

УДК 551.521.3

**СЕЛЕКТИВНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ АТМОСФЕРНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ МОРСКОЙ БЕРЕГОВОЙ  
ЗОНЫ В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 0.52-0.80 МКМ**

**Таварткиладзе К.А.\*., Болашвили Н.Р.\*, Бегалишвили Н.А.\*\*.**

**Институт Географии Вахушти Багратиони Тбилисского Государственного Университета  
им.Ив.Джавахишвили\***

**Институт Гидрометеорологии Грузинского Технического Университета\*\*.**

**зоны в спектральном диапазоне 0.52-0.80 мкм**

Знание оптических свойств аэрозолей имеет важное значение для функционирования космического мониторинга атмосферных процессов. Переносимый информацию электромагнитный сигнал при распространении в полидисперсной атмосфере подвергается значительной деформации при взаимодействии с атмосферными аэрозолями.

Электромагнитное излучение частично рассеивается на атмосферных аэрозолях и закономерность этого рассеяния в основном установлена [1,2]. Однако, еще в середине прошлого века было известно [3-9], что в спектральном диапазоне солнечного излучения существуют области селективного поглощения аэрозолей. Предусмотреть их задача чрезвычайно трудная, так как для этого необходимо знать состав аэрозолей, но установить именно состав на какой-либо территории в произвольное время представляет собой сложнейшую задачу. Приблизительное решение упомянутых проблем сравнительно легко возможно для тех территорий, где существуют постоянные источники одних и тех же аэрозолей. Такими территориями можно считать прибрежную полосу океанов и морей, где систематически должен существовать смешанный состав морских и континентальных аэрозолей.

Целью этой работы представляет в прибрежной зоне экспериментальное определение функции поглощения смешанных (морского и континентального происхождения) атмосферных аэрозолей, в спектральном диапазоне 0.52 – 0.80 мкм.

Комплексный эксперимент в течение многих лет проводился на востоке Черного моря, непосредственно в морской береговой зоне, где достаточно развито крупное промышленное производство и недостатка в антропогенных аэрозолях не наблюдается, а также в непосредственной близости от него в высокогорной зоне (более чем 2000м над уровнем моря), где аэрозоли должны быть в основном естественного (фонового) происхождения.

Изучение эти двух типов аэрозолей, на начальном этапе исследования, происходило отдельно и в дальнейшем им условно присвоены названия: антропогенные и фоновые аэрозоли.

Информация в случае чистого неба, была получена более, чем в 2500 комплексных экспериментах, с использованием аппаратуры, которая измеряла спектральный состав прямой солнечной радиации, достигающей подстилающую поверхность. Эта информация приведена в работе [10].

Вместе со спектральным составом прямой солнечной радиации синхронно измерялись вертикальное распределение водяного пара в атмосфере и общее количество озона.

По величине лучистой энергии солнца, в каждом спектральном участке, определялась величина ослабления энергии в вертикальном направлении всей атмосферы и, учитывая молекулярное рассеяние, поглощение водяной парой и озоном, определялась оптическая плотность («толща») атмосферной аэрозоли [11].

Посредством интерференционных светофильтров осуществлялось выделение спектральных участков из полной лучистой энергии солнца. Интенсивность спектральной энергии измерялась в приблизительно равноудаленных 28 спектральных участках от 0.341 до 1.067 мкм. Полуширина функций пропускания светофильтров колебались в пределах 0.008-0.029 мкм [10].

Почти во всех экспериментах наблюдались участки слабого селективного поглощения в диапазоне 0.5 – 0.8 мкм.

На рис.1 представлены нормированные функции распределения оптических плотностей аэрозоля для всех экспериментов в указанном диапазоне. Коэффициент нормирования для каждой длины волны представляет собой среднее арифметическое плотностей во всех проведенных экспериментах (на рисунке, на вертикальной оси отложено число случаев).

