

С.М. Сакерин, А.М. Игнатов, Д.М. Кабанов

О КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВЯЗЯХ И СПЕКТРАЛЬНОМ ХОДЕ АЭРОЗОЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ АТМОСФЕРЫ В РЯДЕ РАЙОНОВ АТЛАНТИКИ

Проанализированы вариации спектрального хода аэрозольной оптической толщины атмосферы в ряде районов Атлантического океана по материалам исследований в 40-м рейсе НИС <Академик Вернадский>. Проведено сопоставление статистических характеристик параметра Ангстрема для трех регионов исследований и с результатами других авторов. Рассмотрены корреляционные связи спектральных оптических толщин атмосферы, параметра Ангстрема, метеорологических параметров.

Исследование спектрального хода аэрозольных оптических толщин (АОТ) морской атмосферы представляет интерес для развития методов спутниковой океанологии и учета искажающего влияния атмосферы при наблюдении в различных спектральных диапазонах.

В настоящей статье продолжен анализ результатов измерений АОТ на четырех длинах волн (0,48; 0,55; 0,67 и 1 мкм) в ряде районов Атлантики во время 40-го рейса НИС <Академик Вернадский>, в 1989 г. [1]. Характеристики аппаратуры, условия проведения исследований, методики калибровки и учета газовых компонентов были рассмотрены ранее [2, 3].

Результаты анализа статистических характеристик и гистограмм повторяемости АОТ [1, 3] позволили объединить районы исследований в три характерных региона (открытый океан, <море мрака> и прибрежные районы), что совпадает с классификацией в [4]. К первому региону, в нашем случае, отнесены удаленные от берега районы Центральной и Северной Атлантики (17÷60°с. ш.). Во второй регион включены две выборки, полученные в тропической зоне Атлантики у западного побережья Африки в разные периоды наблюдений (с 12 по 26 октября и с 11 ноября по 4 декабря). К третьему региону были отнесены районы вдоль северо-западного побережья Европы и Средиземное море. Однако из-за недостатка спектральных составляющих АОТ на первом этапе наших исследований анализ спектрального хода проводился только для данных, полученных в Средиземном море.

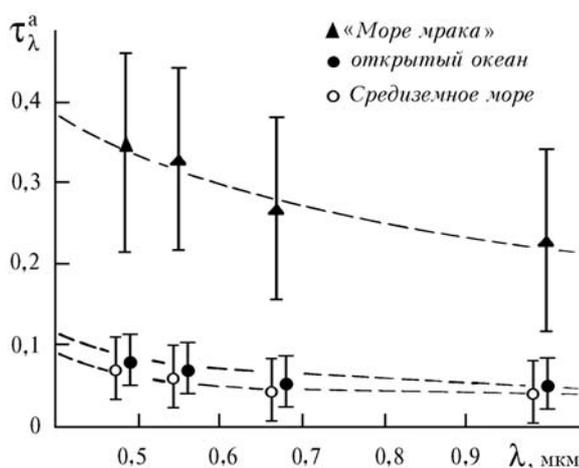


Рис. 1. Спектральный ход АОТ атмосферы (τ_{λ}^a и σ_{τ}) для трех регионов исследований и аппроксимационная зависимость Ангстрема (пунктирные кривые)

На рис. 1 представлен спектральный ход АОТ на основе данных о средних значениях $\bar{\tau}_{\lambda}^a$ и среднеквадратических отклонениях (СКО) σ_{τ} для каждого из трех анализируемых районов. Из приведенных данных следует, что для всех районов наблюдается убывание АОТ с ростом

длины волны при незначительных изменениях СКО и коэффициента вариаций $V_{\tau} = \overline{\tau} / \sigma_{\tau}$. Сходство данных для открытого океана и Средиземного моря, в отличие от [4], объясняется различием <оптической погоды> в разных рейсах – в нашем случае она характеризовалась высокой прозрачностью, свойственной открытому океану. Высокая прозрачность атмосферы в этом районе зимой подтверждается данными [6], полученными в Средиземном море в тот же период и объясняется [6, 7] характерной циркуляцией воздушных масс, способствующей очищению атмосферы от пылевых выносов с континента. Влияние последних более свойственно летне-осеннему периоду [4, 5].

