

УДК 551.510.4

Вариации оптических и микрофизических характеристик аэрозоля на маршруте Российских антарктических экспедиций в Восточной Атлантике

С.М. Сакерин¹, Д.М. Кабанов¹, В.В. Польшкин¹,
В.Ф. Радионов², В.N. Holben³, А. Smirnov^{3*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1, Россия

²Арктический и антарктический научно-исследовательский институт
199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38, Россия

³NASA/Goddard Space Flight Center
Greenbelt, MD 20771, USA

Поступила в редакцию 18.04.2016 г.

Обобщены результаты 12-летних исследований аэрозоля на маршруте Российских антарктических экспедиций в Восточной Атлантике и Южном океане. Проведен анализ пространственного распределения (с широтным шагом 5°) сезонной изменчивости (ноябрь/апрель) и взаимосвязей оптических и микрофизических характеристик аэрозоля. Показано, что среднее широтное изменение параметров аэрозоля в Восточной Атлантике превышает один порядок. Самые низкие значения наблюдаются вблизи Антарктиды, максимальные в тропической зоне: аэрозольная оптическая толщина (0,5 мкм) меняется от 0,02 до 0,5, счетные концентрации мелких частиц ($d = 0,4-1$ мкм) – 0,8–19 см⁻³, концентрации крупных ($d > 1$ мкм) частиц – 0,04–2,2 см⁻³, массовые концентрации аэрозоля – 0,5–14 мкг/м³ и «сажи» – 0,026–0,7 мкг/м³.

Ключевые слова: аэрозольная оптическая толщина, концентрации аэрозоля и «сажи», пространственное распределение, Восточная Атлантика, Южный океан; aerosol optical depth, aerosol and black carbon concentrations, spatial distribution, East Atlantic, Southern Ocean.

Введение

Несмотря на быстрое развитие средств космического зондирования, наиболее полная и качественная информация о физико-химическом составе атмосферного аэрозоля над океаном по-прежнему обеспечивается относительно редкими измерениями его характеристик в морских экспедициях. В качестве примеров можно привести результаты исследований с борта научных судов аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы и вертикальных профилей характеристик рассеяния аэрозоля [1–5], микрофизических параметров и химического состава аэрозоля в приземном слое [6–10 и др.]. Начиная с 2006 г., важную роль в систематизированном сборе данных об оптических свойствах аэрозоля над океаном выполняет программа Maritime Aerosol Network (MAN) [11], которая является частью сети AERONET [12]. На интернет-странице http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/maritime_aerosol_network.html представлены результаты измерений

АОТ и сопутствующих характеристик, полученные в более чем 350 рейсах в различных районах Мирового океана. Полученная информация широко используется при решении различных задач дистанционного зондирования атмосферы со спутников и служит основой для разработки или проверки моделей атмосферного аэрозоля [13].

Вместе с тем, следует учитывать ограниченные возможности морских экспедиций в сравнении с регулярным мониторингом аэрозоля на континентальных станциях [14, 15 и др.]. Во-первых, в большинстве экспедиций измеряются лишь отдельные параметры аэрозоля, что затрудняет разработку комплексных взаимосогласованных моделей его физико-химического состава. Во-вторых, пространственно-временная фрагментарность экспедиционных исследований препятствует получению репрезентативных статистических оценок. Вследствие этого редко появляется возможность для проведения климатических обобщений, требующих продолжительного накопления данных – не менее 10 лет для каждого района и сезона.

В настоящей статье обобщаются результаты ежегодных измерений оптических и микрофизических характеристик аэрозоля над Атлантическим и Южным океаном на маршруте Российских антарктических экспедиций (РАЭ) [16–19]. Накопление данных в 13 экспедициях на трансатлантиче-

* Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru); Дмитрий Михайлович Кабанов (dkab@iao.ru); Виктор Викторович Польшкин (victor@iao.ru); Владимир Федорович Радионов (vradion@aari.nw.ru); Brent Holben (Brent.Holben@nasa.gov); Alexander Smirnov (Alexander.Smirnov-1@nasa.gov).

ском переходе от Ла-Манша до берегов Антарктиды позволило определить: 1) среднее пространственное распределение параметров аэрозоля с широтным шагом (усреднением) 5° ; 2) сезонные отличия широтного распределения на прямом (осень) и обратном (весна) маршруте; 3) абсолютную и относительную изменчивость параметров аэрозоля вдоль маршрута; 4) взаимосвязи между отдельными параметрами аэрозоля. Проведенным анализом результатов многолетних исследований закладывается основа для районирования характеристик аэрозоля в Восточной Атлантике.

1. Аппаратура и характеристика экспериментов

Исследования пространственно-временной изменчивости аэрозоля основывались на измерениях с борта научных судов трех групп характеристик: 1) АОТ и влагосодержания атмосферы; 2) микрофизических параметров аэрозоля в приземном слое; 3) ионного и элементного состава аэрозоля. В данной работе мы исключили из анализа химический состав аэрозоля, измерения (забор проб) которого проводились не чаще чем раз в сутки.

Аэрозольная оптическая тоща τ_λ^a и влагосодержание W атмосферы измерялись портативными солнечными фотометрами SPM [20] (диапазон спектра 0,34–2,14 мкм) и/или Microtops II [21, 22] (диапазон спектра 0,34–0,94 мкм). Фотометрические наблюдения выполнялись сериями из нескольких дублирующих замеров в ситуациях, когда Солнце не было закрыто облачностью. По полученным данным определялись среднечасовые значения спектральных АОТ атмосферы и параметров α , β формулы Ангстрема, которая описывает спектральную зависимость АОТ в области спектра до 1 мкм:

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

Фотометры SPM калибровались в Томске другим методом Бугера (Langley plot method – см., например, [23, 24]). Алгоритмы расчета АОТ и влагосодержания атмосферы приводились в работах [2, 25]. По данным измерений в ИК-диапазоне спектра ($\lambda > 1$ мкм) эмпирическим методом [26] определялись две составляющие АОТ, обусловленные ослаблением радиации грубо- и мелкодисперсным аэрозолем:

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

где m и n – параметры аппроксимации спектральной зависимости τ_λ^f . Грубодисперсная компонента τ^c находилась по минимальным значениям АОТ в диапазоне 1,24–2,14 мкм, а мелкодисперсная компонента оценивалась для длины волны 0,5 мкм как остаточная толщина: $\tau_{0,5}^f = \tau_{0,5}^a - \tau^c$.

Фотометры Microtops II калибровались в GSFC/NASA путем сравнения с Sun-Sky-радиометром CE 318, прокалиброванным в обсерватории Мауна-Лоа. АОТ атмосферы, а также мелко- и грубодисперсные компоненты ($\tau_{0,5}^f$ и τ^c) рассчитывались

с помощью стандартных алгоритмов, принятых в сети AERONET [12, 27].

При анализе характеристик АОТ за основу были взяты результаты измерений фотометров SPM, а при их отсутствии привлекались данные Microtops II. Возможность использования комбинированного массива данных разных фотометров и методик определения τ_λ^a , $\tau_{0,5}^f$ и τ^c обоснована следующим. Во-первых, в нескольких экспедициях осуществлялась интеркалибровка фотометров. Результаты параллельных измерений SPM и Microtops II подтвердили согласие данных в пределах погрешности измерений [16, 17]: для АОТ стандартное отклонение составляло 0,01–0,02; для влагосодержания – около 0,05 г/см². Кроме того, на основе совместного массива данных было проведено сопоставление двух подходов оценки (разделения вклада) τ^c и $\tau_{0,5}^f$ [28]. Среднее отличие τ^c , рассчитанных разными методами, для Атлантического океана составило 0,007 при стандартном отклонении 0,024 и коэффициенте корреляции 0,75. Несколько лучше регрессионная связь τ^c наблюдается для данных, полученных в Южном океане: 0,0; 0,009; 0,80 соответственно. То есть результаты сравнения показали приемлемое согласие данных и возможность использования альтернативных подходов оценки τ^c .

В измерениях характеристик аэрозоля в приземном слое атмосферы использовались фотоэлектрические счетчики частиц АЗ-5, АЗ-10 или GRIMM 1.108 [29, 30] и аэрометр [31, 32]. По данным измерений этих приборов определялись: массовая концентрация аэрозоля (M_A , мкг · м⁻³) и поглощающего вещества – «сажи» в составе субмикронного аэрозоля (M_{BC} , мкг · м⁻³), счетная концентрация частиц (N_A , см⁻³) в диапазоне диаметров от 0,4 до 10 мкм, концентрации частиц в диапазоне размеров мелкодисперсной N_f ($d = 0,4$ –1 мкм), грубодисперсной N_c ($d > 1$ мкм) фракций, а также их соотношение (N_f/N_c).

Забор воздуха осуществлялся по силиконовым шлангам длиной 0,5–1 м с высоты 15–20 м над уровнем морской поверхности. Параметры аэрозоля измерялись круглосуточно в программно заданном режиме с периодичностью измерительных циклов 1 ч и продолжительностью от 10 до 30 мин. Более подробно методики измерений искомых параметров аэрозоля приводились в работах [17, 33].

