Европой и Северной Атлантикой и преобладанием в этих широтах западного переноса, который препятствует поступлению аэрозоля с континента.

Полученная информация позволила найти ориентировочную протяженность (запад–восток) «аэрозольных» районов. Западные границы относительно долготы маршрута РАЭ оценивались по спаду среднего долготного значения АОТ на величину среднеквадратического отклонения (СКО). Из-за относительной близости маршрута РАЭ к континенту (80–700 км) средний рост АОТ в восточном направлении для проанализированных районов не превысил величины стандартного отклонения. Поэтому в качестве восточной границы районов мы использовали долготу ближайшего континента. Рассчитанная таким образом общая протяженность «аэрозольных» районов от берегов Африки составила 1200–1800 км, а вблизи Европы – более 2500 км.

Конечно, приведенные оценки долготных границ (как и широтных зон) представляют лишь средние ориентиры. Но нам важно показать, что рассматриваемые ниже характеристики аэрозоля относятся не только к долготе маршрута РАЭ, а имеют определенную «протяженность» на запад и восток. Отметим также, что оценки долготной протяженности «аэрозольных» районов (1200–2500 км) сопоставимы с широтной протяженностью (1650–2200 км).

2. Средние физико-химические характеристики аэрозоля

Прежде чем обсуждать средние характеристик аэрозоля в выделенных районах океана, сделаем пояснения относительно характера и репрезентативности исходных данных.

1. Представленные ниже характеристики (модели) аэрозоля – это средние многолетние данные, полученные в 14 ежегодных экспедициях (2004–2016 гг.) на одинаковом маршруте в Восточной Атлантике.

2. Пространственное усреднение параметров аэрозоля, ранее рассмотренных в [14], сгладило экстремумы их широтного распределения и сблизило средние значения в соседних районах. Нивелированию зональных различий способствовало также 5-градусное огрубление границ «аэрозольных» районов по обобщенному параметру $A(\varphi)$.

3. Объем данных по характеристикам АОТ на прямом (ноябрь–декабрь) и обратном (апрель–май) маршрутах примерно одинаков (675 и 660 среднечасовых значений) и достаточен для оценки сезонных различий (более подробно сроки и сезоны измерений приведены в [14]). Напомним также, что

в расчетах статистических характеристик АОТ использовался комбинированный массив данных двух фотометров: за основу были взяты результаты измерений фотометра SPM, а при их отсутствии привлекались данные Microtops II.

4. Количество приземных параметров аэрозоля (N_f , N_c , M_a , M_{bc}), полученных на прямых маршрутах (в Антарктиду) в Северном полушарии, было примерно в 2 раза больше, чем на обратных (из Антарктиды) – 1507 и 683 значения соответственно. Поэтому достоверность оценок средних значений на обратном маршруте (весна) несколько ниже.

5. Различие характеристик аэрозоля на прямом/обратном маршрутах примерно отражает амплитуду сезонной изменчивости (осень/весна), поскольку она (изменчивость) в значительной степени обусловлена континентальным влиянием, а содержание аэрозоля в большинстве континентальных внетропических районах максимально весной и минимально осенью.

Методические особенности определения химического состава аэрозоля и количество анализируемых данных рассмотрены в разд. 2.2.

2.1. Оптические и микрофизические характеристики

В [14] анализировалась широтная изменчивость всего комплекса оптических и микрофизических характеристик аэрозоля: спектральных АОТ τ_λ^a , параметров Ангстрема α и β , грубо- и мелкодисперсной компонент АОТ (τ^c и $\tau_{0,5}^f$ на длине волны 0,5 мкм), счетных концентрации (см^{-3}) частиц мелкодисперсной N_f ($d = 0,4\text{--}1,0$ мкм) и грубодисперсной N_c ($d > 1$ мкм) фракций, массовых концентраций аэрозоля M_a ($\text{мкг} \cdot \text{м}^{-3}$) и поглощающего вещества M_{bc} ($\text{мкг} \cdot \text{м}^{-3}$). В настоящей работе основное внимание уделим *первичным* (измеряемым) характеристикам аэрозоля: N_f , N_c , M_{bc} , τ_λ^a , $\tau_{0,5}^f$ и τ^c . Остальные параметры являются расчетными и производными от *первичных*: 1) показатель α зависит от соотношения ($\tau_{0,5}^f/\tau^c$) [14]; 2) параметр β примерно равен грубодисперсной компоненте τ^c [31]; 3) массовая концентрация M_a рассчитывалась по данным измерений счетных концентраций частиц: $M_a = \frac{4}{3} \sum_{i=1}^n N_i \rho \pi r_i^3$ (i – номер диапазона размеров; N_i – счетная концентрация частиц в этом диапазоне; r_i – средний радиус частиц; $\rho = 1,5 \text{ г/см}^3$ – плотность вещества аэрозоля).

Рассмотрим основные особенности широтно-сезонной изменчивости характеристик аэрозоля, подробно представленных в табл. 1, 2 и выборочно – на рис. 4. Прежде всего отметим, что средние значения большинства характеристик имеют статистически значимые различия между соседними районами с доверительной вероятностью не менее 0,95.

