

С.М. Сакерин, С.В. Афонин, Т.А. Еремина, А.М. Игнатов, Д.М. Кабанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ В РЯДЕ РАЙОНОВ АТЛАНТИКИ

Рассмотрены результаты исследований спектральной прозрачности атмосферы в горизонтальном и вертикальном направлениях, полученные в ряде районов Атлантики во время 40-го рейса НИС «Академик Вернадский». Проанализированы статистические параметры изменчивости дальности видимости и аэрозольной оптической толщи морской атмосферы в диапазоне спектра 0,4–1,06 мкм. Показано, что исследованные районы океана можно разделить на три характерные региона, различающиеся статистическими параметрами.

Спектральная прозрачность атмосферы в вертикальном и горизонтальном направлениях является важнейшей характеристикой как для определения аэрозольно-газового состава, так и для корректного учета атмосферы в задачах дистанционного зондирования из космоса.

Одной из актуальных задач является исследование прозрачности морской атмосферы, аэрозольный состав которой имеет специфические особенности [1]. В отличие от континентальных исследований морские носят эпизодический характер, проведены для ограниченного числа районов и недостаточно подробно по спектральному диапазону [2]. Наиболее полные данные по аэрозольной оптической толщине (АОТ) атмосферы были получены в последние годы авторами [3–5], но и они не могут быть достаточными для всех сезонов и регионов, так как получены в отдельных районах Тихого и Индийского океанов и внутренних морях. Вместе с тем представляет интерес проведение аналогичных измерений АОТ даже для исследованных районов разными авторами с точки зрения подтверждения или опровержения выявленных закономерностей. Отмеченное не в меньшей степени относится и к горизонтальной прозрачности атмосферы, тем более, что ее исследования проводились с использованием только локальных методов нефелометрии (см., например, [6]).

В настоящей статье рассмотрены результаты исследований прозрачности атмосферы в ряде районов Атлантического океана и Средиземного моря во время 40-го рейса НИС «Академик Вернадский» в 1989 году.

Измерения АОТ проводились «долгим» методом Бугера на пяти длинах волн (484, 552, 668, 705, 1061 нм). Аппаратура, методики калибровки, измерений и учет рэлеевской составляющей подробно рассмотрены в [7]. Длина волны 0,705 мкм в области слабой полосы H₂O была включена для оценки возможности определения общего влагосодержания атмосферы, но в настоящей статье этот вопрос не анализируется. Учет газовой составляющей ослабления (H₂O и O₃) на других длинах волн осуществлялся с использованием модели LOWTRAN-6.

Таблица 1

Характеристика условий наблюдения, 1989 г.

Номер района	Район	Дата	Кол-во дней измерений	Метеоусловия				
				Кол-во серий	Температура воздуха, °С	Относительная влажность, %	Упругость водяного пара, мб	Давление, мб
1	Западное и северное побережье Европы	01.09–11.09	$\frac{6}{29}$	10,9–24,2	57–91	8,51–24,40	1012,7–1029,1	1,0–14,7
2	Северная и центральная Атлантика	13.09–03.10	$\frac{8}{17}$	10,1–25,6	59–89	7,38–27,52	1004,4–1026,5	5,3–26,2
3	Западная часть центральной и экваториальной Атлантики	04.10–11.10; 29–30.11	$\frac{10}{39}$	25,9–28,0	62–83	22,0–27,69	1009,9–1018,6	1,4–12,7
4	Тропическая Атлантика («море мрака») (I полигон)	12.10–26.10	$\frac{10}{32}$	26,7–28,4	74–84	27,54–30,73	1009,1–1014,6	1,4–10,2
5	Тропическая Атлантика («море мрака») (II полигон)	11.11–04.12	$\frac{13}{85}$	22,5–28,5	76–88	23,06–31,09	1007,8–1014,9	0,6–10,9
6	Северный тропик (Северо-западное побережье Африки)	05.12–14.12	$\frac{9}{52}$	19,0–22,2	71–94	18,16–21,89	1012,7–1018,1	0,8–9,0
7	Средиземное море	15.12–20.12	$\frac{6}{49}$	13,3–22,4	53–90	11,9–19,2	1015,7–1018,0	3,0–12,2
Весь рейс		01.09–20.12	$\frac{62}{303}$	10,1–28,5	53–94	7,38–31,09	1004,4–1029,1	0,6–26,2