Большинство измерений характеристик аэрозоля было выполнено с борта научно-экспедиционного судна (НЭС) «Академик Федоров» в 51-й–60-й РАЭ (рис. 1) на традиционном маршруте (кружки) вдоль берегов Западной Европы и Африки: Санкт-Петербург – Бремерхафен – Ла-Манш – Канарские острова – Кейптаун – Антарктида. Кроме того, к анализу были привлечены данные, полученные в других морских экспедициях: в 19-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик Сергей Вавилов» [17] и двух рейсах НЭС «Академик Трешников» [16]. Из материалов этих экспедиций были отобраны результаты измерений в районах, совпадающих с восточным маршрутом НЭС «Академик Федоров».

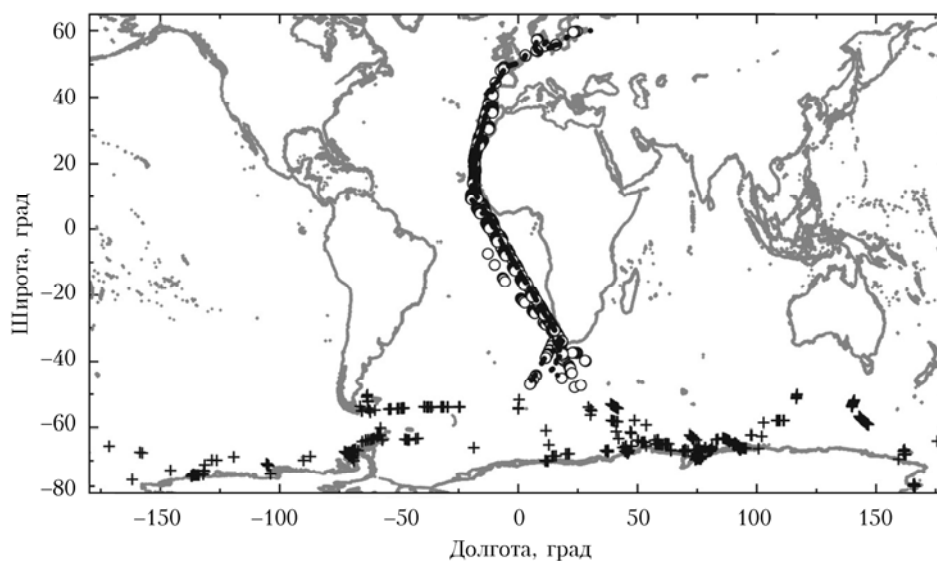


Рис. 1. Карта маршрута РАЭ (крестиками обозначены районы измерений в Антарктике)

Результаты отдельных экспедиций дают сложную картину пространственно-временной изменчивости характеристик аэрозоля. Усреднение данных всех экспедиций на одном и том же маршруте позволило минимизировать короткопериодные вариации и выделить особенности среднего широтного распределения аэрозоля в восточной части Атлантического океана от $\sim 60^\circ$ с.ш. до Антарктиды.

В акватории Южного океана (более 50° ю.ш.) движение судов осуществлялось по разным маршрутам, в том числе вокруг Антарктиды. Усреднение характеристик аэрозоля в южной полярной области было проведено по широтным зонам, вне зависимости от географической долготы (маршрута). Это можно считать допустимым, учитывая ослабленное влияние выносов континентального аэрозоля над Южным океаном и отсутствие статистически значимых неоднородностей долготного распределения [16].

Количество дней и часов измерений в различных экспедициях приведено в табл. 1. На рис. 2 иллюстрируется распределение данных (число измерений N) по пятиградусным широтным зонам на при-

мере АОТ и концентраций M_A . Объем данных, полученных на одном и том же маршруте и примерно в одинаковые сроки, можно считать приемлемым для статистических оценок пространственного распределения характеристик атмосферного аэрозоля.

Исследования характеристик аэрозоля на прямом и обратном маршруте судна выполнялись в разные сезоны двух полушарий. Месяцы и сезоны измерений приведены в табл. 2. Во избежание путаницы в терминологии, климатические сезоны, соответствующие Южному полушарию, здесь и далее указаны в кавычках. Из таблицы следует, что результаты измерений в Северной Атлантике позволяют оценить различия характеристик аэрозоля между осенью и весной, а в Южной Атлантике – между началом «лета» и «осенью». Измерения в Антарктике выполнялись в «летний» период Южного полушария – с декабря по февраль (иногда до начала марта). Заметим, что параметры приземного аэрозоля на обратном маршруте (апрель) измерялись только в двух экспедициях. Поэтому статистическая значимость этих данных (в отличие от АОТ) пока недостаточна.

Таблица 1

Количество дней (часов) измерений характеристик аэрозоля в различных экспедициях

| № п/п | Наименование экспедиции, сроки | АОТ атмосферы | Микрофизические характеристики |
|-------|---|---------------|--------------------------------|
| 1 | 19-й рейс «Академик Сергей Вавилов», 2004 | 28 (132) | 51 (936) |
| 2 | 51-я РАЭ, «Академик Федоров», 2005/2006 | 25 (92) | – |
| 3 | 52-я РАЭ, «Академик Федоров», 2006/2007 | 92 (554) | 67 (1182) |
| 4 | 53-я РАЭ, «Академик Федоров», 2007/2008 | 89 (409) | 170 (3523) |
| 5 | 54-я РАЭ, «Академик Федоров», 2008/2009 | 42 (186) | – |
| 6 | 55-я РАЭ, «Академик Федоров», 2009/2010 | 41 (208) | 93 (1847) |
| 7 | 56-я РАЭ, «Академик Федоров», 2010/2011 | 47 (205) | 35 (757) |
| 8 | 57-я РАЭ, «Академик Федоров», 2011/2012 | 51 (235) | 42 (989) |
| 9 | 58-я РАЭ, «Академик Федоров», 2012/2013 | 86 (513) | 92 (1762) |
| 10 | 58-я РАЭ, «Академик Трешников», 2013 | 23 (85) | – |
| 11 | 59-я РАЭ, «Академик Федоров», 2013/2014 | 47 (220) | – |
| 12 | 59-я РАЭ, «Академик Трешников», 2014 | 39 (206) | 103 (2193) |
| 13 | 60-я РАЭ, «Академик Федоров», 2014/2015 | 57 (346) | 142 (1993) |
| | <i>Общее количество данных</i> | 667 (3391) | 795 (15182) |

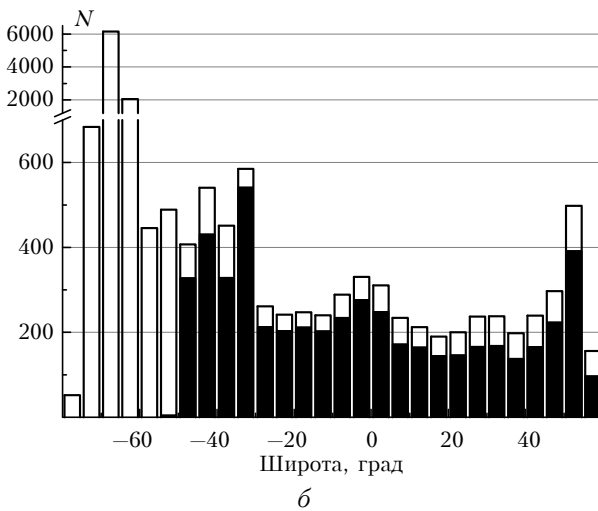
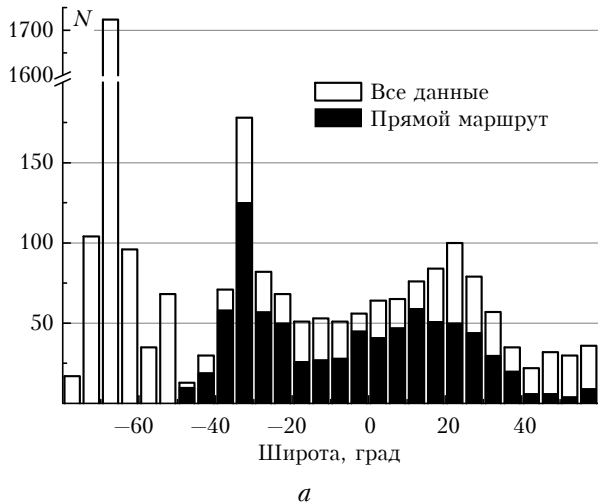


Рис. 2. Количество среднечасовых значений АОТ (а) и M_A (б), полученных в разных частях маршрута РАЭ

Таблица 2

Основные месяцы и сезоны измерений параметров аэрозоля на прямом и обратном маршрутах

| Маршрут РАЭ | Северное полушарие | Южное полушарие |
|-------------|----------------------|----------------------------|
| Прямой | ноябрь (осень) | декабрь (начало «лета») |
| Антарктика | — | декабрь — февраль («лето») |
| Обратный | апрель — май (весна) | март — апрель («осень») |

2. Широтное изменение АОТ и влагосодержания атмосферы

В ранее проведенных исследованиях [1, 2, 16–18 и др.] отмечались значительные неоднородности распределения аэрозоля в атмосфере Восточной Атлантики. Например, средние по районам значения АОТ (0,5 мкм) меняются более чем на порядок: вблизи Антарктиды они составляют около 0,02, а в районе моря Мрака (между Дакаром и островами Зеленого мыса) достигают 0,5. Большой диапазон пространственной изменчивости обус-

ловлен выносами в океаническую атмосферу континентальных аэрозолей различного типа: мелкодисперсного антропогенного аэрозоля со стороны Европы, крупных пылевых частиц из Сахары и других африканских пустынь, а также дымов горения растительности. Особенности изменчивости отдельных характеристик аэрозоля в различных РАЭ уже обсуждались в наших работах [16, 34–36]. В данном случае проведен совместный анализ этих результатов с учетом привлечения новых данных, полученных в 60-й РАЭ.