Таблица 1

Концентрации аэрозоля и «сажи» в шести районах Восточной Атлантики (N – количество среднечасовых значений на прямом/обратном маршрутах; первая строка – средние \pm СКО на прямом маршруте, вторая строка – на обратном)

Характеристика	Район					
	«Европа»	«Гибралтар»	«Северный пассат»	«Южный пассат»	«Южная Атлантика»	«Южный океан»
N	540/232	525/235	442/216	522/179	479/1632	6271
N_f , см^{-3}	8,86 \pm 8,01 10,56 \pm 8,13	6,44 \pm 4,66 5,73 \pm 4,50	14,0 \pm 8,84 6,57 \pm 4,19	4,93 \pm 2,78 11,07 \pm 4,25	5,26 \pm 3,38 5,67 \pm 3,32	1,99 \pm 2,80
N_c , см^{-3}	0,59 \pm 0,56 0,73 \pm 0,66	0,83 \pm 0,63 0,75 \pm 0,64	1,64 \pm 1,01 0,93 \pm 0,90	0,83 \pm 0,54 1,81 \pm 0,55	0,84 \pm 0,54 0,98 \pm 0,58	0,13 \pm 0,20
M_a , $\text{мкг}/\text{м}^3$	4,80 \pm 4,10 4,98 \pm 5,04	5,32 \pm 3,36 3,92 \pm 3,39	12,3 \pm 6,45 5,26 \pm 4,99	6,57 \pm 3,88 11,37 \pm 4,32	6,50 \pm 4,53 5,82 \pm 3,67	1,55 \pm 2,71
M_{bc} , $\text{мкг}/\text{м}^3$	0,32 \pm 0,29 0,214 \pm 0,197	0,089 \pm 0,087 0,089 \pm 0,091	0,443 \pm 0,282 0,201 \pm 0,151	0,090 \pm 0,075 0,129 \pm 0,066	0,063 \pm 0,066 0,040 \pm 0,043	0,021 \pm 0,013
N_f/N_c	15 14,5	7,76 7,64	8,54 7,06	5,96 6,11	6,27 5,79	15,3

Таблица 2

Характеристики АОТ в Восточной Атлантике (структура таблицы совпадает с табл. 1)

Характеристика	Район					
	«Европа»	«Гибралтар»	«Северный пассат»	«Южный пассат»	«Южная Атлантика»	«Южный океан»
N	17/79	112/162	161/130	86/108	299/181	1871
$\tau_{0,5}^a$	0,073 \pm 0,035 0,192 \pm 0,114	0,097 \pm 0,061 0,169 \pm 0,198	0,286 \pm 0,116 0,361 \pm 0,197	0,162 \pm 0,063 0,174 \pm 0,144	0,089 \pm 0,044 0,059 \pm 0,027	0,025 \pm 0,015
$\tau_{0,5}^f$	0,052 \pm 0,038 0,133 \pm 0,094	0,040 \pm 0,028 0,065 \pm 0,055	0,163 \pm 0,107 0,120 \pm 0,074	0,091 \pm 0,056 0,084 \pm 0,092	0,037 \pm 0,034 0,020 \pm 0,011	0,015 \pm 0,009
τ^c	0,022 \pm 0,018 0,059 \pm 0,030	0,057 \pm 0,049 0,105 \pm 0,153	0,123 \pm 0,078 0,242 \pm 0,139	0,071 \pm 0,04 0,090 \pm 0,068	0,052 \pm 0,035 0,039 \pm 0,023	0,01 \pm 0,01
β	0,045 \pm 0,026 0,078 \pm 0,041	0,067 \pm 0,058 0,123 \pm 0,178	0,178 \pm 0,094 0,278 \pm 0,167	0,096 \pm 0,033 0,108 \pm 0,080	0,066 \pm 0,032 0,048 \pm 0,027	0,013 \pm 0,013
α	0,83 \pm 0,43 1,24 \pm 0,34	0,62 \pm 0,33 0,64 \pm 0,39	0,74 \pm 0,28 0,43 \pm 0,17	0,77 \pm 0,28 0,64 \pm 0,29	0,52 \pm 0,31 0,53 \pm 0,38	1,24 \pm 0,56
$\tau_{0,5}^f/\tau^c$	2,36 2,25	0,70 0,62	1,32 0,46	1,28 0,93	0,71 0,51	1,5

