

**Х.С. Сахсаманоглу**

## **ПАРАМЕТРЫ МУТНОСТИ АТМОСФЕРЫ В АФИНАХ И САЛОНИКАХ**

Атмосфера над большими греческими городами, особенно над Афинами и Салониками, за последние годы сильно отягощена твердыми и газовыми аэрозолями в результате неадекватного городского планирования и климатических условий в сочетании с морфологией рельефа местности, где расположены эти города.

В Афинах показатель мутности Линке меньше 5 только в течение нескольких дней в году. В Салониках этот показатель имеет значения много больше 5 при очень большом проценте повторяемости только в период теплого сезона. Та же самая картина и с коэффициентом мутности Ангстрема. Показано, что твердые аэрозоли малого размера преобладают в Салониках, в то время как в Афинах они крупного размера. К такому же заключению привело исследование показателя мутности Линке и для определенных областей спектра.

### **1. Введение**

За последние годы атмосфера над многонаселенными греческими городами, такими как Афины и Салоники, оказалась сильно загрязненной твердыми и газовыми аэрозолями. Очевидно, это произошло в результате проживания большей части населения в районах города с узкими улицами и интенсивным транспортным движением. Кроме того, необходимо отметить, что большие и малые промышленные объекты расположены близко или даже в черте городов и население Афин составляет четыре миллиона, а Салоник – один миллион. На загрязнение атмосферы влияет также морфология рельефа местности данных городов в сочетании с климатическими условиями, преобладающими в главных районах города [1]. Уровень загрязнения в Афинах столь высок, что атмосфера больше не в состоянии очистить саму себя [2].

В данной статье сделана попытка дать расчет атмосферного загрязнения в Афинах и Салониках на основании параметров, значения которых зависят от прямой солнечной радиации, измеренной в этих городах. То есть на основании ослабления прямого полного и спектрально-го солнечного излучения мы рассчитаем степень атмосферного загрязнения, особенно твердыми аэрозолями.

### **2. Исходные данные и метод решения**

Исходные данные для оценки соответствующих параметров, в сущности, представляют собой измерения прямой солнечной радиации, взятые в национальной обсерватории в Афинах ( $\lambda = 23^{\circ}43' \text{ В}$ ,  $\varphi = 37^{\circ}18' \text{ С}$ ,  $H = 107 \text{ м}$ ) и на станции измерения солнечной радиации Аристотелевского университета в Салониках ( $\lambda = 22^{\circ}57' \text{ В}$ ,  $\varphi = 37^{\circ}18' \text{ С}$ ,  $H = 47 \text{ м}$ ). Измерения относятся к периоду 1986–1990 гг. В Афинах они сделаны в 11 ч 20 мин, а в Салониках – между 11-ю и 14-ю ч (время в обоих случаях местное). Оценка атмосферного загрязнения в основном твердыми аэрозолями была сделана с использованием двух параметров: показателя мутности Линке и коэффициента мутности Ангстрема. Значения этих параметров были определены как для всего спектра, так и для отдельных спектральных областей. Области спектра, для которых мы нашли показатель мутности Линке, составляют 300–525, 525–630, 630–710 и 710–2700 нм. Для этого мы использовали значения прямой солнечной радиации, измеренной фильтрами: кварц, 061, RG2 и RG8. Первая и третья спектральные области использованы для определения коэффициента мутности Ангстрема и показателя волновой мутности.

Оценка показателя мутности Линке была сделана при определенных условиях [3, 4]. В чистой атмосфере, т.е. без водных паров, тумана и других абсорбентов, наблюдение прямой солнечной радиации описывается коэффициентом рэлеевского рассеяния  $\sigma_r$ , заданным соотношением

$$\sigma_{\lambda} = 0,00879 \lambda^{-4,09} . \quad (1)$$

Следовательно, с одной стороны, интенсивность прямого солнечного излучения, достигающего земли через оптическую толщину, получается в виде

$$I_{\tau} = \int_0^{\infty} I_{0\lambda} 10^{-\alpha} d\lambda , \quad (2)$$

где  $\alpha = \sigma_{\kappa}$ . С другой стороны, в реальной замутненной атмосфере интенсивность прямого солнечного излучения, достигающего земли при прохождении через оптическую толщину  $m$ , будет определяться соотношением