На рис. 3 показано широтное изменение АОТ (0,5 мкм) и влагосодержания атмосферы W вдоль маршрута РАЭ. В распределении АОТ выделяется хорошо известный максимум в зоне пассатных выносов сахарской пыли (~8° с.ш.), а также вторичные максимумы вблизи Европы (50° с.ш. — Ла-Манш и Северное море) и в районе Южного тропика (23° ю.ш. — вблизи берегов Южной Африки).

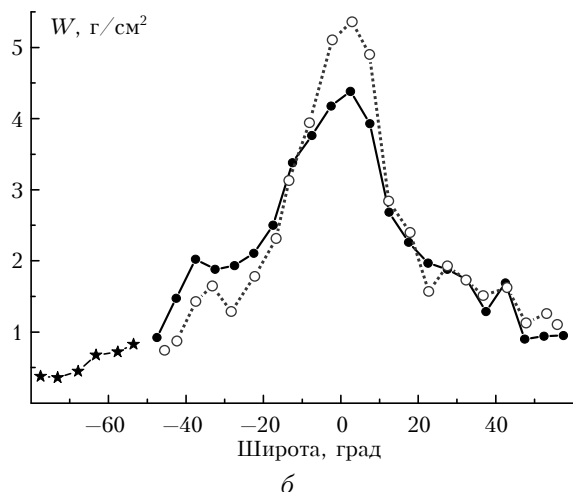
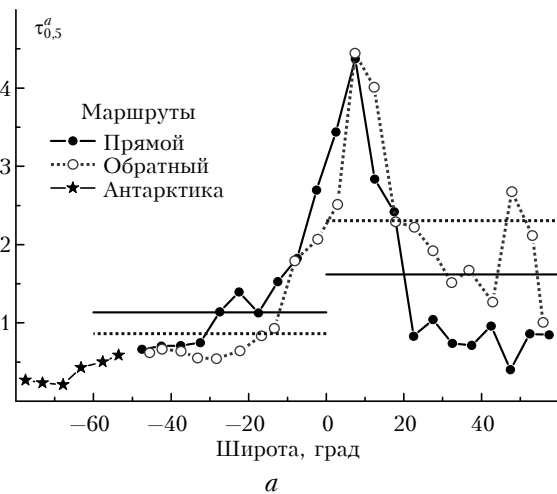


Рис. 3. Широтное распределение АОТ (а) и влагосодержания атмосферы (б) на маршруте РАЭ (прямыми линиями показаны средние уровни $\tau_{0,5}$ в широтных зонах $(0 \pm 60)^\circ$ двух полушарий)

Максимум АОТ вблизи Европы проявился в данных на обратном маршруте (весной). Заметим,

что не только максимум, но и все значения АОТ в широтной зоне 20–60° с.ш. на обратном маршруте примерно в 2 раза больше. Противоположное соотношение, хотя и в меньшей степени, наблюдается в Южном полушарии. Такое различие можно объяснить общей закономерностью, характерной для континентальной атмосферы [37–39 и др.]: уменьшением АОТ с весны по осень (соответствующих каждому полушарию). То есть отличие распределений АОТ в Восточной Атлантике на прямом/обратном маршруте является следствием сезонной изменчивости континентального аэрозоля, выносимого в атмосферу над океаном.

Широтная зависимость влагосодержания атмосферы (рис. 3, б) более монотонная и согласуется с зональным распределением содержания водяного пара (см., например, [40, 41]). Некоторые отличия влагосодержания на обратном маршруте (вблизи экватора и в зоне 20–40° ю.ш.), возможно, обусловлены не сезонным фактором, а меньшим числом измерений. В сравнении с АОТ распределение влагосодержания атмосферы отличается малым разбросом данных относительно средних значений. Этот факт свидетельствует о меньшем влиянии на W континентальных выносов и других факторов. (Более подробно вопрос изменчивости исследуемых характеристик рассмотрен в разд. 4).

Показатель селективности α на большей части маршрута варьирует в диапазоне значений, характерных для морской атмосферы, — от 0,25 до 0,9 [1, 2], а вблизи Антарктиды и весной у берегов Европы выходит на уровень 1,1–1,4 (рис. 4).

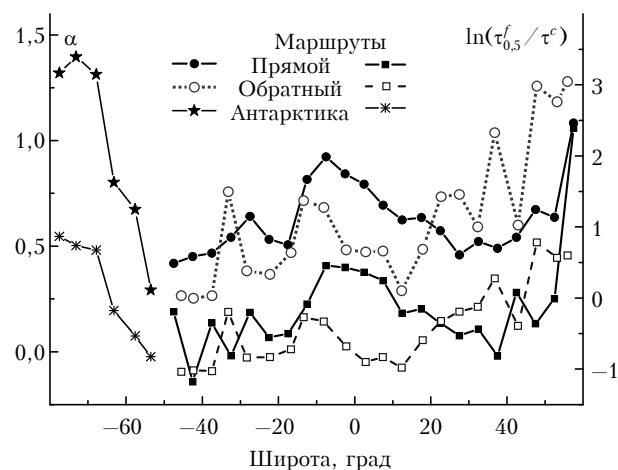


Рис. 4. Широтное распределение показателя α и $\ln(\tau_{0.5}^f/\tau^c)$

Однако причины увеличения α в этих районах различны: вблизи Европы — из-за обогащения атмосферы мелкодисперсным континентальным аэрозолем, а в Антарктике — из-за преобладающего спада грубодисперсной компоненты АОТ. Неоднозначность физической интерпретации показателя α обусловлена его зависимостью от относительного содержания двух фракций аэрозоля (точнее, от

соотношения $\tau_{0.5}^f/\tau^c$), имеющих разные механизмы образования и трансформации в атмосфере [42, 43]. Вследствие этой зависимости широтный ход показателя α повторяет изменение $\ln(\tau_{0.5}^f/\tau^c)$.

Рассмотрим поведение мелко- и грубодисперсной компонент АОТ на маршруте РАЭ (рис. 5, а, б). В широтном распределении τ^c и $\tau_{0.5}^f$, наряду с общим максимумом севернее экватора, есть некоторые отличия, в частности в сезонной трансформации. При смене сезонов (ноябрь/апрель) мелкодисперсная компонента АОТ севернее 20° с.ш. увеличивается, а южнее — уменьшается. Весенние значения $\tau_{0.5}^f$ в умеренных широтах (вблизи Европы) становятся сопоставимыми со значениями $\tau_{0.5}^f$ в зоне северного пассата или даже превышают их. Сезонное изменение грубодисперсной компоненты более простое: весенний рост τ^c в Северном полушарии и «осенний» спад в Южном полушарии (10–40° ю.ш.).

Широтно-сезонное изменение соотношения $\tau_{0.5}^f/\tau^c$ можно проследить по данным на рис. 4. На большей части маршрута основной вклад в АОТ вносит грубодисперсная компонента: $\ln(\tau_{0.5}^f/\tau^c) < 0$. Роль мелкодисперсного аэрозоля преобладает ($\ln(\tau_{0.5}^f/\tau^c) > 0$) в умеренных широтах Северного полушария, вблизи Антарктиды ($> 65^\circ$ ю.ш.), а также в экваториальной зоне.

Распределение параметров m и n , характеризующих мелкодисперсную компоненту АОТ, имеет следующие особенности (рис. 5, в, г). Широтный ход параметра $m \approx \tau_1^f$ качественно повторяет закономерности изменения $\tau_{0.5}^f$. Основными являются максимум в зоне сахарских выносов и повышенные значения в умеренных широтах Северного полушария. В поведении показателя селективности n обращают на себя внимание пониженные значения (до 0,5) в широтной зоне 20–60° ю.ш. и максимум вблизи Антарктиды ($n > 2$). В тропическом поясе (точнее, в зоне 15° ю.ш. — 25° с.ш.) средний уровень показателя n на прямом и обратном маршруте одинаков: $\sim 1,7$. Немного ниже средние значения n на широтах 25–60° с.ш. в осенний период, а весной здесь просматривается тенденция роста показателя n от 1,5 до 2,5.

Обобщим особенности пространственного распределения характеристик АОТ с точки зрения их кластеризации по районам. В Северном полушарии по совокупности экстремумов характеристик АОТ выделяются три района с ориентировочными границами $> 45^\circ$ с.ш., $25\text{--}45^\circ$ с.ш. и $0\text{--}25^\circ$ с.ш. В Южном полушарии распределение большинства характеристик (кроме α и n) более равномерное — монотонный спад от экватора до берегов Антарктиды. То есть пространственное распределение АОТ можно было бы моделировать в виде линейной зависимости от широты [2, 16]. Но, учитывая немонотонность широтного хода показателя селективности α , n и соотношения $\tau_{0.5}^f/\tau^c$, южную часть маршрута тоже следует разделить на три района, примерно с теми же границами, что и в северном полушарии.

