

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.510.4

**Пространственно-временная изменчивость характеристик
аэрозоля на маршруте Индо-Атлантической экспедиции
НИС «Академик Николай Страхов»**

**С.М. Сакерин¹, Л.П. Голобокова², Д.М. Кабанов¹, В.В. Польшкин¹,
Ю.С. Турчинович¹, Т.В. Ходжер², О.И. Хуриганова^{2*}**

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*

Поступила в редакцию 16.09.2016 г.

Обсуждаются результаты исследований физико-химического состава атмосферного аэрозоля в экспедиции НИС «Академик Николай Страхов», проведенной зимой 2015/2016 г. на маршруте от Коломбо до Калининграда (через Суэцкий канал). В сравнении со Средиземным морем и Атлантикой (вблизи Европы) в атмосфере Аравийского и Красного морей отмечены более высокие значения большинства характеристик аэрозоля: аэрозольной оптической толщи (АОТ) в 3–5 раз, счетной концентраций аэрозоля – в 4 раза, концентраций ионов континентального и морского происхождения – в 1,5 раза, а также газообразных примесей (SO₂, HCl, HNO₃, NH₃). Вместе с тем по составу аэрозоля между двумя морями Индийского бассейна есть существенные отличия, обусловленные выносами с континентов различных типов аэрозоля. Над Аравийским морем – самые большие концентрации «сажи» (в среднем, 2,14 мкг · м⁻³) ионов морского происхождения (Na⁺, Cl⁻, Mg²⁺) и NH₃. Над Красным морем – более высокие значения мелкодисперсной компоненты АОТ, концентраций «континентальных» ионов (SO₄²⁻, Ca²⁺, NO₃⁻, NH₄⁺) и газообразных примесей – SO₂, HCl, HNO₃. По ионному составу аэрозоля наиболее устойчивые концентрации отмечены у ионов Ca²⁺ (различие между морями менее 15%), а максимальная пространственная изменчивость – у ионов NH₄⁺ (различие до 40 раз).

Ключевые слова: аэрозольная оптическая толщина, концентрации аэрозоля и «сажи», химический состав, Индийский и Атлантический океан; aerosol optical depth, aerosol and “black carbon” concentrations, chemical composition, Indian and Atlantic Ocean.

Введение

Знание физико-химического состава и закономерностей изменчивости атмосферного аэрозоля необходимо для решения многих задач по проблемам климата, экологии и дистанционного зондирования. С этой целью ведется мониторинг характеристик аэрозоля в континентальных районах (см. например, [1–5]) и менее регулярные измерения в морских экспедициях [6–10 и др.]. Результаты исследований аэрозоля над океаном показали, что на его содержание и характеристики существенное влияние оказывают воздушные массы, поступающие с континентов. Наиболее известными являются пас-

сатный перенос Сахарской пыли в Атлантику и муссонные выносы аэрозолей различного типа в акватории Тихого и Индийского океанов.

Атмосфера над морями Индийского океана обогащается антропогенным и дымовым аэрозолем, возникающим при сжигании различных видов топлива и сельскохозяйственных отходов в густонаселенных районах Индии. Все возрастающее загрязнение атмосферы над Индостаном и прилегающими морскими акваториями (Аравийское море, Бенгальский залив) стало объектом интенсивных исследований в последние 10–20 лет [11–17 и др.]. Значительное континентальное влияние испытывает и атмосфера над Красным морем, но здесь преобладают выносы минерального аэрозоля различного типа [18] и продуктов нефтедобывающей промышленности из стран Ближнего Востока [19].

Из-за эпизодичности морских экспедиций к изучению аэрозоля все шире привлекаются данные космического зондирования [20–22], позволяющие оценивать пространственное распределение характери-

* 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); Юрий Сергеевич Турчинович (tus@iao.ru); Тамара Викторовна Ходжер (khodzher@lin.irk.ru); Ольга Иннокентьевна Хуриганова (khuriganowa@lin.irk.ru).

стик аэрозоля и/или средние закономерности их изменчивости (синоптической, сезонной, межгодовой).

В данной работе обсуждаются результаты измерений физико-химического состава атмосферного аэрозоля с борта НИС «Академик Николай Страхов» на маршруте от Коломбо до Калининграда (через Суэцкий канал). Особое внимание уделяется анализу данных, полученных над Аравийским и Красным морями, подверженными выносам континентального аэрозоля со стороны Индостана, Аравийского полуострова и Северо-Восточной Африки.

1. Характеристика экспедиционных измерений

Зимой 2015/2016 г. с борта НИС «Академик Николай Страхов» проведены исследования пространственно-временной изменчивости комплекса характеристик аэрозоля на маршруте Коломбо – Аравийское, Красное, Средиземное море – Атлантический океан – Ла-Манш – Калининград (рис. 1). Измерения характеристик аэрозоля выполнялись стандартными для наших морских экспедиций [2, 9, 23, 24] методами и приборами в составе портативного солнечного фотометра SPM [25], фотоэлектрического счетчика частиц АЗ-10 [26], аэролометра («сажемера») [27] и заборника проб аэрозоля на фильтры.

С помощью солнечного фотометра измерялась аэрозольная оптическая толщина (АОТ) в диапазоне спектра 0,34–2,14 мкм, влагосодержание атмосферы W и рассчитывались параметры α , β формулы Ангстрема:

$$\tau^a(\lambda) = \beta \cdot \lambda^{-\alpha}. \quad (1)$$

Кроме того, результаты измерений АОТ в ИК-диапазоне ($\lambda > 1$ мкм) позволили выделить две составляющие, обусловленные ослаблением радиации грубо- и мелкодисперсным аэрозолем [2, 28]:

$$\tau^a(\lambda) = \tau^c + \tau^f(\lambda) \approx \tau^c + m \cdot \lambda^{-n}, \quad (2)$$

где τ^c и τ^f – грубо- и мелкодисперсные компоненты АОТ (τ^f , как и ранее, приводится для длины волны 0,5 мкм), m и n – параметры спектральной зависимости $\tau^f(\lambda)$.

К анализу результатов судовых измерений привлекались данные спутниковых наблюдений MODIS/Aqua&Terra над Аравийским морем: АОТ на длине волны 0,55 мкм, коллекция 6 [29, 30]. По результатам многолетних (2002–2015 гг.) спутниковых измерений рассмотрено среднее пространственное распределение АОТ вдоль оси основного потока выноса континентального аэрозоля – от середины западного побережья п-ва Индостан до середины восточного побережья п-ва Сомали с разрешением $3^\circ \times 3^\circ$ (шаг около 350 км). Кроме того, проведено сравнение судовых и спутниковых (с разрешением $3^\circ \times 2^\circ$) значений АОТ вдоль маршрута в Аравийском море непосредственно в период экспедиции – с 16 по 24 декабря 2015 г.

По данным измерений фотоэлектрического счетчика и аэролометра определялись: счетная концентрация частиц в диапазоне диаметров 0,3–10 мкм (N_A , см⁻³), функции распределения частиц по объемам ($\Delta V/\Delta d$), массовые концентрации аэрозоля (M_A , мкг · м⁻³) и поглощающего вещества – «сажи» (M_{BC} , мкг · м⁻³) в составе субмикронного аэрозоля. Массовая концентрация M_A рассчитывалась по счетным концентрациям N_A для плотности частиц $1,5 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ (пример расчета приведен в [31]). Забор воздуха в счетчик частиц и аэролометр осуществлялся с высоты ~12 м над уровнем моря по силиконовым шлангам длиной 0,5–1 м. Измерения параметров аэрозоля выполнялись в программно заданном режиме – круглосуточно, ежедневно. Количество дней/часов измерений различных параметров аэрозоля приведено в табл. 1.