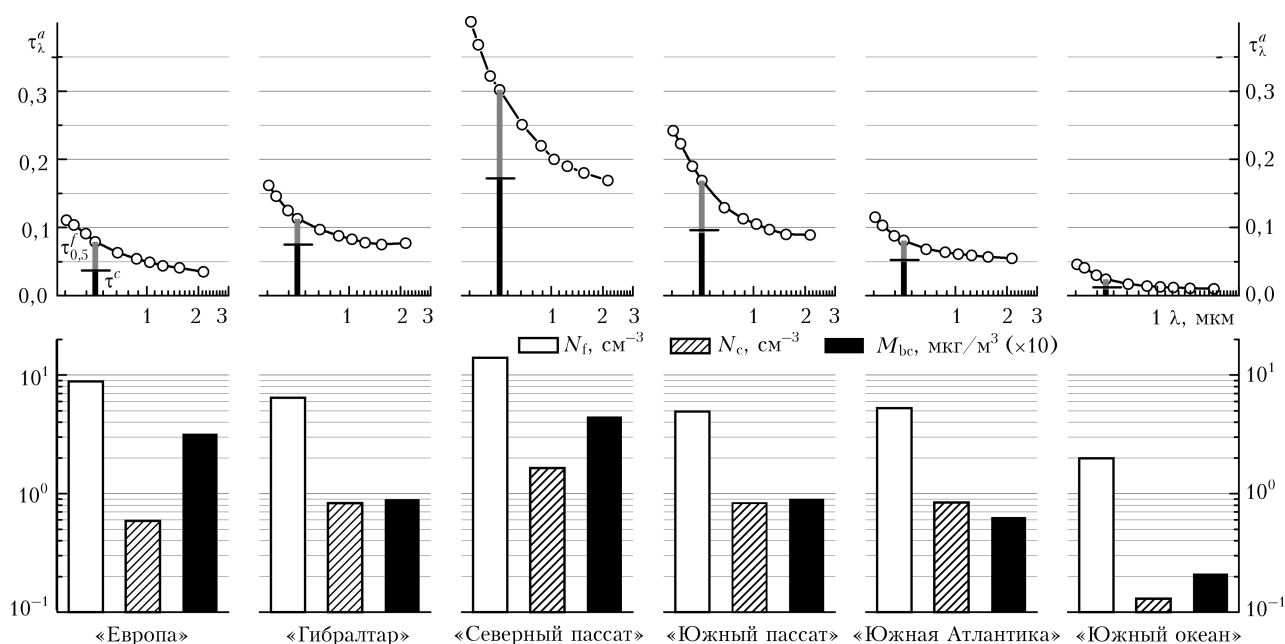


Рис. 4. Средние характеристики аэрозоля ($\tau^a(\lambda)$, $\tau_{0,5}^f$, τ^c , N_f , N_c , M_{bc}) в шести широтных зонах Восточной Атлантики на прямом маршруте РАЭ (ноябрь–декабрь)

Малые межрайонные отличия наблюдаются только в нескольких случаях, отмеченных в табл. 1, 2 серым цветом.

Общий диапазон зональной изменчивости *первичных* характеристик аэрозоля составляет примерно один порядок величины: самый большой — у массовой концентрации «сажи» (10–20 раз), а малый — у счетной концентрации мелких частиц (5,6–7,0 раз). Минимальным содержанием аэрозоля отличается атмосфера над Южным океаном, а максимальные значения большинства параметров аэрозоля — в тропической зоне. Однако в апреле–мае (обратный маршрут) более высокие средние значения $\tau_{0,5}^f$ и M_{bc} наблюдаются в зоне «Европа». Кроме того, весенние значения N_f вблизи Европы (10,6 см⁻³) практически достигают максимального уровня, отмечаемого в этот период в зоне «Южный пассат» (11 см⁻³).

Сезонные различия есть у всех характеристик аэрозоля, но со своими особенностями. У счетных концентраций частиц N_f , N_c и, как следствие, M_a сезонность проявляется в смещении тропического максимума из Северного полушария в Южное. У трех других характеристик (τ^c , $\tau_{0,5}^f$ и M_{bc}) максимум при смене сезона (осень/весна) сохраняется в районе «Северный пассат», но средние значения изменяются в 1,5–2,7 раза: τ^c увеличивается, $\tau_{0,5}^f$ и M_{bc} уменьшаются.

Обращает на себя внимание особенность зонального распределения отношения концентраций мелких и крупных частиц (см. последнюю строку табл. 1): независимо от сезона на большей части Восточной Атлантики отношение $N_f/N_c \approx 7$, а в крайних зонах («Европа» и «Южный океан») оно возрастает примерно вдвое. Качественно аналогичное распределение наблюдается в соотношении мелко- и грубодисперсных компонент АОТ ($\tau_{0,5}^f/\tau^c$) и у показателя селективности α (см. табл. 2). Однако причины повышенных значений этих характеристик в двух крайних зонах различны [14]: в первом случае — увеличение содержания мелкодисперсного аэрозоля, выносимого со стороны Европы, во втором — преобладающий спад концентраций грубодисперсного аэрозоля вблизи Антарктиды.

Анализ коэффициентов вариаций (в таблицах не приведены) *первичных* характеристик аэрозоля показал их относительно однородное распределение по широтным зонам в пределах 30–100% (в основном 50–80%), что существенно меньше зональной изменчивости. Аномально высокие (в ~1,5 раза) вариации отмечены в двух случаях: 1) у счетной концентрации частиц в зоне «Южный океан» из-за неполной очистки данных от искажающего влияния судовых источников аэрозоля при малых скоростях движения или стоянках во льдах; 2) у τ^c в зоне «Гибралтар» из-за небольшого числа событий выноса в этот район пылевого аэрозоля.

Средние спектральные зависимости АОТ $\tau^a(\lambda)$ в разных широтных зонах приведены в верхней части рис. 4. Заметим, что $\tau^a(\lambda)$ в данном случае

рассчитывались по меньшему (в 2–3 раза) числу измерений только фотометром SPM, работающим в более широкой области спектра 0,34–2,14 мкм, чем фотометр Microtops II (0,34–0,87 мкм). Вследствие этого (разной статистики) значения АОТ на рис. 4 несколько отличаются от данных табл. 2: в среднем на 0,01–0,02, максимально на 0,07.

Учитывая, что основные характеристики АОТ уже обсуждались выше, ограничимся двумя комментариями о зональной изменчивости $\tau^a(\lambda)$. Из рис. 4 видно, что максимальная селективность АОТ ($\alpha = 1,24$) наблюдается весной вблизи Европы и над Южным океаном, а самый пологий спектральный ход — в зоне «Северный пассат» (здесь максимальные $\tau^c = 0,24$ и минимальные $\alpha = 0,43$). Нижнее положение занимают спектральные зависимости $\tau^a(\lambda)$ в чистой атмосфере над Южным океаном, а верхнее — в тропической зоне (северной и южной). Промежуточное положение спектральных АОТ в других районах зависит от сезона и спектрального участка (видимый или ИК-диапазон).