$$I = I_0 10^{-m \sigma(m) T} , \quad (3)$$

где  $T$  – показатель мутности Линке;  $\sigma(m)$  – коэффициент среднего ослабления прямого солнечного излучения по всей полосе спектра. Отсюда следует, что показатель мутности  $T$  будет определяться выражением:

$$T = P(m) [\log I_0 - \log I - 2 \log D] , \quad (4)$$

где  $P(m) = [m \sigma(m)]^{-1}$  вычисляется [5] из соотношения

$$P(m) = 22,64 m^{-0,801} \text{ для } 1 \leq m \leq 4 , \quad (5)$$

а  $D$  – это расстояние от Земли до Солнца на момент измерения в астрономических единицах.

Показатель мутности  $T$  выявляет количество чистых газовых сред, вызывающих такое же ослабление солнечной радиации, как и реальная атмосфера.

Оценки коэффициента мутности Ангстрема и волнового показателя также были сделаны при определенных условиях [6, 7].

Эффективная длина волны  $\lambda_{\text{эф}}$  соответствует каждой спектральной полосе. Следовательно, интенсивность  $I$  прямой солнечной радиации в какой-либо спектральной полосе, зарегистрированная пиргелиометром для оптической толщины  $m$ , можно выразить соотношением

$$I = I_0 \exp [ - \beta_m / \lambda^{-1,3} ] , \quad (6)$$

где  $I_0$  – мощность солнечного излучения на верхней границе атмосферы;  $\lambda$  – эффективная длина волны;  $\beta$  – коэффициент мутности Ангстрема для данной полосы спектра.

Для полосы 300–525 нм эффективная длина волны равна 455 нм, а мощность облученности –  $313 \text{ Вт} / \text{м}^2$ . Для участка спектра 630–710 нм эффективная длина волны равна 669 нм, а мощность облученности –  $127 \text{ Вт} / \text{м}^2$ . Используя выражение (6), определим коэффициенты  $\beta_1$  и  $\beta_2$  для участков спектра 300–525 и 630–710 нм. Наконец, из соотношения

$$\log (\beta / \beta_2) = 1,041 \log (\beta_2 / \beta_1) \quad (7)$$

получим истинный коэффициент  $\beta$ . Зная коэффициенты  $\beta_1$  и  $\beta_2$ , вычислим показатель длины волны  $\lambda$  из формулы

$$\alpha = 1,3 - 5,94 \log (\beta_2 / \beta_1) . \quad (8)$$

В соответствии с теорией Юнга значения показателя длины волны будут меняться между 1,0 и 2,0. Реально, однако, эти значения получились много больше 5,0, когда основной размер твердых аэрозолей в атмосфере был очень малым. Наоборот, отрицательные значения показателей длины волны были получены в случае преобладания в атмосфере твердых аэрозолей очень больших размеров.

### 3. Коэффициенты мутности, полученные в Афинах и Салониках

#### а) Показатель мутности Линке

Используя выражения (4) и (5), мы нашли значения показателей мутности Линке  $T$  (ПМЛ) как для всего спектра, так и для отдельных полос: 300–525, 630–710 и 710–2700 нм. Исследование этих значений ПМЛ дали следующие результаты.

Годичные вариации ПМЛ проявляют свой максимум во время теплого сезона. Такой факт ожидался, поскольку в это время года климатические условия, преобладающие на основной территории Греции, способствуют накоплению в атмосфере большого количества твердых аэрозолей. Частые антициклональные ситуации или ситуации с очень малой скоростью изменения температуры характерны для летнего климата Греции. Еще один характерный факт – низкая частота выпадения осадков в Греции в летний период. Среднемесячные значения показателя в обоих городах оказались высокими. В Афинах значения этого показателя в среднем выше, чем в Салониках, приблизительно на 2 единицы, а среднемесячные значения ПМЛ больше 5 на протяжении всего года. В Салониках, наоборот, среднемесячный ПМЛ превышает значение 5 только в период май–октябрь (табл. 1). На июль приходится наиболее высокая средняя величина показателя, которая в Афинах достигает 9, а в Салониках – 6,5.