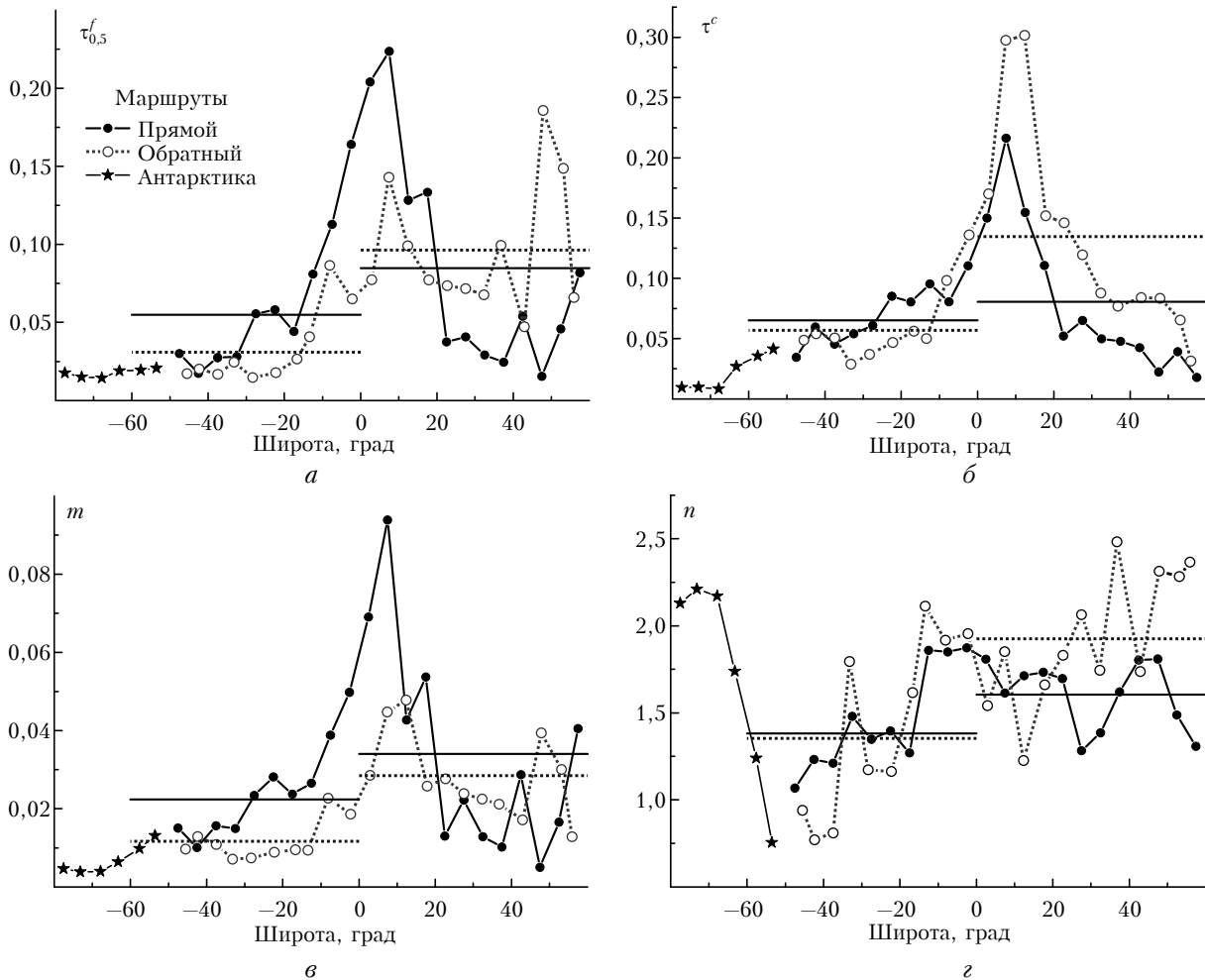


Рис. 5. Широтное распределение мелко- и грубодисперсной компонент АОТ (*а* и *б*), параметров *m* (*в*) и *n* (*г*) (прямыми линиями показаны средние уровни характеристик в широтных зонах $0 \pm 60^\circ$)

3. Широтное изменение концентраций аэрозоля и «сажи» в приземном слое атмосферы

В отличие от АОТ характеристики аэрозоля в приземном слое атмосферы более чувствительны к локальным неоднородностям аэрозольных полей и случайным техногенным воздействиям: выбросы дымовых труб, вентиляционных шахт и др. При проведении измерений стараются предотвратить ложные замеры (выбросы) или фиксируют такие события для последующего исключения при обработке. К сожалению, при круглосуточной работе приборов не всегда удается обеспечить надлежащее качество данных. Поэтому для исключения ложных замеров была проведена итерационная процедура фильтрации исходных данных — отбракованы значения, отличающиеся от текущего среднего более чем на три СКО — «критерий 3σ ». (Вопрос отбраковки данных подробнее рассмотрен в [44].) Таким образом, в дальнейшем анализе использовался массив данных, очищенный от случайных выбросов.

Общий диапазон изменения концентраций аэрозоля в приземном слое атмосферы на маршруте РАЭ превышает один порядок (рис. 6). Самые низкие значения всех параметров наблюдаются вблизи Антарктиды (округленно): $N_f = 0,8 \text{ см}^{-3}$, $N_c = 0,04 \text{ см}^{-3}$, $M_A = 0,5 \text{ мкг/м}^3$, $M_{BC} = 0,026 \text{ мкг/м}^3$. Приведенные значения характеризуют фоновый уровень концентраций аэрозоля в атмосфере над океаном. Причина низких концентраций вблизи берегов Антарктиды очевидна — здесь ослаблены дальние переносы аэрозоля с континентов и генерация морского аэрозоля с поверхности, частично покрытой льдом или снегом. Максимальные значения всех параметров аэрозоля наблюдаются в тропической зоне: средние значения N_f достигают 19 см^{-3} , $N_c = 2,2 \text{ см}^{-3}$, $M_A = 14 \text{ мкг/м}^3$, $M_{BC} = 0,7 \text{ мкг/м}^3$.

В широтном распределении параметров аэрозоля повторяются закономерности, которые уже отмечались для АОТ атмосферы: основной максимум в тропической зоне и вторичный максимум вблизи Европы ($> 45^\circ$ с.ш.). Характерной особенностью является также резкий спад концентраций аэрозоля над Южным океаном — в широтной зоне $60\text{--}65^\circ$ ю.ш.

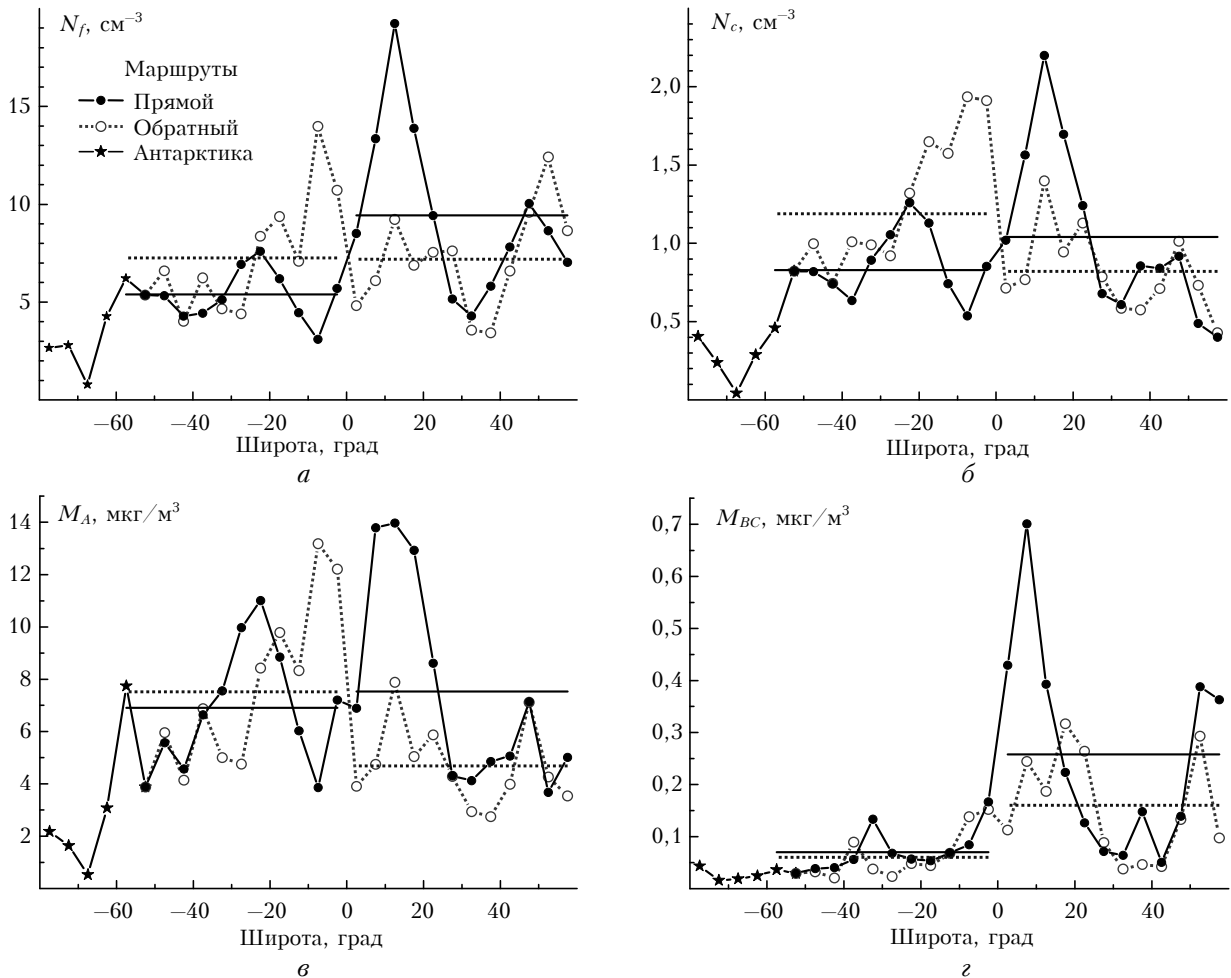


Рис. 6. Средние широтные распределения счетных концентраций мелких N_f (а) и крупных N_c (б) частиц, массовых концентраций аэрозоля (в) и «сажи» (г) на прямом и обратном маршруте РАЭ (прямыми линиями показаны средние уровни параметров в широтных зонах $(0 \pm 60)^\circ$)