Отметим, что различия абсолютных значений оптических плотностей для антропогенных (а) и фоновых (б) аэрозолей для всех рассмотренных длин волн приблизительно одинаковы. В частности, в один и тот же период оптические плотности фоновых аэрозолей на 20-30% меньше, чем оптические плотности антропогенных аэрозолей для соответствующих длин волн. Различны диапазоны их изменений, они для фоновых аэрозолей гораздо больше чем для антропогенных.

Как известно, накопление аэрозолей, особенно в приземном слое, во второй половине дня должно быть значительным. Интенсивность поглощения в это время вероятно будет более заметной. Вместе с этим, определенный интерес представляет процесс накопления антропогенных и естественных аэрозолей в атмосфере в течении дня. Поэтому множество экспериментальных данных было сгруппировано по часам.

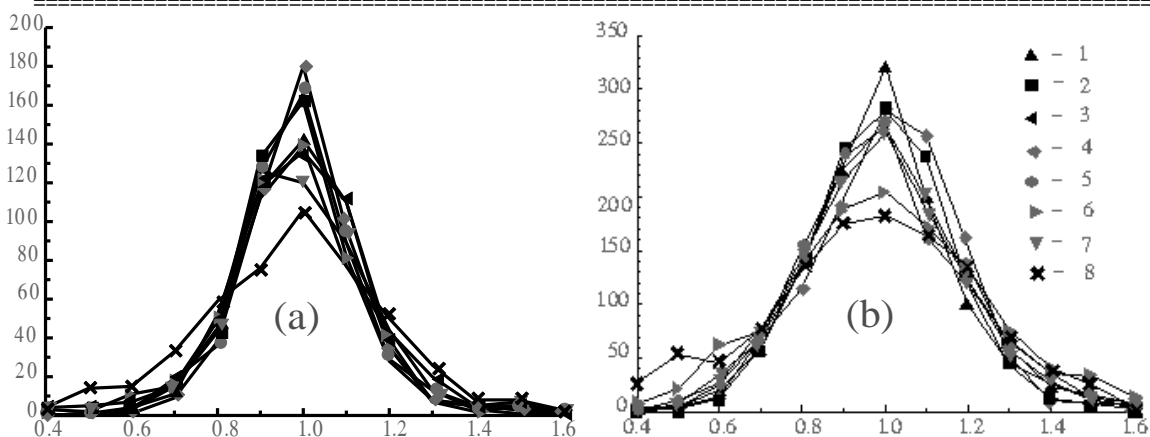


Рис.1 Распределение нормированных оптических плотностей антропогенных (а) и фоновых(б) аэрозолей для следующих участков длин волн с центрами: 1 – 0.520 мкм; 2 – 0.547 мкм; 3 – 0.613 мкм; 4 – 0.636 мкм; 5 – 0.672 мкм; 6 – 0.702 мкм; 7 – 0.739 мкм; 8 – 0.800 мкм.

Изменение оптических плотностей аэрозолей в течении дня для рассмотренных восьми участков длин волн для антропогенных и фоновых аэрозолей дано на рис.2 (на горизонтальных осях отложены часы). Как видно из рис.2, процесс накопления аэрозолей в атмосфере в течении дня четко выражен только для фоновых аэрозолей. Для антропогенных аэрозолей он менее заметен.

