

## О результатах исследований аэрозольной оптической толщи атмосферы во время экспедиции вокруг Антарктиды (53-я РАЭ)

С.М. Сакерин<sup>1</sup>, Д.М. Кабанов<sup>1</sup>, В.Ф. Радионов<sup>2</sup>, И.А. Слуцкер<sup>3</sup>,  
А.В. Смирнов<sup>3</sup>, С.А. Терпугова<sup>1</sup>, Б.Н. Холбен<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> *Годдардский центр космических полетов, НАСА, Гринбелт, США*

Поступила в редакцию 14.07.2008 г.

Представлены результаты нового цикла исследований аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы с борта НЭС «Академик Федоров», выполненных на первом этапе 53-й Российской антарктической экспедиции (ноябрь 2007 — март 2008 г.). Обсуждаются статистические характеристики спектральных АОТ, параметра Ангстрема и влагосодержания атмосферы в нескольких районах Южного полушария. Приводятся обобщенные данные нескольких экспедиций о широтной зависимости аэрозольного замутнения над океаном — линейном убывании АОТ примерно в 5 раз при движении от экватора до Антарктиды. Отмечается, что АОТ атмосферы вблизи Антарктиды в поствулканический период (1995–2008 гг.) отличается устойчиво низкими значениями — в середине видимой области спектра около 0,025, а величина пространственно-временной изменчивости (среднеквадратическое отклонение) составляет 0,01–0,02.

*Ключевые слова:* аэрозоль, оптическая толщина, Антарктида, Мировой океан.

В исследованиях аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы над океаном в настоящее время сочетаются два подхода: глобальный охват и регулярность космических наблюдений (AVHRR/NOAA, MODIS, MISR и др. [1–4 и др.]) с эпизодическими, но более точными измерениями с борта судна (например, [5]). То есть корабельные измерения АОТ атмосферы продолжают играть важную роль в снижении дефицита информации о радиационных свойствах аэрозоля в различных районах Мирового океана. В целях интеграции и систематизации измерений, а также стандартизации обработки информации было принято решение [6] о создании сайта AERONET Maritime Aerosol Network ([http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new\\_web/maritime\\_awerosol\\_network.html](http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/maritime_awerosol_network.html)), на котором представляются результаты измерений АОТ с привязкой калибровки к методикам сети AERONET.

В связи с проведением Международного полярного года особое значение имеют наблюдения АОТ в наиболее чистых регионах планеты, какими являются Южный океан и Антарктида. Исследования в районе Антарктиды позволяют оценить тен-

денции изменения глобального аэрозольного фона в условиях увеличивающейся антропогенной нагрузки и климатических изменений. В настоящей статье обсуждаются результаты измерений АОТ атмосферы, выполненные зимой 2007/08 г. на первом этапе 53-й Российской антарктической экспедиции с борта НЭС «Академик Федоров».

### 1. Характеристика экспериментов

В измерениях спектральной прозрачности атмосферы использовался портативный солнечный фотометр Microtops II [6] в комплекте с измерителем координат — приемником GPS-12. Microtops II имеет следующие основные характеристики: угол поля зрения 2,5°; максимумы полос пропускания светофильтров — 440, 500, 675, 870 и 940 нм; погрешность измерений 1%. Перед экспедицией прибор был прокалиброван в GSFC/NASA путем сравнения с сетевым фотометром Cimel CE-318. Вычисление АОТ и влагосодержания атмосферы (по измеренным сигналам прозрачности) проводилось по стандартной методике, принятой для сети AERONET [8]. Фотометрические наблюдения осуществлялись короткими сериями (5–15 замеров), в ситуациях, когда Солнце было свободно от облачности. При анализе полученных данных в основном использовались средние за день значения АОТ атмосферы —  $\tau_{\lambda}^a$ , а также показателя Ангст-

\* Сергей Михайлович Сакерин (SMS@iao.ru); Дмитрий Михайлович Кабанов; Владимир Федорович Радионов; Илья А. Слуцкер; Александр В. Смирнов; Светлана Александровна Терпугова; Бренд Н. Холбен.