Исследование коэффициентов ослабления света ϵ_λ в морской атмосфере проводилось пассивным методом [8, 9] с помощью прибора ИКОС [7], прошедшего ранее испытания в береговых условиях. Погрешность определения коэффициентов ослабления при береговых испытаниях была оценена $0,04 \text{ км}^{-1}$. Измерения указанным методом в условиях судна проводились впервые, поэтому из-за влияния качки и других факторов возможно увеличение погрешности до $0,05 \pm 0,06 \text{ км}^{-1}$. Основные измерения были проведены в области спектральной чувствительности глаза человека ($\lambda_{\text{max}} = 0,55 \text{ мкм}$). Кроме того, в 1-м и частично во 2-м районах измерения коэффициентов ослабления света были проведены с использованием интерференционных фильтров $0,43$ и $0,67 \text{ мкм}$, которые затем были заменены на комбинации цветных стекол — $0,48$ и $0,66 \text{ мкм}$ соответственно.

Районы проведенных работ иллюстрируются на рис. 1, где показан маршрут судна и гистограммы повторяемостей АОТ в области спектра $0,55 \text{ мкм}$. Условия проведения измерений (районы, время, метеословия) приведены в табл. 1.

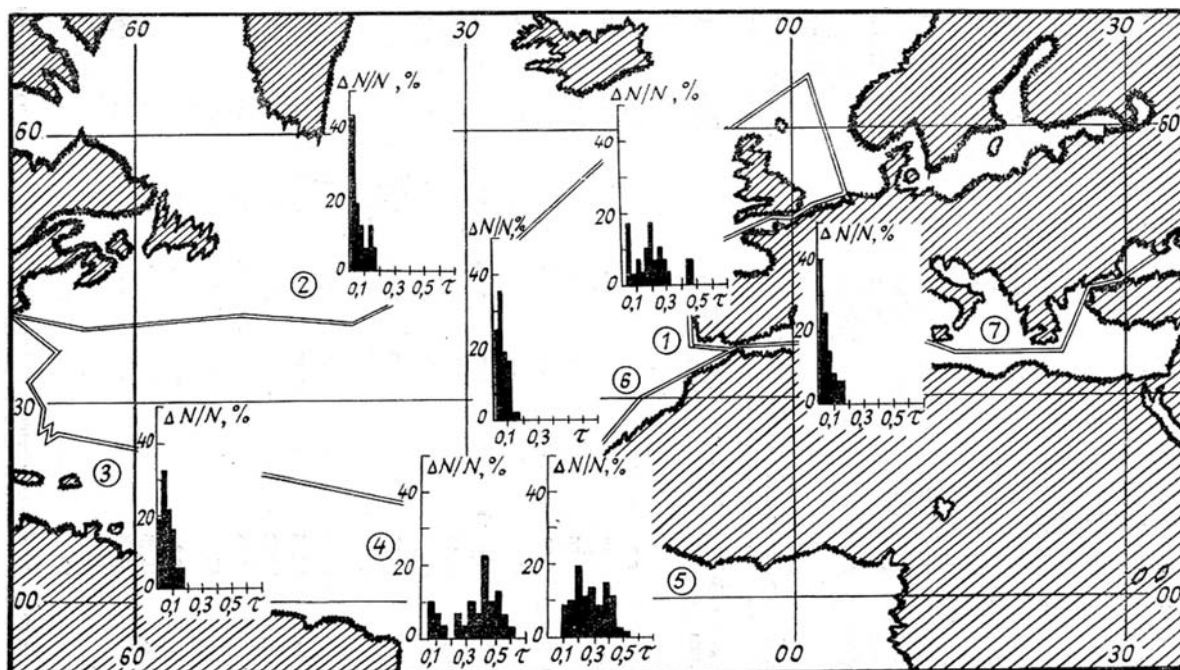


Рис. 1. Карта-схема районов работ с маршрутом НИС и гистограммами повторяемостей АОТ

При первоначальном делении массива данных по характерным регионам учитывались возможные широтные особенности, обусловленные различными типами воздушных масс [1], влиянием различных континентов, возможное влияние временных трендов за 20-, 40-дневный промежуток (4 и 5 районы).

Исследования горизонтальной прозрачности атмосферы были проведены только в видимом диапазоне спектра на трех длинах волн. Общее количество измерительных дней составило 41, а единичных измерений (на длине волны $0,55 \text{ мкм}$) 204.