Таблица 1

Статистический анализ значений показателя мутности Линке ( $T$ )

	Янв.	Февр.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.
Средние значения												
Афины	5,67	6,38	7,58	7,86	8,21	8,11	8,85	8,41	7,98	7,33	6,15	5,64
Салоники	3,88	4,64	4,98	4,74	6,07	5,84	6,53	6,14	5,70	5,02	3,64	3,49
Разница	1,79	1,74	2,68	3,12	2,14	2,27	2,32	2,27	2,28	2,31	2,51	2,15
Коэффициент вариации (%)												
Афины	12,3	12,4	16,9	14,2	15,4	12,0	12,4	12,9	12,6	16,7	14,8	9,4
Салоники	23,6	18,6	20,3	24,3	16,4	20,0	20,1	19,8	17,8	21,0	22,0	14,8
Максимальные значения												
Афины	7,7	7,8	11,5	11,3	12,7	10,5	11,7	10,9	11,1	11,5	9,4	7,1
Салоники	6,2	6,9	8,0	7,8	8,9	10,3	10,5	9,2	7,4	7,1	6,1	5,1
Минимальные значения												
Афины	4,6	5,0	5,7	6,2	6,3	5,7	6,2	5,6	5,8	4,9	4,6	4,6
Салоники	2,0	2,7	2,3	3,2	4,2	4,2	4,3	4,0	3,1	3,1	2,5	2,1

Примечание. Коэффициент вариации равен отношению стандартного отклонения к среднему значению.

В Афинах зимой бывают дни, когда значения ПМЛ не достигают 5 и не бывает дней с величиной ПМЛ меньше 3-х. В летние месяцы не отмечено дней со значениями ПМЛ меньше 5 (табл. 2). В Салониках 20% зимних дней, когда значения ПМЛ меньше 3-х. Однако с октября по апрель большинство дней имеет значение ПМЛ меньше 5. Это означает, что в Салониках в течение этого периода 15 дней в месяц имеют значения ПМЛ меньше 5. Самый неблагоприятный день в Афинах был в мае, когда значение ПМЛ достигало 12,7. В Салониках это произошло в июле, когда величина ПМЛ равнялась 10,5.

Сравнивая среднемесячные значения ПМЛ в Афинах за период 1963–1972 гг. [8, 9] с соответствующими значениями изучаемого периода, обнаруживаем, что сегодня в Афинах значения ПМЛ увеличились по меньшей мере на 2 единицы зимой и на 3 единицы летом. Мутность атмосферы в Афинах в 60-х годах была немного меньше той, которая преобладает сегодня в Салониках. Из-за отсутствия данных относительно мутности атмосферы над Салониками до изучаемого периода мы не можем провести такого же сравнения, как для Афин.

Коэффициент вариации значений ПМЛ в Афинах составляет приблизительно 2–13%, в то время как в Салониках – около 20% (табл. 1). Представляется, что атмосферная мутность в Афинах проявляет большую стабильность, чем в Салониках.

Чтобы обнаружить большие различия между показателями мутности Линке, зарегистрированные в Афинах и Салониках за исследуемый период, мы провели гармонический анализ [10] средних значений ПМЛ для 73 пятидневных периодов года для обоих городов. Пятидневные периоды были выбраны из-за некоторого отсутствия данных дневной солнечной радиации. Анализ дал следующую информацию для первых трех гармоник (рис. 1). Амплитуды

соответствующих гармоник для обоих городов почти одинаковы. Для Афин первые три гармоники ответственны за общее изменение ПМЛ при 85, 5 и 1% соотношений (вкладе) для каждой гармоники соответственно. В Салониках эти соотношения были 81, 5 и 1%. В Афинах гармоники достигают своих максимальных значений 2-го июля, 17-го и 25-го марта. Соответствующие даты для Салоников – 5-го июля, 5-го марта и 14-го февраля. Эти даты находятся в пределах пятидневного приближения. Следовательно, различия в значениях ПМЛ для обоих городов в основном зависят от постоянных факторов, таких как человеческая деятельность, и в значительно меньшей степени от межгодовых вариаций, вызываемых такими факторами, как атмосферная циркуляция в греческом регионе.