рема  $\alpha$ , который характеризует селективность спектральной зависимости АОТ:

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

Параметры  $\alpha$ ,  $\beta$  рассчитывались методом наименьших квадратов после логарифмирования зависимости (1) для диапазона спектра 440–870 нм.

Относительно параметра  $\beta$  напомним [9, 10], что он, в основном, определяется содержанием в атмосфере крупных частиц аэрозоля и может быть использован для оценки грубодисперсного компонента АОТ –  $\tau_c$  ( $\beta \approx \tau_c$ ).

Маршрут рейса (рис. 1) включал переход судна по Атлантическому океану (Санкт-Петербург – Кейптаун) и затем кругосветное плавание вокруг Антарктиды с подходами к российским антарктическим станциям, Австралии (п. Мельбурн) и Южной Африке (п. Кейптаун).

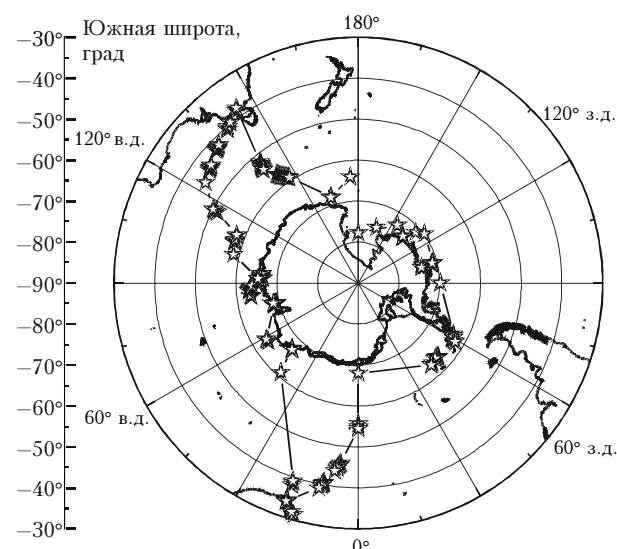


Рис. 1. Маршрут НЭС «Академик Федоров» на первом этапе 53-й РАЭ (звездочками обозначены районы измерений АОТ атмосферы)

Измерения были начаты 16 ноября 2007 г. в районе Гибралтарского пролива и завершились 6 марта 2008 г. в районе Кейптауна. Общее количество данных составило: 3549 единичных замеров, 300 среднечасовых спектров АОТ за 69 измерительных дней. Характер изменения АОТ и влагосодержания атмосферы за весь период измерений показан на рис. 2. Хорошо видно увеличение аэрозольного замутнения в зоне северного пассата (пылевые выносы с Сахары) и при подходе к континентам (п. Мельбурн и Кейптаун).

Основная часть данных была получена на широтах более 35° ю.ш. – 52 дня, в том числе вблизи Антарктиды – 34 дня измерений. Для предварительного анализа результатов в Южном полушарии были выделены пять районов (подмассивов данных): 1) Южный океан (на широтах более 55° ю.ш., вне прибрежной зоны); 2) прибрежная (~100-мильная) зона Антарктиды; 3) ст. Мирный; а также переходы судна в средних широтах; 4) «Антарктида –

п. Мельбурн», 5) «Антарктида – п. Кейптаун». В табл. 1 приведены данные, полученные в указанных районах.