Полученные при обработке статистические параметры приведены в табл. 2, а гистограммы повторяемостей различных градаций метеорологической дальности видимости (МДВ) S_m — на рис. 2.

Проведенный анализ показал, что из-за малой высоты (для данного метода) установки прибора ИКОС и не полностью исключенного влияния качки (смазывание горизонта) диапазон измерений дальности видимости был сужен до $\sim 25 \text{ км}$. Результаты, полученные в диапазоне дальностей видимости $8-25 \text{ км}$, можно считать правдоподобными и не противоречащими ранее проведенным исследованиям.

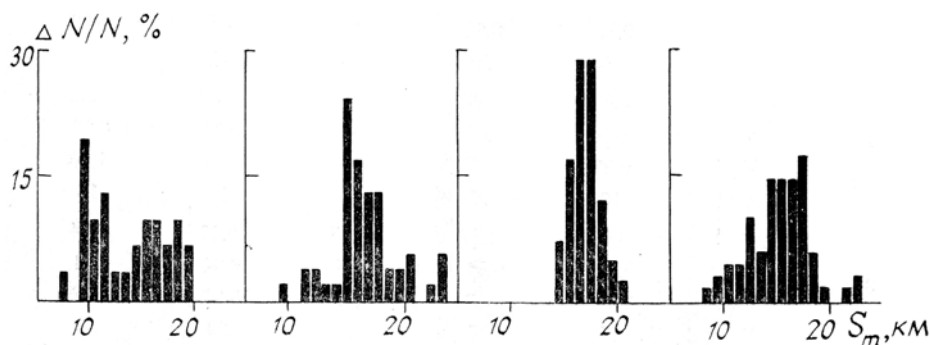


Рис. 2. Гистограммы повторяемостей МДВ в различных районах (с 1-го по 4-й соответственно)

Статистические характеристики изменчивости коэффициентов ослабления света

Номер района	Характеристика	МДВ, км	$\epsilon_{0,43}$, км ⁻¹	$\epsilon_{0,48}$, км ⁻¹	$\epsilon_{0,55}$, км ⁻¹	$\epsilon_{0,66}$, км ⁻¹	$\epsilon_{0,67}$, км ⁻¹	$\bar{\gamma}$
1	min	8,0	0,4	—	0,20	—	0,24	—
	среднее	13,67	0,53	—	0,31	—	0,34	—
	max	19,86	0,76	—	0,49	—	0,61	—
	СКО	3,52	0,08	—	0,08	—	0,1	—
	N	31	17	—	31	—	16	—
2	min	8,9	—	0,19	0,16	0,12	—	1,15
	среднее	16,21	—	0,27	0,25	0,24	—	
	max	23,76	—	0,54	0,44	0,53	—	
	СКО	3,15	—	0,09	0,05	0,09	—	
	N	54	—	25	54	24	—	
3	min	14,33	—	0,21	0,19	0,11	—	1,01
	среднее	16,96	—	0,24	0,23	0,24	—	
	max	20,03	—	0,3	0,27	0,35	—	
	СКО	1,25	—	0,02	0,02	0,03	—	
	N	42	—	36	42	38	—	
4	min	8,3	—	0,19	0,18	0,22	—	1,08
	среднее	15,25	—	0,28	0,27	0,25	—	
	max	22,23	—	0,4	0,47	0,36	—	
	СКО	2,86	—	0,05	0,06	0,03	—	
	N	70	—	62	70	64	—	

Примечание. При исследовании в 1-м и частично во 2-м районах были использованы фильтры 0,43 и 0,67 мкм соответственно.

Как и следовало ожидать, наиболее чистой является атмосфера в западной части центральной Атлантики (третий район). Устойчивость «оптической погоды» — малые значения СКО и узкая гистограмма распределения МДВ, в большей степени свойственна также третьему району.

Районы вблизи побережий Европы и Африки (1-й и 4-й районы соответственно) отличаются повышенной замутненностью и неустойчивостью атмосферы (размытые гистограммы) из-за влияния континентов — индустриальная деятельность в Европе и пылевые выносы из западной Африки [1]. Второй район по статистическим параметрам занимает промежуточное положение.