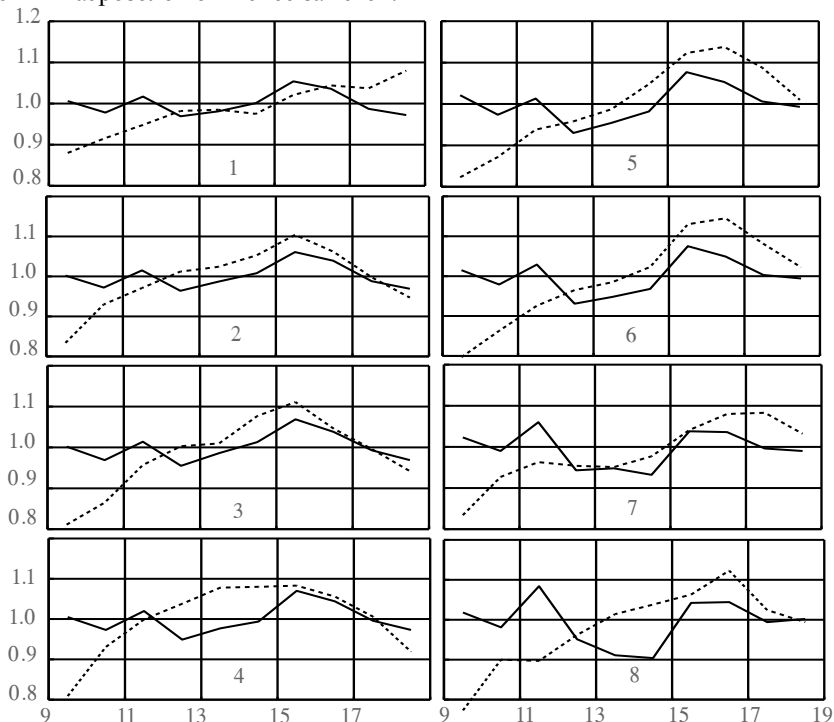


Рис.2. Изменение в течении дня нормированных спектральных оптических плотностей - для антропогенных(непрерывная кривая) и для фоновых (прерывистая кривая) аэрозолей. Числа определяют участки волн (см. Рис.1).

Для количественных оценок процесса ослабления влияния прямой солнечной радиации на атмосферные аэрозоли, часто применяют т.н. эмпирическую формулу Ангрстрема, которая имеет следующий вид:

$$\tau_a = \alpha \lambda^{-n}, \quad (1)$$

где  $\tau_a$  - оптическая плотность аэрозолей,  $\lambda$  - длина волны в мкм,  $\alpha$  и  $n$  - эмпирические коэффициенты.

Разумеется, формула (1) не предусматривает селективное поглощение, она выражает монотонное уменьшение оптической плотности с увеличением длины волны. Поэтому она определяет только процесс уменьшения лучистой энергии, вызванное рассеянием на аэрозолях. Так как этот процесс происходит с одинаковой закономерностью на всех участках длины волны, то корреляционная связь оптических плотностей аэрозолей для разных длин волн должна быть достаточно высокой.

Если на каком-либо участке рассматриваемого диапазона длины волны имеет место селективное поглощение, тогда корреляционная связь этого участка с остальными участками снизится. Величина понижения должна зависеть от интенсивности поглощения. Таким образом, корреляционная функция, определяющая связь

оптических плотностей аэрозолей в определенном диапазоне длин волн, может дать информацию о поглощении аэрозолями лучистой энергии. Как уже было отмечено, в экспериментальных данных наблюдался процесс поглощения аэрозолями в диапазоне 0.52-0.80 мкм. На рис.3 показано изменение коэффициента корреляции ( $r_{\tau\tau}$ ) относительно длины волны при отсутствии поглощения (а) и при наличии поглощения (б).

Графики на рисунке построены по данным одного максимально загрязненного дня приблизительно к 16 часам. В отсутствии поглощения (рис.4а) значения коэффициентов корреляции вычислены с помощью формулы (1), где  $\alpha$  и  $n$  эмпирические значения коэффициентов определены на основе фактических данных только для длин волн 0.52 и 0.80 мкм. Для случая же поглощения (рис.4б) использованы фактические оптические плотности аэрозолей для 8 выделенных участков.

