

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 523.334.3, 535.361.1

## Результаты спектральных измерений аэрозольной оптической толщи атмосферы солнечными фотометрами в 58-й Российской антарктической экспедиции

С.М. Сакерин<sup>1</sup>, Н.И. Власов<sup>2</sup>, Д.М. Кабанов<sup>1</sup>, К.Е. Лубо-Лесниченко<sup>2</sup>,  
А.Н. Прахов<sup>2</sup>, В.Ф. Радионов<sup>2</sup>, Ю.С. Турчинович<sup>1</sup>, В.Н. Holben<sup>3</sup>, А. Smirnov<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1, Россия

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

<sup>3</sup>NASA Goddard Space Flight Center  
8800 Greenbelt Rd, Greenbelt, MD 20771, USA

Поступила в редакцию 6.09.2013 г.

Обсуждаются особенности пространственно-временной изменчивости аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы, измеренных в 58-й Российской антарктической экспедиции с борта НЭС «Академик Федоров», «Академик Трешников» и на ст. Мирный. Показано, что основной закономерностью пространственного распределения АОТ над океаном в Южном полушарии является линейный широтный спад АОТ от 0,15 на экваторе до 0,025 вблизи Антарктиды. Отмечается сохранение низкого уровня АОТ в Антарктиде ( $0,022 \pm 0,005$ ) в последние 17 лет.

*Ключевые слова:* аэрозольная оптическая толщина, Атлантика, Антарктика; aerosol optical depth, Atlantic, Antarctic.

### Введение

Наблюдения спектральной прозрачности атмосферы солнечными фотометрами позволяют исследовать пространственно-временную изменчивость двух наиболее динамичных компонентов атмосферы — аэрозольной оптической толщи (АОТ) и общего влагосодержания. Особое значение имеют результаты измерений в Антарктике, наиболее удаленной от основных источников аэрозольно-газовых эмиссий. Поэтому количественные характеристики, полученные в этом регионе, рассматриваются в качестве глобального фонового уровня для земной атмосферы.

Первые измерения прозрачности атмосферы в Антарктике были выполнены в 1950/51 г. во время Норвежско-Британско-Шведской экспедиции [1, 2], а российские исследования ведутся с 1966 г. — сначала с использованием стеклянных, а затем интерференционных фильтров [2–5]. Начиная с 2004 г.

регулярные наблюдения на антарктической станции Мирный стали дополняться данными ежегодных измерений АОТ и влагосодержания атмосферы с борта научных судов в Южном океане [6–11].

Активизации судовых измерений АОТ и накоплению информации способствовала организация в 2006 г. морской компоненты AERONET — Maritime Aerosol Network ([12]; [http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new\\_web/maritime\\_awerosol\\_network.html](http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/maritime_awerosol_network.html)). Одним из стимулов для начала регулярных измерений АОТ над океанами послужили два рейса научных судов «Академик Сергей Вавилов» и «Академик Федоров» в 2004–2006 гг. [6–8]. В настоящее время в этом проекте участвуют научные группы из 12 стран, а количество состоявшихся морских экспедиций превышает 230. Результаты судовых измерений АОТ солнечными фотометрами используются для валидации спутниковых наблюдений, проверки модельных разработок и при решении других задач физики атмосферы [13–21].

В настоящей статье обсуждаются результаты очередного цикла измерений спектральных АОТ атмосферы, выполненных в 58-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ), по маршрутам движения двух научно-экспедиционных судов (НЭС) «Академик Федоров», «Академик Трешников» и на ст. Мирный.

\* Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru); Николай Ильич Власов; Дмитрий Михайлович Кабанов (dkab@iao.ru); Константин Евгеньевич Лубо-Лесниченко; Александр Николаевич Прахов; Владимир Федорович Радионов; Юрий Сергеевич Турчинович (tus@iao.ru); Brent Holben (Brent.N.Holben@nasa.gov); Alexander Smirnov (Alexander.Smirnov-1@nasa.gov).

# 1. Характеристика и задачи экспедиционных измерений

Маршрут НЭС «Академик Федоров» (02.11.2012–10.05.2013) традиционно проходил в Восточной Атлантике – через Бремерхафен, Кейптаун к антарктическим станциям Молодежная, Прогресс, Мирный и обратно. Первый рейс НЭС «Академик Трешников» (21.12.2012 – 11.04.2013) выполнялся в Западной Атлантике (вдоль берегов Южной Америки) через Монтевидео до антарктической ст. Беллинсгаузен и обратно (рис. 1).

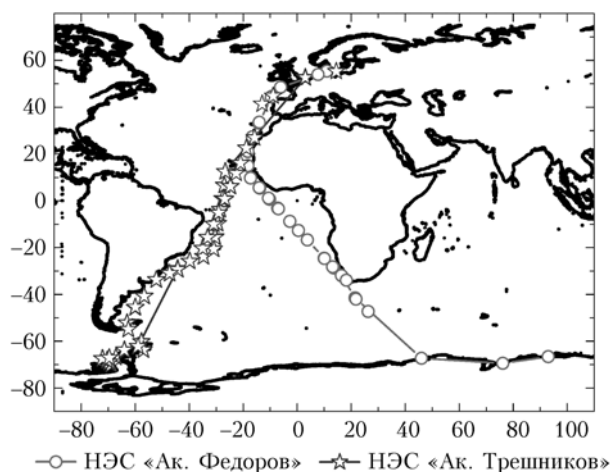


Рис. 1. Маршруты НЭС «Академик Федоров» и «Академик Трешников» в 58-й РАЭ (значками обозначены районы/дни измерений солнечных фотометров)

В наблюдениях АОТ атмосферы использовались две пары портативных солнечных фотометров – Microtops (<http://www.solar.com/sunphoto.htm>) и SPM (разработка ИОА СО РАН). Описания этих фотометров и методики измерений спектральных АОТ и влагосодержания атмосферы уже представлялись в ряде публикаций (см., например, [22–25]), поэтому ограничимся краткими характеристиками, приведенными в табл. 1. Кроме того, к анализу привлекались данные стационарного фотометра AVAS, измеряющего АОТ (0,395; 0,408; 0,479; 0,651; 0,873 мкм) на ст. Мирный с 1988 г. [26].