Кроме измерений физических характеристик аэрозоля, на верхней палубе судна раз в сутки отбирались пробы воздуха для последующего определения концентраций ионов K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , Ca^{2+} , NH_4^+ , Cl^- , NO_3^- и SO_4^{2-} и газообразных примесей (SO_2 , HCl , HNO_3 , NH_3). Отбор проб производился универсальным методом, принятым в международных сетях мониторинга EANET (Acid Deposition Monitoring Network in East Asia) и EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme). Как и в других наших экспедициях [9, 23, 24], воздух объемом 10 м³ прокачивался через блок из четырех последовательно соединенных фильтров.

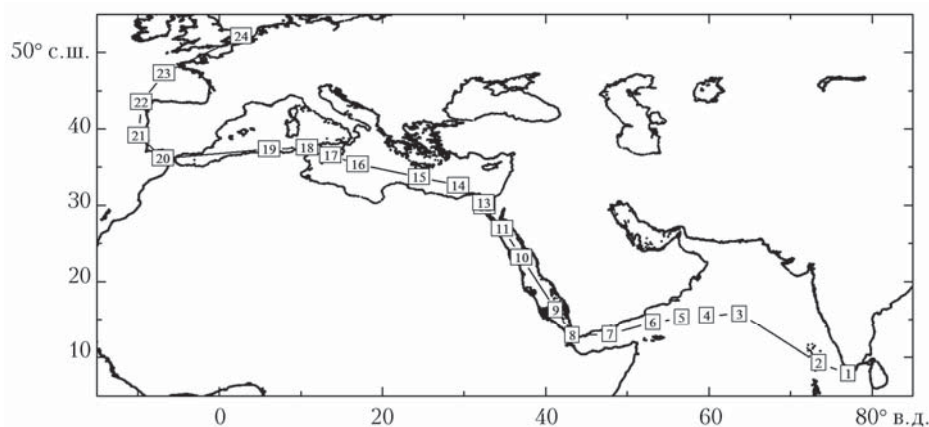


Рис. 1. Маршрут экспедиции НИС «Академик Николай Страхов» (в квадратиках указаны номера дней измерений АОТ)

Таблица 1

Количество дней (часов) измерений характеристик аэрозоля в различных районах

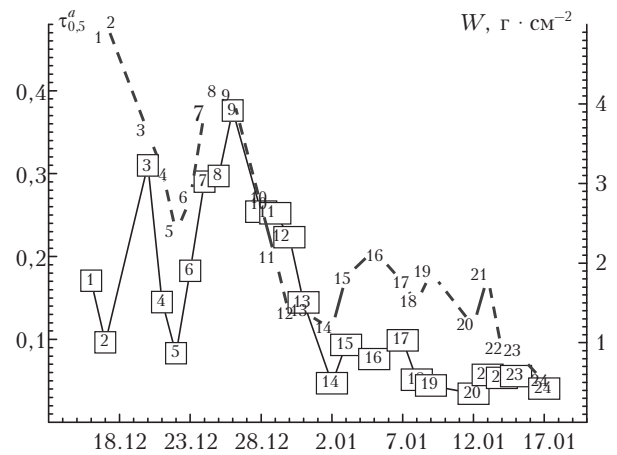
Район, сроки	АОТ	Микрофизические характеристики	Пробы аэрозоля на фильтры
Аравийское море, 16–24.12.2015 г.	7 (36)	9 (184)	4
Красное море и Суэцкий канал, 25–31.12.2015 г.	6 (35)	7 (168)	3
Средиземное море, 01–09.01.2016 г.	6 (27)	9 (216)	4
Атлантика, 10–20.01.2016 г.	5 (15)	11 (246)	2
Общее количество данных	24 (113)	36 (814)	12

Прямое накопление аэрозоля осуществлялось на первом фильтре PTFE (Япония) с диаметром пор 0,8 мкм. Химический анализ выполнялся в аттестованной лаборатории гидрохимии и химии атмосферы (Лимнологический институт СО РАН) следующим образом. Фильтры с пробами аэрозоля экстрагировали деионизированной водой (электропроводность 0,15–0,18 мкСм/см) и затем фильтровали через ацетат-целлюлозный фильтр с диаметром пор 0,2 мкм. Определение концентрации ионов в полученном фильтрате проводилось методом ионной хроматографии на ионной системе ICS-3000 (Dionex, США). Концентрации HCl и SO_2 рассчитывались из суммы концентраций Cl^- и SO_4^{2-} , определенных на 2-м и 3-м фильтре, NH_3 – из NH_4^+ со 2-го и 4-го фильтров, HNO_3 – из NO_3^- на 2-м фильтре. В качестве стандартов использовали растворы фирмы Kanto Chemical Co (Япония) и Dionex (США).

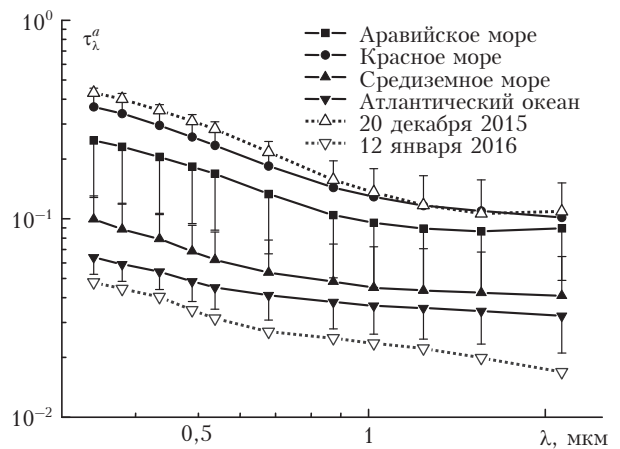
2. АОТ атмосферы

На рис. 2, а иллюстрируется пространственно-временная изменчивость АОТ (0,5 мкм) и влагосодержания атмосферы на маршруте экспедиции (цифрами на графиках обозначены порядковые номера дней измерений). Самые большие замутнения атмосферы были зарегистрированы на юге Красного моря (27 декабря, $\tau_{0,5}^a = 0,38$) и в центральной части Аравийского моря (20 декабря, $\tau_{0,5}^a = 0,31$), а минимальные – в Гибралтаре (12 января, $\tau_{0,5}^a = 0,03$). Влагосодержание атмосферы уменьшалось в соответствии с широтной зависимостью на два порядка величины – от $5 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ южнее Индии до $0,05 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ над Северным морем.

Учитывая различие природных условий (источников аэрозоля и циркуляций) на маршруте экспедиции, статистические характеристики АОТ рассчитывались отдельно для четырех районов (табл. 2): Аравийское море, Красное море (включая Суэцкий канал), Средиземное море и Атлантика (вдоль берегов Западной Европы). Средние спектральные зависимости АОТ для выделенных морских акваторий показаны на рис. 2, б. Из приведенных данных следует, что АОТ атмосферы во всем диапазоне спектра распределились по районам в следующей последовательности: Красное, Аравийское, Средиземное море и Атлантика. По степени замутнения атмосферы проявилось также деление на две группы: высокие замутнения над морями Индийского океана и более чистая атмосфера над морями Атлантики.