Наиболее приемлемой аппроксимацией спектрального хода АОТ является степенная зависимость – формула Ангстрема:

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

где α – параметр Ангстрема, характеризующий селективность (относительную) спектрального хода АОТ и связанный с распределением частиц по размерам; β – коэффициент мутности, связанный с концентрацией аэрозоля. Параметр α определяется методом наименьших квадратов после логарифмирования зависимости (1). В расчетах использовались средние за полдня значения τ_{λ}^a .

Относительно формулы Ангстрема следует выделить два обстоятельства:

1) как уже отмечалось другими авторами, реальные спектральные зависимости АОТ и их усредненные значения лишь приближенно соответствуют формуле Ангстрема;

2) относительная селективность спектрального хода, выражаемая степенной функцией, изменяется в пределах рассматриваемого диапазона длин волн и, как следствие, значение α зависит от границ спектра.

Последнее обстоятельство особенно важно при сопоставлении результатов исследований, выполненных разными авторами. В качестве примера изменения α в табл. 1 приведены его значения, определенные по нашим данным для <моря мрака>, в различных участках спектра.

Таблица 1

Показатели Ангстрема в различных участках спектра

λ , мкм	0,48 – 0,55	0,55 – 0,67	0,67 – 1	0,48 – 1
α	0,48	1,22	0,33	0,61

Статистические характеристики изменчивости параметра Ангстрема для трех регионов приведены в табл. 2, а усредненные зависимости (1) изображены пунктиром на рис. 1. Прежде чем проводить анализ и сопоставление с результатами других исследований [4, 8], отметим следующие методические различия, которые следует принимать во внимание. В [4] анализируемый спектральный диапазон несколько шире – $0,44 \div 1,02$ мкм (у нас – $0,48 \div 1,0$ мкм), подход к районированию одинаков, но анализируется атмосфера разных океанов. В [8] спектральный диапазон находится в пределах $0,38 \div 0,78$ мкм и районирование проведено не географическое, а по типу воздушных масс, определенных по самолетным измерениям состава аэрозоля на четырех уровнях атмосферы (от 1000 до 500 мбар).

Таблица 2

Статистические характеристики параметра Ангстрема

Район	Статистические характеристики			
	$\overline{\tau}_{0,55}^a$	$\overline{\alpha}$	σ_{α}	V_{α}
Открытый океан	0,08	0,75	0,76	1,02
[4]	0,07	0,39	0,38	0,97
[8]	0,16	1	–	–
Средиземное море	0,06	0,72	0,63	0,88
[4]	0,2	1,17	0,3	0,26
<Море мрака>	0,32	0,61	0,29	0,48
	(0,36)	(0,36)	(0,25)	(0,69)
[4]	0,42	0,45	0,12	0,26
[8]	0,39	0,37	–	–

Анализ гистограммы повторяемостей параметра Ангрстрема (рис. 2) и его статистических характеристик (табл. 2) в разных регионах показывает, что α изменяется в широком диапазоне, а основная часть результатов сосредоточена в пределах $0,2 \div 1,1$. Максимальная относительная изменчивость α (V_α достигает единицы) наблюдается для открытого океана и в определенной степени обусловлена малостью значений τ_λ^a и возрастающей ролью ошибок. Расхождение средних значений α с данными [4, 8] объясняется не только различием атмосферы над Атлантическим и Тихим океанами, а возможно, и методическими расхождениями (разный спектральный диапазон, учет газовых компонентов и др.), которые оказываются существенными при малых значениях τ_λ^a .