Таблица 1

## Характеристики портативных солнечных фотометров

Характеристика	SPM	Microtops
Диапазон спектра, мкм	0,3–2,2	0,34–0,94
Количество спектральных каналов	12	5
Угол поля зрения, град	1,5–2,5	2,5
Память: циклов измерений (дней)	65 000 (80)	800 (10)
Встроенные датчики	T, P, GPS	T, P (GPS – внешнее)

Измерения фотометрами проводились сериями – по 5–10 единичных замеров в ситуациях, когда

Солнце не было закрыто облаками. По полученным данным определялись среднечасовые и среднедневные значения АОТ  $\tau_{\lambda}^a$ , влагосодержания атмосферы  $W$  и параметров  $\alpha$ ,  $\beta$  формулы Ангстрема, которая описывает спектральную зависимость АОТ:  $\tau^a(\lambda) = \beta \cdot \lambda^{-\alpha}$ . Параметры  $\alpha$ ,  $\beta$  рассчитывались методом наименьших квадратов после логарифмирования спектральных зависимостей  $\tau^a(\lambda)$  в диапазоне спектра 0,44–0,87 мкм.

Основные задачи фотометрических измерений в 58-й РАЭ следующие:

- 1) получение новых данных о характеристиках АОТ над акваторией Мирового океана и проведение интеркалибровки трех фотометров (Microtops, SPM, AVAS);
- 2) оценки межгодовой и сезонной изменчивости АОТ атмосферы в Антарктиде;
- 3) уточнение широтной зависимости АОТ над океаном в Южном полушарии;
- 4) определение статистических характеристик вариаций АОТ в нескольких районах океана и оценка их различий по маршруту двух НЭС (вдоль берегов Африки и Америки).

## 2. Результаты наблюдений

**Калибровки фотометров.** Поскольку наблюдения на двух судах и ст. Мирный выполнялись разными приборами, то большое внимание было уделено их калибровке – получению «заатмосферных постоянных». Перед началом экспедиции оба фотометра Microtops были прокалиброваны в GSFC/NASA (США) путем сравнения их показаний с «мастер-прибором» – фотометром Cimel CE-318, прокалиброванным в горной обсерватории Мауна-Лоа [12, 23].

Заатмосферные постоянные фотометра AVAS ежегодно контролировались и уточнялись в период декабрь–январь каждого наблюдательного сезона в Мирном долгим методом Бугера (Langley-plot method) по данным натурных измерений в условиях длительной (десятки часов или дней) оптической стабильности атмосферы.

Определение калибровочных констант фотометров SPM проводилось в Томске, затем они уточнялись в ходе экспедиционных измерений. Рассмотрим эти результаты на примере последнего образца SPM, изготовленного для ст. Мирный. При калибровке SPM использовались два подхода:

1) для длин волн 0,5; 0,67 и 0,87 мкм – на основе привязки к данным параллельных измерений фотометром Microtops (результаты измерений еще в одном спектральном канале Microtops 0,44 мкм показались недостаточно надежными из-за проявления «дневного хода» АОТ с максимумом в полдень);

2) для всех остальных спектральных каналов, отсутствующих в фотометре Microtops, калибровочные константы SPM рассчитывались долгим методом Бугера в условиях высокой прозрачности атмосферы с учетом отсутствия выраженного дневного хода и гладкости спектральной зависимости АОТ.

Для проверки правильности калибровки SPM было проведено сопоставление с результатами совместных ( $\pm 30$  мин) измерений  $\tau_{\lambda}^a$  и  $W$  фотометром Microtops в условиях малых замутнений атмосферы, когда погрешности проявляются наиболее явно (рис. 2).

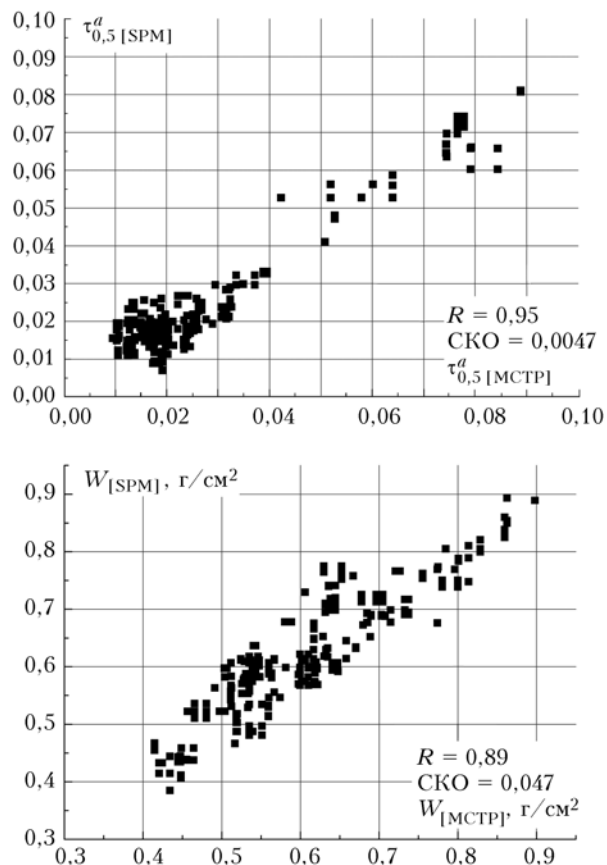


Рис. 2. Примеры сопоставления результатов параллельных измерений  $\tau_{\lambda}^a$  и  $W$  фотометрами SPM и Microtops (МСТР) в период 13.12.2012–20.01.2013

Сравнение данных двух приборов показало (табл. 2), что коэффициенты корреляции  $R$  между результатами измерениями составляют  $0,74 \pm 0,95$ , а средний квадрат отклонения (СКО) показаний не превышает погрешности измерений: для АОТ – до 0,008, для влагосодержания – 0,05 г/см<sup>2</sup>. Следует отметить, что относительно низкая корреляция АОТ на длине волны 0,44 мкм связана, по-видимому, с погрешностью калибровки Microtops, а на длине волны 0,87 мкм – с большим разбросом сигналов SPM из-за недостаточно точной юстировки.

Таблица 2

Результаты сравнения  $\tau_{\lambda}^a$  и  $W$ , измеренных фотометрами SPM и Microtops

Характеристика	$\tau_{0,44}^a$	$\tau_{0,5}^a$	$\tau_{0,67}^a$	$\tau_{0,87}^a$	$W$ , г/см <sup>2</sup>
Коэффициент корреляции	0,89	0,95	0,93	0,74	0,89
Среднеквадратическое отклонение	0,0082	0,0047	0,0034	0,0064	0,047

Результаты спектральных измерений аэрозольной оптической толщи атмосферы солнечными фотометрами... 1061

На рис. 3 иллюстрируется временная изменчивость АОТ и влагосодержания атмосферы: 1) по данным фотометра Microtops за весь период рейса; 2) с 11.11.12 по 20.01.13 совместно с фотометром SPM; 3) с 5 по 20 января совместно с фотометром ABAS на ст. Мирный. В целом, вариации среднесуточных значений  $\tau_{\lambda}^a$  и  $W$ , измеренных разными приборами, имеют согласованный характер. Небольшой разброс данных обусловлен, в первую очередь, не погрешностью измерений (она указана выше), а различиями сроков наблюдений с использованием фотометров и последующим отличием среднесуточных значений АОТ.