а



б

Рис. 2. Изменение АОТ (сплошные кривые) и влагосодержания W (пунктирные кривые) в период рейса (а) и средние спектральные зависимости АОТ в четырех районах (б); пунктиром показаны минимальные (12 января) и максимальные (20 декабря) спектральные зависимости $\tau^a(\lambda)$

Особенности и различия между районами более детально можно проследить по величине мелко- и грубодисперсной компонентам АОТ. Атмосфера над Аравийским и Красным морями характеризуется высокими значениями обеих компонент АОТ: τ^f в среднем сопоставимы с данными над континентом (Томск) и морями с сильным континентальным влиянием (Каспийское море, море Мрака), а τ^c – с данными над Японским морем (весна) и в зоне северного пассата Атлантики [28]. Кроме

Средние (\pm СКО) значения характеристик АОТ в различных районах на маршруте НИС «Академик Николай Страхов»

Характеристики	Аравийское море	Красное море	Средиземное море	Атлантика
τ^a (0,34 мкм)	$0,230 \pm 0,111$	$0,339 \pm 0,088$	$0,089 \pm 0,030$	$0,059 \pm 0,011$
τ^a (0,5 мкм)	$0,183 \pm 0,088$	$0,258 \pm 0,077$	$0,069 \pm 0,024$	$0,048 \pm 0,01$
τ^a (0,87 мкм)	$0,104 \pm 0,054$	$0,143 \pm 0,052$	$0,048 \pm 0,026$	$0,038 \pm 0,01$
τ^a (2,14 мкм)	$0,089 \pm 0,041$	$0,101 \pm 0,050$	$0,041 \pm 0,024$	$0,032 \pm 0,011$
α	$1,026 \pm 0,235$	$1,103 \pm 0,230$	$0,813 \pm 0,559$	$0,520 \pm 0,222$
β	$0,091 \pm 0,048$	$0,123 \pm 0,048$	$0,043 \pm 0,027$	$0,035 \pm 0,01$
τ^c	$0,085 \pm 0,044$	$0,101 \pm 0,05$	$0,041 \pm 0,024$	$0,032 \pm 0,011$
τ^f (0,5 мкм)	$0,098 \pm 0,058$	$0,156 \pm 0,049$	$0,028 \pm 0,021$	$0,016 \pm 0,005$
n	$2,62 \pm 0,25$	$2,29 \pm 0,19$	$2,45 \pm 1,09$	$1,95 \pm 0,73$
m	$0,079 \pm 0,037$	$0,107 \pm 0,035$	$0,020 \pm 0,015$	$0,012 \pm 0,002$
W	$3,71 \pm 1,03$	$2,62 \pm 1,26$	$1,72 \pm 0,34$	$1,07 \pm 0,49$

того, над Аравийским и Красным морями компонента τ^f превышает τ^c , а в северной части маршрута их соотношение противоположное: τ^f в 1,5–2 раза меньше, чем τ^c . Эти факты свидетельствуют о существенном влиянии выносов как мелких частиц антропогенного и/или дымового аэрозоля, так и более крупного аридного аэрозоля с территорий Индостана и Ближнего Востока.

На рис. 3, а представлено среднее пространственное распределение АОТ над северо-западной частью Индийского океана, построенное по многолетним спутниковым данным (декабри 2002–2015 гг.) [30]. Из рисунка видно, что наиболее интенсивный вынос аэрозоля в период зимнего муссона идет в юго-западном направлении: от середины западного побережья п-ва Индостан до середины восточного побережья п-ва Сомали. АОТ вдоль этого направления в среднем изменяется от 0,32 до 0,23 (рис. 3, б), градиент спада составляет 0,037 на тысячу километров.

Большинство измерений АОТ с борта судна были проведены на южной и северной периферии основного потока выноса аэрозоля из Индокитая (см. рис. 3, а), поэтому полученные данные оказались ниже средних спутниковых на оси потока (см. рис. 3, б). Исключением является только 3-й день измерений (20 декабря), когда судовые значения АОТ сблизились с многолетними спутниковыми.

Если рассматривать только экспедиционный период в Аравийском море (16–24.12.2015 г.), то результаты судовых измерений АОТ хорошо согласуются со спутниковыми данными над районами местоположения судна (см. графики 2 и 3 на рис. 3, б). Обратим также внимание на увеличение АОТ (SPM и MODIS) в 7–8-й дни измерений (24–25 декабря) при нахождении судна в Аденском заливе. Однако в этом случае повышенные замутнения атмосферы, как и в последующие дни над Красным морем (см. 9–12-й дни на рис. 2), были обусловлены влиянием выносов континентального аэрозоля из стран Ближнего Востока.

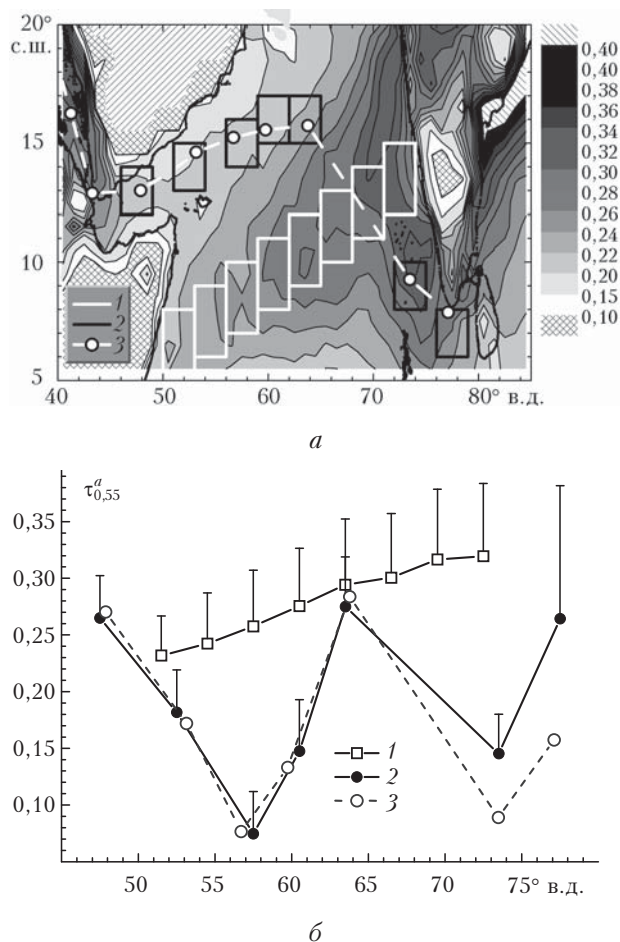


Рис. 3. Среднее пространственное распределение АОТ над Аравийским морем по спутниковым данным (а) и сравнение с результатами судовых измерений (б). 1 – АОТ вдоль оси основного потока выноса аэрозоля (MODIS, 2002–2015 г.); 2 – АОТ на маршруте НИС (MODIS, 16–24.12.2015 г.); 3 – судовые измерения АОТ (SPM); прямоугольниками на рис. 3, а обозначены районы пространственного усреднения спутниковых значений АОТ в двух направлениях (1 и 2)

Большое число экспедиционных исследований аэрозоля в разных районах Индийского океана было выполнено индийскими авторами [11–16 и др.], которые отмечали существенное влияние выносов континентального аэрозоля различного типа – антропогенного, дымового, аридного. Например, весной 2003 г. в юго-восточной части Аравийского моря АОТ (0,5 мкм) достигала 0,84 при среднем значении 0,44 [13]. Однако высокая сезонная и синоптическая изменчивость АОТ в этом регионе не позволяет провести корректное сопоставление наших данных с результатами измерений [11–16], проводившихся в другие месяцы года (январь–май).