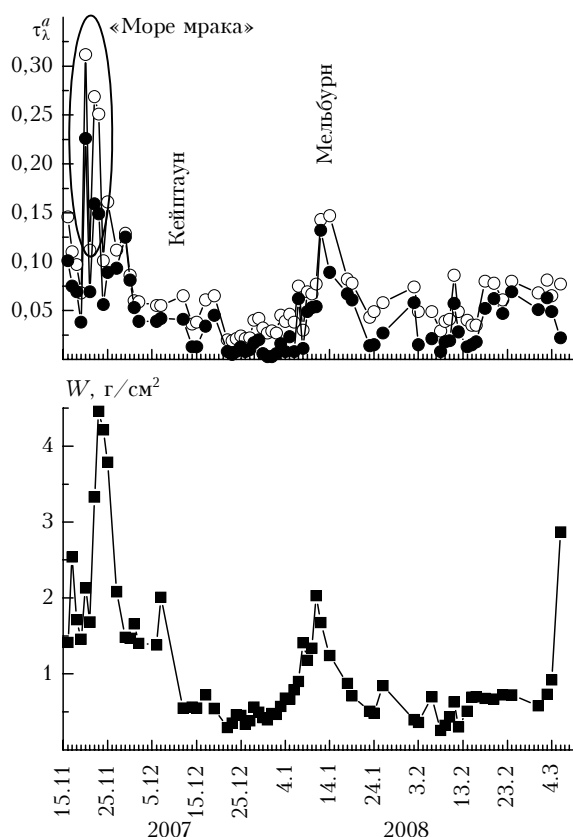


Рис. 2. Изменение АОТ (440 и 870 нм) и влагосодержания атмосферы в период исследований

Таблица 1  
Объем данных, полученных в разных районах

Район	Количество единичных серий	Количество дней измерений
1. Южный океан	241	7
2. Антарктида (~100-мильная зона)	1723	34
3. Ст. Мирный	506	4
4. Переход в Мельбурн	430	7
5. Переход в Кейптаун	171	11

## 2. Обсуждение результатов

### 2.1. Статистические характеристики

Рассчитанные характеристики для выделенных районов (табл. 2) свидетельствуют о малых аэрозольных замутнениях атмосферы в высоких широтах Южного полушария и согласуются с предшествующими результатами [11–13 и др.]. Для влагосодержания атмосферы хорошо проявляется известная зональная зависимость – уменьшение влаги с ростом широты (в средних широтах  $W$  около 1,4 г/см<sup>2</sup>, вблизи Антарктиды – 0,5 г/см<sup>2</sup>). Такая же зависимость характерна и для АОТ атмосферы (подробнее см. ниже).

Статистика АОТ и влагосодержания атмосферы в Южном полушарии

Район	Характеристика						W, г/см <sup>2</sup>
	$\tau_{440}^a$	$\tau_{500}^a$	$\tau_{675}^a$	$\tau_{870}^a$	$\alpha$	$\beta(\approx\tau_c)$	
1. Южный океан	0,056 ± 0,015	0,035 ± 0,017	0,035 ± 0,018	0,031 ± 0,021	0,95 ± 0,74	0,028 ± 0,020	0,69 ± 0,11
2. Антарктида	0,043 ± 0,019	0,027 ± 0,020	0,024 ± 0,019	0,022 ± 0,019	1,16 ± 0,63	0,018 ± 0,018	0,51 ± 0,14
3. Ст. Мирный	0,028 ± 0,003	0,011 ± 0,004	0,008 ± 0,003	0,005 ± 0,002	2,38 ± 0,47	0,003 ± 0,002	0,44 ± 0,04
4. Переход в Мельбурн	0,078 ± 0,034	0,059 ± 0,031	0,064 ± 0,034	0,061 ± 0,036	0,35 ± 0,39	0,059 ± 0,036	1,35 ± 0,41
5. Переход в Кейптаун	0,075 ± 0,027	0,056 ± 0,025	0,058 ± 0,029	0,055 ± 0,031	0,46 ± 0,52	0,052 ± 0,031	1,45 ± 0,65
Все данные (>55° ю.ш.)	0,046 ± 0,019	0,029 ± 0,019	0,026 ± 0,019	0,024 ± 0,019	1,14 ± 0,65	0,020 ± 0,018	0,54 ± 0,15

Данные, приведенные на сайте «Maritime aerosol network» и в обзорной статье [14], дали возможность провести сравнение полученных значений АОТ атмосферы в Южном океане и Антарктиде с данными других исследований в этих районах (рис. 3).