2.2. Концентрации ионов и газообразных примесей

Наряду с измерением оптических и микрофизических характеристик аэрозоля на маршруте РАЭ проводился отбор проб воздуха на фильтры для последующего определения ионного состава аэрозоля и содержания газообразных примесей (SO₂, HCl, HNO₃, NH₃). В данной работе рассмотрим главные водорастворимые ионы (K⁺, Mg²⁺, Na⁺, Ca²⁺, NH₄⁺, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻), суммарный вклад которых составлял 95–96%. Оставшиеся ~3% приходились на долю ионов водорода и менее 1% — на долю нитритов, бромидов и фосфатов. Масса этих ионов в среднем составляла ~0,03 мкг/м³. Из-за меньшего числа данных (в сравнении с микрофизическими параметрами) подробный широтный ход химического состава аэрозоля в [14] не рассматривался. Поэтому поясним методические особенности этих измерений и количество анализируемых данных.

Отбор проб проводился стандартным методом, принятым в международных сетях мониторинга EANET и EMEP. Как и в других наших экспедициях (см., например, [25]), при отборе проб воздуха в течение 8–12 ч прокачивался через блок из четырех последовательно соединенных фильтров. Аэрозоль собирался на первом тефлоновом фильтре PTFE с диаметром пор 0,8 мкм. Последующие фильтры — ULTIPOR N (полиамидный, диаметр пор 0,45 мкм) и два импрегнированных фильтра Whatman с щелочной и кислой основами — служили для улавливания газообразных примесей. Химический анализ выполнялся в ЦКП «Ультрамикрoанализ» методом ионной хроматографии на системе ICS-3000 (Dionex, США).

Всего в девяти экспедициях было отобрано 552 пробы. Из анализа были исключены 105 проб, полученных в неблагоприятных погодных условиях, когда морская составляющая (Na⁺, Cl⁻) была на порядок выше по сравнению с другими ионами.

Таким образом, для определения среднего химического состава использовались 447 проб (100 отобранных на прямом маршруте в Атлантике, 91 — на обратном и 256 — в Южном океане). Распределение проб по отдельным широтным зонам приведено в верхней строке табл. 3. Учитывая пока недостаточное количество данных по выделенным районам и относительно малое различие концентраций большинства ионов на прямом и обратном маршрутах, расчет статистических характеристик проводился без разделения по сезонам (прямой и обратный маршруты вместе).

В пространственно-временных вариациях химического состава аэрозоля есть две особенности, отличающие его от оптических/микрофизических характеристик. Первое отличие — более значительная изменчивость концентраций ионов и газообразных примесей во всех широтных зонах: коэффициенты вариаций меняются от 52% (SO_4^{2-} в зоне «Гибралтар») до примерно 300%. На повышенную изменчивость отчасти могло повлиять малое количество отобранных проб в отдельных широтных зонах, и особенно в Северном полушарии (от 17 до 33). Поэтому дополнительно были рассчитаны средние концентрации для всей Восточной Атлантики — от 60° с.ш. до 55° ю.ш. (см. последний столбец табл. 3).

Второе отличие состоит в относительно слабой зональной изменчивости ионного состава аэрозоля (кроме NO_3^-): средние концентрации ионов в отдельных районах различаются в 1,3–2,9 раза. Самые низкие концентрации наблюдаются над Южным океаном, а также в зоне «Европа» (кроме SO_4^{2-} и NO_3^-). По содержанию ионов преимущественно морского происхождения (Na^+ , Mg^{2+} , Cl^-) лидирует «Южная Атлантика» — здесь маршрут наиболее

удален от континента. Максимальный уровень концентраций большинства «континентальных» ионов (SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+) наблюдается в зоне «Гибралтар», а Ca^{2+} — в зоне «Северный пассат».

Характерной особенностью пространственного распределения иона NO_3^- является более высокий уровень концентраций в Северном полушарии (0,40–0,48 мкг · м⁻³) в сравнении с Южным (0,06–0,16 мкг · м⁻³). Концентрации NO_3^- , наряду с максимальной зональной изменчивостью (различие в 8 раз), отличаются и самой большой временной изменчивостью — коэффициенты вариаций достигают 267%.

Зональное различие концентраций газообразных примесей, в сравнении с микрофизическими параметрами аэрозоля, тоже невелико: соотношение максимальных и минимальных концентраций находится в диапазоне от 1,55 для HCl до 4,3 для SO₂. Географическое распределение примесей характеризуется следующими особенностями. Самыми низкими концентрациями отличается тропическая зона — северная (HCl, SO₂, HNO₃) или южная (NH₃). Максимальные концентрации HCl и NH₃ наблюдаются над Южной Атлантикой, а SO₂ и HNO₃ — вблизи Европы. Интересно, что содержание газообразных примесей в чистой атмосфере Южного океана оказалось в середине общего диапазона зональной изменчивости.

Дополнительно было оценено различие средних концентраций ионов и газообразных примесей над Восточной Атлантикой (60° с.ш. — 55° ю.ш.) и Южным океаном (> 55° ю.ш.), наиболее удаленным от континентальных источников (см. 2 последних столбца табл. 3). Сравнение показало, что средние концентрации большинства ионов (кроме NH_4^+

Таблица 3

Средние (\pm СКО) концентрации (мкг · м⁻³) ионов и малых газовых примесей в разных широтных зонах Атлантики (N — количество проб; Σ_{ions} — суммарное содержание ионов)