Оценка спектрального хода коэффициента ϵ_λ показала, что отношение $\gamma = \epsilon_{0,48} / \epsilon_{0,66}$ находится в пределах 1,0÷1,15. Причем в условиях открытого океана наблюдается нейтральный ход (третий район) а в районах, приближенных к континенту, начинает проявляться спектральная зависимость $\gamma > 1$. Это можно объяснить тем, что в открытом океане аэрозольное ослабление обусловлено в первую очередь грубодисперсной фракцией (морской аэрозоль), определяющей нейтральный ход в исследованном диапазоне. С приближением к континенту становится более заметным проявление субмикронной фракции аэрозоля и появление спектрального хода соответственно. Для сравнения отметим, что в береговых условиях закрытого моря [10] наблюдается более выраженный спектральный ход ($\bar{\gamma} = 1,28 \pm 1,67$), чем для океанических условий.

В исследованиях АОТ атмосферы были получены более полные по спектру и статистически обоснованные данные. По каждому району количество измерительных дней составило от 6 до 15 при частоте проведения измерений в пределах 0,5–2 час⁻¹.

Общий характер изменения АОТ за время рейса иллюстрируется на рис. 3, а в табл. 3 приведены основные статистические характеристики изменчивости АОТ (средние значения $\bar{\tau}^a$, среднеквадратические отклонения (СКО) σ_τ , коэффициенты вариаций V_τ) для семи районов и пяти длин волн.

Из табл. 3 видно, что атмосфера более замутнена у северо-западного побережья Европы и в «море мрака» (районы 1 и 4, 5). Максимальные значения АОТ (для $\lambda = 0,55$ мкм) в этих районах составляли 0,46; 0,60 и 0,51 соответственно. Эти же районы отличаются и наибольшей изменчивостью АОТ, что проявляется в размытых диаграммах повторяемостей ее значений (см. рис. 1) и в 2 раза больших величинах среднеквадратического отклонения (σ_τ (1, 4, 5) > 0,1, а (σ_τ (2, 3, 6, 7) ≤ 0,05). По

средним и дисперсиям АОТ результаты для первого района оказались близкими к данным, полученным в [3, 5] для прибрежных районов и совпадают со значением $\tau_{0,55}^a = 0,2$, принятым в стандартной радиационной модели [1].

Таблица 3

Статистические характеристики АОТ атмосферы

Номер района	Характеристики	484 нм	552 нм	668 нм	705 нм*	1061 нм
1	$\bar{\tau}^a$	0,26	0,20	—	0,13	0,06
	σ_{τ}	0,21	0,13	—	0,12	0,06
	V_{τ}	0,82	0,62	—	0,88	0,95
	N	15	29	—	12	14
2	$\bar{\tau}^a$	0,06	0,05	—	0,06	0,03
	σ_{τ}	0,05	0,05	—	0,05	0,03
	V_{τ}	0,89	0,97	—	0,87	1,10
	N	16	16	—	15	16
3	$\bar{\tau}^a$	0,08	0,07	0,05	0,13	0,04
	σ_{τ}	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	V_{τ}	0,50	0,59	0,82	0,31	0,98
	N	35	37	28	29	37
4	τ^a	0,38	0,36	0,32	0,41	0,28
	σ_{τ}	0,16	0,16	0,15	0,14	0,13
	V_{τ}	0,42	0,44	0,47	0,34	0,46
	N	31	31	31	31	32
5	$\bar{\tau}^a$	0,32	0,28	0,22	0,30	0,18
	σ_{τ}	0,11	0,10	0,10	0,08	0,08
	V_{τ}	0,36	0,38	0,43	0,27	0,43
	N	82	82	84	83	82
6	$\bar{\tau}^a$	0,07	0,06	0,04	0,08	0,05
	σ_{τ}	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03
	V_{τ}	0,52	0,61	0,67	0,47	0,62
	N	47	48	50	49	49
7	$\bar{\tau}^a$	0,07	0,06	0,05	0,06	0,04
	σ_{τ}	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04
	V_{τ}	0,67	0,77	0,93	0,71	1,08
	N	49	49	49	49	49
«Океан» 2, 3, 6	$\bar{\tau}^a$	0,08	0,07	0,05	0,09	0,04
	σ_{τ}	0,04	0,04	0,03	0,05	0,03
	V_{τ}	0,58	0,65	0,71	0,24	0,79
	N	44	45	30	40	45
«Море мрака» 4+5	$\bar{\tau}^a$	0,34	0,31	0,26	0,35	0,22
	σ_{τ}	0,14	0,13	0,13	0,12	0,11
	V_{τ}	0,39	0,42	0,49	0,34	0,49
	N	41	41	42	42	41
«Прибреж- ный» 1+7	$\bar{\tau}^a$	0,12	0,12	0,05	0,08	0,04
	σ_{τ}	0,14	0,11	0,04	0,07	0,04
	V_{τ}	1,11	0,90	0,78	0,85	0,94
	N	18	23	12	17	18