В течение двух недель на ст. Мирный проводились интеркалибровочные измерения АОТ тремя фотометрами – Microtops, ABAS и SPM – средние спектральные зависимости  $\tau^a(\lambda)$  для этого периода иллюстрируются на рис. 4. Сравнение АОТ в сопоставимых (в пределах полуширины пропускания фильтров) спектральных каналах фотометров показало, что среднее различие в фиолетовой части спектра составляет около 0,02, а в области 0,5–0,87 мкм не превышает 0,01. Обратим внимание, что интеркалибровка выполнялась в условиях очень высокой прозрачности атмосферы ( $\tau_{\lambda}^a = 0,01–0,05$ ), когда измеряемые значения АОТ были сопоставимы с величиной погрешности измерений каждого из приборов. Разброс  $\tau_{\lambda}^a$  или немонотонность спектрального хода АОТ в ИК-диапазоне ( $\lambda > 1$  мкм) у фотометра SPM обусловлены как погрешностью, так и не достаточно точным наведением фотометра на Солнце.

*Пространственно-временная изменчивость АОТ.* Рассмотрим, как согласуются результаты измерений АОТ в 58-й РАЭ с ранее полученными данными в различных районах Атлантического и Южного океанов. На рис. 5 приведены результаты сравнения средних значений  $\tau_{0,5}^a$ : 1) определенных в результате районирования АОТ в Атлантике [10]; 2) полученных в 51–57-й РАЭ; 3) полученных в 58-й РАЭ на западном и восточном маршрутах. Усреднение АОТ проводилось для следующих широтных зон по маршруту НЭС: вблизи Европейского континента (ВК) на широтах 35–50° с.ш.; в районе Канарских островов (КО), 20–35° с.ш.; в море мрак (ММ) – район наиболее замутненной атмосферы в зоне пылевых выносов из Сахары, 0–20° с.ш.; в тропических и умеренных широтах Атлантики Южного полушария (далее сокращенно *Южная Атлантика* – ЮА), 0–60° ю.ш.; в Южном океане (ЮО) – южнее 60° ю.ш.; в Антарктике – 100-мильная зона вблизи берегов Антарктиды и на ст. Мирный.

Средние АОТ, полученные в 58-й РАЭ на НЭС «Академик Федоров», хорошо согласуются с данными предшествующих экспедиций (51–57-я РАЭ) и результатами районирования АОТ [10]. На маршруте НЭС «Академик Трешников» наблюдались небольшие отличия – средние значения  $\tau_{0,5}^a$  в 100-мильной зоне Антарктиды выходят из коридора СКО. Возможным объяснением повышенных АОТ (относительно данных на восточном маршруте) является влияние близости континента – Южной Америки.

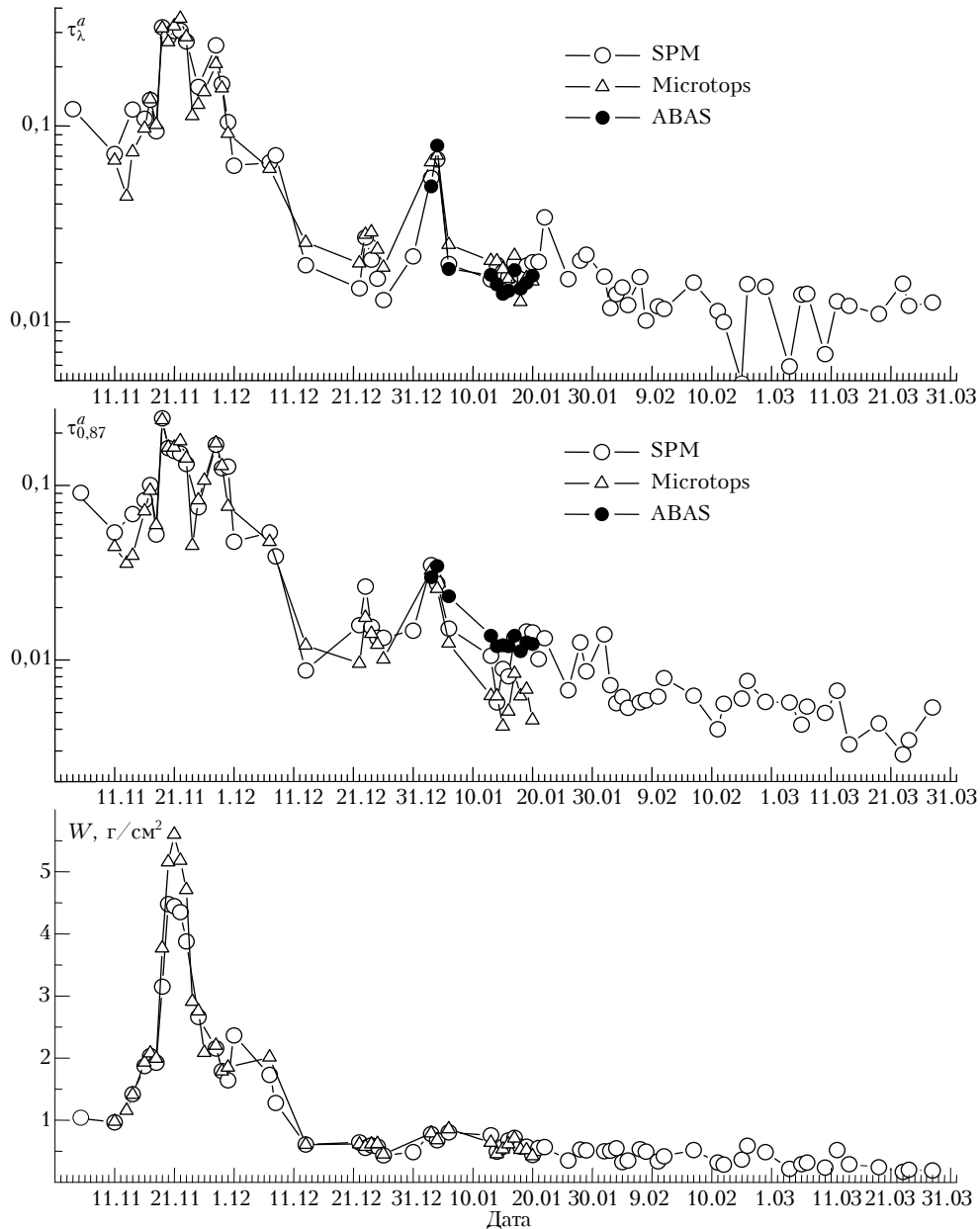


Рис. 3. Вариации  $\tau_\lambda^a$  и  $W$  по данным разных фотометров: 11.11.12–20.01.13 измерения SPM и Microtops; с 5 по 20 января совместные измерения с фотометром ABAS на ст. Мирный