Компоненты	Район						
	«Европа»	«Гибралтар»	«Северный пассат»	«Южный пассат»	«Южная Атлантика»	«Южный океан»	Восточная Атлантика
	N = 17	31	33	36	74	256	191
<i>Ионы</i>							
Na ⁺	0,98 ± 0,85	1,42 ± 0,97	1,26 ± 1,07	1,38 ± 0,95	1,84 ± 1,07	0,76 ± 0,81	1,51 ± 1,04
NH ₄ ⁺	0,12 ± 0,13	0,18 ± 0,22	0,12 ± 0,19	0,12 ± 0,18	0,15 ± 0,27	0,14 ± 0,20	0,14 ± 0,22
K ⁺	0,09 ± 0,08	0,12 ± 0,12	0,10 ± 0,10	0,10 ± 0,06	0,12 ± 0,10	0,09 ± 0,09	0,11 ± 0,09
Mg ²⁺	0,08 ± 0,08	0,19 ± 0,13	0,18 ± 0,19	0,17 ± 0,14	0,23 ± 0,17	0,09 ± 0,11	0,19 ± 0,16
Ca ²⁺	0,10 ± 0,10	0,14 ± 0,15	0,25 ± 0,31	0,14 ± 0,20	0,17 ± 0,13	0,10 ± 0,11	0,17 ± 0,19
Cl ⁻	1,61 ± 1,40	2,38 ± 1,77	2,01 ± 1,81	2,44 ± 1,80	3,09 ± 1,93	1,34 ± 1,43	2,54 ± 1,87
NO ₃ ⁻	0,42 ± 0,37	0,48 ± 0,44	0,40 ± 0,61	0,16 ± 0,20	0,11 ± 0,21	0,06 ± 0,16	0,26 ± 0,40
SO ₄ ²⁻	0,64 ± 0,39	0,86 ± 0,45	0,69 ± 0,57	0,63 ± 0,47	0,68 ± 0,45	0,36 ± 0,30	0,70 ± 0,47
Σ_{ions}	4,04 ± 2,68	5,76 ± 3,07	5,01 ± 4,00	5,13 ± 3,56	6,38 ± 3,76	2,94 ± 2,78	5,62 ± 3,59
<i>Малые газообразные примеси</i>							
HCl	5,05 ± 8,45	4,73 ± 6,34	4,17 ± 4,98	5,26 ± 4,68	6,47 ± 5,22	5,18 ± 5,43	5,41 ± 5,68
HNO ₃	0,68 ± 0,82	0,53 ± 0,69	0,27 ± 0,20	0,28 ± 0,20	0,33 ± 0,31	0,41 ± 1,60	0,38 ± 0,46
SO ₂	6,05 ± 11,6	3,33 ± 4,32	1,41 ± 3,84	2,29 ± 3,56	1,44 ± 2,28	1,94 ± 3,65	2,53 ± 4,88
NH ₃	1,95 ± 2,35	1,20 ± 1,29	1,30 ± 1,42	1,11 ± 1,46	2,12 ± 2,63	1,66 ± 2,02	1,62 ± 2,07

и K^+) над Атлантикой в 2 раза выше, чем над Южным океаном, а содержание газообразных примесей и ионов NH_4^+ и K^+ — практически одинаковое.

Таким образом, в отличие от микрофизических/оптических характеристик аэрозоля пространственное распределение концентраций ионов и газообразных примесей над океаном более однородное. Зональные различия концентраций меньше или сопоставимы с временной изменчивостью, обусловленной сменой синоптических и гидрометеорологических условий.

Интересно сопоставить средние концентрации ионов и газообразных примесей в широтных зонах на маршруте РАЭ с данными наших экспедиций в других районах Мирового океана: Каспийском [32], Аравийском и Красном морях [33], Северном Ледовитом океане (север Карского моря и море Лаптевых) и дальневосточных морях [25]. Заметим, что количество проб, отобранных в этих экспедициях, существенно меньше, чем в РАЭ, поэтому результаты сопоставления носят оценочный характер.

Среди рассмотренных районов самый низкий уровень концентраций большинства ионов зарегистрирован на севере морей Лаптевых и Карского ($\Sigma_{ions} = 1,39 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$); над Южным океаном содержание ионов оказалось в 2–3 раза выше. Максимальными средними концентрациями ионов отличаются Аравийское и Красное моря — $\Sigma_{ions} = 18$ и $9,2 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ соответственно. По «морским» ионам следующими по значимости идут «Южная Атлантика» и другие районы на маршруте РАЭ, а по «континентальным» ионам — Каспийское море. Концентрации «континентальных» ионов в четырех широтных зонах Атлантики севернее 20° ю.ш. ближе всего к данным над дальневосточными морями и занимают промежуточное положение среди рассмотренных районов океана.

Сравнение средних концентрации газообразных примесей в различных районах океана показано следующее. Атмосфера на всем маршруте РАЭ отличается высоким содержанием HCl ($4,17$ – $6,47 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$). Большие значения были получены только над Японским и Охотским морями ($16,3$ и $20,9 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$). Концентрации HNO_3 , наоборот, на большей части Атлантики (южнее 20° с.ш.) низкие, такие же, как над арктическими и дальневосточными морями ($0,11$ – $0,46 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$). Концентрации SO_2 и NH_3 в Восточной Атлантике попадают в середину общего диапазона изменчивости этих примесей в других районах океана [25, 32, 33]: $0,15$ – $5,00 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ для SO_2 и $0,04$ – $7,17 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ для NH_3 .

Заключение

В работе обобщены результаты измерений комплекса физико-химических характеристик аэрозоля в 14 экспедициях (2004–2016 гг.) по одному и тому же маршруту в Восточной Атлантике от Ламанша до берегов Антарктиды. На основе общих закономерностей пространственного распределения аэрозоля проведено его районирование — определе-

ны границы шести широтных зон ($>45^\circ$ с.ш., 20 – 45° с.ш., 0 – 20° с.ш., 0 – 20° ю.ш., 20 – 55° ю.ш., $>55^\circ$ ю.ш.) и оценена долготная протяженность «аэрозольных» районов (1200 – 2500 км).