3. Концентрации аэрозоля и «сажи» в приземном слое атмосферы

Изменчивость параметров N_A , M_A и M_{BC} в период экспедиции иллюстрируется на рис. 4. Можно отметить, что практически на всем маршруте наблюдались кратковременные всплески (максимумы) концентраций аэрозоля, обусловленных близостью к континентальным источникам (выносам аэрозоля). Например, повышенные счетные концентрации частиц (N_A более 250 см^{-3}) регистрировались 24 декабря в Аденском заливе, 30, 31 декабря в Суэцком канале и 18 января в Северном море.

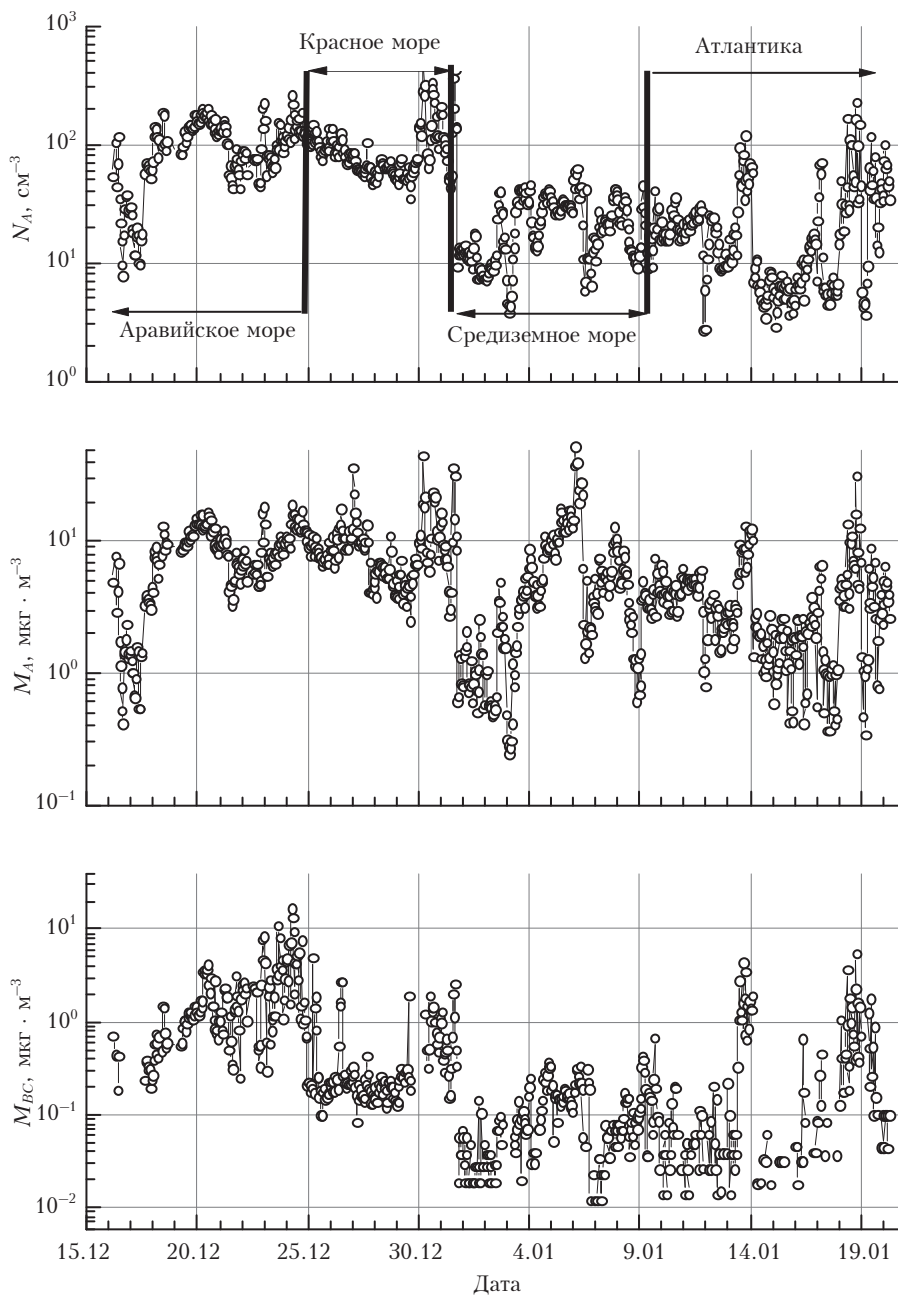


Рис. 4. Временная изменчивость параметров N_A , M_A и M_{BC} в период рейса НИС «Академик Николай Страхов»

Средние (\pm СКО) значения параметров аэрозоля в четырех районах на маршруте НИС «Академик Николай Страхов»

Параметр	Аравийское море	Красное море	Средиземное море	Атлантика
$N_A(d > 0,3 \text{ мкм}), \text{ см}^{-3}$	$101,0 \pm 52,1$	$96,8 \pm 73,3$	$22,4 \pm 12,2$	$25,4 \pm 30,2$
$M_A(d > 0,3 \text{ мкм}), \text{ мкг} \cdot \text{ м}^{-3}$	$8,25 \pm 4,37$	$9,2 \pm 6,3$	$5,6 \pm 6,5$	$3,5 \pm 3,6$
$M_{BC}, \text{ мкг} \cdot \text{ м}^{-3}$	$2,14 \pm 2,42$	$0,46 \pm 0,64$	$0,11 \pm 0,10$	$0,57 \pm 0,93$
$P = M_{BC}/M_A$	$0,21 \pm 0,17$	$0,05 \pm 0,06$	$0,03 \pm 0,03$	$0,07 \pm 0,09$

Статистические характеристики параметров аэрозоля (табл. 3), как и для АОТ атмосферы, были рассчитаны для отдельных морских акваторий, в которых действуют разные источники и типы континентального аэрозоля. Из приведенных данных следует, что средние концентрации аэрозоля над морями Индийского бассейна существенно больше, чем в северной части маршрута: по массовой концентрации примерно в 2 раза, по счетной — в 4 раза. По-видимому, в таком распределении аэрозоля определенную роль сыграл также широтно-сезонный фактор: при движении судна в северном направлении теплый период в тропической зоне сменился на холодный вблизи Европы.

Более детальную информацию о дисперсном составе аэрозоля дают функции распределения частиц по объемам $\Delta V/\Delta d$ (рис. 5). В субмикронном диапазоне размеров наблюдается вышеотмеченная группировка данных на два типа районов — северная и южная часть маршрута. В северной части (Средиземное море и Атлантика) объемные распределения частиц имеют меньшие значения (в 2–6 раз) и характерный максимум в области $d \approx 0,45 \text{ мкм}$. Группировка по районам нарушается в диапазоне грубодисперсной фракции. Содержание крупных частиц над Средиземным морем с ростом диаметра резко увеличивается и значения $\Delta V/\Delta d$ (при $d > 3 \text{ мкм}$) становятся такими же, как над Красным морем.