Таблица 2

Распределение (%) по классам значений показателя мутности Линке ( $T$ )

А Ф И Н Ы												
$T$	Янв.	Февр.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.
3										1	3	9
5	84	75	30	27	16	13	5	8	18	48	91	89
7	6	25	57	49	58	70	50	62	67	42	3	2
9			11	22	23	17	41	30	14	8	3	
11			2	2	3		4		1	1		
С А Л О Н И К И												
3	19	3	3							1	25	18
5	67	65	51	64	19	30	14	20	31	54	69	81
7	14	32	45	29	60	52	49	53	52	43	6	1
9			1	7	21	17	35	25	17	2		
11						1	2	2				

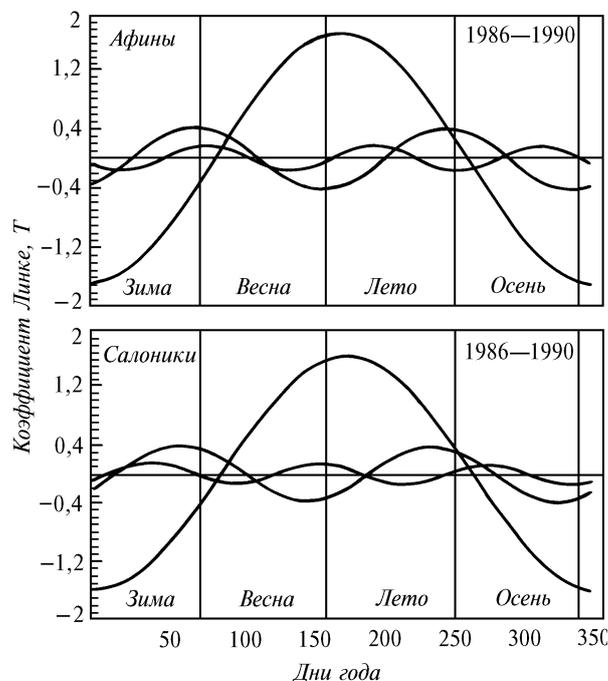


Рис. 1. Гармонический анализ годовой вариации показателя мутности Линке  $T$  (первые три гармоники)

При сравнении среднемесячных значений ПМЛ для вышеуказанных областей спектра оказалось, что они очень большие для полосы 300–525 нм (первый участок спектра) в обоих городах, причем в Салониках они немного больше, чем в Афинах (рис. 2). Для второго и третьего участков спектра значения ПМЛ в Афинах почти такие же или ниже на 2 единицы соответствующих значений третьего участка. Для Салоников, наоборот, значения ПМЛ для второго участка спектра ниже соответствующих значений первого участка на 4 единицы и выше на 4 единицы значений ПМЛ третьего участка спектра. Следует заметить, что значения ПМЛ для третьего спектрального участка очень малы (2,5–3,5 единицы) по сравнению со значениями ПМЛ других участков и значениями того же участка для Афин. Касаясь значений ПМЛ для четвертого участка спектра, замечаем, что между Афинами и Салониками есть разница в 2,5 единицы, которая, возможно, обусловлена только твердым аэрозолем, поскольку средние значения осадков в обоих городах почти одинаковы. Анализ значений ПМЛ показал, что они, по-видимому, имеют тенденцию снижаться от первой к четвертой спектральной полосе, т.е. в Афинах наблюдается равномерное изменение ПМЛ в атмосфере, по крайней мере, для видимого диапазона солнечного спектра. Напротив, в Салониках значения ПМЛ демонстрируют сильное уменьшение, идущее от первого к третьему участку спектра. Это значит, что в атмосфере обсуждаемых городов большая часть твердых аэрозолей имеет очень малый размер. В Афинах ситуация иная. А именно, коэффициент вариации значений ПМЛ проявляет единообразие в видимой части солнечного спектра (рис. 3) с максимумом в марте. В Салониках в видимой части спектра мы отмечали постоянное увеличение коэффициента вариации, идущее от малых к большим длинам волн. Наивысшие значения мы зарегистрировали в апреле (коэффициент вариации есть стандартное отклонение, деленное на среднее значение). Значения ПМЛ также даны для рэлеевской атмосферы (рис. 2), чтобы представить еще одно измерение атмосферного загрязнения.