Для выделенных районов вычислены средние значения основных характеристик аэрозоля: АОТ атмосферы, мелко- и грубодисперсной компонент АОТ, счетных концентраций частиц, массовых концентраций в аэрозоле поглощающего вещества и водорастворимых ионов (Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , K^+ , Ca^{2+} , NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-}), а также содержание газообразных примесей (SO_2 , HCl , HNO_3 , NH_3). Полученные характеристики можно рассматривать в качестве эмпирической модели зонального распределения аэрозоля в Восточной Атлантике.

Самые большие средние значения большинства оптических и микрофизических характеристик наблюдаются в тропической зоне, минимальные — над Южным океаном. Диапазон зональной изменчивости параметров аэрозоля составляет около одного порядка: от $5,6$ – $7,0$ раз у счетной концентрации мелких частиц до 10 – 20 раз у массовой концентрации «сажи». При смене сезона (осень/весна) тропический максимум концентраций N_f , N_c и M_a смещается из Северного полушария в Южное. У трех других *первичных* характеристик аэрозоля максимум сохраняется в зоне «Северный пассат», но средние значения изменяются в $1,5$ – $2,7$ раза ($\tau_{0,5}^f$ и M_{bc} уменьшаются, τ^c увеличивается). Коэффициенты вариаций характеристик аэрозоля во всех широтных зонах в основном попадают в диапазон 50 – 80% , что значительно меньше зональной изменчивости.

В отличие от оптических/микрофизических характеристик аэрозоля зональные различия концентраций ионов (за исключением NO_3^-) и газообразных примесей существенно меньше и сопоставимы с синоптической изменчивостью. Диапазон зональной изменчивости (отношение максимальных/минимальных концентраций) составляет $1,3$ – $2,9$ у ионов и $1,5$ – $4,3$ у газообразных примесей при коэффициентах вариаций в каждой зоне 60 – 300% .

Минимальные концентрации всех ионов характерны для атмосферы Южного океана и/или вблизи Европы: $\Sigma_{ions} \approx 3$ и $4 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ соответственно. Максимальные уровни суммарной концентрации ($\Sigma_{ions} = 6,38 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$) и концентрации «морских» ионов (Na^+ , Mg^{2+} , Cl^-) наблюдаются в зоне «Южная Атлантика», а большинства «континентальных» ионов (SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+) — в зоне «Гибралтар» (Ca^{2+} — в «Северном пассате»). Отмечены повышенная зонально-временная изменчивость и специфика географического распределения ионов NO_3^- — средние концентрации в Северном полушарии ($0,40$ – $0,48 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$) существенно больше, чем в Южном ($0,06$ – $0,16 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$).

Географическое распределение газообразных примесей отличается от распределения как ионного состава аэрозоля, так и микрофизических параметров. Минимальный уровень концентраций характерен для тропической зоны — северной (HCl , SO_2 , HNO_3) или южной (NH_3). Максимальные концен-

трации HCl и NH₃ наблюдаются над Южной Атлантикой, а SO₂ и HNO₃ – вблизи Европы.

Показано, что средние концентрации большинства ионов в целом над Восточной Атлантикой (60° с.ш.–55° ю.ш.) вдвое выше, чем над Южным океаном (>55° ю.ш.), а концентрации газообразных примесей и ионов NH₄⁺ и K⁺ различаются незначительно.

В заключение отметим приоритет проведенного статистического обобщения с точки зрения комплексного представления физико-химических характеристик аэрозоля в Восточной Атлантике, основанного на данных многолетних единообразных измерений. Однако продолжительность рядов наблюдений пока не удовлетворяет современным требованиям климатических обобщений (около 30 лет), поэтому необходимо уточнение полученных данных, в том числе их сезонной изменчивости в различных широтных зонах.

Авторы выражают благодарность руководителям РАЭ за содействие в проведении исследований, А. Smirnov – за предоставление фотометра Microtops II, а также коллегам, которые разрабатывали приборы и участвовали в измерениях – Н.И. Власову, А.В. Губину, А.С. Кессель, К.Е. Лубо-Лесниченко, В.В. Полькину, А.Н. Прахову, Д.Е. Савкину, С.А. Терпуговой, С.А. Турчиновичу, Ю.С. Турчиновичу, А.Б. Тихомирову, В.П. Шмаргунову.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН (проект № П.2П/IX.133-3).