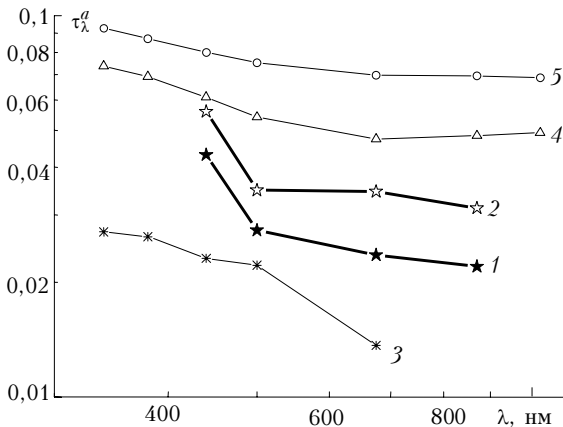


Рис. 3. Средние спектральные зависимости  $\tau^a(\lambda)$  в Южном океане (1), вблизи Антарктиды (2) в сравнении с данными AERONET наблюдений (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>): ст. «South Pole» — 90° ю.ш., 70° в.д. (3); о. Крозе — 46° ю.ш., 51° в.д. (4); о. Амстердам — 37° ю.ш., 77° в.д. (5)

Из приведенных результатов следует, что средние значения АОТ на длине волны 500 нм в высоких широтах Южного полушария варьируют в диапазоне ~0,02–0,08. Самые низкие значения АОТ — 0,015 наблюдаются во внутриконтинентальных районах Антарктиды [14] и максимальные — в умеренных широтах океана. Например, на о. Амстердам среднее  $\tau_{500}^a$  составляет около 0,08 (см. <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>). Результаты измерений АОТ в 53-м РАЭ находятся в середине этого диапазона и согласуются с данными исследований других научных групп в Антарктике.

Рассмотрим две особенности характеристик АОТ атмосферы, наблюдавшиеся в высоких широтах (> 65° ю.ш.). Самые малые средние значения АОТ (ниже, чем даже на Южном полюсе [14]) были получены около ст. Мирный. Однако из-за малого периода измерений это, скорее всего «благо-

приятное» стечение обстоятельств, а не свойство данного района.

Вторая особенность — относительно большие значения показателя селективности Ангстрема вблизи Антарктиды (подмассивы 2 и 3) по сравнению с чистыми районами Мирового океана, где величина показателя  $\alpha$  в среднем составляет 0,4–0,6 [10, 15 и др.]. О больших значениях показателя Ангстрема, сопоставимых с данными в континентальных условиях ( $\alpha \approx 1,3$ ), свидетельствуют также данные наблюдений на других антарктических станциях [14], согласно которым средние  $\alpha$  находятся в диапазоне от 0,73 до 1,75. Основными причинами повышенных значений  $\alpha$  могут быть следующие.

Во-первых, величина показателя селективности  $\alpha$  в основном зависит от соотношения оптических вкладов в АОТ мелкодисперсного (субмикронного) и грубодисперсного аэрозолей [9]. В условиях открытого океана (подмассивы 1, 4, 5) доля грубодисперсного аэрозоля ( $\tau_c \approx 0,03$ –0,06), генерируемого морской поверхностью, составляет относительно большую величину (например, в области 440 нм — не менее 50%). Вследствие этого показатель  $\alpha$  имеет малые значения. В районах, покрытых льдом (2 и 3), содержание крупного морского аэрозоля ( $\tau_c \approx 0,003$ –0,018) уменьшается более существенно по сравнению с мелкодисперсным, что приводит к соответствующему росту показателя селективности.