В сравнении с АОТ приземные характеристики аэрозоля на прямом/обратном маршруте и, соответственно, по сезонам различаются более контрастно. На отдельных участках маршрута прослеживается даже противофазный характер широтного распределения. Влияние сезонного фактора проявляется в том, что в апреле основные максимумы концентраций аэрозоля (N_f , N_c , M_A) смещаются из зоны Северного тропика на юг (см. рис. 6, а–в). Кроме того, меняются положение и величина других максимумов. Например, весенний максимум концентрации мелких частиц вблизи Европы ($> 40^\circ$ с.ш.) становится больше, чем в зоне северного пассата. Это изменение согласуется с весенним ростом АОТ (см. рис. 3, а, 5, а), обусловленным сезонной изменчивостью континентального аэрозоля.

Несколько иными особенностями характеризуется широтно-сезонная изменчивость содержания «сажи» (рис. 6, г). На прямом маршруте хорошо проявляются два основных максимума M_{BC} — на широтах $\sim 8^\circ$ с.ш. и $50\text{--}55^\circ$ с.ш. (Ла-Манш, Северное море), а также локальное повышение вблизи Кейптауна ($\sim 35^\circ$ ю.ш.). На обратном маршруте максимумы концентрации «сажи» снижаются и в среднем

прослеживается тенденция роста M_{BC} с юга на север при локальном минимуме на широтах $30\text{--}40^\circ$ с.ш.

На рис. 7 иллюстрируется широтный ход соотношения концентраций частиц мелко- и грубодисперсного аэрозоля (N_f/N_c). На большей части маршрута как в ноябре, так и в апреле соотношения счетных концентраций двух фракций аэрозоля варьирует в относительно небольшом диапазоне значений $N_f/N_c \approx 5\text{--}10$. Над Южным океаном ($60\text{--}70^\circ$ ю.ш.) и вблизи Европы ($> 50^\circ$ с.ш.) соотношение N_f/N_c резко повышается до $14\text{--}20$.

В заключение данного раздела рассмотрим средний уровень характеристик аэрозоля в одинаковых широтных зонах $(0 \pm 60)^\circ$ двух полушарий, который обозначен на рис. 3, 5, 6 прямыми линиями. Независимо от сезона все характеристики АОТ в Северном полушарии больше, чем в Южном (рис. 3, а, 5), что обусловлено большим влиянием континентальных выносов. Вторая особенность касается сезонных отличий, тоже связанных с влиянием континента: в осенний период (для каждого полушария) средний уровень большинства характеристик (τ_a^a , $\tau_{0,5}^a$, τ^c , n) ниже, чем весной или в начале лета.

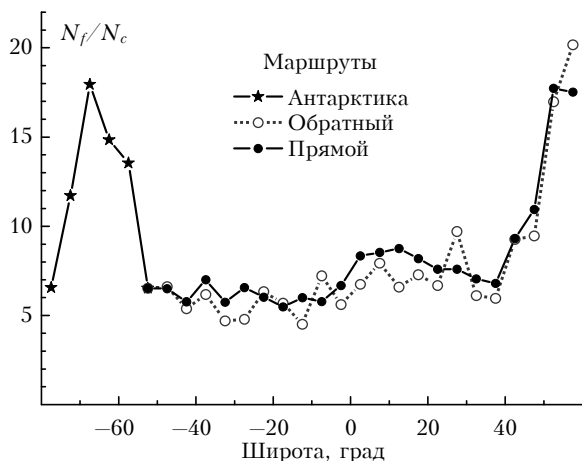


Рис. 7. Широтное распределение отношения счетных концентраций частиц мелко- и грубодисперсного аэрозоля

Большая широтная изменчивость приземных характеристик аэрозоля и отличие их распределений на прямом и обратном маршруте (рис. 6) приводят к противоречивым результатам. На прямом маршруте (ноябрь) средние значения всех параметров аэрозоля в Северном полушарии больше, чем в Южном. На обратном маршруте (апрель) соотношение средних уровней параметров различается: N_c и M_A больше в Южной Атлантике, M_{BC} больше в Северной Атлантике, а уровень N_f одинаковый.

Приведем основные причины противоречивости этих результатов, а также относительно малых сезонных различий (ноябрь—апрель) параметров N_f и M_A вблизи Европы (рис. 6). Во-первых, измерения приземных параметров аэрозоля на обратном маршруте проводились только в двух экспедициях, и объем этих данных (см. рис. 2, б) пока недостаточен для надежных статистических оценок. Во-вторых, основную роль в формировании средних уровней N_f , N_c , M_A и M_{BC} играет максимум в тропической зоне. Поэтому именно его положением в значительной степени определяется соотношение аэрозольных параметров между Северным и Южным полушариями. Кроме того, меньший весенний рост N_f (в сравнении с АОТ) обусловлен тем, что дальние переносы континентального аэрозоля происходят в различных слоях тропосферы и их влияние лучше проявляется не в приземной характеристике, а в интегральной (АОТ).

Если не учитывать сезонные отличия на прямом и обратном маршрутах, а рассматривать массив данных в целом, то более высокий уровень большинства характеристик аэрозоля наблюдается в Северной Атлантике, что нетрудно объяснить большей площадью суши и, соответственно, выносов континентального аэрозоля. Соотношение средних параметров в Северном/Южном полушариях составляет: $\tau_{0,5}^a = 0,20/0,11$; $\tau_{0,5}^f = 0,10/0,05$; $\tau^c = 0,11/0,06$; $N_f = 8,7/5,9 \text{ см}^{-3}$; $N_c = 0,97/0,92 \text{ см}^{-3}$; $M_{BC} = 0,23/0,07 \text{ мкг/м}^3$. То есть особенно велико различие между Северным и Южным полушариями по содержанию «сажи» — в 3,3 раза.

4. Вариабельность параметров аэрозоля в приземном слое и столбе атмосферы

Выше рассматривались особенности широтного распределения только средних значений различных характеристик аэрозоля. Представляло интерес оценить степень их изменчивости в различных районах Восточной Атлантики (подробнее см. [44]). Напомним, что параметры аэрозоля в приземном слое атмосферы (N_f , N_c , M_A , M_{BC}) были очищены от случайных выбросов. Поэтому распределение их коэффициентов вариаций V (отношение СКО к средним значениям) оказалось достаточно равномерным — в коридоре значений $(70 \pm 30)\%$ (рис. 8, а).

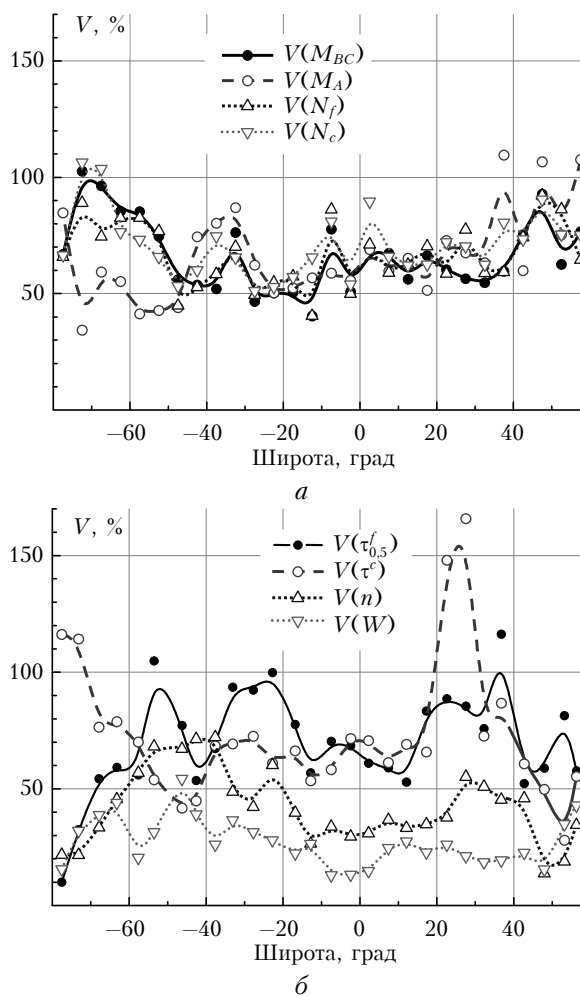


Рис. 8. Широтное распределение коэффициентов вариаций параметров аэрозоля (а) и характеристик АОТ (б) на маршруте РАЭ

Из-за прерывистости рядов фотометрических наблюдений отбраковка результатов измерений $\tau_{0,5}^a$ и W по «критерию 3σ » не проводилась. По этой причине коэффициенты вариаций характеристик АОТ меняются в более широком диапазоне и достигают 160% (рис. 8, б). Коэффициенты вариаций

влажностности атмосферы более устойчивы и не превышают 55%.