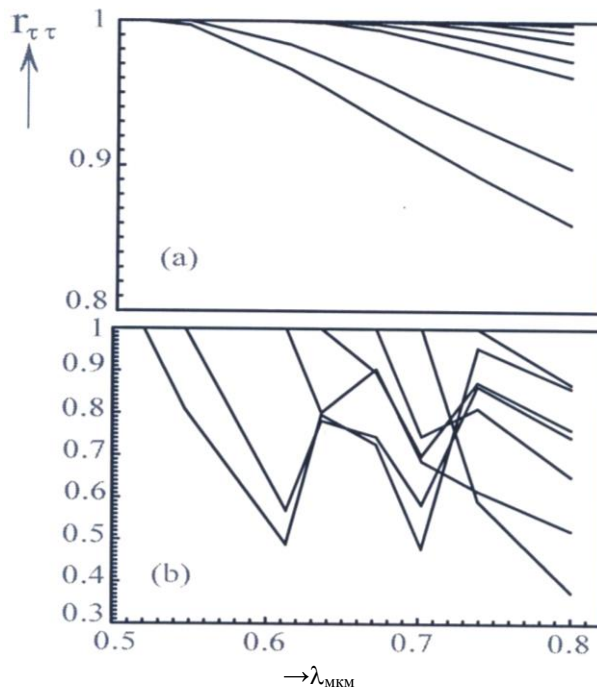


Рис.3 Изменение корреляционной функции оптической плотности аэрозолей относительно длины волны при отсутствии поглощения (а) и при наличии поглощения (б).

Для количественной оценки функции интенсивности поглощения аэрозолей, на основе данных всех проведенных экспериментов, был применен принцип сравнения графиков, представленный на рис.4. Так как значения оптических плотностей аэрозолей значительно изменялись в течении дня, то данные были сгруппированы следующим образом – в течении дня с 9 до 19 часов множество антропогенных и фоновых аэрозолей разделили на подмножества для каждого часа.

На рис. 4а и 4б даны изменения корреляционных функций оптических плотностей аэрозолей по длинам волн для антропогенных и естественных (фоновых) аэрозолей по часам в течении дня (с 9 до 19 часов)

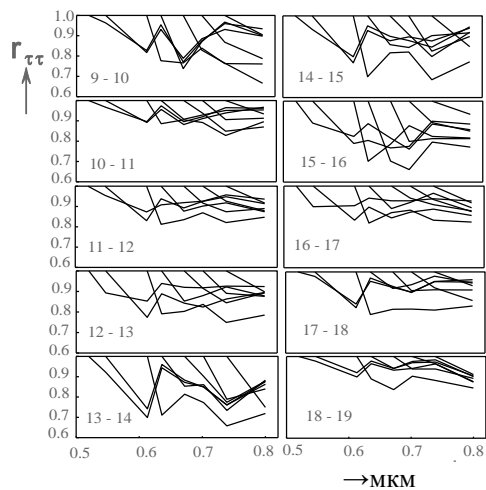


Рис.4а.

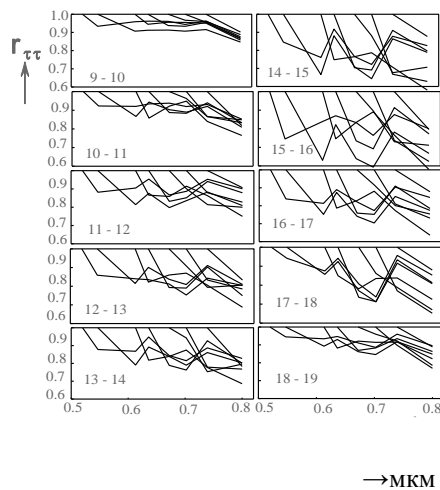


Рис.4в.

Представленные графики дают ясную картину изменения в течении дня интенсивности поглощения аэрозолей в спектральном диапазоне 0.52 – 0.80 мкм. Следует отметить, что указанные изменения интенсивности поглощения аэрозолей в течении дня хорошо согласуются с изменением оптической плотности при длине волны 0.80 мкм. Это дает возможность связать интенсивность поглощения аэрозолей, с оптической плотности аэрозоля при длине волн 0.80 мкм, где поглощения аэрозолей не происходит.