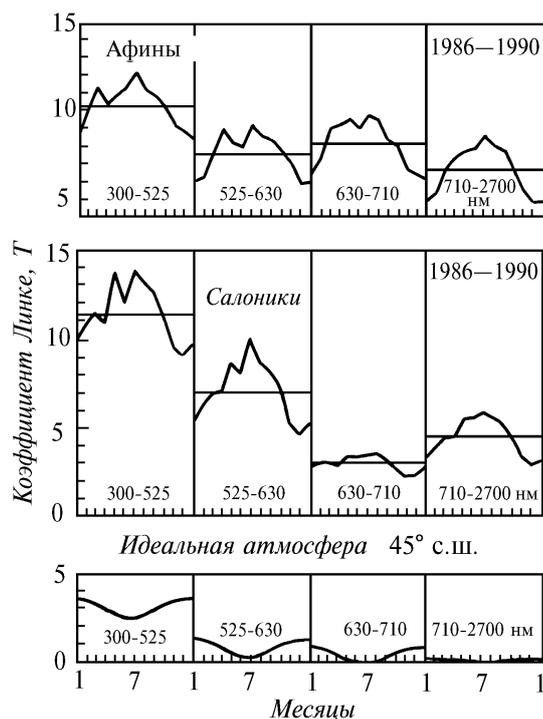


Рис. 2. Годовая вариация показателя мутности Линке  $T$  для четырех спектральных областей

б) Коэффициент мутности Ангстрема

Используя соотношение (6), мы определили коэффициенты мутности  $\beta_1$  и  $\beta_2$  для спектральных полос 350–525 и 630–710 нм. По формуле (7) мы вычислили истинный (реальный) коэффициент мутности Ангстрема  $\beta$  для спектрального участка 300–710 нм. Наконец, используя выражение (8), мы нашли показатель длины волны  $\alpha$  для той же полосы спектра.

Анализ результатов выявил, что значения  $\beta_1$  в Салониках несколько больше, чем значения  $\beta_1$  в Афинах, особенно во время теплого сезона. Однако в Афинах значения коэффициента  $\beta_2$  вдвое больше, чем в Салониках в холодный период года и в три раза больше во время теплого периода (рис. 4). То же самое подтверждается значениями ПМЛ для двух первых спектральных участков.

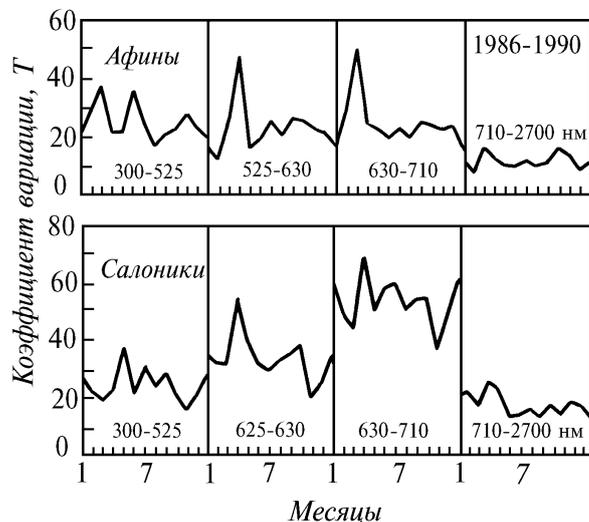


Рис. 3. Годовая вариация коэффициента вариации показателя мутности Линке  $T$  для четырех спектральных областей

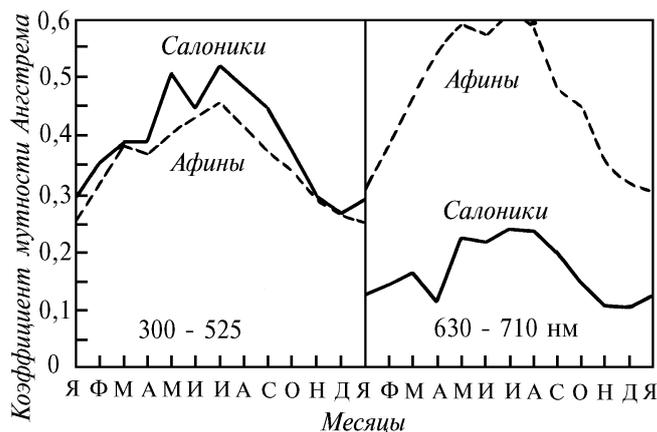


Рис. 4. Годовая вариация коэффициентов мутности Ангстрема  $\beta_1$  и  $\beta_2$

Реальный коэффициент мутности Ангстрема  $\beta$  в Салониках имеет в целом низкие значения почти на протяжении всего года (рис. 5). В Афинах коэффициент имеет более высокие значения, которые летом увеличиваются вдвое по сравнению с зимой. В Салониках значение  $\beta$  меняется от 0 до 0,2 (табл. 3), что в процентном отношении более 80%. В Афинах значения  $\beta$  имеют очень большой разброс. Так, зимой они варьируют между 0,2 и 0,6, а летом выходят за пределы значения 0,8, что превышает 50%.