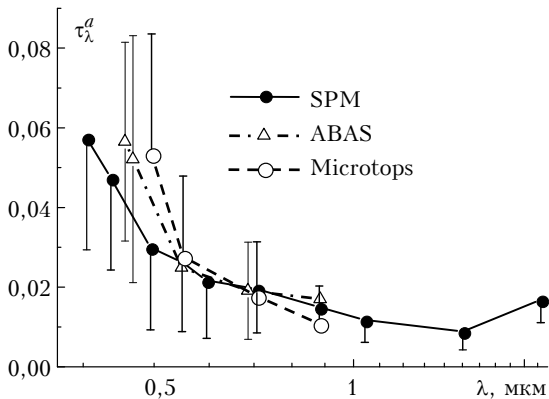


Рис. 4. Средние спектральные зависимости AOT по данным измерений трех фотометров на ст. Мирный (05–20.01.2013)

Средние спектральные зависимости  $\tau^a(\lambda)$ , полученные фотометрами Microtops и SPM в одноименных районах западного и восточного маршрутов, иллюстрируются на рис. 6, а в табл. 3, выборочно приведены количественные характеристики AOT для трех районов. Сравнительный анализ показал следующее:

- в данных всех фотометров хорошо проявляется уменьшение AOT от экватора к Антарктиде (подробнее см. ниже раздел о широтной зависимости AOT);

- AOT в восточном секторе 100-мильной зоны вблизи Антарктиды практически совпадают с данными на ст. Мирный;

- в западном секторе Антарктиды («Академик Трешников») AOT во всем диапазоне спектра значительно выше, чем в восточном, на 0,02–0,03;

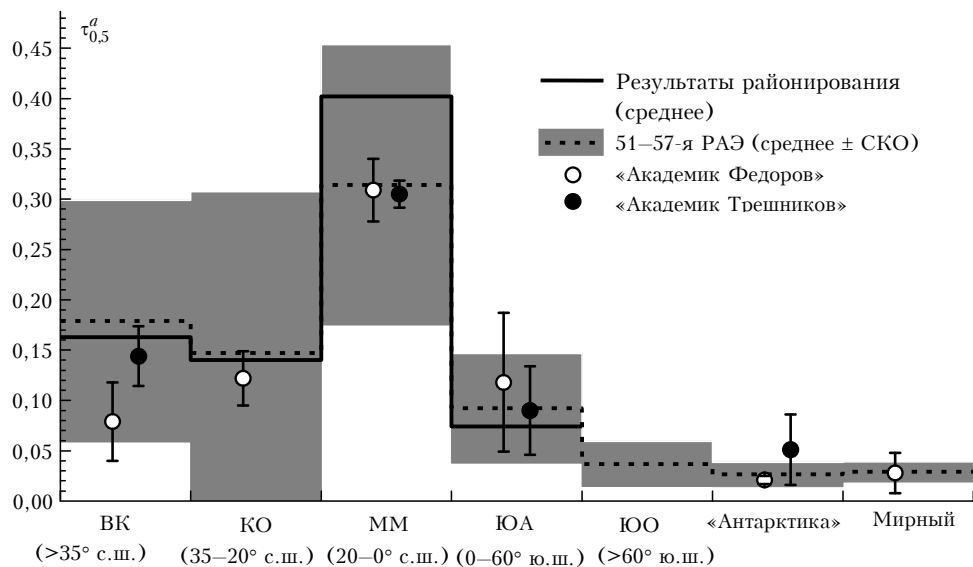


Рис. 5. Изменение АОТ (0,5 мкм) в различных широтных зонах (районах) Атлантического и Южного океанов: кружками обозначены средние ( $\pm$  СКО) значения в 58-й РАЭ по маршруту двух НЭС; пунктиром и серым тоном – средние  $\pm$  СКО в 51–57-й РАЭ; жирные линии – средние значения по результатам районирования Атлантики [10]; «Антарктика» – 100-мильная зона вблизи берегов Антарктиды

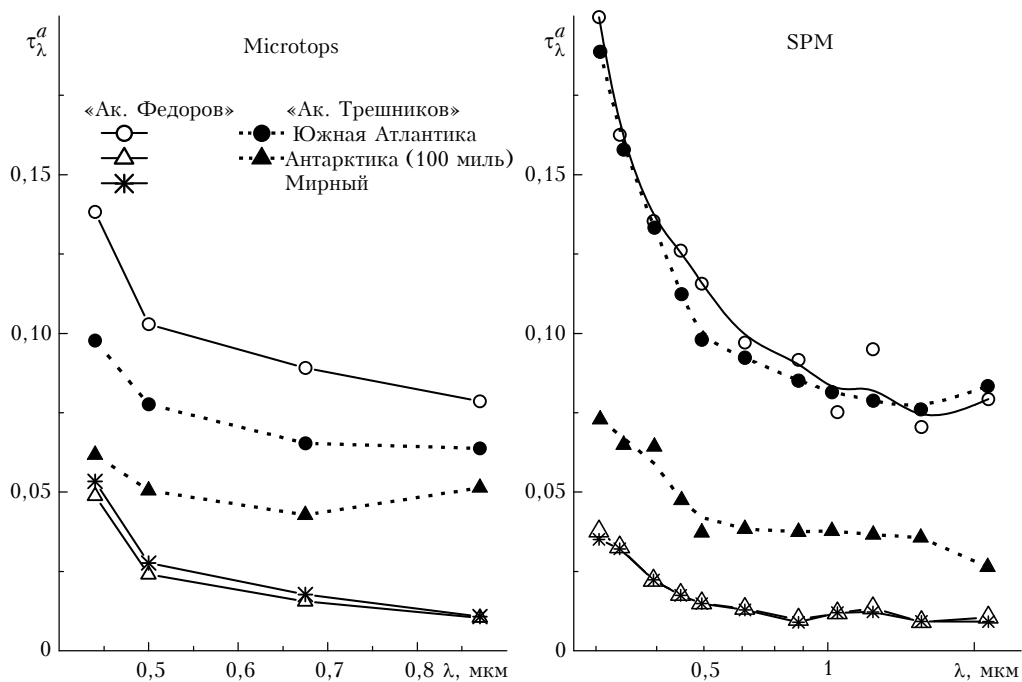


Рис. 6. Средние спектральные зависимости  $\tau^a(\lambda)$ , измеренные фотометрами Microtops и SPM с борта двух НЭС в трех районах Южного полушария