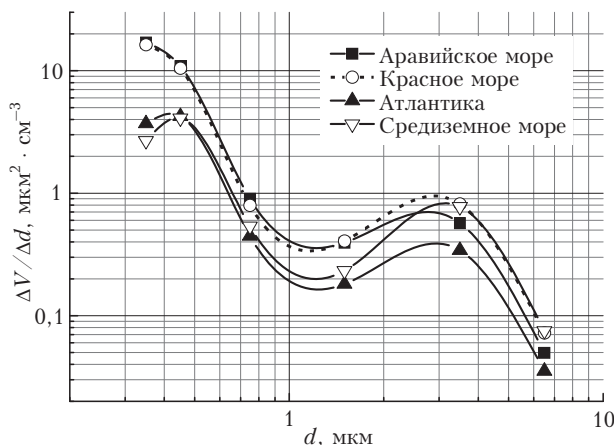


Рис. 5. Средние функции распределения аэрозольных частиц по объемам в четырех районах

Распределение по районам содержания «сажи» имеет свои особенности. Кратковременные повыше-

ния M_{BC} до $3\text{--}5 \text{ мкг} \cdot \text{ м}^{-3}$ были зарегистрированы в северной части маршрута: 18 января на юге Северного моря, 13 января вблизи Португалии и 30, 31 декабря в Суэцком канале. Однако в целом самые высокие концентрации «сажи» наблюдались над Аравийским морем: средние M_{BC} составили $2,14 \text{ мкг} \cdot \text{ м}^{-3}$, а максимальные в Аденском заливе (23, 24 декабря) превысили $10 \text{ мкг} \cdot \text{ м}^{-3}$. Достаточно большие средние значения M_{BC} над Аравийским морем приводят и индийские коллеги [16]: около $0,7 \text{ мкг} \cdot \text{ м}^{-3}$ в январе и $1,8 \text{ мкг} \cdot \text{ м}^{-3}$ в апреле. Для сравнения отметим, что по результатам наших измерений в Восточной Атлантике [24] самые большие многолетние средние значения M_{BC} составили $0,7 \text{ мкг} \cdot \text{ м}^{-3}$ в зоне Сахарских пылевых выносов и $0,1\text{--}0,4 \text{ мкг} \cdot \text{ м}^{-3}$ вблизи Европы (Северное море).

О высокой поглощательной способности атмосферного аэрозоля над Аравийским морем свидетельствует также удельное содержание «сажи» в общей массе аэрозоля $P = (M_{BC}/M_A)$, которое в 3–7 раз превышает данные на других участках маршрута (см. нижнюю строку табл. 3). Таким образом, над Аравийским морем сочетается большое содержание субмикронного аэрозоля с его высоким поглощением.

В данном случае мы не стали проводить количественное сравнение M_A и, соответственно, величины P с данными других районов или авторов из-за различия приборов и методик оценки массовой концентрации аэрозоля. Отметим только, что по результатам многолетних измерений вблизи Европы [24] средние концентрации M_A , рассчитанные для диапазона диаметров частиц $0,4\text{--}10 \text{ мкм}$, составили около $4,5 \text{ мкг} \cdot \text{ м}^{-3}$ при коэффициенте вариаций 62%. В этом же коридоре значений (с учетом поправки на другой диапазон ($d = 0,3\text{--}10 \text{ мкм}$)) варьировали M_A в рейсе НИС «Академик Николай Страхов» на маршруте от Средиземного до Северного моря.

Для оценки степени взаимосвязи различных параметров аэрозоля были рассмотрены коэффициенты взаимной корреляции $R_{i,j}$ между компонентами АОТ (τ^c , τ^f) и концентрациями аэрозоля в приземном слое — N_A , M_A , M_{BC} . Расчеты проводились для совместного массива данных ($N = 92$) на всем маршруте экспедиции. Из табл. 4 видно, что между большинством характеристик наблюдается статистически значимая взаимосвязь, обусловленная согласованным характером их изменчивости на маршруте экспедиции. Исключением является только корреляция между M_{BC} и τ^f .

Таблица 4

**Коэффициенты взаимной корреляции
характеристик аэрозоля на маршруте НИС
«Академик Николай Страхов»**

Характеристика аэрозоля	M_{BC}	M_A	N_A	τ^c	τ^f
M_{BC}	1	0,46	0,62	0,32	0,16
M_A		1	0,66	0,49	0,32
N_A			1	0,59	0,64
τ^c				1	0,61
τ^f					1

4. Химический состав

В табл. 5 приведены средние концентрации малых газовых примесей и ионов в водорастворимой фракции аэрозоля в четырех районах экспедиции. С учетом малого числа отобранных проб и продолжительности измерений в каждом из районов полученные данные дают представление о химическом составе только для конкретного периода экспедиции и атмосферных условий. Рассмотрим основные особенности распределения концентраций ионов и газовых примесей в приземной атмосфере над различными морями.

Ионный состав. Высокие концентрации ионов и их общее содержание \sum_{ions} зарегистрированы над тропическими морями Индийского океана в среднем в 1,5 раза больше, чем в северной части маршрута. Наряду с высоким и сопоставимым содержанием ионов над этими морями, обратим внимание на отличительные особенности: над Аравийским морем максимальные концентрации определены у ионов преимущественно морского происхождения (Na^+ , Cl^- , Mg^{2+}), а над Красным морем – максимальные концентрации у ионов преимущественно

континентального происхождения (SO_4^{2-} , Ca^{2+} , NO_3^- , NH_4^+). Например, в сравнении с соседним Средиземным морем содержание ионов NH_4^+ больше в 5,5 раз, SO_4^{2-} и NO_3^- – в 2 раза.

Наиболее устойчивые концентрации в составе аэрозоля наблюдались у ионов Ca^{2+} : различие между отдельными морями не более 15%, а внутри районов – от 24% (Атлантика) до 58% (Аравийское море). Отметим также высокую относительную изменчивость концентраций всех ионов над Аравийским морем, коэффициенты вариаций здесь достигают 100%. Этот факт свидетельствует о неустойчивости ионного состава отобранных проб, очевидно зависящей от смены воздушных масс.

Особенностью данных, полученных в Атлантике (фильтры 11 и 12), являются высокие (вторые по значимости) концентрации «морских» ионов (Na^+ , Cl^-) и дефицит «континентальных». Средиземное море отличается от других районов устойчиво низким общим содержанием ионов и минимальными концентрациями «морских» ионов.

