

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И КОНТРОЛЮ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

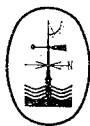
ТРУДЫ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
им. А. И. ВОЕЙКОВА

Выпуск

472

АКТИНОМЕТРИЯ,
АТМОСФЕРНАЯ ОПТИКА
И ОЗОНОМЕТРИЯ

Под редакцией
д-ра техн. наук Г. П. ГУЩИНА



ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1984

В сборнике публикуются работы по методике измерений, обработки, контроля и результатам измерения отдельных составляющих радиационного баланса, спектральной прозрачности атмосферы и аэрозоля, дальности видимости и общего содержания атмосферного озона.

Сборник предназначен для научных работников и специалистов в области физики атмосферы.

The publication contains works on the procedures for measurements, processing and control as well as on measurement results of individual components of the radiation balance, the spectral transparency of the atmosphere and aerosol, visibility range and the total content of atmospheric ozone.

The publication is meant for researchers and specialists in atmospheric physics.

325661

Е. П. Барашкова, В. Н. Цветкова

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ (по наблюдениям в Чарджоу)

Для решения ряда прикладных задач атмосферной оптики необходимы данные о спектральной прозрачности атмосферы. С 1968 г. Главная геофизическая обсерватория приступила к организации на территории СССР сети станций, которые должны проводить систематические измерения, позволяющие определять коэффициент спектральной прозрачности атмосферы P_λ [1]. В настоящее время действует 28 таких станций, результаты наблюдений которых за период с 1972 по 1978 г. опубликованы в справочниках [5—7], где приведены средние за день значения $P_{\lambda\text{ ср}}$ и показателя аэрозольного ослабления δ_λ для шести длин волн (344, 369, 463, 530, 572, 627 нм). Способ производства и обработки наблюдений изложен в Методических указаниях [4].

Для практических целей удобнее пользоваться не данными за отдельные дни, а результатами статистических обобщений за весь период наблюдений. В настоящей статье и предпринята попытка некоторых статистических обобщений на основании результатов наблюдений в Чарджоу (1972—1977 гг.). Этот пункт был выбран потому, что там отмечается большое количество ясных дней, а следовательно, имеется сравнительно большое число наблюдений за спектральной прозрачностью атмосферы.

Первичная обработка материала наблюдений состоит в отыскании наибольшего и наименьшего значений наблюдаемой величины. Ограниченное число наблюдений не позволяет установить действительные пределы изменения P_λ , тем не менее приведенные в табл. 1 экстремальные значения P_λ за 6-летний период наблюдений представляют определенный интерес. В этой же таблице приведены и осредненные за 6 лет значения $\overline{P_{\lambda\text{ ср}}}$ для каждого месяца.

Из табл. 1 следует, что $\overline{P_{\lambda\text{ ср}}}$ имеет незначительный годовой ход (годовая амплитуда меняется от 0,05 для $\lambda=369$ нм до 0,09 для $\lambda=572$ нм), при этом наибольшая прозрачность отмечается

Годовой ход спектральной прозрачности атмосферы $\overline{P}_{\lambda \text{ ср.}} \cdot 10^2$

λ нм	$\overline{P}_{\lambda \text{ ср.}}$	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Экстремальные значения
344	Ср.	43	43	42	40	43	42	44	46	46	46	44	45	
	Макс.	50	51	52	50	50	49	53	54	55	54	51	51	55
	Мин.	33	35	28	30	33	35	27	32	36	35	31	36	27
369	Ср.	46	46	47	46	50	49	49	50	51	51	49	46	
	Макс.	54	56	56	58	65	56	56	58	59	62	56	57	65
	Мин.	28	30	34	35	34	37	31	35	41	39	33	42	28
463	Ср.	66	67	68	67	70	68	68	71	73	71	70	71	
	Макс.	78	77	79	85	88	79	79	80	87	87	80	92	92
	Мин.	51	49	51	47	52	54	43	52	57	59	47	54	43
530	Ср.	71	73	73	71	72	73	74	76	77	76	74	75	
	Макс.	81	89	84	91	83	85	86	86	91	91	84	83	91
	Мин.	51	50	57	49	54	53	55	59	60	62	49	58	49
572	Ср.	72	73	74	70	75	73	76	76	78	78	78	79	
	Макс.	86	84	87	91	92	85	90	87	90	88	86	89	92
	Мин.	56	52	56	47	59	56	48	56	63	62	50	66	47
627	Ср.	78	78	77	74	77	76	77	79	80	80	80	81	
	Макс.	90	90	88	93	92	86	90	91	91	90	90	91	93
	Мин.	56	53	56	49	61	59	59	59	64	68	53	65	49

в сентябре, наименьшая — в январе и апреле. Такой годовой ход является следствием изменений показателя аэрозольного ослабления [5—7].

В отдельные годы может наблюдаться более заметный годовой ход средних месячных величин, смещается и положение максимальных значений.

Из табл. 1 также следует, что в течение всего года наблюдается рост прозрачности атмосферы с увеличением длины волны λ .