* Для длины волны 0,705 мкм поглощение водой не исключено.

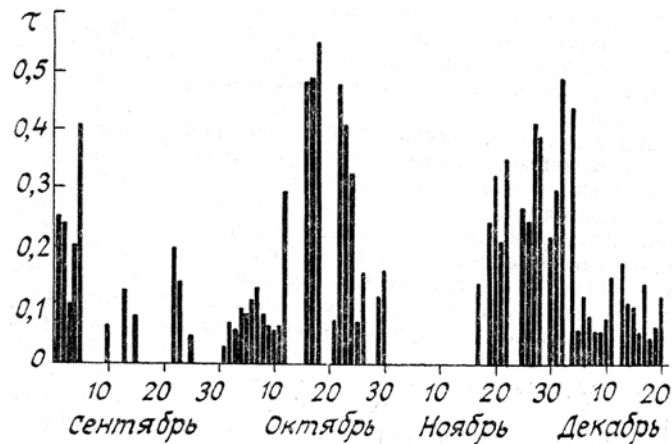


Рис. 3. Изменение средних за сутки АОТ ($\lambda = 0,55$ мкм) по маршруту рейса

Районы 2, 3 и 6 можно отнести к чисто океаническим с минимальными значениями АОТ в пределах 0,01–0,03 и средними значениями на уровне 0,05–0,07. Интересно отметить, что вместе с уменьшением в 4–6 раз среднего значения АОТ (по сравнению с прибрежными районами) уменьшается и дисперсия, а коэффициенты вариаций практически не изменяются.

Отличие районов 1, 4, 5 от других легко объясняется близостью к континенту и преимущественными направлениями ветра, выносящего в океаническую атмосферу пылевую (минеральную) фракцию аэрозоля или антропогенный аэрозоль.

Характеристики АОТ для средиземноморского района (7) оказались близкими к океаническим районам (2, 3, 6) и заниженными по сравнению с данными [4]. Указанное различие может быть объяснено отличием «оптической погоды» в различных рейсах и малой продолжительностью наших наблюдений (шесть измерительных дней).

Из анализа гистограмм повторяемостей АОТ (рис. 1) следует, что для океанических районов они более узкие и имеют одномодальный характер. Гистограммы для районов, подверженных влиянию континентов (1, 4, 5), отличаются размытостью и многомодальностью. Аналогичные выводы можно сделать и для АОТ на других длинах волн, причем рассмотренные закономерности более отчетливо проявляются и дисперсии более значительно.

Таким образом, совокупность полученных данных с учетом их статистической обеспеченности и схожести позволяет провести объединение ряда районов в характерные регионы, и проанализировать их отдельно. К первому – открытый океан центральной и северной Атлантики, были отнесены районы 2, 3 и 6. Ко второму региону – тропическая зона Атлантики у западного побережья Африки («море мрака») – отнесены выборки 4 и 5, полученные практически в одном районе, но в разные месяцы. Наконец, в третий регион были объединены данные, полученные в прибрежном районе – 1 и внутреннем море – 7.

Как следует из табл. 1, частота дневных измерений АОТ в различных районах изменялась в пределах от двух до восьми, поэтому при объединении данных в регионы потребовались соответствующее статистическое выравнивание. Для каждого измерительного дня сначала были получены средние значения АОТ для допосуденных и послепосуденных измерений, а затем уже из них формировались выборки для трех регионов.

Из анализа статистических данных по трем указанным регионам (нижняя часть табл. 3) следует четкое различие по средним значениям, СКО и коэффициентам вариаций. Причем средние значения и дисперсии АОТ в прибрежной зоне занимают промежуточное значение между «океаном» и «морем мрака», а коэффициенты вариаций оказываются максимальными. Средние значения и СКО АОТ имеют одинаковый спектральный ход, а коэффициенты, вариаций изменяются нерегулярно.