Для подмножеств, сгруппированных по часам, как для антропогенных, так и для фоновых аэрозолей, были рассчитаны эмпирические коэффициенты  $\alpha$  и  $n$ . Полученные результаты представлены в таблице 1

Изменения коэффициентов корреляции ( $r_{\tau\tau}$ ) в спектральном диапазоне 0.52-0.80 мкм, для антропогенных аэрозолей в течении дня (9-10,10-11,.....,18-19 часов)

Таблица 1. Изменения параметров  $\alpha$  и  $n$  в течении дня для фоновых и антропогенных аэрозолей с учетом поглощения и при его отсутствии

Часы	Естественные (фоновые) аэрозоли				Антропогенные аэрозоли			
	Поглощение учтено		Без поглощения		Поглощение учтено		Без поглощения	
	$\alpha$	$n$	$\alpha$	$n$	$\alpha$	$n$	$\alpha$	$n$
9 - 10	0.186	1.70	0.157	1.24	0.099	1.28	0.118	1.14
10 - 11	0.164	1.27	0.140	1.39	0.117	1.15	0.135	1.08
11 - 12	0.174	1.21	0.157	1.25	0.104	1.27	0.126	1.18
12 - 13	0.147	1.44	0.127	1.48	0.107	1.32	0.125	1.30
13 - 14	0.163	1.31	0.134	1.37	0.111	1.23	0.128	1.26
14 - 15	0.163	1.34	0.127	1.45	0.113	1.19	0.130	1.15
15 - 16	0.163	1.24	0.131	1.36	0.115	1.14	0.139	1.13
16 - 17	0.183	1.20	0.154	1.28	0.123	1.03	0.147	0.98
17 - 18	0.184	1.14	0.156	1.26	0.120	1.12	0.143	1.00
18 - 19	0.195	1.15	0.177	1.21	0.112	1.12	0.130	1.00

Эмпирические коэффициенты вычислены как при наличии поглощения, так и в отсутствии такового. При вычислении коэффициентов с учетом поглощения, были выбраны восемь участков в спектральный диапазоне (0.52 – 0.80 мкм), в которых проводились измерения. Вычисления выполнены методом наименьших квадратов [12]. При отсутствии поглощения для вычислений взяты только границы рассматриваемого диапазона, где поглощение незначительно, т.е. участки с центрами 0.52 и 0.80 мкм.

Данные в Таблице 1 разницы между значениями оптических плотностей аэрозолей в отсутствии поглощения, вычисленных с помощью  $\alpha$  и  $n$ , и фактическими значениями оптических плотностей в соответствующем спектральном участке определяет интенсивность поглощения аэрозолей, характеризующую данный участок. Результаты оценок этой разницы в рассматриваемом спектральном диапазоне для всех подмножеств, для антропогенных и фоновых аэрозолей, представлены на рис.5. Таким образом, полученные значения определяют функцию поглощения аэрозолей в спектральном диапазоне 0.52-0.80 мкм..

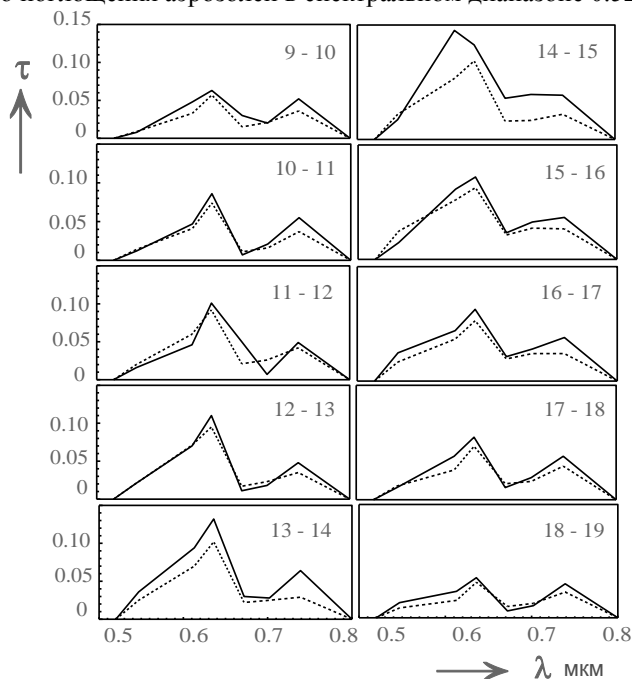


Рис.5. Функция селективного поглощения атмосферных аэрозолей- антропогенных (непрерывная кривая) и фоновых (прерывистая кривая) - в диапазоне длин волн 0.52-0.80 мкм и ее изменения в течении дня.