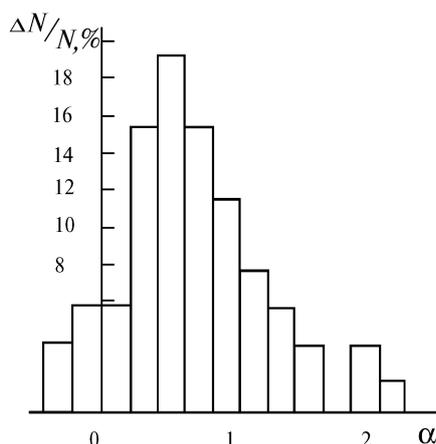


Рис. 2. Гистограмма повторяемостей параметра Ангрстрема за весь период исследований

Различие статистических характеристик параметра Ангрстрема с данными [4] в Средиземном море объясняется наличием двух разных типов <оптической погоды> в этом регионе: замутненной атмосферы под влиянием пылевых выносов из Африки в теплый период и очищенной атмосферы под влиянием циклонической деятельности в зимний период [6].

Наибольшее соответствие данных по α наблюдается для района Тропической Атлантики у западного побережья Африки. Этот район характеризуется достаточно устойчивым повышенным замутнением, связанным с систематическими выносами пыли из Сахары, следы которых обнаруживаются вплоть до американского континента. Как показали исследования в период проведения Национального эксперимента ТРОПЭК-72 [9, 10], пылевые выносы приводят к существенному увеличению концентрации аэрозоля и доли крупных частиц минеральной фракции. Вследствие этого происходит увеличение среднего замутнения и уменьшение селективности спектрального хода (см. табл. 2). Среднее значение параметра Ангрстрема $\bar{\alpha} = 0,61$ несколько выше данных [4, 8] и совпадает с результатами исследований [11], согласно которым $\bar{\alpha}$ за весь период экспедиции ТРОПЭК-72 в этом районе составляло величину 0,6. Для объяснения имеющихся расхождений проанализируем график повторяемостей α для первого периода наблюдений (октябрь) и суммарного (октябрь–декабрь) при $\Delta\alpha = 0,1$ (рис. 3). В суммарной гистограмме отчетливо выделяются две моды значений α , которые соответствуют двум типам спектрального хода АОТ, характерным для этого региона. Причем первый максимум ($\alpha \approx 0,4 \div 0,45$) совпадает с данными [4] и соответствует близкому к нейтральному ходу τ_λ^a , обусловленному повышенным влиянием грубодисперсной фракции аэрозоля. Второй максимум ($\alpha \approx 0,8$) совпадает с нашими данными по океану ($\alpha = 0,75$) и соответствует большей селективности спектрального хода и снижению влияния крупных частиц. Таким образом, исходя из лучшей статистической обеспеченности наших измерений (23 измерительных дня в отличие от 12 в [4] и 2 в [8]), наиболее вероятным объяснением расхождений является то, что измерения [4, 8] были проведены в основном при первом типе <оптической погоды> в этом районе с соответствующим спектральным ходом АОТ. Отдельное рассмотрение значений α для первого этапа измерений (октябрь) также подтверждает сделанный вывод. В этом случае в

гистограмме повторяемостей α (рис. 3) практически исчезает второй максимум, а средние значения $\bar{\tau}_{0,55}^a$ и $\bar{\alpha}$ (данные приведены в скобках табл. 2) сближаются с результатами [4, 8].