Во-вторых, из вида спектральной зависимости  $\tau^a(\lambda)$  следует (см. данные 53-й РАЭ на рис. 3), что селективность, в основном, проявилась на первом участке 440–500 нм — из-за повышенных значений на длине волны 440 нм (или заниженных на 500 нм). То есть при малых значениях АОТ, близких к величине погрешности (~0,01–0,02), систематическая ошибка — завышение АОТ в области 440 нм, может вызвать ложное увеличение показателя  $\alpha$ .

В принципе могут быть и физические причины проявления селективности АОТ только на участке 440–500 нм: такое поведение  $\tau^a(\lambda)$  может быть при низких концентрациях мелкодисперсного аэрозоля и/или более малых размерах этой фракции частиц в антарктической атмосфере. В этом случае селективный спад АОТ с ростом  $\lambda$ , обусловленный мел-

кодисперсным аэрозолям, практически закончатся к середине видимой области спектра.

Для выяснения и обоснования истинных причин рассмотренных особенностей спектрального хода  $\tau^a(\lambda)$  необходимы дополнительные исследования — желательно на большем числе длин волн в «фиолетовой» части спектра.

## 2.2. Пространственное распределение АОТ атмосферы

Измерения АОТ и влагосодержания атмосферы во время кругосветного плавания в Южном океане дали возможность рассмотреть их долготное распределение. Из результатов, приведенных на рис. 4, следует, что несколько большие аэрозольные за-

мутнения были зарегистрированы в Западном полушарии (Тихоокеанский сектор). Например, в области 440 нм значения АОТ составили (среднее  $\pm$  СКО): в Восточном полушарии  $0,034 \pm 0,013$ , а в Западном —  $0,055 \pm 0,02$ . (Указанное отличие статистически различимо с доверительной вероятностью более 0,999). Для влагосодержания атмосферы такой особенности не проявляется.

Однако более обоснованно можно говорить о наличии широтной зависимости  $\tau^a(\varphi)$  над океаном в Южном полушарии (впервые это отмечалось в работе [13]). Получение новых результатов позволило уточнить и обобщить указанную закономерность с учетом данных четырех экспедиций: 19-й рейс НИС «Академик Сергей Вавилов», 51, 52 и 53-я РАЭ (рис. 5).