Обратим внимание на экстремальные значения $V(\tau^c)$ на широтах $\sim 25^\circ$ с.ш. и более 70° ю.ш. В первом случае повышенную изменчивость τ^c можно объяснить эпизодичностью выносов сахарской пыли на периферию пассатного потока. Вторая область повышенной изменчивости τ^c (почти 120%) находится вблизи Антарктиды ($> 70^\circ$ ю.ш.). Причем вариации второй компоненты АОТ ($\tau_{0,5}^f$) в этих широтах, наоборот, снижаются до 10%. Причиной разного поведения $V(\tau^c)$ и $V(\tau_{0,5}^f)$ являются не какие-то природные особенности, а очень малые значения τ^c и $\tau_{0,5}^f$, которые сопоставимы с погрешностью их определения.

За исключением двух рассмотренных аномалий, распределения коэффициентов вариаций всех характеристик аэрозоля выглядят достаточно однородными. В отличие от средних значений параметров (рис. 5, 6), величина их относительной изменчивости (рис. 8) хотя и меняется вдоль маршрута, но не сильно отклоняется от средних уровней. «Стационарность» широтных распределений V свидетельствует о тесной, практически линейной связи абсолютной изменчивости (СКО) параметров с их средними значениями (см. примеры на рис. 9). (Наклон регрессионной прямой фактически и является коэффициентом вариаций.)

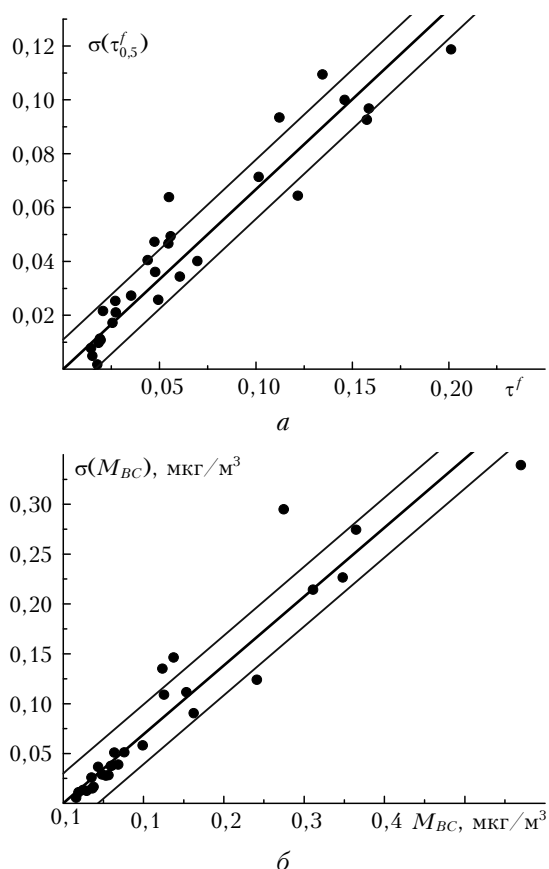


Рис. 9. Регрессионные зависимости СКО от средних значений для $\tau_{0,5}^f$ (а) и M_{BC} (б)

Кроме того, отметим, что коэффициенты вариаций различных параметров аэрозоля находятся в узком диапазоне значений (в порядке убывания): $V(\tau^c) = 71\%$, $V(M_{BC}) = 69\%$, $V(N_f) = 67\%$, $V(\tau_{0,5}^f) = 67\%$, $V(N_c) = 66\%$, $V(M_A) = 62\%$.

Таким образом, несмотря на высокую неоднородность пространственного распределения аэрозоля и разнообразие атмосферных условий (метеорологических, циркуляционных и др.) в Восточной Атлантике, коэффициенты вариаций различных параметров имеют сопоставимые значения (62–71%), а абсолютная изменчивость (СКО) пропорциональна текущим средним значениям.

5. Взаимосвязи параметров аэрозоля

Из общих соображений понятно, что схожие закономерности пространственно-временной изменчивости различных характеристик аэрозоля приводят к появлению соответствующих взаимосвязей, а различия снижают эту взаимосвязь. Для получения количественных оценок были рассчитаны коэффициенты взаимной корреляции $R_{i,j}$ между двумя группами основных характеристик аэрозоля: 1) АОТ – $\tau_{0,5}^f$, τ^c , n ; 2) параметры аэрозоля в приземном слое – N_f , N_c , M_A , M_{BC} . Коэффициенты корреляции $R_{i,j}$ определялись как для индивидуальных массивов данных внутри каждой группы (отдельно АОТ и отдельно приземные параметры), так и для совместного массива всех характеристик аэрозоля. Анализ взаимосвязей проводился для всего маршрута РАЭ и трех районов Восточной Атлантики, наиболее отличающихся по природным условиям: а) общий массив данных на маршруте РАЭ (табл. 3 – справа, сверху); б) широтная зона $25\text{--}55^\circ$ с.ш., подверженная выносам мелкодисперсного континентального аэрозоля со стороны Европы под влиянием развитой циклонической деятельности (табл. 3 – слева, внизу); в) пассатная зона $0\text{--}25^\circ$ с.ш., известная мощными, постоянными выносами пылевого аэрозоля (табл. 4 – справа, сверху); г) широтная зона $25\text{--}60^\circ$ ю.ш. – наиболее удаленная от континентов часть маршрута, характеризующаяся малым содержанием аэрозоля (табл. 4 – слева, внизу).

При интерпретации коэффициентов корреляции воспользуемся следующим условным делением: сильная связь ($R_{i,j} > 0,5$), умеренная ($0,3 < R_{i,j} < 0,5$), слабая ($R_{i,j} < 0,3$) и статистически незначимая. Значения однотипных коэффициентов корреляций $R_{i,j}$, рассчитанных для индивидуальных и совместного массивов, несколько отличаются, но приводят к одинаковым выводам. Приведем их в порядке уменьшения уровня взаимосвязи.

Наиболее тесная связь, как для общего массива данных (а), так и для отдельных широтных зон (б–г), наблюдается между концентрациями аэрозоля N_f , N_c и M_A . Схожесть пространственного распределения этих и других характеристик аэрозоля (кроме τ^f , τ^c) на маршруте РАЭ предопределяет также их сильную взаимосвязь в общем массиве данных.

Коэффициенты взаимной корреляции характеристик аэрозоля на всем маршруте (справа, вверху) и в широтной зоне 25–55° с.ш. (слева, внизу)

| | $\tau_{0,5}^f$ | τ^c | n | N_f | N_c | M_A | M_{BC} |
|----------------|-----------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| $\tau_{0,5}^f$ | 1 | 0,74 (0,55) | -0,06 (-0,13) | 0,49 | 0,46 | 0,57 | 0,59 |
| τ^c | -0,06 (0,31) | 1 | -0,15 (-0,18) | 0,64 | 0,64 | 0,64 | 0,71 |
| n | 0,10 (0,25) | -0,17 (0,19) | 1 | -0,15 | -0,23 | -0,21 | -0,04 |
| N_f | 0,15 | 0,50 | -0,06 | 1 | 0,91 (0,82) | 0,90 (0,80) | 0,60 (0,55) |
| N_c | 0,04 | 0,60 | -0,25 | 0,92 (0,73) | 1 | 0,86 (0,83) | 0,52 (0,39) |
| M_A | -0,04 | 0,60 | -0,21 | 0,87 (0,69) | 0,94 (0,82) | 1 | 0,52 (0,42) |
| M_{BC} | 0,13 | 0,10 | -0,24 | -0,01 (0,47) | -0,17 (0,10) | 0,02 (0,18) | 1 |

Примечание. Здесь и в табл. 4: в скобках указаны $R_{i,j}$ для индивидуальных массивов данных – либо АОТ, либо приземные параметры; жирным шрифтом выделены статистически значимые коэффициенты по уровню 0,001.

Коэффициенты взаимной корреляции характеристик аэрозоля в зонах 0–25° с.ш. (справа, вверху) и 25–60° ю.ш. (слева, внизу)

| | $\tau_{0,5}^f$ | τ^c | n | N_f | N_c | M_A | M_{BC} |
|----------------|----------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| $\tau_{0,5}^f$ | 1 | 0,71 (0,24) | -0,35 (-0,34) | 0,28 | 0,29 | 0,56 | 0,50 |
| τ^c | 0,20 (-0,04) | 1 | -0,32(-0,28) | 0,45 | 0,47 | 0,48 | 0,55 |
| n | 0,15 (0,0) | 0,0 (-0,03) | 1 | -0,12 | -0,14 | -0,23 | 0,03 |
| N_f | 0,23 | 0,38 | 0,07 | 1 | 0,93 (0,83) | 0,84 (0,76) | 0,39 (0,29) |
| N_c | -0,05 | 0,35 | -0,18 | 0,56 (0,61) | 1 | 0,84 (0,80) | 0,31 (0,22) |
| M_A | 0,38 | 0,40 | 0,18 | 0,87 (0,75) | 0,37 (0,47) | 1 | 0,31 (0,38) |
| M_{BC} | -0,03 | 0,21 | 0,07 | 0,09 (0,11) | 0,09 (0,15) | 0,16 (0,30) | 1 |

При рассмотрении отдельных широтных зон (б–г) коэффициенты корреляций τ^c с $\tau_{0,5}^f$ и концентрациями аэрозоля снижаются. Умеренная связь между всеми параметрами (кроме n) характерна для пассатной зоны, а также между τ^c и другими параметрами во всех широтных зонах. Что касается показателя n , то его связи с другими рассмотренными характеристиками незначимые или слабые отрицательные.