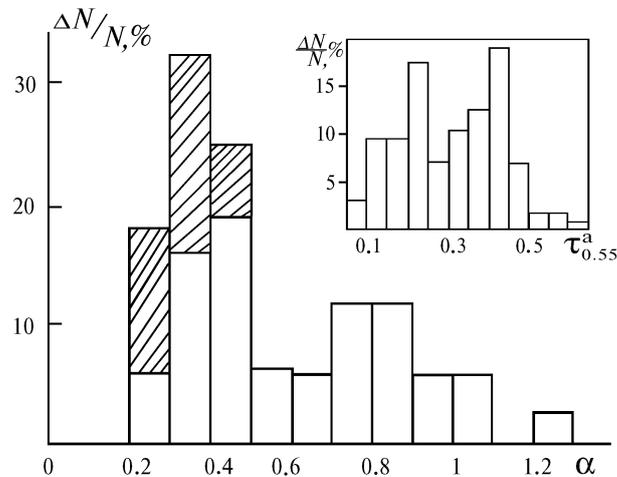


Рис. 3. Гистограмма повторяемостей параметра α за весь период измерений в «Море мрака» и за первый этап (заштрихованная часть); на заднем плане приведена гистограмма повторяемостей $\tau_{0,55}^a$ в этом же районе

Двухмодальный характер свойствен и для гистограммы повторяемостей самих значений АОТ атмосферы в этом районе [1] (см. рис. 3). Логично предположить, что каждый типичный спектральный ход АОТ определенным образом связан с одной из типичных ситуаций атмосферного замутнения. Поиск такой зависимости показал ее неоднозначный и сложный характер, что подтверждается низким уровнем корреляции $r(\tau_{0,55}^a, \alpha)$, равным для этого района 0,311. Чтобы выявить эту завуалированную сложную связь ($\tau_{0,55}^a, \alpha$), были отдельно проанализированы АОТ, относящиеся к первому ($0,2 < \tau_{0,55}^a < 0,25$) и второму ($0,4 < \tau_{0,55}^a < 0,45$) максимумам в гистограмме повторяемостей. В результате такого подхода оказалось, что 89% значений $\tau_{0,55}^a$ в первом максимуме соответствуют величинам α в пределах от 0,6 до 1,3 при наиболее вероятном значении $\alpha \approx 0,85$, то есть относятся ко второй моде гистограммы повторяемостей параметра Ангстрема. Аналогично для второй моды $\tau_{0,55}^a$ 68% ее значений соответствуют α в пределах от 0,2 до 0,5 при наиболее вероятном значении $\alpha \approx 0,45$, близком к первому максимуму гистограммы α .

Таким образом, в рамках полученных в 40-м рейсе данных по «Морю мрака» можно полагать, что каждая из отмеченных в [1] типичных ситуаций по уровню $\tau_{0,55}^a$ характеризуется своим спектральным ходом: для меньших замутнений – это в основном более селективная зависимость, а для сильных замутнений – спектральный ход, близкий к нейтральному.

Принимая во внимание наличие определенной взаимосвязи τ_{λ}^a с параметром α , представляет интерес проанализировать корреляцию параметров α и β и возможность перехода к однопараметрической зависимости $\tau_{\lambda}^a(\lambda)$ хотя бы в рамках отдельных регионов. Отметим, что попытки такого рода уже предпринимались, но однозначных связей получено не было [13].

Прежде всего были проанализированы сами значения α и β для трех массивов данных: открытый океан, «Море мрака» и все океанические измерения. Для повышения статистической обеспеченности при анализе использовались все единичные спектральные реализации АОТ без их усреднения по времени. Значения коэффициентов взаимной корреляции $r_{\alpha,\beta}$ (табл. 3) оказались значимыми и с отрицательным знаком, причем взаимосвязь в отдельных подмассивах больше, чем в общем массиве. То есть имеет место региональный характер взаимосвязи. Из факта отрицательных значений $r_{\alpha,\beta}$ следует, что увеличение коэффициента мутности β (концентрации), как правило сопровождается уменьшением параметра α или увеличением относительного вклада больших частиц. С учетом этого обстоятельства параметр α выражался через β в виде:

$$\alpha^0 = a \beta^b. \quad (2)$$

Коэффициенты корреляции $r_{\alpha,\alpha}^0$ с соответствующими значениями a и b приведены в табл. 3. Достаточно высокий уровень корреляции $r_{\alpha,\alpha}^0$ по крайней мере для отдельных регионов, позволяет надеяться, что на основе более продолжительных рядов наблюдений может быть сформирована однопараметрическая зависимость с соответствующими границами применения.