Показатель длины волны  $\alpha$  имеет очень малые значения в Афинах и очень большие в Салониках. В Афинах показатель длины волны во многих случаях отрицателен (табл. 4). В январе количество дней с отрицательными значениями показателя длины волны составляет 5%, в то время как в июне – 32%. В Салониках дни с отрицательным значением этого показателя очень редки [11]. Самое большое процентное отношение значений показателя длины волны находится между 0 и 2 для Афин и между 2 и 6 для Салоников.

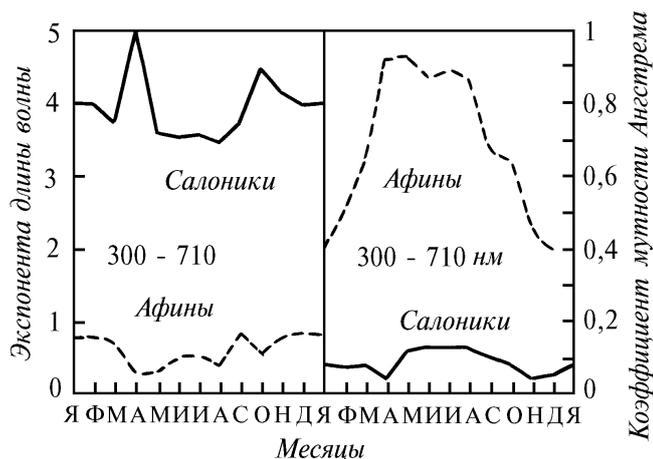


Рис. 5. Годовая вариация реального коэффициента мутности Ангстрема  $\beta$  и показателя длины волны  $\alpha$

Таблица 3

Распределение по классам значений реального коэффициента мутности Ангстрема  $\beta$

А Ф И Н Ы												
$\beta$	Янв.	Февр.	Март	Апр.	Май	Июнь.	Июль.	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.
0,2	10		11			3	4		4		6	4
0,4	44	42	7	9	2	5	1	2	7	14	29	50
0,6	38	38	22	9	11	13	8	7	22	40	59	38
0,8	8	10	33	33	27	17	23	36	43	21		8
1,0			22	27	27	18	29	24	15	19		
		10	4	21	33	43	35	30	9	7	6	
С А Л О Н И К И												
0,2	92	95	95	99	86	85	83	87	92	96	100	93
0,4	3	3	4	1	10	10	14	9	7	3		7
0,6	4	2	1		3	3	2	4	1			
0,8					1		1					
1,0						1						
	1					1				1		

Разные значения  $\alpha$  и  $\beta$ , зарегистрированные в Афинах и Салониках, объясняются тем, что коэффициент  $\beta$  и показатель  $\alpha$  зависят от отношения  $\beta_2 / \beta_1$ . В Салониках это отношение меньше единицы, в то время как в Афинах оно превышает единицу. Поэтому десятичный логарифм этого отношения отрицателен для Салоников и положителен для Афин. Весьма большие значения показателя длины волны  $\alpha$  в Салониках обусловлены тем, что большая часть твердых аэрозолей в атмосфере этого города имеет очень малые размеры. Это подтверждается и техническими отчетами общественных институтов. В Афинах очень малые значения  $\alpha$  обусловлены тем, что твердые аэрозоли в этом городе имеют весьма большие размеры (например, угольная пыль).