Как это очевидно из данных рис.5, разница между функциями поглощения для антропогенных и фоновых аэрозолей небольшая. В основном в случае антропогенных аэрозолей поглощение происходит чуть более интенсивно, чем для фоновых. Это подтверждает также рис.6, на котором объединены все экспериментальные данные и для каждого спектрального участка отмечены величины среднеквадратичного отклонения.

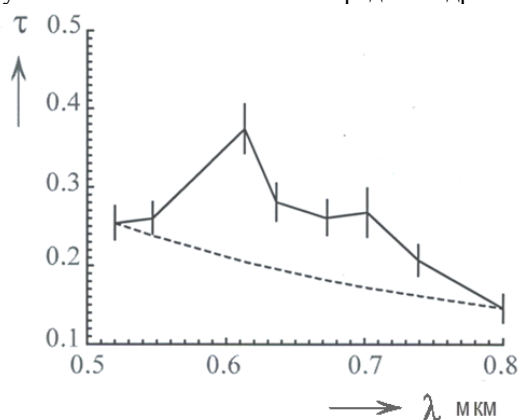


Рис.6. Объединенная функция поглощения для антропогенных и фоновых аэрозолей в спектральном диапазоне 0.52 – 0.80 мкм по данным всех экспериментов и ее аппроксимация (прерывистая кривая) по формуле (1) (начальная длина волны  $\lambda=0.52$  мкм, конечная-  $\lambda=0.80$  мкм).

Короткие вертикальные отрезки на рис.6 определяют величины среднеквадратичного отклонения. Они показывают, что разница для антропогенных и фоновых аэрозолей меньше величины погрешности. Поэтому было принято решение объединить значения данных для антропогенных и фоновых аэрозолей.

Объединенное множество оптических плотностей для антропогенных и фоновых аэрозолей, в спектральном участке с центром в 0.80мкм было разделено на 6 групп с центрами 0.05, 0.10, 0.15, . . . , 0.30 мкм с шагом 0.05 мкм. В каждой группе шириной 0.05мкм определили средние значения оптических плотностей, и во взятых восьми спектральных участках произвели их интерполяцию шагом 0.01 мкм по всем длинам волн в спектральном диапазоне 0.52-0.80 мкм. Полученные таким образом значения приведены в таблице 2.

**Таблица 2** Значения оптических плотностей атмосферных аэрозолей, определяющее селективное поглощение и диапазоне 0.52-0.80 мкм, в морской прибрежной зоне

$\lambda$ мкм	$\tau_{0.8}$					
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
0.52	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.53	0.005	0.006	0.008	0.009	0.010	0.012
0.54	0.009	0.012	0.015	0.017	0.020	0.022
0.55	0.013	0.017	0.021	0.024	0.028	0.032
0.56	0.016	0.021	0.026	0.030	0.035	0.039
0.57	0.020	0.025	0.031	0.036	0.041	0.047
0.58	0.024	0.030	0.037	0.043	0.049	0.056
0.59	0.027	0.034	0.042	0.049	0.056	0.064
0.60	0.031	0.039	0.048	0.056	0.064	0.073
0.61	0.036	0.046	0.056	0.065	0.075	0.085
0.62	0.048	0.061	0.074	0.086	0.099	0.112
0.63	0.056	0.071	0.086	0.101	0.116	0.130
0.64	0.052	0.066	0.081	0.085	0.109	0.123
0.65	0.035	0.045	0.055	0.064	0.074	0.083
0.66	0.021	0.027	0.033	0.038	0.044	0.050
0.67	0.016	0.021	0.026	0.030	0.035	0.039
0.68	0.015	0.019	0.023	0.027	0.031	0.035
0.69	0.015	0.019	0.024	0.027	0.031	0.035
0.70	0.017	0.022	0.027	0.031	0.036	0.041
0.71	0.020	0.026	0.032	0.037	0.043	0.048
0.72	0.026	0.033	0.040	0.047	0.054	0.060
0.73	0.031	0.039	0.048	0.056	0.064	0.073
0.74	0.034	0.043	0.052	0.061	0.071	0.080
0.75	0.027	0.034	0.042	0.049	0.056	0.064
0.76	0.020	0.025	0.031	0.036	0.041	0.047
0.77	0.014	0.018	0.022	0.025	0.029	0.033