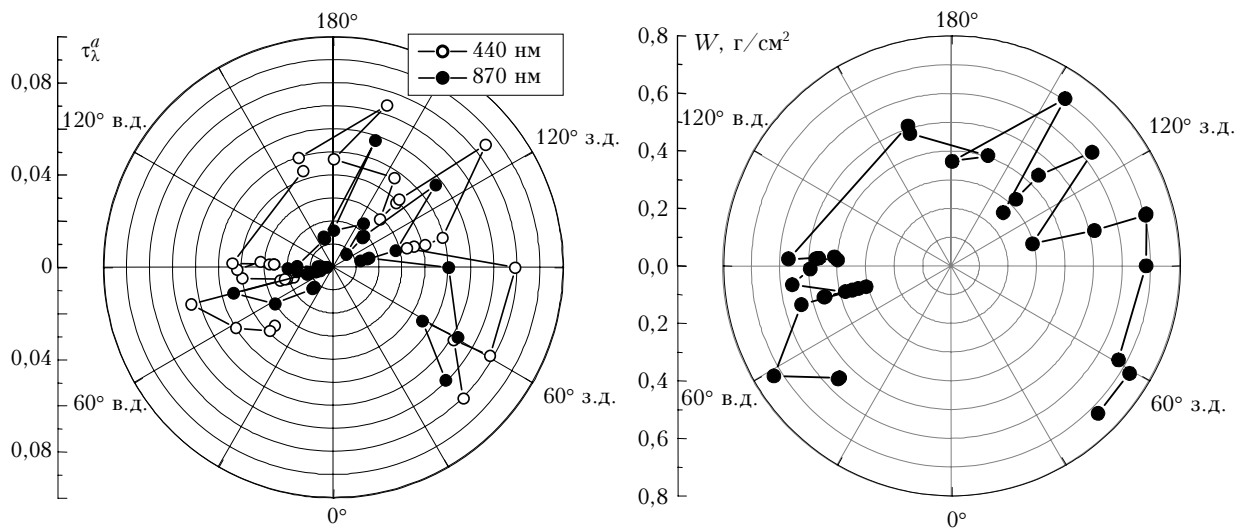


Рис. 4. Долготное распределение АОТ и влагосодержания атмосферы в высоких широтах Южного полушария

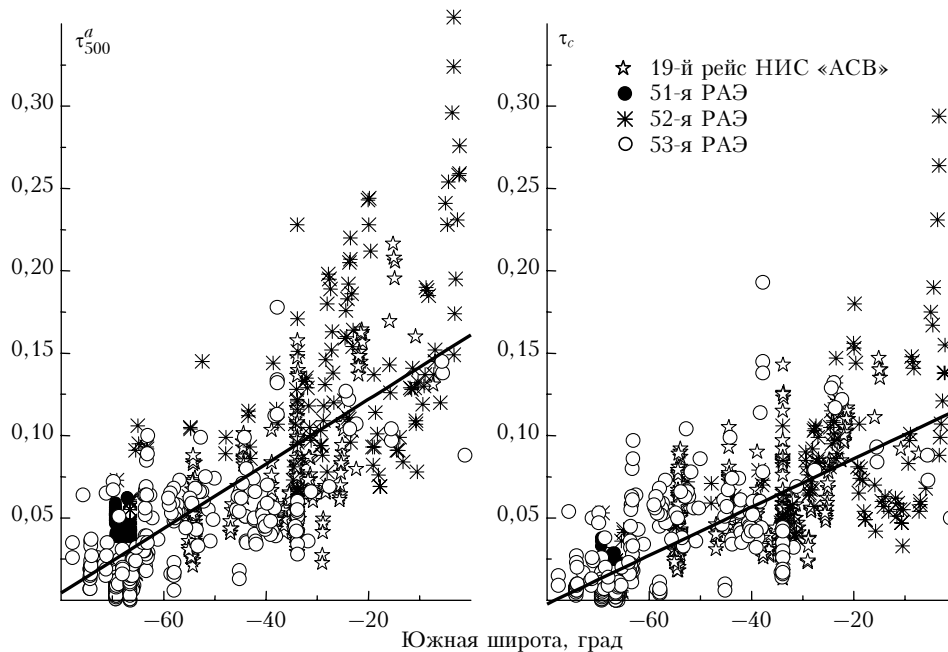


Рис. 5. Широтное изменение АОТ ( $\tau_{500}^a$  и  $\tau_c$ ) и линейная аппроксимация их широтной зависимости

Уменьшение аэрозольного замутнения с удалением от экватора проявляется на всех длинах волн и двух компонентах АОТ, обусловленных мелко- и грубодисперсным аэрозолем. Например, в середине видимого диапазона спектра АОТ уменьшается в 5 раз — от 0,16 в тропиках до ~0,03 у берегов Антарктиды. Сравнение линейных аппроксимаций  $\tau^a(\varphi)$  для разных экспедиций показало, что их отличие невелико и обусловлено разным диапазоном широт, в которых проводились измерения, и некоторыми отличиями аэрозольного замутнения в разные периоды. Важно также подчеркнуть, что широтное убывание АОТ проявилось и в Тихоокеанском секторе Южного океана.

Обобщение результатов нескольких экспедиций подтвердило, что для модельного описания пространственного распределения  $\tau^a_\lambda$  над океаном в Южном полушарии (вне прибрежных зон) может быть использована линейная зависимость от широты, которая для середины видимой области спектра имеет вид

$$\tau^a_{500}(\varphi) = \tau^a_{500}(0^\circ) - k\varphi = 0,161 - 0,002\varphi. \quad (2)$$

Погрешность эмпирической зависимости составляет 0,021.