Таблица 3  
Средние характеристики АОТ в отдельных районах океана по данным измерений SPM на НЭС «Академик Федоров» в 58-й РАЭ

Район	$\tau_{0,34}^a$	$\tau_{0,44}^a$	$\tau_{0,5}^a$	$\tau_{0,87}^a$	$\tau_{1,55}^a$	$\alpha$	$\beta$	$W, \text{ г/см}^2$
Южная Атлантика (0–60° ю.ш.)	0,20	0,135	0,126	0,092	0,070	0,60	0,082	1,95
100-мильная зона вблизи Антарктиды	0,038	0,022	0,018	0,010	0,009	1,20	0,008	0,47
Ст. Мирный	0,035	0,022	0,017	0,009	0,009	1,31	0,008	0,46

– АОТ, измеренные фотометром Microtops в Южной Атлантике (0–60° ю.ш.), на восточном маршруте оказались чуть больше, чем на западном (по-видимому, из-за малого числа данных).

Обратим внимание на высокие значения показателя селективности Ангстрема во всех районах Антарктики ( $\alpha = 1,2 \div 1,7$ ), которые более характерны для континента. В умеренных и тропических широтах океана средняя величина показателя  $\alpha$  в 2 раза ниже: например, по данным 58-й РАЭ в Южной Атлантике  $\alpha = 0,6$ . Близкие значения показателя селективности ( $\alpha = 0,4 \div 0,8$ ) указываются и для других чистых районов океана (см., например, [3, 10, 27]).

При интерпретации результатов большую величину  $\alpha$  обычно связывают с высоким содержанием в атмосфере мелкодисперсного аэрозоля, который определяет селективность спектрального хода АОТ. При этом иногда упускается из виду, что величина  $\alpha$  зависит от относительного вклада в ослабление радиации мелкодисперсных и грубодисперсных частиц. И в данном случае (Антарктика) большие значения  $\alpha$  обусловлены не высокой концентрацией мелких частиц, а очень низким содержанием именно грубодисперсного аэрозоля (его вклад в АОТ меньше 0,01). В чистых районах океана при таком же или даже большем содержании мелкодисперсного аэрозоля показатель  $\alpha$  снижается за счет увеличения числа крупных частиц морского аэрозоля.

*Широтная зависимость АОТ над океаном в Южном полушарии.* В предшествующих публикациях [9, 10, 28] уже показывалось, что пространственное распределение аэрозольного замутнения атмосферы в Южной Атлантике, в среднем, характеризуется монотонным спадом АОТ от экватора до берегов Антарктиды. Следовательно, вместо районирования можно использовать более простую аналитическую модель широтного уменьшения АОТ.

Напомним, что широтное изменение АОТ над океаном в Южном полушарии [9–11] обусловлено двумя факторами: 1) убыванием вклада континентального аэрозоля, выносимого в океан вследствие уменьшения площади суши с ростом широты; 2) преобладанием зональных циркуляций воздуха, не способствующих переносу аэрозольных частиц в высокие южные широты.

Обобщение результатов 51–58-й РАЭ и 19-го рейса НИС «Академик Сергей Вавилов» [6–8] подтвердило, что широтная зависимость  $\tau_{\lambda}^a(\varphi)$  проявляется на всех длинах волн. Например, в области 0,5 мкм АОТ уменьшается в среднем от ~0,15 на экваторе до 0,025 у берегов Антарктиды (рис. 7). Для описания широтного изменения  $\tau_{0,5}^a$  методом наименьших квадратов были подобраны аппроксимационные формулы в виде линейной зависимости:

$$\tau_{0,5}^a(\varphi) = \tau_{0,5}^a(0^\circ) - k\varphi = 0,146 - 0,00176\varphi.$$

Погрешность использования такой модели составляет 0,03 при коэффициенте корреляции 0,77. Аналогичные формулы (с другими коэффициентами аппроксимации) можно записать и для других длин волн.

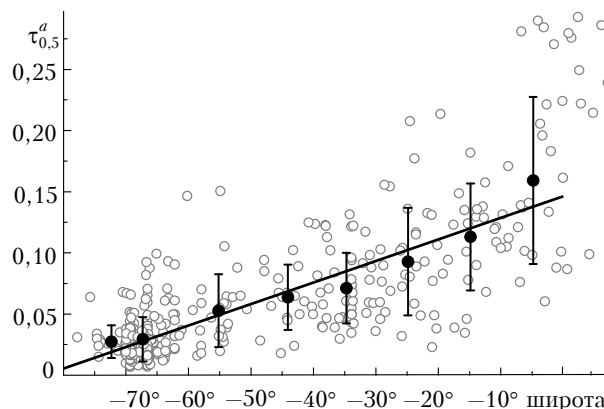


Рис. 7. Широтное изменение средних значений  $\tau_{0,5}^a$  и линейная аппроксимация широтной зависимости

Есть основания полагать, что из-за ослабленного влияния выносов континентального аэрозоля долготное распределение АОТ над океаном в Южном полушарии более однородное, чем в Северном. Для оценки возможных пространственных различий было проведено сравнение АОТ в трех секторах Южного океана, измеренных в 51–58-й РАЭ на широтах более 60° ю.ш. (табл. 4), в том числе, во время двух кругосветных экспедиций вокруг Антарктиды [11, 29]. Анализ данных показал, что в Индийском секторе средние значения  $\tau_{\lambda}^a$  ниже, но величина различий (~0,01) меньше погрешности измерений и вариаций АОТ, т.е. нет оснований говорить о статистически значимых неоднородностях.

В наших данных, полученных в умеренных и тропических широтах Южной Атлантики, в явном виде тоже не проявилось долготной зависимости АОТ, как это наблюдается в Северном полушарии при сближении с континентами или зонами выносов континентального аэрозоля (см., например, районы ВК, КО, ММ на рис. 5). Исключением являются АОТ, измеренные непосредственно в прибрежных зонах, например при подходе к п. Кейптаун. К сожалению, пока не достаточно эмпирических данных для количественного подтверждения отсутствия или малого влияния выносов континентального аэрозоля на пространственное распределение и вариабельность АОТ в южной части океанов.