1. *Бартенева О.Д., Никитинская Н.И., Сакунов Г.Г., Веселова Л.К.* Прозрачность толщи атмосферы в видимой и ИК-области спектра. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 224 с.
2. *Шифрин К.С., Волгин В.М., Волков Б.Н., Еришов О.А., Смирнов А.В.* Оптическая толщина аэрозоля атмосферы над морем // Исслед. Земли из космоса. 1985. № 4. С. 21–30.
3. *Волгин В.М., Еришов О.А., Смирнов А.В., Шифрин К.С.* Оптическая толщина аэрозоля в характерных морских регионах // Изв. АН СССР. Физика атмосф. и океана. 1988. Т. 24, № 10. С. 1058–1064.
4. *Tomasi C., Prodi F.* Measurement of atmospheric turbidity and vertical mass loading of particulate matter in marine environments (Red Sea, Indian Ocean, and Somali Coast) // J. Geophys. Res. 1982. V. 87, N C2. P. 1279–1286.
5. *Moorthy K.K., Satheesh S.K., Baby S.S., Saha A.* Large latitudinal gradients and temporal heterogeneity in aerosol black carbon and its mass mixing ratio over southern and northern oceans observed during a transcontinental cruise experiment // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. P. L14818. DOI: 10.1029/2005GL023267.
6. *Копейкин В.М., Репина И.А., Гречко Е.И., Огородников Б.И.* Измерение содержания сажевого аэрозоля над водной поверхностью в Южном и Северном полушариях // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 444–450; *Kopeikin V.M., Repina I.A., Grechko E.I., Ogorodnikov B.I.* Measurements of soot aerosol content in the near-water atmospheric layer in Southern and Northern hemispheres // Atmos. Ocean. Opt. 2010. V. 23, N 6. P. 500–507.
7. *Bates T.S., Quinn P.K., Covert D.S., Coffman D.J., Johnson J.E., Wiedensohler A.* Aerosol physical properties and controlling processes in lower marine boundary layer: A comparison of submicron data from ACE-1 and ACE-2 // Tellus B. 2000. V. 52. P. 258–272.
8. *Raes F., Bates T.S., McGovern F., van Liedekerke M.* The 2nd aerosol characterization experiment (ACE-2): General overview and main results // Tellus B. 2000. V. 52. P. 111–125.
9. *Sakerin S.M., Kabanov D.M.* Spatial inhomogeneities and the spectral behavior of atmospheric aerosol optical depth over the Atlantic Ocean // J. Atmos. Sci. 2002. V. 59, N 3, part 1. P. 484–500.
10. *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 // Int. J. Remote Sens. 2008. V. 29, N 9. P. 2519–2547. DOI: 10.1080/01431160701767492.
11. *Smirnov A., Holben B.N., Kaufman Y.J., Dubovik O., Eck T.F., Slutsker I., Pietras C., Halthore R.N.* Optical properties of atmospheric aerosol in maritime environments // J. Atmos. Sci. 2002. V. 59, N 3, part 1. P. 501–523.
12. *Лисицын А.П.* Аридная седиментация в Мировом океане. Рассеянное осадочное вещество атмосферы // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 10. С. 1398–1439.
13. *Кабанов Д.М., Сакерин С.М.* Прозрачность атмосферы над Атлантическим океаном. Ч. 2. Вариации аэрозольной оптической толщи и влагосодержания атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13, № 8. С. 715–722.
14. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Полькин В.В., Радионон В.Ф., Holben B.N., Smirnov A.* Вариации оптических и микрофизических характеристик аэрозоля на маршруте Российских антарктических экспедиций в Восточной Атлантике // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 8. С. 666–678. DOI: 10.15372/AOO20160808; *Sakerin S.M., Kabanov D.M., Polkin V.V., Radionov V.F., Holben B.N., Smirnov A.* Variations in aerosol optical and microphysical characteristics along the route of Russian Antarctic expeditions in the East Atlantic // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 1. P. 89–102.
15. *Бартенева О.Д., Веселова Л.К., Никитинская Н.И.* Об оптических свойствах атмосферного аэрозоля тропической зоны Атлантического океана // ТРОПЕКС-72. Л.: Гидрометеиздат, 1974. С. 482–493.
16. *Шифрин К.С., Гашко В.А., Новозрудский Б.В.* Спектральная прозрачность атмосферы над тропической частью Индийского океана // Гидрофизические и оптические исследования в Индийском океане. М.: Наука, 1975. С. 164–170.
17. *Гашко В.А., Шифрин К.С.* Спектральная прозрачность атмосферы в северо-западной части Тихого океана // Оптика моря. М.: Наука, 1983. С. 190–194.
18. *Еришов О.А., Смирнов А.В., Шифрин К.С.* Исследование спектральной прозрачности и солнечного ореола в атмосфере над океаном // Изв. АН СССР. Физика атмосф. и океана. 1990. Т. 26, № 4. С. 388–394.
19. *Tomasi C., Kokhanovsky A.A., Lupi A., Ritter C., Smirnov A., Mazzola M., Stone R.S., Lanconelli C., Vitale V., Holben B.N., Nyeki S., Wehrli C., Altonen V., de Leeuw G., Rodriguez E., Herber A.B., Stebel K., Stohl A., O'Neill N.T., Radionov V.F., Zielinski T., Petelski T., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Xue Y., Mei L., Istomina L., Wagener R., McArthur B., Sobolewski P.S., Butler J., Kivi R., Courcoux Y., Larouche P., Broccardo S., Piketh S.J.* Aerosol remote