### 2.3. Сравнение с многолетними данными АОТ в Антарктиде

Представляло интерес сопоставить результаты измерений АОТ с борта НЭС «Академик Федоров» вблизи Антарктиды (примерно в 100-мильной зоне) с данными стационарных наблюдений на ст. Мирный [14, 16 и др.]. На рис. 6 приведены средние значения АОТ в области 500 нм, полученные нами в 51, 52 и 53-й РАЭ, и многолетний ход АОТ в районе ст. Мирный.

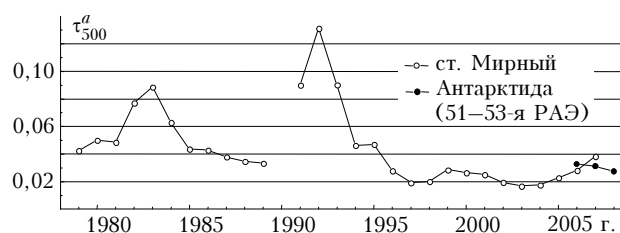


Рис. 6. Многолетняя изменчивость АОТ атмосферы на ст. Мирный и средние данные судовых измерений вблизи Антарктиды в 51–53-й РАЭ

Хорошо видны известные «всплески» аэрозольного замутнения после взрывных извержений влк. Эль-Чичон (1982 г.) и Пинатубо (1991 г.). Если исключить периоды вулканических возмущений, то в долговременной изменчивости просматривается небольшой отрицательный тренд — уменьшение АОТ примерно на ~2,4% (подробнее см. [14]), т.е. уровень глобального фонового аэрозоля в последние 30 лет по крайней мере не увеличивался.

Если рассматривать поствулканический период (1996–2008 гг.), то АОТ характеризуется достаточно низкими значениями  $0,024 \pm 0,006$  без значимого тренда. Из рис. 6 видно, что средние значения АОТ на ст. Мирный несколько отличаются от данных судовых измерений. Небольшое отличие ( $\Delta\tau$  менее 0,01) можно объяснить разными периодами и районами измерений АОТ: в одном случае усреднение за год (ст. Мирный), в другом случае пространственно-временное среднее в прибрежной зоне за более короткие периоды. Из этих результатов можно сделать вывод, что величина межгодовых вариаций (СКО) и пространственных неоднородностей АОТ вблизи береговой зоны Антарктиды (см. также табл. 2) сопоставима и в середине видимой области спектра составляет не более 0,02.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 17 «Фундаментальные проблемы океанологии: физика, геология, биология, экология».

1. Kaufman Y.J., Tanre D., Gordon H.R., Nakajima T., Lenoble J., Frouin R., Grassl H., Herman B.M., King M.D., Teillet P.M. Passive remote sensing of tropospheric for the aerosol effect // J. Geophys. Res. D. 1997. V. 102. N 14. P. 16,815–16,830.
2. Mishchenko M.I., Georgdzhayev I.V., Cairns B., Rossow W.B., Lacis A. Aerosol retrieval over the oceans by use of channels 1 and 2 AVHRR data: Sensitivity analysis and preliminary results // Appl. Opt. 1999. V. 38. N 36. P. 7325–7341.
3. Ignatov A., Stowe L. Aerosol retrievals from individual AVHRR channels. Part I, II // J. Atmos. Sci. 2002. V. 59. N 3. P. 313–362.
4. Remer L.A., Kaufman Y.J., Mattoo S., Martins J.V., Ichoku C., Levy R.C., Kleidman R.G., Tanre D., Chu D.A., Li R.-R., Eck T.F., Vermote E., Holben B.N. The MODIS Aerosol Algorithm, Products, and Validation // J. Atmos. Sci. 2005. V. 62. Issue 4. P. 947–973.
5. 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 (4 p.). doi: 10.1029/2006GL026051.
6. Smirnov A., Holben B.N., McClain C.R., Sakerin S.M., Smyth T., Radionov V.F., Zielinski T., Matarrese R., Zibordi G., Proshutinsky A., Robertson L., Harvey M., Slutsker I., Giles D., Tran A. Oceanic Aerosol Network: a maritime component of AERONET. 2007 Joint Assembly, Acapulco, Mexico, May 22–25.2007, (Eos Trans. AGU, 88(23) Jt. Assem. Suppl., Abstract OS34A-06).
7. Morys M., Mims III F.M., Hagerup S., Anderson S.E., Baker A., Kia J., Walkup T. Design, calibration, and performance of MICROTOPS II handheld ozone monitor and Sun photometer // J. Geophys. Res. D. 2001. V. 106. N 13. P. 14,573–14,582.
8. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima T., Lavenue 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.