Наряду с абсолютными концентрациями был рассмотрен долевой вклад ионов в состав аэрозоля в эквивалентной форме. Для этого абсолютные концентрации ионов делились на эквивалентную массу и вклад ионов рассчитывался относительно суммы эквивалентов. Из рис. 6 видно, что общим для всех районов является малый и практически одинаковый вклад ионов Mg^{2+} (2,1–2,7%) и K^+ (0,4–0,8%). Максимальная доля «морских» ионов содержится в составе аэрозоля, отобранного над Атлантикой: Na^+ – 25%, Cl^- – 39,7%. Высокая доля «континентальных» ионов зарегистрирована в аэрозоле над Красным и Средиземным морями: Ca^{2+} – 23,0 и 29,3%, SO_4^{2-} – 20,9 и 17,2% соответственно. В атмосфере этих морей отмечены также повышенные концентрации NO_3^- и NH_4^+ . На формирование высоких абсолютных и относительных

Таблица 5

**Средние (\pm СКО) концентрации ионов и малых газовых примесей ($\mu\text{г} \cdot \text{м}^{-3}$)
на маршруте НИС «Академик Николай Страхов»**

Компоненты	Район (№ фильтра)			
	Аравийское море (1–4)	Красное море (4–6)	Средиземное море (7–10)	Атлантика (11, 12)
	<i>Ионы</i>			
Na^+	3,33 \pm 3,30	1,88 \pm 1,44	1,28 \pm 0,38	2,39 \pm 2,02
NH_4^+	0,54 \pm 0,37	0,83 \pm 0,29	0,15 \pm 0,21	0,02 \pm 0,01
K^+	0,20 \pm 0,19	0,10 \pm 0,05	0,06 \pm 0,01	0,09 \pm 0,08
Mg^{2+}	0,20 \pm 0,22	0,17 \pm 0,09	0,09 \pm 0,02	0,12 \pm 0,11
Ca^{2+}	2,25 \pm 1,30	2,47 \pm 0,86	2,07 \pm 0,51	1,81 \pm 0,44
Cl^-	5,83 \pm 5,86	3,25 \pm 2,68	2,41 \pm 0,38	4,88 \pm 3,15
NO_3^-	1,71 \pm 1,23	1,98 \pm 0,55	0,99 \pm 0,30	0,63 \pm 0,38
SO_4^{2-}	3,93 \pm 2,29	4,27 \pm 1,44	2,12 \pm 0,89	1,22 \pm 0,11
\sum_{ions}	17,99 \pm 14,65	14,96 \pm 5,53	9,17 \pm 1,86	11,16 \pm 6,30
	<i>Малые газообразные примеси</i>			
HCl	1,80 \pm 0,60	2,15 \pm 0,47	1,66 \pm 1,20	1,40 \pm 0,57
HNO ₃	1,13 \pm 0,82	1,41 \pm 0,56	0,78 \pm 0,35	0,82 \pm 0,16
SO ₂	2,92 \pm 2,56	4,17 \pm 1,52	1,56 \pm 1,73	0,76 \pm 0,56
NH ₃	1,88 \pm 1,82	1,40 \pm 1,11	0,72 \pm 0,48	0,32 \pm 0,09

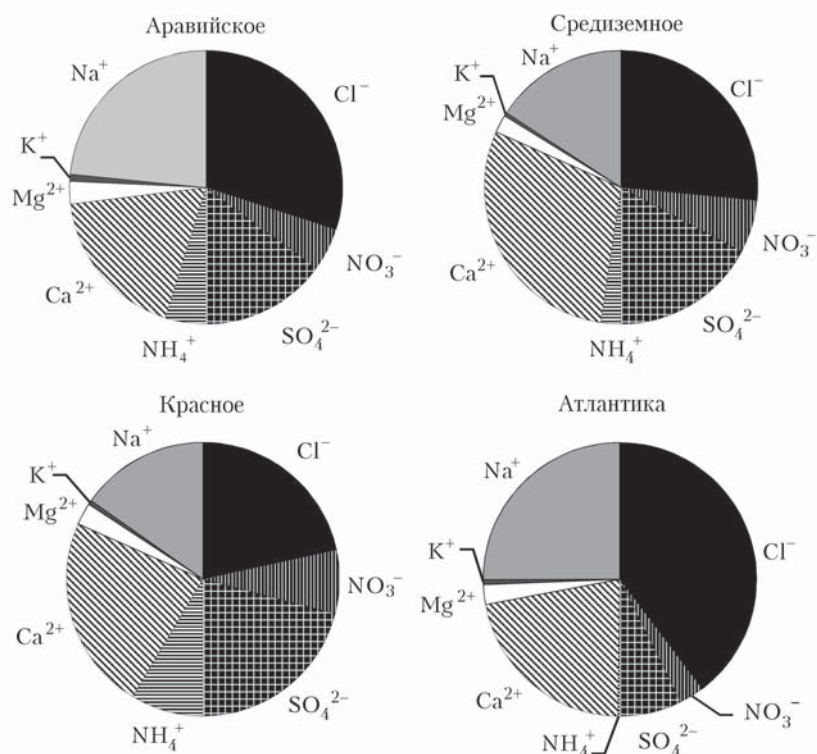


Рис. 6. Долевой вклад «морских» (оттенки серого) и «континентальных» (штриховки) ионов в различных районах экспедиции

концентраций ионов над Аравийским морем сопоставимый вклад вносят как континентальные, так и морские источники аэрозоля. Смешанное и достаточно сильное влияние различных источников и типов аэрозоля (урбанизированный, морской, пылевой) над Аравийским морем отмечается также в работе [32].

Перераспределение содержания в аэрозоле ионов континентального и морского происхождения на маршруте экспедиции хорошо проявилось в динамике долевого фактора FM_{cont} [33], который определялся по следующему соотношению:

$$FM_{cont} = \sum_{i=1}^n (M_i^a - k_i^w \cdot M_{Na}^w) / \sum_{i=1}^n M_i^a, \quad (3)$$

где $n = 6$ – число ионов (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-}), используемых в расчетах; M_i^a – массовая концентрация i -го иона в аэрозоле; M_{Na}^a – концентрация ионов Na^+ ; $k_i^w = (M_i^w / M_{Na}^w)$ – отношение концентраций i -х ионов к Na^+ в составе морской воды.

Из рис. 7, а видно, что с удалением от Индостана долевого фактор FM_{cont} сначала уменьшился (фильтры № 1–3), а при вхождении в Красное море вновь увеличился до максимальной величины 0,83 (фильтр № 5). При движении в акватории Средиземного моря (фильтры № 7–10), FM_{cont} постепенно уменьшался в западном направлении и достиг минимума на Атлантическом участке маршрута (фильтр № 11). В среднем над Средиземным

морем и на юге Северного моря вблизи Нидерландов (фильтр № 12) наблюдался сопоставимый вклад ионов континентального и морского происхождения $FM_{cont} = 0,5 \pm 0,1$.

Вклад различных источников в ионный состав аэрозоля можно также оценить с помощью коэффициента обогащения [34], который характеризует отличие соотношений концентраций разных ионов относительно иона натрия в аэрозоле (aer) и морской воде (sw) [9]:

$$K_{об} = [(C_i / C_{Na^+})_{aer}] / (C_i / C_{Na^+})_{sw}, \quad (4)$$

где (C_i / C_{Na^+}) – концентрация i -го иона (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-}) относительно Na^+ . Заметим, что значительное превышение коэффициента обогащения ($K_{об} \gg 1$) свидетельствует о континентальном происхождении соответствующих ионов в исследуемом районе.

Результаты расчетов показали (рис. 7, б), что отношение концентраций $(Ca^{2+} / Na^+)_{aer}$ и $(SO_4^{2-} / Na^+)_{aer}$ в составе аэрозоля намного больше, чем в морской воде. Максимальные значения $K_{об}$ кальция (до 80) и сульфатов (около 20) были определены у южной оконечности Индостана и над Красным морем. Изменение вдоль маршрута коэффициентов обогащения Ca^{2+} , SO_4^{2-} и K^+ качественно повторяет динамику долевого фактора FM_{cont} . Обращает на себя внимание дефицит содержания в аэрозоле магния (в сравнении с морской водой): коэффициент его обогащения достигает единицы только в районе Суэцкого канала (фильтры № 5–7).