Таблица 3

Значения коэффициентов корреляции $r_{\alpha,\beta}$; $r_{\alpha,\alpha}^0$ и параметров a и b

Регион	$r_{\alpha,\beta}$	$\alpha^0 = a\beta^{-b}$		
		$r_{\alpha,\alpha}^0$	a	b
Открытый океан	-0,492	0,743	0,025	-0,957
<Море мрака>	-0,476	0,858	0,255	-0,510
Все данные	-0,249	0,571	0,293	-0,292

Анализ коэффициентов корреляции между АОТ на разных длинах волн (табл. 4) показывает высокий уровень связи, причем более значительный, чем в ранее проведенных исследованиях [4, 11]. Как и следовало ожидать, увеличение разности между длинами волн ($\lambda_i - \lambda_j$) сопровождается уменьшением коэффициента $r(\tau_{\lambda_i}^a; \tau_{\lambda_j}^a)$ от 0,995 до 0,948. Заметим, что значимая корреляция в нашем случае составляет 0,135 (с доверительной вероятностью 0,95).

Таблица 4

Матрица коэффициентов корреляции

	$\tau_{0,48}$	$\tau_{0,55}$	$\tau_{0,67}$	τ_1	T	R	e	V	W	α
$\tau_{0,48}$	1	0,995	0,982	0,948	0,421	0,007	0,479	-0,142	0,547	-0,075
$\tau_{0,55}$		1	0,990	0,962	0,417	-0,005	0,469	-0,128	0,518	-0,091
$\tau_{0,67}$			1	0,980	0,379	0,003	0,451	-0,103	0,432	-0,143
τ_1				1	0,378	0,009	0,432	-0,053	0,313	-0,261
T					1	-0,402	0,926	-0,214	0,581	0,038
R						1	-0,036	-0,115	0,046	-0,114
e							1	-0,293	0,626	-0,091
V								1	-0,491	0,007
W									1	0,279
α										1

Уравнения регрессии, связывающие значения $\tau_{0,55}^a$, выбранной в качестве опорной, с АОТ на других длинах волн приведены в табл. 5. Доверительные интервалы для параметров регрессии получены с надежностью 0,95. В табл. 5 представлены также среднеквадратические ошибки экстраполяции $\sigma_i = \sigma_0 \sqrt{(1 - r^2(\tau_{\lambda_i}^a; \tau_{\lambda_j}^a))}$ и относительные ошибки $\Delta_i = \sigma_i / \tau_{\lambda_i}^a$.

Таблица 5

Регрессионные уравнения связи ($\tau_{0,55}^a; \tau_i^a$), и значения ошибок σ_i и Δ_i

Уравнение регрессии	σ_i	Δ_i
$\tau_{0,48}^a = (1,05 \pm 0,02)\tau_{0,55}^a + (0,00 \pm 0,01)$	0,02	0,10
$\tau_{0,67}^a = (0,89 \pm 0,03)\tau_{0,55}^a - (0,02 \pm 0,01)$	0,02	0,14
$\tau_1^a = (0,72 \pm 0,05)\tau_{0,55}^a - (0,01 \pm 0,05)$	0,04	0,31

Более сложной является взаимосвязь τ_{λ}^a с метеопараметрами – температурой (T), относительной (R) и абсолютной (e) влажностью воздуха, скоростью ветра (V) и общим влагосодержанием атмосферы (W), а также с параметром Ангстрема α . Достаточно очевидно отсутствие взаимосвязи τ_{λ}^a с параметрами R и V , а для параметра α намечается слабая корреляционная связь с отрицательным знаком. Что касается остальных метеопараметров (T, e, W), то корреляция значимая, причем она монотонно возрастает с переходом от $\tau_{1,0}^a$ в инфракрасном диапазоне к $\tau_{0,48}^a$ в коротковолновой части видимого диапазона спектра. Отмеченная закономерность мо-