Большой объем информации о пространственно-временной изменчивости АОТ над океаном дает космическое зондирование (MODIS/Aqua и др.). Однако использование этих результатов требует тщательного контроля и проверки. В частности, по спутниковым данным в широтной зоне ~40–60° ю.ш. над Южным океаном наблюдается существенная аномалия повышенных АОТ [30–32 и др.], получившая название Enhanced Southern Oceans Anomaly (ESOA). Сравнение спутниковых и наземных (MAN, AERONET) наблюдений в Южном океане показало, что среднее превышение АОТ достигает 2–3 раз. В максимуме аномалии спутниковые значения  $\tau_{0,55}^a$  составляют 0,12–0,17. Такое высокое содержание аэрозоля в удаленном (чистом) районе океана трудно однозначно объяснить какими-то физическими факторами.

Таблица 4

Средние характеристики АОТ в трех секторах Южного океана по данным измерений фотометром Microtops в 51–58-й РАЭ (весь массив данных на широтах более 60° ю.ш.)

Район	$\tau_{0,44}^a$	$\tau_{0,5}^a$	$\tau_{0,67}^a$	$\tau_{0,87}^a$	$\alpha$	$\beta$	$W$ , г/см <sup>2</sup>
Атлантический сектор (30 дней)	0,048	0,037	0,030	0,032	0,96	0,037	0,50
Индийский сектор (194 дня)	0,038	0,027	0,019	0,017	1,34	0,013	0,47
Тихоокеанский сектор (28 дней)	0,047	0,033	0,025	0,024	1,07	0,020	0,53

Среди причин артефакта ESOA рассматриваются возможные недостатки спутниковых алгоритмов восстановления АОТ, касающиеся фильтрации облачности, влияния на альbedo морской поверхности эффектов ветра («белые барашки»), несовершенство аэрозольных моделей и др. Анализ этих факторов [32] пока не дал полного объяснения существования ESOA. По нашему мнению, дополнительной (а возможно, и основной) причиной ESOA является неучет влияния на альbedo морской поверхности айсбергов, постоянно присутствующих в этой широтной зоне.

*Многолетняя и сезонная изменчивость АОТ в Антарктиде.* Полученные ранее оценки [2, 33] показали низкий уровень аэрозольного замутнения антарктической атмосферы и отсутствие значимого тренда АОТ после вулканических возмущений. На рис. 8, а приведен дополненный по 2013 г. ряд наблюдений  $\tau_{0,5}^a$  на ст. Мирный и ежегодных измерений АОТ с борта НЭС «Академик Федоров» в приантарктических водах (100-мильная зона). В многолетнем ходе хорошо видны всплески АОТ после крупных вулканических извержений (Эль-Чичон и Пинатубо). При сравнении современных данных с данными, полученными в более ранние периоды между извержениями этих вулканов (1979 и 1989 гг.), просматривается тенденция уменьшения АОТ за 35 лет. Однако более уверенно можно говорить о стабильно низком уровне значений АОТ в Антарктиде в последние 17 лет:  $\tau_{0,5}^a$  варьирует в диапазоне  $0,022 \pm 0,005$  как по данным на ст. Мирный, так и по судовым измерениям в 100-мильной зоне. Малая величина межгодовых колебаний АОТ и различий с судовыми данными (менее 0,01) свидетельствует о сохранении глобального фонового уровня аэрозоля и отсутствии значимых изменений антропогенных и природных эмиссий аэрозоля.

Выявление особенностей годового хода аэрозольного замутнения в высокоширотных районах затруднено не только низкими значениями АОТ, но и малой продолжительностью измерительного периода. Оценки изменения среднемесячных АОТ, проведенные по данным наблюдений на ст. Мирный до 2008 г. (исключая вулканические периоды) [33], показали наличие слабовыраженного максимума в середине антарктического лета, который связывался с увеличением влажности в теплый период.

Качественно аналогичный результат был получен при оценке годового хода характеристик аэрозоля в приземном слое атмосферы на ст. Восток [34]: самые низкие концентрации аэрозоля и сажи

наблюдались во время антарктической зимы (июнь–август), а максимальные в более теплый период (ноябрь–апрель).

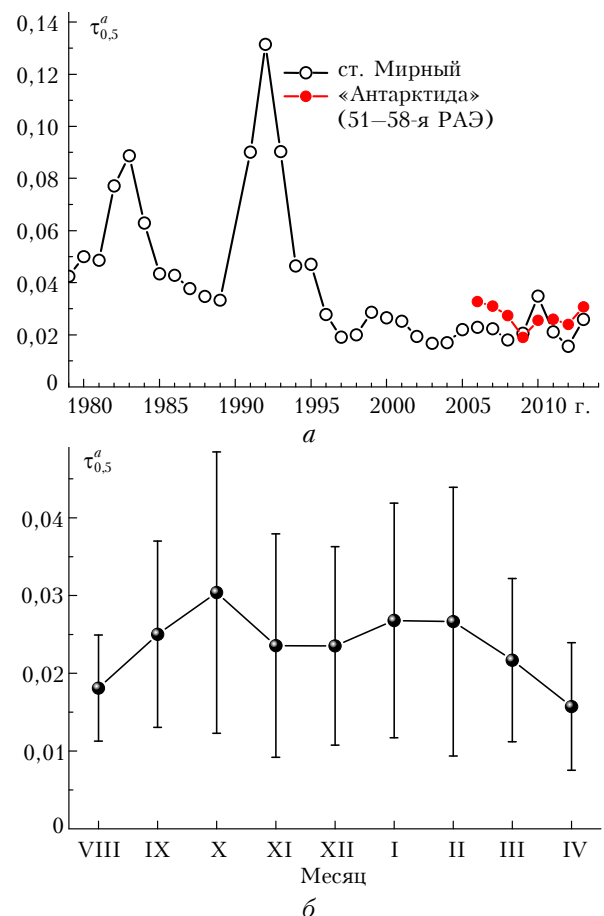


Рис. 8. Межгодовая (а) и сезонная (б) изменчивость АОТ атмосферы в Антарктиде

Результаты наблюдений средних месячных величин  $\tau_{0,5}^a$  на ст. Мирный, дополненные до 2013 г., приведены на рис. 8, б. Видно, что в начале и конце теплого периода средние значения АОТ составляют  $\sim 0,017$ , а в октябре (антарктическая весна) достигают 0,03. Напрашивается аналогия с годовым ходом АОТ во многих районах умеренных и полярных широт Северного полушария, который характеризуется основным весенним и вторичным летним максимумом аэрозольного замутнения (см., например, [35, 36]). По-видимому, причинами наблюдаемой изменчивости являются: а) рост генерации вторичного аэрозоля в антарктической атмосфере

с увеличением инсоляции, температуры и влажности; б) слабое проявление (за счет дальних переносов) сезонной динамики АОТ на континентах и островах Южного полушария (Южная Америка, Африка, Австралия и др.). Вместе с тем амплитуда сезонного изменения АОТ в Антарктиде очень мала  $\sim 0,01$  и статистическая значимость (по уровню 0,99) различия месячных значений АОТ проявляется только между октябрём и двумя крайними месяцами (август, апрель).