9. Сакерин С.М., Кабанов Д.М. О взаимосвязях параметров формулы Ангреста и аэрозольной оптической толщи атмосферы в области спектра 1–4 мкм // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20. № 3. С. 222–228.
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. Issue 9. 2519. doi: 10.1080/01431160701767492. P. 2519–2547.
11. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Козлов В.С., Панченко М.В., Полькин В.В., Тихомиров 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. С.-Петербург, 2007. № 77. С. 67–75.
12. Sakerin S.M., Smirnov A.M., Kabanov D.M., Polkin V.V., Holben B.N., Panchenko M.V., Kopelevich O.V. Measurements of atmospheric optical depth, black carbon mass concentration, and aerosol size distribution in South Atlantic 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.
13. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Панченко М.В., Полькин В.В. О широтной зависимости и взаимосвязях характеристик аэрозоля в атмосфере Южной Атлантики // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19. № 7. С. 611–621.
14. Tomasi C., Vitale V., Lupi A., Di Carmine C., Campanelli M., Herber A., Treffeisen R., Stone R.S., Andrews E., Sharma S., Radionov V., von Hoyningen-Huene W., Stebel K., Hansen G.H., Muhre C.L., Wehrli C., Aaltonen V., Lihavainen H., Virkkula A., Hillamo R., Strom J., Toledano C., Cachorro V.E., Ortiz P., de Frutos A.M., Blindheim S., Frioud M., Gausa M., Zeilinski T., Petelski T., Yamanouchi T. Aerosol in polar regions: A historical overview based on optical depth and in site observations // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. D16205. doi: 10.1029/2007JD008432.
15. 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.
16. Радионов В.Ф., Ламакин М.В., Хербер А. Изменения аэрозольной оптической толщины атмосферы в Антарктиде // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2002. Т. 38. № 2. С. 205–210.

*S.M. Sakerin, D.M. Kabanov, V.F. Radionov, I.A. Slutsker, A.V. Smirnov, S.A. Terpigova, B.N. Holben. About results of investigations of the aerosol optical depth of the atmosphere in circumnavigation around Antarctica (53 RAE).*

The results are presented of new cycle of investigations of the aerosol optical depth (AOD) of the atmosphere from onboard of the research vessel «Akademik Fedorov», carried out at the first stage of the 53-d Russian Antarctic Expedition (November 2007 – March 2008). Statistical characteristics are discussed of spectral AOD, Angstrom exponent and columnar water vapor of the atmosphere in some regions of southern hemisphere are discussed. Generalized data on latitudinal dependence of aerosol turbidity over ocean, obtained in several expeditions, are presented. The data show linear decrease of AOD by approximately 5 times at motion from equator to Antarctica. It is noted that AOD of the atmosphere near Antarctica is post-volcanic period (1995–2008) is characterized by stable low values, about 0.025 in the center of the visible range, and the value of spatial-temporal variability (rmsd) is 0.01–0.02.