жет быть объяснена более высокой взаимосвязью с метеопараметрами мелкодисперсной фракции аэрозоля. Максимальная корреляция (до 0,547) характерна для влагосодержания W . Дополнительным и отличным от других метеопараметров фактором, приводящим к этому, является то, что влагосодержание, также как АОТ, является интегральным параметром и охватывает всю толщу атмосферы.

Значимость коэффициентов корреляции не дает, однако, оснований для нахождения простых однозначных связей. Наличие в наших данных синоптического периода изменчивости $\tau_{\lambda}^a(t)$ (в настоящей статье не рассматривается) дает основание предположить, что наиболее вероятным объяснением значимой корреляции (с параметрами T , e , V) является смена воздушных масс, каждая из которых характеризуется своим набором оптико-метеорологических параметров атмосферы.

Противоречивые результаты различных авторов (см., например, [11, 12]) по вопросу взаимосвязи τ_{λ}^a с метеопараметрами не позволяют провести объективного сопоставления, поэтому необходимы дальнейшие исследования и в первую очередь с привлечением синоптической информации.

1. Сакерин С.М., Афонин С.В., Еремина Т.А., Игнатов А.М., Кабанов Д.М. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. N 7. С. 695–704.
2. 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. N 4496–В90. С. 11–35.
3. Korotaev G.K., Sakerin S.M., Ignatov A.M., Stow L.L., McClain E.P. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. (To be published).
4. Волгин В.М., Ершов О.А., Смирнов А.В., Шифрин К.С. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1988. Т. 24. N 10. С. 1058–1064.
5. Ершов О.А., Смирнов А.В., Шифрин К.С. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1990. Т. 26. N 4. С. 388–394.
6. Ершов О.А., Романова Н.А. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1991. Т. 27. N 12. С. 1379–1380.
7. Атлас океанов. Атлантический и Индийский океаны. М.: Изд. ГУНМО МО СССР. 1974.
8. Reddy P.L., Креунер F.W., DeLuisi J.J., Kim Y. // An International Journal of Global Change/ Global Biogeochemical Cycles. 1990. V. 4. N 3. P. 225–240.
9. ТРОПЕКС-72. Труды Межведомственной геофизической экспедиции по программе национального Атлантического тропического эксперимента. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 686 с.
10. Бартенева О.Д., Веселова Л.К., Никитинская Н.И. // Труды Межведомственной геофизической экспедиции по программе национального Атлантического тропического эксперимента. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 686 с.
11. Шифрин К.С., Волгин В.М., Волков Б.Н. и др. // Исследование Земли из космоса. 1985. N 4. С. 21–30.
12. Ершов О.А., Смирнов А.В. // Исследование Земли из космоса. 1986. N 5. С. 3–8.
13. Шенермарк М., Циммерман Г., Пизик Б. и др. // Исследование Земли из космоса. 1989. N 2. С. 47–53.

Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск
Морской гидрофизический институт АН Украины

Поступила в редакцию
24 декабря 1992 г.

S.M. Sakerin, A.M. Ignatov, D.M. Kabanov. On Correlations in Spectral Behavior of the Aerosol Optical Depth in Some Regions of the Atlantic.

Variations in the spectral behavior of the aerosol optical depth of the atmosphere observed in some regions of the Atlantic during the 40th expedition of the research vessel <Akademik Vernadskii>. A comparison of statistical characteristics of the Angstrom parameter for three regions with the data by other authors is conducted. Correlations between the spectral behavior of the optical depth of the atmosphere, Angstrom parameter, and meteorological parameters are discussed.