### Заключение

В рамках 58-й РАЭ проведены очередные циклы измерений АОТ атмосферы с борта НЭС «Академик Федоров», «Академик Трешников» и на ст. Мирный. Анализ результатов экспедиционных исследований позволяет сделать следующие основные выводы.

1. Интеркалибровочные измерения нескольких солнечных фотометров (Microtops, SPM, ABA5) показали хорошее согласие получаемых данных – средняя величина различий не превышает погрешности измерений АОТ и влагосодержания атмосферы.

2. Из анализа многолетних рядов наблюдений на ст. Мирный и в прибрежной зоне (51–58-я РАЭ) следует, что АОТ в Антарктиде с 1996 г. сохраняется на стабильно низком уровне  $0,022 \pm 0,005$ , что свидетельствует об отсутствии глобальных изменений содержания аэрозоля под влиянием антропогенных и природных источников.

3. Обобщенные результаты 10 рейсов НЭС в Южной Атлантике подтверждают, что основная закономерностью пространственного распределения АОТ над океаном в Южном полушарии является линейный широтный спад АОТ от  $\sim 0,15$  на экваторе до  $0,025$  у берегов Антарктиды.

Выражаем благодарность экипажам НЭС «Академик Федоров» и «Академик Трешников» за помощь и поддержку при проведении экспедиционных наблюдений.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 23 и с использованием уникальной установки НЭС «Академик Федоров» – Государственный контракт Министерства образования и науки Российской Федерации № 16.518.11.7093.

1. Liljequist G.H. Energy exchange of an Antarctic snowfield. Norwegian-British-Swedish Antarctic expedition, 1949–1952 // Scientific results. V. II, part 1A. Oslo: Norw. Polar Inst., 1956. 109 p.
2. Tomasi C., Vitale V., Lupi A., Di Carmine C., Campanelli M., Herber A., Treffeisen R., Stone R.S., Andrews E., Sharma S., Radionov V.F., von Hoyningen-Huene W., Stebel R., Yansen G.H., Myhre C.L., Wehrli C., Aaltonen V., Lihavainen Y., Virkkula A., Hillamo R., Strom J., Toledano C., Cachorro V.E., Ortiz P., de Frutos A.M., Blindheim S., Frioud M., Gausa M., Zeielinski T., Petelski T., Yamanouchi T. Aerosol in polar regions: A historical overview based on optical depth and in situ observations // J. Geophys. Res. 2007. V. 112, D16205, doi: 10.1029/2007JD008432.

3. Бартенева О.Д., Никитинская Н.И., Сакунов Г.Г., Веселова Л.К. Прозрачность толщ атмосферы в видимой и ближней ИК-области спектра. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 224 с.
4. Радионов В.Ф., Ламакин М.В., Хербер А. Измерения аэрозольной оптической толщины атмосферы в Антарктиде // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2002. Т. 38, № 2. С. 205–210.
5. Радионов В.Ф., Маршупова М.С., Русина Е.Н., Лубо-Лесниченко К.Е., Пиманова Ю.Е. Аэрозольная мутность атмосферы в полярных районах // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1994. Т. 30, № 6. С. 797–801.
6. Sakerin S.M., Smirnov A., Kabanov D.M., Yu.S. Turchinovich, Holben B.N., Radionov V.F., Slutsker I. Ship-based aerosol optical depth measurements near Antarctica. AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, December 11–15, 2006 (Eos Trans. AGU, 87(52), Fall Meet. Suppl., Abstract A53C-0202).
7. Smirnov A., Holben B.N., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Slutsker I., Chin M., Diehl T.L., Remer L.A., Kahn R., Ignatov A., Mishechenko M., Liu L., Kucsera T.L., Giles D., Eck T.F., Kopelevich O. Ship-based aerosol optical depth measurements in the Atlantic Ocean, comparison with satellite retrievals and GOSART model // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33, L14817, doi: 10.1029/2006GL026051.
8. 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 19<sup>th</sup> cruise of the research vessel «Akademik Sergey Vavilov» // J. Geophys. Res. 2007. V. 112, D10220, doi: 10.1029/2006JD007947.
9. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Козлов В.С., Панченко М.В., Польшин В.В., Тухомиров А.Б., Власов Н.И., Радионов В.Ф., Смирнов А.В., Холбен Б.Н., Слуцкер И.А., Голобокова Л.П. Результаты исследований характеристик аэрозоля в 52-й РАЭ // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. Вып. 77. С. 65–75.
10. Sakerin S.M., Kabanov D.M., Smirnov A.V., Holben B.N. Aerosol optical depth of the atmosphere over ocean in the wavelength range 0.37–4  $\mu\text{m}$  // Int. J. Remote Sens. 2008. V. 29, iss. 9. P. 2519–2547, doi: 10.1080/01431160701767492.
11. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Радионов В.Ф., Слуцкер И.А., Смирнов А.В., Терпугова С.А., Холбен Б.Н. О результатах исследований аэрозольной оптической толщи атмосферы во время кругосветной экспедиции вокруг Антарктиды (53-я РАЭ) // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21, № 12. С. 1032–1037.
12. 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., Krishna Moorthy 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.
13. Liu L., Mishchenko M.I., Goddard I., Smirnov A., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Ershov O.A. Global validation of two-channel AVHRR aerosol optical thickness retrievals over the oceans // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 2004. V. 88, N 1–3. P. 97–109.
14. 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., Quinn P.K., Nelson N.B., Radionov V.F., Duarte C.M., Losno R., Sciare J., Voss K., Kinne S., Nalli N.R., Joseph E., Krishna Moorthy K., Covert D., Gulev S.K., Milinetsky G., La-