0.78	0.006	0.008	0.010	0.011	0.013	0.015
0.79	0.002	0.003	0.004	0.004	0.005	0.006
0.80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

В соответствии с данными Таблицы 2 на рис.7, графически представлено изменение оптической плотности аэрозолей с длиной волны  $\lambda$ , вызванное поглощением излучения смешанными аэрозолями (континентальными и морского происхождения) в спектральном диапазоне 0.52-0.80 мкм.

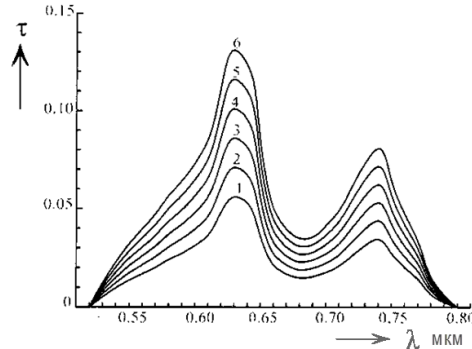


Рис.7. Функция поглощения оптической плотности аэрозолей в спектральном диапазоне 0.52-0.80 мкм, когда оптическая плотность рассеяния при  $\lambda=0.8$  мкм равна : 0.05 (1); 0.10 (2); 0.15 (3); 0.20 (4); 0.25 (5) и 0.30 (6).

Таким образом, в морской береговой зоне величина уменьшения лучистой энергии солнца в спектральном диапазоне 0.52-0.80 мкм, может быть определена с помощью Таблицы 2 или графическим представлением на рис.7. Для этого должно быть известно значение оптической плотности аэрозолей, соответствующее длине волны  $\lambda=0.8$  мкм.

#### ლიტერატურა – REFERENCES - ЛИТЕРАТУРА

1. Шифрин К.С. Рассеяние света в мутной среде. М., Гостехиздат, 1951, с. 288.
2. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами, М., Изд-во Иностран. Лит., 1961, (536).
3. Кастров В.Г. Исследование поглощения солнечной радиации в свободной атмосфере до 3 – 5 км, Труды ЦАО, 1952, вып. 8 (3-26).
4. Лившиц Г.Ш. Определение аэрозольного поглощения в ультрафиолетовой области спектра на основе двухслойной атмосферы, Изв.АН СССР, ФАО, 1979, 15, 9 (990-993).
5. Розенберг Г.В., Любовева Ю.С., Горчаков Г.И. Фоновый аэрозоль Абастумани, Изв. АН СССР, 1982, 18, 8 (822-839).
6. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И., Поздняков Д.В. Атмосферный аэрозоль, Л., Гидрометеиздат 1983, (224).
7. Pritchard B.S., Elliott W.G. Two instruments for atmospheric optical measurements, J. Opt. Soc. America, 1960, 50, 3 (191-198).
8. Chin-I Lin, Bacher M., Charison R.I. Absorption coefficient of atmospheric aerosol; method for measurement, Appl.Opt., 1973, 12, 6 (1356-1363).
9. Park J.H., London T. Ozone photochemistry and radiative heating of the middle atmosphere. J. Atmos. Sci., 1974, 10 (1898-1916).
10. Таварткиладзе К.А. Моделирование аэрозольного ослабления радиации и методы контроля загрязнения атмосферы. Мецნიერება, Тбилиси, 1989, (203).
11. Физическая оптика. Термины, буквенные обозначения и определения основных величин ГОСТ 7601-78, М., Изд-во стандартов 1979, (27).