Заключение

В последнее десятилетие проводились ежегодные измерения оптических и микрофизических характеристик аэрозоля над океаном на одном и том же маршруте Российских антарктических экспедиций (вдоль берегов Западной Европы и Африки до Антарктиды и обратно). Накопление данных в 13 экспедициях позволило проанализировать среднее пространственное распределение (с широтным шагом 5°), сезонную изменчивость (ноябрь/апрель) и взаимосвязи параметров аэрозоля в различных районах Восточной Атлантики и Южного океана. Приведем основные выводы полученных результатов.

1. Общий диапазон изменения средних значений параметров аэрозоля на маршруте РАЭ превышает один порядок (округленно): $\tau_{0,5}^a = 0,02–0,5$; $\tau_{0,5}^f = 0,015–0,22$; $\tau^c = 0,01–0,3$; $N_f = 0,8–19 \text{ см}^{-3}$; $N_c = 0,04–2,2 \text{ см}^{-3}$; $M_A = 0,5–14 \text{ мкг/м}^3$; $M_{BC} = 0,026–0,7 \text{ мкг/м}^3$. Самые низкие значения всех параметров наблюдаются вблизи Антарктиды, максимальные – в зоне северного пассата. Параметр

Ангстрема α , зависящий от соотношения $\tau_{0,5}^f/\tau^c$, в основном имеет значения, характерные для морской атмосферы (0,25–0,9), а вблизи Европы и Антарктиды выходит на «континентальный» уровень 1,1–1,4. Качественно аналогично меняется соотношение счетных концентраций частиц мелко- и грубодисперсного аэрозоля: на большей части Атлантики (N_f/N_c) находится в диапазоне 5–10 и увеличивается до 14–20 над Южным океаном и вблизи Европы.

2. Широтные распределения характеристик АОТ на маршруте РАЭ трансформируются под влиянием сезонного фактора, следуя общему правилу для каждого полушария: снижения значений от весны к осени. Наиболее явно это проявилось для компоненты $\tau_{0,5}^f$ вблизи Европы и обусловлено влиянием сезонной изменчивости выносов континентального аэрозоля в океан.

3. В широтных распределениях приземных характеристик аэрозоля сезонные изменения проявились более контрастно. В апреле (относительно ноября) максимумы концентраций аэрозоля (N_f , N_c , M_A) в тропической зоне смещаются на юг. Кроме того, повышается максимум концентраций мелких частиц вблизи Европы (> 40° с.ш.), что согласуется с аналогичным ростом $\tau_{0,5}^f$. Широтное распределение содержания аэрозоля поглощающего вещества в ноябре характеризуется тремя максимумами: в зоне северного пассата, вблизи Европы (50–55° с.ш.) и Кейптауна. В апреле основной тенденцией является рост M_{BC} с юга на север при локальном минимуме на широтах 30–40° с.ш.

4. Сравнение характеристик аэрозоля в широтных зонах 0–60° без учета сезонной изменчивости показало, что средний уровень всех параметров в Северном полушарии больше, чем в Южном полушарии и особенно велико различие по содержанию в аэрозоле поглощающего вещества – в 3,3 раза. Очевидным объяснением является большая площадь суши и мощность антропогенных источников как дополнительного фактора увеличения содержания аэрозоля над океаном.

5. В отличие от средних значений параметров аэрозоля, широтные распределения их коэффициентов вариаций достаточно однородны и находятся в относительно узком диапазоне значений: $V(\tau^c) = 71\%$, $V(M_{BC}) = 69\%$, $V(N_f) = 67\%$, $V(\tau_{0,5}^f) = 67\%$, $V(N_c) = 66\%$, $V(M_A) = 62\%$.

6. Показана тесная корреляционная связь: между всеми параметрами аэрозоля на общем массиве данных (за счет общего пространственного распределения на маршруте); между концентрациями аэрозоля N_f , N_c и M_A в трех различных районах. Умеренная корреляция отмечена в пассатной зоне между всеми параметрами аэрозоля и в трех широтных зонах у τ^c с большинством других параметров.

Анализ широтно-сезонной изменчивости характеристик аэрозоля на маршруте РАЭ показал наличие индивидуальных особенностей, обусловленных различиями типов аэрозоля (дисперсный состав, поглощение), его содержания в приземном слое и во всей толще атмосферы и влиянием других факторов. Наряду с различиями проявились и общие закономерности широтного распределения большинства параметров аэрозоля, которые создают предпосылки для районирования – выделения нескольких широтных зон (районов), в пределах которых характеристики близки между собой и значимо отличаются от соседних районов.

Авторы выражают благодарность организаторам/руководителям антарктических экспедиций за содействие в проведении исследований атмосферного аэрозоля над океаном, а также коллегам, которые участвовали в измерениях и разработке аппаратуры – Н.И. Власову, А.В. Губину, А.С. Кессель, К.Е. Лубо-Лесниченко, Вас.В. Полькину, А.Н. Прахову, Д.Е. Савкину, С.А. Терпуговой, А.Б. Тихомирову, Ю.С. Турчиновичу, С.А. Турчиновичу, В.П. Шмаргунову.

Работа выполнена при финансовой поддержке комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН, проект № IX.133.3.

1. 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.
2. 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.
3. 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.

4. 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.
5. Kanitz T., Engelmann R., Heinold B., Baars H., Skupin A., Ansmann A. Tracking the Saharan Air Layer with shipborne lidar across the tropical Atlantic // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 41, iss. 3. DOI: 10.1002/2013GL058780.
6. 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.
7. 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 the southern and northern hemispheres // Atmos. Ocean. Opt. 2010. V. 23, N 6. P. 500–508.
8. Brooks Ian M. D317 Cruise report. Sea Spray, Gas Fluxes and Whitecaps Study (SEASAW) / Institute for Atmospheric Science School of Earth and Environment University of Leeds. Leeds. LS2 9JT. 2007. 60 p.
9. Clarke A.D., Howell S., Quinn P.K., Bates T.S., Ogren J.A., Andrews E., Jefferson A., Massling A., Mayol-Bracero O., Maring H., Savoie D., Cass G. The INDOEX aerosol: A comparison and summary of chemical, microphysical, and optical properties observed from land, ship, and aircraft // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107, N 19. 8033. DOI: 10.1029/2001JD000572.
10. De Bruyn W.J., Bates T.S., Caine J.M., Saltzman E.S. Shipboard measurements of dimethyl sulfide and SO₂ southwest of Tasmania during the First Aerosol Characterization Experiment (ACE 1) // J. Geophys. Res. D. 1998. V. 103, N 13. P. 16703–16711.
11. 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. D06204. DOI: 10.1029/2008JD011257.
12. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakadjima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Remote Sens. Environ. 1998. V. 66, N 1. P. 1–16.
13. Smirnov A., Holben B.N., Giles D.M., Slutsker I., O'Neill N.T., Eck T.F., Macke A., Croot P., Courcoux Y., Sakerin S.M., Smyth T.J., Zielinski T., Zibordi G., Goes J.I., Harvey M.J., Quinn P.K., Nelson N.B., Radionov V.F., Duarte C.M., Losno R., Sciare J., Voss K.J., Kinne S., Nalli N.R., Joseph E., Moorthy K.K., Covert D., Gulev S.K., Milinevsky G., Larouche P., Belanger S., Horne E., Chin M., Remer L.A., Kahn R.A., Reid J.S., Schulz M., Heald C.L., Zhang J.,