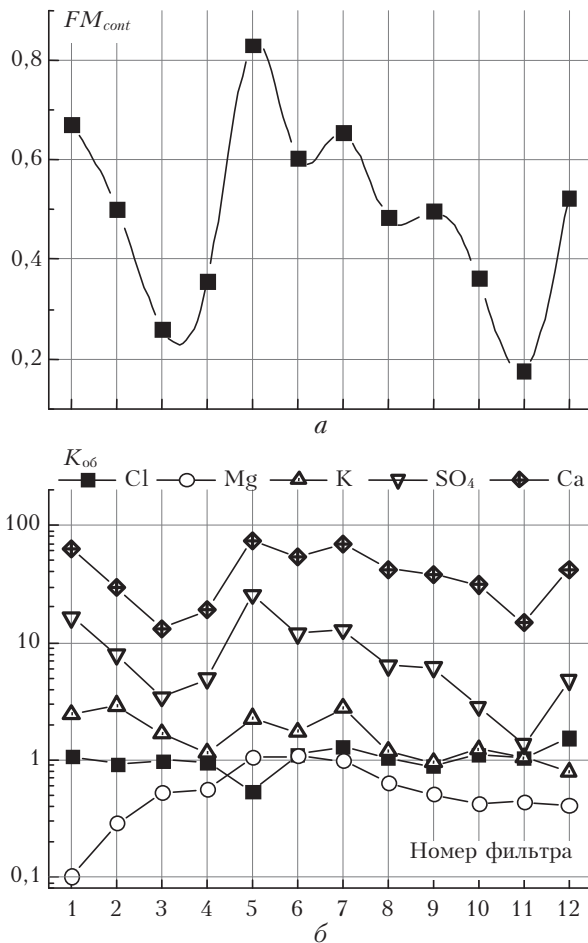


Рис. 7. Изменение на маршруте экспедиции долевого фактора FM_{cont} (а) и коэффициентов обогащения различных ионов относительно ионов Na^+ (б)

Малые газообразные примеси. Как и по характеристикам аэрозоля, атмосфера над морями Индийского океана отличается более высоким содержанием всех газообразных примесей (см. нижнюю часть табл. 5). Вместе с тем между двумя районами есть отличия: над Аравийским морем отмечаются максимальные концентрации NH_3 , а над Красным морем – самые большие концентрации SO_2 , HCl и HNO_3 . Высокое содержание над Красным морем SO_2 , а также ионов SO_4^{2-} очевидно связано с нефтедобывающей промышленностью [19], являющейся одним из основных источников соединений серы. Известно, что с пирогенными процессами в атмосферу наряду с компонентами углеводородного происхождения поступают соединения серы, которые в результате трансформации в атмосфере под действием окислителей превращаются в серную кислоту или сульфаты [35].

Заключение

Исследования атмосферного аэрозоля в экспедиции НИС «Академик Николай Страхов» зимой 2015/2016 г. показали, что АОТ атмосферы, концентрации аэрозоля, «сажи», а также «континентальных» ионов (SO_4^{2-} , Ca^{2+} , NO_3^- , NH_4^+) и малых газообразных примесей (SO_2 , HCl , HNO_3 ,

NH_3) над Аравийским и Красным морями заметно превышают аналогичные характеристики в северной части маршрута – Средиземном море и Атлантике вблизи Европы.

Наряду с высоким содержанием аэрозоля над морями Индийского бассейна между ними есть существенные отличия, обусловленные действием разных типов аэрозоля (антропогенного, дымового, аридного), выносимого с соседних континентов. Над Аравийским морем – самые большие средние концентрации аэрозоля ($N_A = 101 \text{ см}^{-3}$), «сажи» ($M_{BC} = 2,14 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$), ионов морского происхождения (Na^+ , Cl^- , Mg^{2+}) и аммиака (NH_3). Над Красным морем – максимальные значения мелкодисперсной компоненты АОТ ($\tau^f = 0,16$), содержания «континентальных» ионов (SO_4^{2-} , Ca^{2+} , NO_3^- , NH_4^+) и газообразных примесей – диоксида серы (SO_2), азотной (HNO_3) и соляной (HCl) кислот.

Концентрации аэрозоля и «сажи», измеренные в северной части маршрута (от Средиземного до Северного моря), находятся в коридоре значений, характерных для умеренных широт Атлантики вблизи берегов Европы, составляя в среднем:

$$N_A(d > 0,3 \text{ мкм}) \approx 24 \text{ см}^{-3},$$

$$M_A(d > 0,3 \text{ мкм}) \approx 4,5 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3},$$

$$M_{BC} \approx 0,34 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

По ионному составу аэрозоля максимальная пространственная изменчивость отмечена у ионов NH_4^+ (различие между отдельными морями до 40 раз), а наиболее устойчивые концентрации – у ионов Ca^{2+} (различие не более 15%). Самое большое отличие химического состава аэрозоля от морской воды отмечено у южной оконечности Индостана и над Красным морем в концентрациях Ca^{2+} и SO_4^{2-} – их коэффициенты обогащения достигают значений 80 и 20 соответственно.

Авторы выражают благодарность коллегам NASA GES-DISC, обслуживающим систему Giovanni [30], за представление спутниковых данных. Благодарим Совет по гидросфере Земли ФАНО России и руководство экспедиции НИС «Академик Николай Страхов», обеспечивших проведение исследований. Работа велась в рамках Комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН – проект № П.2П/IX.133-3 и ЦКП «Ультрамикроанализ».

- Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Remote Sens. Environ. 1998. V. 66. P. 1–16.
- Исследование радиационных характеристик аэрозоля в азиатской части России / Под ред. С.М. Сакерина. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2012. 484 с.
- Кузнецова И.Н., Глазкова А.А., Шальгина И.Ю., Нахаев М.И., Архангельская А.А., Звягинцев А.М., Семутникова Е.Г., Захарова П.В., Лезина Е.А. Сезонная и суточная изменчивость концентраций взвешенных частиц в приземном воздухе жилых районов Москвы

- // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 6. С. 473–482.
4. *Аришинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Козлов А.С., Мальшикин С.Б., Симоненков Д.В., Антохин П.Н.* Нуклеационные всплески в атмосфере бореальной зоны Западной Сибири. Часть I. Классификация и повторяемость // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 9. С. 766–774.
 5. *Груздев А.Н., Исаков А.А.* О природе долгопериодных вариаций массовой концентрации приземного аэрозоля // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 9. С. 810–815; *Gruzdev A.N., Isakov A.A.* On the nature of long-period variations in mass concentration of near-ground aerosol // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 1. P. 73–78.
 6. *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. Pt. 1. P. 501–523.
 7. *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, iss. 9. P. 2519–2547. DOI: 10.1080/01431160701767492.
 8. *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., Jourdain F.* Maritime Aerosol Network as a component of Aerosol Robotic Network // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. D06204. DOI: 10.1029/2008JD011257.
 9. *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.
 10. *Tomasi C., Prodi F.* Measurement of atmospheric turbidity and vertical mass loading of particulate matter in marine environments (Red Sea, Indian Ocean, and Somalian Coast) // *J. Geophys. Res.* 1982. V. 87, N 2. P. 1279–1286.
 11. *Kedia S., Ramachandran S.* Variability in aerosol optical and physical characteristics over the Bay of Bengal and the Arabian Sea deduced from Angstrom exponents // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. D14207. DOI: 10.1029/2009JD011950.
 12. *Kalapureddy M.C.R., Kaskaoutis D.G., Raj P.E., Devara P.C.S., Kambezidis H.D., Kosmopoulos P.G., Nastos P.T.* Identification of aerosol type over the Arabian Sea in the premonsoon season during the Integrated Campaign for Aerosol, Gases and Radiation Budget (ICARB) // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. D17203. DOI: 10.1029/2009JD011826.
 13. *Moorthy K.K., Babu S.S., Satheesh S.K.* Aerosol characteristics and radiative impacts over the Arabian Sea during the intermonsoon season: results from ARMEX field campaign // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. P. 192–206.
 14. *Moorthy K.K., Saha A., Prasad B.S.N., Niranjan K., Jhurry D., Pillai P.S.* Aerosol optical depths over peninsular India and adjoining oceans during the INDOEX campaigns: Spatial, temporal, and spectral characteristics // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106, N 22. P. 28,539–28,554.
 15. *Satheesh S.K., Moorthy K.K., Murthy B.V.K.* Spatial gradients in aerosol characteristics over the Arabian Sea and Indian Ocean // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103, N 20. P. 26,183–26,192.
 16. *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. L14818. DOI: 10.1029/2005GL023267.
 17. *Moorthy K.K., Satheesh S.K., Murthy B.V.K.* Investigations of marine aerosols over the tropical Indian Ocean // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102, N 15. P. 18827–18842.
 18. *Prakash P.J., Stenchikov G., Tao W., Yapici T., Warsama B., Engelbrecht J.* Study of Arabian Red Sea coastal soils as potential mineral dust sources // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, N 18. P. 11991–12004. URL: <http://www.atmos-chem-phys.net/16/11991/2016/> DOI: 10.5194/acp-16-11991-2016.
 19. *Abdallah R.I., Khalil N.M., Roushdie M.I.* Monitoring of pollution in Egyptian Red Sea // *Egyptian Journal of Petroleum.* 2015. V. 24. P. 59–70.
 20. *Badarinath K.V.S., Kharol S.K., Sharma A.R.* Long-range transport of aerosols from agriculture crop residue burning in Indo-Gangetic Plains e a study using LIDAR, ground measurements and satellite data // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2009. V. 71. P. 112–120.
 21. *Dey S., Di Girolamo L.* A climatology of aerosol optical and microphysical properties over the Indian subcontinent from 9 years (2000–2008) of Multiangle Imaging Spectroradiometer (MISR) data // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. D15204. DOI: 10.1029/2009JD013395.
 22. *Duflot V., Royer P., Chazette P., Baray J.-L., Courcoux Y., Delmas R.* Marine and biomass burning aerosols in the southern Indian Ocean: retrieval of aerosol optical properties from ship-borne lidar and sun-photometer measurements // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. D18208. DOI: 10.1029/2011JD015839.
 23. *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 Riff // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 1. P. 16–23.
 24. *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.
 25. *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 атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1112–1117; *Sakerin S.M., Kabanov D.M., Rostov A.P., Turchinovich S.A., Knyazev V.V.* Sun photometers for measuring spectral air transparency in stationary and mobile conditions // *Atmos. Ocean. Opt.* 2013. V. 26, N 4. P. 352–356.
 26. *Счетчик аэрозольных частиц АЗ-10.* Руководство по эксплуатации. ЭКИТ 7.830.000 РЭ. М., 2010. 13 с.

27. Козлов В.С., Шмаргунов В.П., Польшин В.В. Спектрофотометры для исследования характеристик поглощения света аэрозольными частицами // Приборы и техн. эксперим. 2008. № 5. С. 155–157.
28. Сакерин С.М., Кабанов Д.М. Мелко- и грубодисперсные компоненты аэрозольной оптической толщи атмосферы в морских и полярных районах // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 8. С. 690–697; Sakerin S.M., Kabanov D.M. Fine and coarse components of atmospheric aerosol optical depth in maritime and polar regions // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 6. P. 510–517.
29. Acker J.G., Leptoukh G. Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data // Eos, Trans. AGU. 2007. V. 88, N 2. P. 14–17.
30. URL: <http://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov>
31. Поддубный В.А., Польшин В.В., Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Лужецкая А.П., Маркелов Ю.И., Дубинкина Е.С., Хуриганова О.И. Комплексный аэрозольный эксперимент на Среднем Урале. Часть 1. Условия проведения и результаты фотометрических измерений // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 12. С. 1003–1010.
32. Kalapureddy M.C.R., Kaskaoutis D.G., Raj P. Ernest, Devara P.C.S., Kambezidis H.D., Kosmopoulos P.G., Nastos P.T. Identification of aerosol type over the Arabian Sea in the monsoon season during the Integrated Campaign for Aerosols, Gases and Radiation Budget (ICARB) // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. D17203. DOI: 10.1029/2009JD011826.
33. Польшин В.В., Щелканов Н.Н., Голобокова Л.П., Панченко М.В. Сравнение методик оценки вклада континентальных и морских источников в ионный состав приводного аэрозоля Белого моря // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 1. С. 23–26.
34. Кондратьев К.Я. Аэрозоль и климат. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 541 с.
35. Proemse B.C., Mayer B., Fenn M.E. Tracing industrial sulfur contributions to atmospheric sulfate deposition in the Athabasca oil sands region, Alberta, Canada // Appl. Geochem. 2012. V. 27. P. 2425–2434.

S.M. Sakerin, L.P. Golobokova, D.M. Kabanov, V.V. Pol'kin, Yu.S. Turchinovich, T.V. Khodzher, O.I. Khuriganova. Spatiotemporal variations in aerosol characteristics along the route of the Indian-Atlantic expedition onboard RV "Akademik Nikolaj Strakhov".

We discuss the results of studying the physical-chemical composition of the atmospheric aerosol during expedition onboard RV "Akademik Nikolaj Strakhov" carried out during winter of 2015/2016 on the route from Colombo to Kaliningrad (via Suez Canal). In comparison with the Mediterranean Sea and Atlantic (near Europe), the atmosphere of the Arabian and Red Seas was characterized by higher values of most aerosol characteristics: 3–5 times larger aerosol optical depth (AOD), 4 times larger aerosol number concentration, 1.5 times larger concentrations of continent- and sea-derived ions, as well as more abundant gaseous admixtures (SO₂, HCl, HNO₃, NH₃). At the same time, two seas of the Indian basin show substantial differences in aerosol composition, caused by outflows of aerosols of different types from the continents. The largest concentrations of black carbon (2.14 μg · m⁻³, on the average), sea-derived ions (Na⁺, Cl⁻, Mg²⁺), and NH₃ are observed over the Arabian Sea; and larger values of fine component of AOD and concentrations of "continental" ions (SO₄²⁻, Ca²⁺, NO₃⁻, NH₄⁺) and gaseous admixtures SO₂, HCl, HNO₃ are found over the Red Sea. With respect to ion composition of aerosol, most stable concentrations are noted in Ca²⁺ ions (less than 15% difference among the seas), and maximal spatial variations are found in NH₄⁺ ions (a difference is up to a factor of 40).