- rouche 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., Gärtley 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. Techn.* 2011. N 4. P. 583–597.
15. *Smirnov A., Sayer A.M., Holben B.N., Hsu N.C., Sakerin S.M., Macke A., Nelson N.B., Courcoux Y., Smyth T.J., Croot P., Quinn P.K., Sciare J., Gulev S.K., Piketh S., Losno R., Kinne S., Radionov V.F.* Effect of wind speed on aerosol optical depth over remote oceans, based on data from the Maritime Aerosol Network // *Atmos. Measur. Techn.* 2012. N 8. P. 377–388.
16. *Remer L.A., Mattoo S., Levy R.C., Munchak L.A.* MODIS 3 km aerosol product: algorithm and global perspective // *Atmos. Measur. Techn.* 2013. N 9. P. 1829–1844.
17. *Sayer A.M., Smirnov A., Hsu N.C., Munchak L.A., Holben B.N.* Estimating marine aerosol particle volume and number from Maritime Aerosol Network data // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. N 12. P. 8889–8909.
18. *Sayer A.M., Smirnov A., Hsu N.C., Holben B.N.* A pure marine aerosol model for use in remote sensing applications // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. D05213, doi: 10.1029/2011JD016689.
19. *Kleidman R.G., Smirnov A., Levy R.C., Mattoo S., Tanre D.* Evaluation and windspeed dependence of MODIS aerosol retrievals over open ocean // *IEEE Trans. Geosci. Remote. Sens.* 2012. N 50. P. 429–435, doi: 10.1109/TGRS.2011.2162073.
20. *Bevan S.L., North P.R.J., Los S.O., Grey W.M.F.* A global dataset of atmospheric aerosol optical depth and surface reflectance from AATSR // *Remote. Sens. Environ.* 2012. V. 116. P. 199–210.
21. *Lapina K., Heald C.L., Spracklen D.V., Arnold S.R., Allan J.D., Coe H., McFiggans G., Zorn S.R., Drewnick F., Bates T.S., Hawkins L.N., Russell L.M., Smirnov A., O'Dowd C.D., Hind A.J.* Investigating organic aerosol loading in the remote marine environment // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. N 11. P. 8847–8860, doi: 10.5194/acp-11-8847-2011.
22. *Knobelspiess 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 hand-held sunphotometers // *Remote. Sens. Environ.* 2004. N 93. P. 87–106.
23. *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.
24. *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.
25. *Кабанов Д.М., Веретенников В.В., Воронина Ю.В., Сакерин С.М., Турчинович Ю.С.* Информационная система для сетевых солнечных фотометров // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 1. С. 61–67.
26. *Leiterer U., Weller M.* Sunphotometer BAS and ABAS for atmospheric research // WMO/TD. 1988. N 222. WMO. Geneva. P. 21–26.
27. *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.
28. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Панченко М.В., Польшкин В.В.* О широтной зависимости и взаимосвязях характеристик аэрозоля в атмосфере Южной Атлантики // *Оптика атмосф. и океана.* 2006. Т. 19, № 7. С. 611–621.
29. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Польшкин В.В., Smirnov A., Радионон В.Ф., Slutsker I., Власов Н.И., Польшкин В.В.* О результатах исследований аэрозольной оптической толщи атмосферы в 55-й Российской антарктической экспедиции // *Мат-лы VII Всерос. Симпоз. «Контроль окружающей среды и климата “КОСК-2010”»* / Под общ. ред. М.В. Кабанова, А.А. Тихомирова. Томск, 5–7 июля 2010 г. Томск: Аграф-Пресс, 2010. С. 242–244.
30. *Zhang J., Reid J.S.* MODIS aerosol product analysis for data assimilation: Assessment of over-ocean level 2 aerosol optical thickness retrievals // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111, D22207, doi:10.1029/2005JD006898.
31. *Shi Y., Zhang J., Reid J.S., Holben B., Hyer E.J., Curtis C.* An analysis of the Collection 5 MODIS over-ocean aerosol optical depth product for its implication in aerosol assimilation // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. P. 557–565, doi:10.5194/acp-11-557-2011.
32. *Toth D.T., Zhang J., Campbell J.R., Reid J.S., Shi Y., Johnson R.S., Smirnov A., Vaughan M.A., Winker D.M.* Investigating enhanced Aqua MODIS aerosol optical depth retrievals over the mid-to-high latitude Southern Oceans through intercomparison with co-located CALIOP, MAN, and AERONET data sets // *J. Geophys. Res.: Atmospheres.* 2013. V. 118. P. 4700–4714, doi:10.1002/jgrd.50311.
33. *Радионон В.Ф., Русина Е.Н., Сакерин С.М., Сибир Е.Е., Smirnov A.B.* Составляющие радиационного баланса и аэрозольно-оптические параметры атмосферы в Антарктике в период МПГ на фоне их многолетней изменчивости // *Вклад России в Международный полярный год 2007/08. Метеорологические и геофизические исследования.* М.; СПб.: ООО «Паулсен», 2011. С. 158–169.
34. *Польшкин В.В., Польшкин В.В., Панченко М.В.* Годовой ход микрофизических характеристик аэрозоля на станции «Восток» в 2009 и 2011 гг. // *Оптика атмосф. и океана.* 2012. Т. 25, № 11. С. 963–967.
35. *Исследование радиационных характеристик аэрозоля в азиатской части России* // Под общей ред. С.М. Сакерина. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2012. 484 с.
36. *Абакумова Г.М., Горбаренко Е.В.* Прозрачность атмосферы за последние 50 лет и ее изменение на территории России. М.: Изд. ЛКИ, 2008. 188 с.

*S.M. Sakerin, N.I. Vlasov, D.M. Kabanov, K.E. Lubo-Lesnichenko, A.N. Prakhov, V.F. Radionov, Ju.S. Turchinovich, B.N. Holben, A. Smirnov.* Results of spectral measurements of aerosol optical depth of the atmosphere with solar photometers during the 58th Russian Antarctic expedition.

We discuss the specific features of the spatiotemporal variations in the atmospheric aerosol optical depth (AOD), measured during the 58th Russian Antarctic Expedition onboard RVs Akademik Fyodorov, RV Akademik Treshnikov, and at the Mirny station. It is shown that the main regularity of the spatiotemporal AOD distribution over ocean in the southern hemisphere is the linear latitudinal decrease of AOD from 0.15 at the equator to 0.025 near Antarctica. We indicate the persistence of low AOD level in Antarctica (0.022 + 0.005) during last 17 years.