- Lapina K., Kleidman R.G., Griesfeller J., Gaitley B.J., Tan Q., Diehl T.L.* Maritime Aerosol Network as a component of AERONET – first results and comparison with global aerosol models and satellite retrievals // *Atmos. Measur. Technol.* 2011. N 4. P. 583–597. DOI: 10.5194/amt-4-583–2011.
14. Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н. Прогноз изменения концентрации озона и аэрозоля на основании предсказанного в 24-м цикле уровня солнечной активности // *Оптика атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 9. С. 778–783.
 15. Яушева Е.П., Панченко М.В., Козлов В.С., Терпугова С.А., Чернов Д.Г. Влияние города на аэрозольные характеристики атмосферы Академгородка г. Томска в переходные сезоны // *Оптика атмосфер. и океана.* 2014. Т. 27, № 11. С. 981–988.
 16. 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-й Российской антарктической экспедиции // *Оптика атмосфер. 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.
 17. Sakerin S.M., Smirnov A.V., Kabanov D.M., Polkin V.V., Holben B.N., Panchenko M.V., Kopelevich O.V. Aerosol optical and microphysical properties over the Atlantic Ocean during the 19th cruise of the research vessel “Akademik Sergey Vavilov” // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. D10220. DOI: 10.1029/2006JD007947.
 18. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Козлов В.С., Панченко М.В., Полюкин В.В., Тихомиров А.Б., Власов Н.И., Радионов В.Ф., Смирнов А.В., Холбен Б.Н., Слущкер И.А., Голобокова Л.П. Результаты исследований характеристик аэрозоля в 52-й РАЭ // *Проблемы Арктики и Антарктики.* 2007. Вып. 77. С. 67–75.
 19. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Радионов В.Ф., Slutsker I.A., Smirnov A.V., Терпугова С.А., Holben B.N. О результатах исследований аэрозольной оптической толщины атмосферы во время кругосветной экспедиции вокруг Антарктиды (53-я РАЭ) // *Оптика атмосфер. и океана.* 2008. Т. 21, № 12. С. 1032–1037.
 20. 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 атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 12. С. 1112–1117; Sakerin S.M., Kabanov D.M., Rostov A.P., Turchinovich Yu.S., Knyasev 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.
 21. Microtops II Sunphotometer Owners Manual – Solar Light. URL: solarlight.com/wp-content/uploads/.../MTPMAN-RevC.pdf
 22. 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.
 23. Shaw G.E., Reagan J.A., Herman B.M. Investigations of Atmospheric Extinction using direct solar radiation Measurements made with a multiple wavelength radiometer // *J. Appl. Meteorol.* 1973. V. 12. P. 374–380.
 24. Гуцин Г.П. Методы, приборы и результаты измерения спектральной прозрачности атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 200 с.
 25. Кабанов Д.М., Веретенников В.В., Воронина Ю.В., Сакерин С.М., Турчинович Ю.С. Информационная система для сетевых солнечных фотометров // *Оптика атмосфер. и океана.* 2009. Т. 22, № 1. С. 61–67; Kabanov D.M., Veretennikov V.V., Voronina Yu.V., Sakerin S.M., Turchinovich Yu.S. Information system for network solar photometers // *Atmos. Ocean. Opt.* 2009. V. 22, N 1. P. 121–127.
 26. Сакерин С.М., Кабанов Д.М. О взаимосвязях параметров формулы Ангреста и аэрозольной оптической толщины атмосферы в области спектра 1–4 мкм // *Оптика атмосфер. и океана.* 2007. Т. 20, № 3. С. 222–228.
 27. O’Neill N.T., Eck T.F., Smirnov A., Holben B.N., Thulasiraman S. Spectral discrimination of coarse and fine mode optical depth // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108, N 17. P. 4559–4573. DOI: 10.1029/2002JD002975.
 28. Кабанов Д.М., Сакерин С.М. Сравнение методик оценки мелко- и грубодисперсных компонент аэрозольной оптической толщины атмосферы по данным измерений в видимой области спектра // *Оптика атмосфер. и океана. Физика атмосферы: Материалы XXII Междунар. симп. [Электронный ресурс].* Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2016.
 29. Счетчик аэрозольных частиц АЗ-10. Руководство по эксплуатации. ЭКИТ 7.830.000 РЭ. М., 2010. 13 с.
 30. Grimm H., Eatough D.J. Aerosol measurement: the use of optical light scattering for the determination of particulate size distribution, and particulate mass, including the semi-volatile fraction // *J. Air Waste MA.* 2009. V. 59. P. 101–107.
 31. Козлов В.С., Шмаргунов В.П., Полюкин В.В. Спектрофотометры для исследования характеристик поглощения света аэрозольными частицами // *Приборы и техн. эксперим.* 2008. № 5. С. 155–157.
 32. Kozlov V.S., Yausheva E.P., Terpuгова 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, iss. 15. P. 5722–5741. DOI: 10.1080/01431161.2014.945010.
 33. 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.
 34. Kabanov D.M., Radionov V.F., Sakerin S.M., Smirnov A. Spatial distribution of atmospheric aerosol optical depth over Atlantic ocean along the route Russian Antarctic expeditions // *Proc. SPIE.* 2015. V. 9292. DOI: 10.1117/12.2074564.
 35. Полюкин В.В., Полюкин Вас.В., Голобокова Л.П., Панченко М.В., Терпугова С.А., Тихомиров А.Б. О межгодовой изменчивости широтного распределения микрофизических и химических характеристик приводного аэрозоля в Восточной Атлантике в 2006–2010 гг. // *Оптика атмосфер. и океана.* 2013. Т. 26, № 6. С. 519–524.
 36. Polkin V.V., Sakerin S.M., Polkin Vas.V., Turchinovich U.S., Terpuгова S.A., Tikhomirov A.B., Radionov V.F. Summary of long-term data on latitudinal dependence of the near-water aerosol microphysical characteristics in Eastern Atlantic // *Proc. SPIE.* 2015. V. 9680. DOI: 10.1117/12.2204791.
 37. Weller M., Schulz E., Leiterer U., Naebert T., Herber A., Thomason L.W. Ten years of aerosol optical depth

- observation at the Lindenberg meteorological observatory // *Contrib. Atmos. Phys.* 1998. V. 71, N 4. P. 387–400.
38. *Holben B.N., Tanre D., Smirnov A., Eck T.F., Slutsker I., Abuhassan N., Newcomb W.W., Schafer J.S., Chatenet B., Lavenu F., Kaufman Y.J., Vande Castle J., Setzer A., Markham B., Clark D., Frouin R., Halthore R., Karneli A., O'Neill N.T., Pietras C., Pinker R.T., Voss K., Zibordi G.* An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET // *J. Geophys. Res. D.* 2001. V. 106, N 11. P. 12067–12097.
 39. *Сакерин С.М., Береснев С.А., Горда С.Ю., Кабанов Д.М., Корниенко Г.И., Маркелов Ю.И., Михалев А.В., Николашкин С.В., Панченко М.В., Поддубный В.А., Полькин В.В., Смирнов А., Тащилин М.А., Турчинович С.А., Турчинович Ю.С., Холбен Б., Ерёмкина Т.А.* Характеристики годового хода спектральной аэрозольной оптической толщины атмосферы в условиях Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 6. С. 566–574; *Sakerin S.M., Beresnev S.A., Gorda S.Yu., Kabanov D.M., Kornienko G.I., Markelov Yu.I., Mikhalev A.V., Nikolashkin S.V., Panchenko M.V., Poddubnyi V.A., Pol'kin V.V., Smirnov A., Tashchilin M.A., Turchinovich S.A., Turchinovich Yu.S., Holben B., Eremina T.A.* Characteristics of the annual behavior of the spectral aerosol optical depth of the atmosphere under conditions of Siberia // *Atmos. Ocean. Opt.* 2009. V. 22, N 4. P. 446–456.
 40. *Tuller S.E.* World distribution of mean monthly and annual precipitable water // *Mon. Weather Rev.* 1968. V. 96, N 11. P. 785–797.
 41. *Атлас океанов: Атлантический и Индийский океаны* // Отв. ред. С.Г. Горшков. М.: ГУНПО МО СССР, 1977. 306 с.
 42. *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 region // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 6. P. 510–517.
 43. *Сакерин С.М., Андреев С.Ю., Кабанов Д.М., Николашкин С.В., Прахов А.Н., Радионов В.Ф., Турчинович Ю.С., Чернов Д.Г., Holben B.N., Smirnov A., Sorokin M.G.* О результатах исследований аэрозольной оптической толщи атмосферы в арктических районах // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 5. С. 413–423; *Sakerin S.M., Andreev S.Yu., Kabanov D.M., Nikolashkin S.V., Prakhov A.N., Radionov V.F., Turchinovich Yu.S., Chernov D.G., Holben B.N., Smirnov A., Sorokin M.G.* On results of studies of atmospheric aerosol optical depth in arctic regions // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 6. P. 517–528.
 44. *Кабанов Д.М., Полькин В.В., Сакерин С.М., Радионов В.Ф., Смирнов А.* Анализ взаимосвязей характеристик атмосферного аэрозоля по данным многолетних измерений на восточном маршруте Российских антарктических экспедиций // *Оптика атмосф. и океана. Физика атмосферы: Материалы XXII Международного симпозиума [Электронный ресурс].* Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2016.

S.M. Sakerin, D.M. Kabanov, V.V. Polkin, V.F. Radionov, B.N. Holben, A. Smirnov. Variations in optical and microphysical characteristics of aerosol along the route of Russian Antarctic Expeditions in the East Atlantic.

The 12-year aerosol studies along the route of the Russian Antarctic Expeditions in the East Atlantic and the Southern Ocean are summarized. We analyzed the spatial distribution (with 5° latitudinal step), seasonal (November/April) variations, and interrelations between aerosol optical and microphysical characteristics. It is shown that the latitudinally average variations in aerosol parameters in the East Atlantic exceed one order of magnitude. The lowest (maximal) values are observed near Antarctica (in tropical zone): aerosol optical depth (0.5 μm) varies from 0.02 to 0.5, number concentrations of small particles ($d = 0.4–1 \mu\text{m}$) vary in the range 0.8–19 cm⁻³, concentrations of large ($d > 1 \mu\text{m}$) particles vary in the range 0.04–2.2 cm⁻³, and aerosol and black carbon mass concentrations vary in ranges 0.5–14 μg/m³ and 0.026–0.7 μg/m³, respectively.