Сопоставляя полученные данные с результатами исследований [4], необходимо отметить, что при их общем согласии есть определенные расхождения. В наших исследованиях во всех выделенных регионах атмосфера оказалась несколько прозрачнее и более изменчивой. Расхождения по средним значениям – в пределах 10–30%, а по коэффициентам вариаций – в два раза.

На рис. 4 приведена гистограмма повторяемостей значений АОТ в анализируемых регионах. Для океанических данных (рис. 4, а) четко выделяется единственный максимум с наиболее вероятным значением $\tau_{0,55}^a \approx 0,05$. В «море мрака» (рис. 4, б) проявляются два максимума в области ~0,38 и ~0,26, которые свойственны двум типам «оптической погоды». Первый максимум определенно соответствует состоянию атмосферы во время пылевых выносов, а второй отражает некоторое фоновое состояние для этого района в промежуточный период. Вероятность реализаций двух типов «оптической погоды» соизмерима. Первый максимум практически совпадает с результатами [4] ($\tau_{0,55}^{\max} \approx 0,4$). Отсутствие второго максимума в данных [4] объясняется, на наш взгляд, меньшей статистической обеспеченностью их исследований.

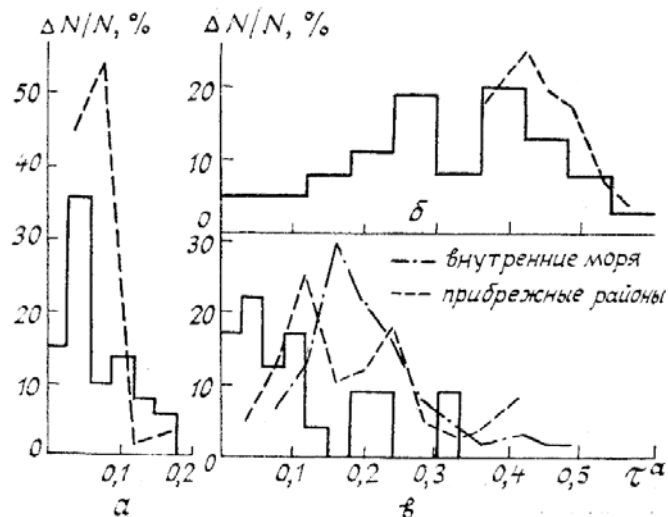


Рис. 4. Гистограммы повторяемостей АОТ в различных районах Атлантики: *а* — северная и центральная Атлантика, *б* — «море мрака», *в* — районы вблизи европейского побережья. Штрихпунктирной и штриховыми линиями показаны результаты, полученные авторами [4] в аналогичных условиях (открытый океан; «море : мрака»; внутри моря и береговые данные)

Более сложный вид гистограммы повторяемостей АОТ наблюдается для районов, подверженных влиянию континента (рис. 4, *в*). Наличие многомодальности в гистограммах характеризует сложное и изменчивое влияние различных факторов на оптическое состояние атмосферы, которое затрудняет выделение наиболее вероятных значений оптической толщи атмосферы в прибрежных районах.

Обращает на себя внимание то, что проанализированные расхождения с данными авторов [4] не носят принципиального характера, хотя проводились в разное время и, кроме «моря мрака», в разных районах морей и океанов.

Рассмотрение статистических параметров и гистограмм на других длинах волн показало подобие проанализированных закономерностей для рассмотренных районов океана. Причем при увеличении длины волны (кроме $\lambda = 0,705$, где проявляется поглощение водяным паром) наблюдается уменьшение среднего значения и СКО оптических толщ. (Более подробно спектральные особенности АОТ будут проанализированы в следующей статье).

Определенную информацию о высотном распределении аэрозоля позволяет получить оценка геометрической толщины эффективного однородного слоя аэрозоля $H_0 = \tau/\epsilon$. В наших исследованиях эта величина для $\lambda = 0,55$ оказалась в пределах $H_0 = 0,4 \pm 0,2$ км для океанического района (3) и $H_0 = 1,3 \pm 0,7$ км — для «моря мрака» (4). Качественно увеличение H_0 согласуется с отмеченным в [1] ростом минеральной фракции аэрозоля на высотах 1–4 км под влиянием пылевых выносов из Сахары. В то же время полученные значения H_0 оказались заниженными по сравнению, например, с данными измерений [11], где H_0 составляла 1–3 км. Одним из возможных объяснений этого — большее влияние (в нашем случае) грубодисперсной фракции аэрозоля, сосредоточенной в надводном слое, приводящее, следовательно, к снижению H_0 .