- sensing in polar regions // *Earth-Sci. Rev.* 2015. V. 140. P. 108–157.
20. Смеркалов В.А. Прикладная оптика атмосферы. СПб.: Гидрометеоздат, 1997. 334 с.
 21. Smirnov A., Holben B.N., Slutsker I., Giles D., McClain C.R., Eck T.F., Sakerin S.M., Macke A., Croot P., Zibordi G., Quinn P., Sciare J., Kinne S., Harvey M., Smyth T., Piketh S., Zielinski T., Proshutinsky A., Goes J., Seigel D.A., Larouche P., Radionov V.F., Goloub P., Krishnamoorthy K., Matarrese R., Robertson L., Jourdin F. Maritime aerosol network as a component of Aerosol Robotic Network // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. P. D06204. DOI: 10.1029/2008JD011257.
 22. Сакерин С.М., Власов Н.И., Кабанов Д.М., Лубо-Лесниченко К.Е., Прахов А.Н., Радионов В.Ф., Турчинович Ю.С., Holben B.N., Smirnov A. Результаты спектральных измерений аэрозольной оптической толщины атмосферы солнечными фотометрами в 58 Российской антарктической экспедиции // *Оптика атмосф. и океана.* 2013. Т. 27, № 12. С. 1059–1067; Sakerin S.M., Vlasov N.I., Kabanov D.M., Lubo-Lesnichenko K.E., Prakhov A.N., Radionov V.F., Turchinovich Yu.S., Holben B.N., Smirnov A. Results of spectral measurements of atmospheric aerosol optical depth with sun photometers in the 58th Russian Antarctic Expedition // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 5. P. 393–402.
 23. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Панченко М.В., Полькин В.В. О широтной зависимости и взаимосвязях характеристик аэрозоля в атмосфере Южной Атлантики // *Оптика атмосф. и океана.* 2006. Т. 19, № 7. С. 611–621.
 24. Sakerin S.M., Smirnov A.V., Kabanov D.M., Pol'kin 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. V. 112. P. D10220. DOI: 10.1029/2006JD007947.
 25. Sakerin S.M., Bobrikov A.A., Bukin O.A., Golobokova L.P., Polkin Vas.V., Polkin Vik.V., Shmirko K.A., Kabanov D.M., Khodzher T.V., Onischuk N.A., Pavlov A.N., Potemkin V.L., Radionov V.F. On measurements of aerosol-gas composition of the atmosphere during two expeditions in 2013 along Northern Sea Route // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15, iss. 21. P. 12413–12443. DOI: 10.5194/acp-15-1-2015.
 26. Knobelspiesse K.D., Pietras C., Fargion G.S., Wang M.H., Frouin R., Miller M.A., Subramaniam S., Balch W.M. Maritime aerosol optical thickness measured by handheld sunphotometers // *Remote Sens. Environ.* 2004. N 93. P. 87–106.
 27. 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 // *Int. J. Remote Sens.* 2014. V. 35, N 15. P. 5722–5741.
 28. Sakerin S.M., Kabanov D.M., Polkin V.V. Estimate of latitudinal and longitudinal boundaries of aerosol regions in the East Atlantic // *Proc. SPIE. Atmos. Phys.* / G.G. Matvienko, O.A. Romanovskii (eds.). 2017. V. 10466. P. 10466-19.
 29. Kabanov D.M., Gulev S.K., Holben B.N., Radionov V.F., Sakerin S.M., Smirnov A. Latitudinal distribution of the aerosol optical depth over oceans in southern hemisphere // *Proc. SPIE.* 2014. V. 9292. P. 9292940. DOI: 10.1117/12.2074564.
 30. Acker J.G., Leptoukh G. Online analysis enhances use of NASA Earth Science Data // *Eos, Trans. Amer. Geophys. Union.* 2007. V. 88. P. 14–17.
 31. Сакерин С.М., Кабанов Д.М. О взаимосвязях параметров формулы Ангстрема и аэрозольной оптической толщины атмосферы в области спектра 1–4 мкм // *Оптика атмосф. и океана.* 2007. Т. 20, № 3. С. 222–228.
 32. Полькин В.В., Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Голобокова Л.П. Результаты сравнительных исследований оптических, микрофизических характеристик и химического состава аэрозоля над Каспийским морем в 26-м и 41-м рейсах НИС «Рифт» // *Оптика атмосф. и океана.* 2013. Т. 26, № 8. С. 628–635; Pol'kin V.V., Kabanov D.M., Sakerin S.M., Golobokova L.P. Comparative studies of optical and microphysical characteristics and chemical composition of aerosol over water basin of Caspian sea in the 29th and 41st cruises of RV rift // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 1. P. 16–23.
 33. Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Кабанов Д.М., Полькин В.В., Турчинович Ю.С., Ходжер Т.В., Хуриганова О.И. Пространственно-временная изменчивость характеристик аэрозоля на маршруте Индо-Атлантической экспедиции НИС «Академик Николай Страхов» // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 1. С. 42–52. DOI: 10.15372/AOO20170106; Sakerin S.M., Golobokova L.P., Kabanov D.M., Pol'kin V.V., Turchinovich Yu.S., Khodzher T.V., Khuriganova O.I. Spatiotemporal variations in aerosol characteristics along the route of the Indian-Atlantic Expedition onboard the research vessel "Akademik Nikolaj Strakhov" // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 4. P. 349–359.

S.M. Sakerin, L.P. Golobokova, D.M. Kabanov, V.V. Pol'kin, V.F. Radionov. Zonal distribution of aerosol physical-chemical characteristics in the Eastern Atlantic.

Based on long-term (2004–2016) expedition studies, statistical generalization and zoning of physical-chemical aerosol characteristics in the Eastern Atlantic (from English Channel to Antarctica) are performed. For six latitudinal zones of the Atlantic and Southern Oceans (> 45°N; 20°–45°N; 0°–20°N; 0°–20°S; 20°–55°S; > 55°S) the average values of the main aerosol characteristics are calculated, i.e., atmospheric AOD, fine and coarse AOD components, particle number concentrations, and mass concentrations of aerosol, black carbon, and water-soluble ions (Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻, K⁺, Ca²⁺, NH₄⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻), as well as of gas admixtures (SO₂, HCl, HNO₃, NH₃).

It is shown that the zonal variability range of optical and microphysical aerosol characteristics is about an order of magnitude: the largest (minimal) average values are observed in the tropical zone (Southern Ocean). The zonal differences (a factor of 1.3 to 4.3) in concentrations of ions and gas admixtures are much smaller and comparable to synoptic variations. The concentrations of "marine" ions are maximal over the Southern Atlantic, and of "continental" ions, in the Northern hemisphere, in tropical and subtropical zones; the concentrations of all ions are minimal over the Southern Ocean. The specific features of geographic distribution of gas admixtures are noted: the maximal concentrations of HCl and NH₃ are observed over the Southern Atlantic, of SO₂ and HNO₃, near Europe, and the lowest level is observed in the tropical zone.