Распределение (%) по классам значений показателя длины волны Ангстрема  $\alpha$ 

А Ф И Н Ы												
$\alpha$	Янв.	Февр.	Март	Апр.	Май	Июнь.	Июль.	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.
0	5	10	22	30	29	32	16	16	10	14	6	4
+2	87	85	67	64	69	62	79	84	84	84	94	92
+4	8	5	11	6	2	3	4		3	2		4
+6						3	1		1			
									1			
С А Л О Н И К И												
0	1					1				1		
+2	6	5	6		7	8	5	6	6	5		10
+4	41	62	58	30	62	65	72	77	62	51	55	39
+6	45	25	30	45	29	18	19	13	24	28	36	41
	7	8	6	25	2	8	4	4	8	15	9	10

#### 4. Заключение

Атмосфера над Афинами характеризуется большими концентрациями твердых аэрозолей, поэтому показатель мутности Линке  $T$  имеет весьма большие значения. Только несколько дней в году в этом городе значение  $T$  меньше 5. В Салониках ситуация в этом плане несколько лучше. В этом городе в холодное время года процент дней, когда значение  $T$  больше 5, в целом мал. Картина меняется на обратную во время теплого сезона, когда этот процент возрастает до 70%. В Салониках твердые аэрозоли вызывают большое ослабление солнечной радиации для коротковолновой части спектра и малое ослабление в длинноволновом диапазоне. В Афинах ослабление солнечного излучения почти одинаково для всех областей спектра. Возможно, это связано с размерами твердых аэрозолей, преобладающих в атмосфере обоих городов, а именно большими размерами в Афинах и малыми в Салониках.

Реальные значения коэффициента мутности Ангстрема  $\beta$  в целом высокие и довольно разбросанные, особенно летом, когда 50% значений  $\beta$  превышают 0,8. В Салониках, наоборот, значения  $\beta$  невысокие, и 80% из них не достигают 0,2. Волновой показатель Ангстрема  $\alpha$  имеет малые значения в Афинах и большие в Салониках. Это также обусловлено различием в размерах твердых аэрозолей над Афинами и Салониками.

1. Katsolius B. D. // Atmospheric turbidity at Athens Observatory, Pageoph., 1977. V. 115. P. 583–591.
2. Sahsamanoğlu H. S., Bloutsos A. A. Cleansing of the atmosphere in the Athens area by means of rainfall and wind. Energy and Buildings. Lausanne: Elsevier Sequoia S.A., 1982. P. 125–128.
3. Kondratyev K. Ya. Radiation in the atmosphere. N. York: Academic Press, 1969. 912 p.
4. Coulson K. L. Solar and Terrestrial Radiation. N. York: Academic Press, 1975. 322 p.
5. Sahsamanoğlu H. S., Bloutsos A. A. Solar radiation reduction by water dust in the area of Thessaloniki. Solar Energy, 1989. V. 43 (5). P. 301–304.
6. Angstrom A. // Tellus. 1961. V. XIII. P. 214–223.
7. Angstrom A. // Tellus. 1964. V. XVI. P. 64–75.
8. Karalis J. D. Study of atmospheric turbidity in Athens by Linke's factor. Abstracts of the Greek Science Academy, 1973. V. 48. P. 261–272.
9. Katsolius B. D., Tselepidaki I. G. Monthly variations and trends of atmospheric turbidity in Athens. Zeit. für Meteorologie., 1986. V. 36. P. 255–258.
10. Panofsky H. A., Brier G. W. Some applications of Statistics to Meteorology. Pennsylvania: University Park, 1968. 224 p.
11. Sahsamanoğlu H. S., Makrogiannis T. J., Hatzigiannoglou M. P. Effect of air pollutants on direct solar radiation reaching the city centres of Thessaloniki and Athens. Annual Conference of KRIKOS organization: Restoration and protection of the environment in the 90 s. Thessaloniki, Greece, August 19–21. 1992.

H. S. Sahsamanoğlu. **Parameters of Atmospheric Turbidity in Athens and Thessaloniki.**

The atmosphere over big Greek cities, especially Athens and Thessaloniki, has been recently burdened extensively by solid and gas aerosols. This has been the effect of the inadequate town planning and the climatological conditions in the area, in combination with the morphology relief surrounding these cities.

In Athens, the Linke turbidity factor is less than 5 only during a few days around the year. In Thessaloniki the same factor has values greater than 5 at a very large percentage, only during the warm semester. The picture of the Angstrom turbidity coefficient is the same. The Angstrom wavelength exponent shows that solid aerosols of small size are predominant in Thessaloniki, while large sizes are predominant in Athens. The study of the Linke turbidity factor for specific spectral bands has led to the same conclusions.