**ზღვის სანაპირო ზონაში ატმოსფერული აეროზოლების სელექტიური შთანთქმა 0.52-0.80 მკმ სპექტრულ დიაპაზონში.** /თავართქილაძე კ., ბოლაშვილი ნ., ბეგალიშვილი ნ./სტუ-ს ჰმი-ის სამეცნ. რეგ. შრ. კრებ. - 2018. - ტ.125. - გვ.39-46. - რუს.; რუზ.: ქართ., ინგლ., რუს. შესწავლილია ზღვის სანაპირო ზონაში კონტინენტური და ზღვისმიერი წარმოშობის ატმოსფერული აეროზოლების ოპტიკური თვისებები, კერძოდ სპექტრულ დიაპაზონში 0.52-0.80 მკმ აეროზოლების შთანთქმის ფუნქცია. საფუძვლად უდევს წლების მანძილზე კომპლექსური ექსპედიციების დროს, აღნიშნული სპექტრული დიაპაზონის შიგნით 8 უბანზე, ინტერფერენციული შუქფილტრების გამოყენებით მიღებული მზის პირდაპირი რადიაციის მნიშვნელობები (2500-ზე მეტი შემთხვევა). პარალელურად იზომებოდა ატმოსფეროში წყლის ორთქლის ვერტიკალური განაწილება და ოზონის შემცველობა. აღნიშნული დიაპაზონის საწყის და ბოლო უბნებზე (სადაც შთანთქმას ადგილი არ ქონდა) მიღებული აეროზოლების ოპტიკური სიმკვრივეებიდან განისაზღვრებოდა ანგსტრემის ფორმულის ემპირიული კოეფიციენტები და ისინი საშუალებას იძლეოდნენ დიაპაზონის შიგნით რვა უბანზე დაგვედგინა აეროზოლების შთანთქმის ფუნქცია

**Selective Absorption of the Atmospheric Aerosols of Sea Coast Zone in 0.52-0.80 Microns Spectral Range.**  
/Tavartkiladze K., Bolashvili N., Begalishvili N./Transactions of the IHM at the GTU. - 2018. - vol.125. - pp.40-47. - Rus.;  
Summ: Georg., Eng., Rus.

The optical properties of mixed (continental and marine origin) atmospheric aerosols in the coastal zone have been studied, in particular, absorbing function the aerosols in 0.52 - 0.80 micrometer spectral range. Over the years, more than 2,500 complex expeditions were carried out, during which in 28 spectral regions the spectral composition of direct solar radiation with the help of optical filters in a 0.341 to 1067 micrometer spectral range were measured. At the same time, the vertical distribution of water vapor in the atmosphere and the total amount of ozone were also measured.

The empirical coefficients of the Angstrom formula were determined from the optical density at the beginning and at the end of the spectral range (where no absorption was observed), and they made it possible to determine the aerosol absorption function at 8 points of this range.

**Селективное поглощение атмосферных аэрозолей морской береговой зоны в спектральном диапазоне 0.52-0.80 МКМ./** Таварткиладзе К.А., Болашвили Н.Р., Бегалишвили Н.А./ Сб. Трудов ИГМ ГТУ-а. - 2018. - вып.125. - с.40-47. - Рус.; Рез: Груз., Англ., Рус.

Изучены оптические свойства смешанных (континентальных и морского происхождения) аэрозолей в морской береговой зоне, в частности, функция поглощения аэрозолей в спектральном диапазоне 0.52 – 0.80 мкм. На основе данных более 2500 комплексных экспедиций, проведенных в течении многих лет, с помощью интерференционных светофильтров измерялся спектральный состав прямой солнечной радиации в 28 спектральных областях в спектральном диапазоне 0.341-1.067 мкм. Параллельно измерялись вертикальное распределение в атмосфере водяного пара и общее количество озона. Из оптической плотности в начале и в конце спектрального диапазона (где поглощение не наблюдается) определялись эмпирические коэффициенты формулы Ангретра и они давали возможность определить функцию аэрозольного поглощения на 8 точках указанного диапазона