Основные выводы

1. Проведенные исследования подтвердили возможность применения измерителя «ИККОС» для оценки горизонтальной прозрачности атмосферы с борта судна. Общий характер полученных количественных данных по атмосферным замутнениям согласуется с результатами ранее проведенных исследований других авторов. В то же время для получения более детальных и надежных результатов необходимо совершенствование прибора, алгоритма восстановления коэффициентов ослабления ϵ и расширение спектрального диапазона.

2. По статистическим параметрам АОТ атмосферу над Атлантическим океаном можно разделить на три характерных региона — открытый океан, прибрежные районы и «море мрака» (тропическая зона океана вблизи западного побережья Африки):

а) для открытого океана свойственна не только максимальная прозрачность, но и наименьшая абсолютная изменчивость АОТ;

б) «море мрака» характеризуется максимальными замутнениями, небольшой относительной изменчивостью АОТ и двумя модами наиболее вероятных значений АОТ, свойственных двум типам оптико-метеорологического состояния атмосферы;

в) АОТ прибрежных районов по средним значениям и СКО занимают промежуточное значение, но отличаются наибольшими значениями относительной изменчивости.

В заключение авторы выражают благодарность группе метеорологии 40-го рейса (руководитель В.И. Милованов) за данные метеонаблюдений, использованные при анализе результатов.

1. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И., Поздняков Д.В. Атмосферный аэрозоль. Л.: Гидрометеониздат, 1983. 224 с.
2. Смирнов А.В., Шифрин К.С. //Физика пограничного слоя атмосферы и ее прикладные аспекты. (Сб. научных трудов; вып. 85). Л., 1984. С. 121–127.
3. Шифрин К.С., Волгин В.М., Волков Б.Н., Ершов О.А., Смирнов А.В. //Исследование Земли из космоса. 1985. № 4. С. 21–30.
4. Волгин В.М., Ершов О.А., Смирнов А.В., Шифрин К.С. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1988. Т. 24. № 10. С. 1058–1065.
5. Ершов О.А., Смирнов А.В. //Исследование Земли из космоса. 1986. № 5. С. 3–8.
6. Лактионов А.Г., Кондратьев К.Я., Адиашкин В.Н. и др. // ТРОПЭКС-74. Т. 1. Атмосфера. 1976. С. 630–637.
7. Сакерин С.М., Игнатов А.М., Шибанов Е.Б. Аппаратура и методики определения спектральной прозрачности атмосферы с борта НИС //Океан – Космос: эксперимент «Атлантика-89». Деп. в ВИНТИ 07.08.90 № 4496-В90 С. 11–35.
8. Кабанов М.В., Сакерин С.М. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1983. Т. 19. № 2. С. 147–155.
9. Веретенников В.В., Логинов С.В., Сакерин С.М. //Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 9. С. 987–989.
10. Кабанов М.В., Панченко М.В., Пхалагов Ю.А. и др. Оптические свойства прибрежных атмосферных дымок. Новосибирск: Наука, 1988. 201 с.
11. Капустин В.Н., Козлов Е.М., Мартьянова Г.Н. и др. //ТРОПЭКС-74. Т. 1. Атмосфера, 1976. С. 638–643.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,
Томск

Поступила в редакцию
4 апреля 1991 г.

S.M. Sakerin, S.V. Afonin, T.A. Eryomina, A.M. Ignatov, D.M. Kabanov.
General Characterization and Statistical Parameters of the Atmospheric Spectral Transmission in Some Regions of the Atlantic.

The paper deals with the discussion of experimental results on the spectral transmission of the atmosphere along horizontal and vertical paths obtained in some regions of the Atlantic during the 40-th mission of the research vessel «Akademik Vernadskii». The analysis of statistical properties of the variations of visual range and optical thickness of aerosol in the marine atmosphere is presented for the spectral range 0.4 to 1.06 μm . It is shown that the studied regions of the Atlantic ocean can be divided into three groups with different statistical properties of the mentioned parameters variability.