На рис. 1 представлена зависимость средних за апрель и сентябрь (1972—1977 гг.) значений $\overline{P}_{\lambda \text{ ср.}}$ и коэффициента прозрачности аэрозольного слоя, рассчитанного на основании приведенных в [5—7] данных о показателе аэрозольного ослабления, от λ . Там же для сравнения приведены значения коэффициента спектральной прозрачности для идеальной атмосферы и для реальной атмосферы в Алма-Ате [3].

Наблюдаемая в Чарджоу зависимость $\overline{P}_{\lambda \text{ ср.}}$ от λ практически повторяет ход $P(\lambda)$ для идеальной атмосферы, хотя и отмечается существенное различие в абсолютных значениях. Уменьшение про-

зрачности аэрозольного слоя (кривые 5 и 6) в коротковолновом диапазоне спектра не вносит заметных изменений в спектральный ход прозрачности атмосферы в целом. Различие в прозрачности атмосферы в Чарджоу и Алма-Ате вызвано главным образом

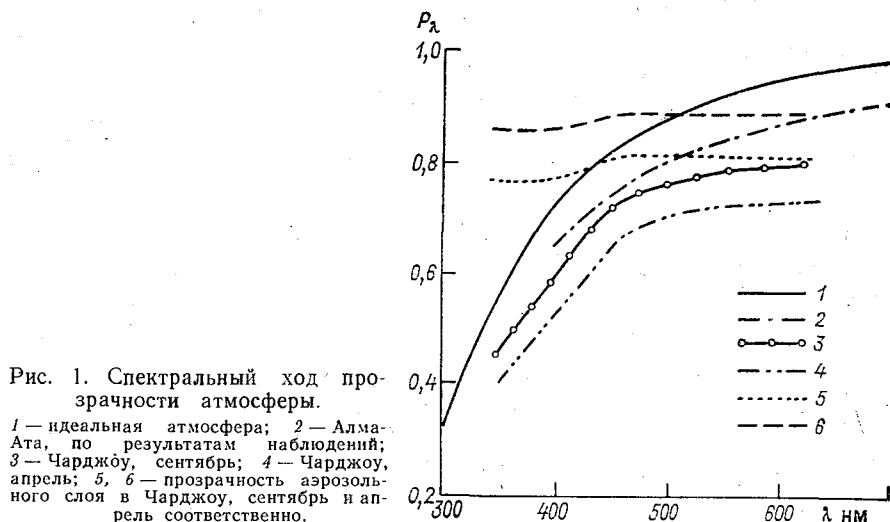


Таблица 2

**Корреляционная матрица коэффициентов прозрачности атмосферы
в различных участках спектра**

λ нм	344	369	463	530	572	627
Июнь						
344	1,00					
369	0,816	1,00				
463	0,743	0,695	1,00			
530	0,706	0,901	0,652	1,00		
572	0,659	0,907	0,691	0,942	1,00	
627	0,666	0,900	0,725	0,931	0,936	1,00
Декабрь						
344	1,00					
369	0,833	1,00				
463	0,713	0,664	1,00			
530	0,914	0,789	0,703	1,00		
572	0,834	0,842	0,715	0,877	1,00	
627	0,915	0,713	0,682	0,874	0,699	1,00

Повторяемость (%) коэффициентов спектральной прозрачности атмосферы по грациям

$P_{\lambda \text{ ср}}$	Зима	Весна	Лето	Осень	Год	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
	$\lambda = 344 \text{ нм}$					$\lambda = 369 \text{ нм}$				
0,25—0,30	—	1,4	0,3	—	0,4	1,7	—	—	—	0,2
0,30—0,35	1,4	7,0	1,5	1,4	2,6	1,7	1,9	0,7	0,6	1,1
0,35—0,40	17,7	28,6	14,4	11,5	16,7	7,0	6,7	3,7	1,7	4,2
0,40—0,45	45,5	39,9	45,5	33,0	40,4	19,2	26,0	12,4	11,0	15,9
0,45—0,50	34,0	22,6	34,4	47,2	36,1	43,1	29,7	38,2	33,1	35,6
0,50—0,55	1,4	0,5	3,9	6,9	3,8	25,6	30,5	39,2	40,4	35,7
0,55—0,60	—	—	—	—	—	1,7	2,6	5,8	12,9	6,6
0,60—0,65	—	—	—	—	—	—	2,6	—	0,3	0,7
	$\lambda = 463 \text{ нм}$					$\lambda = 530 \text{ нм}$				
0,40—0,45	—	—	0,2	—	0,1	—	—	—	—	—
0,45—0,50	1,7	0,4	0,2	0,3	0,5	0,6	0,4	0,2	0,3	0,3
0,50—0,55	2,3	2,6	2,1	0,6	1,8	1,7	0,8	0,5	—	0,6
0,55—0,60	5,8	10,4	7,4	3,9	6,8	2,3	5,9	2,8	0,8	2,8
0,60—0,65	21,5	20,1	19,2	11,8	17,6	9,3	12,1	7,0	4,8	7,7
0,65—0,70	34,4	25,7	27,6	25,3	27,4	18,6	21,1	16,3	13,8	16,9
0,70—0,75	24,4	27,0	30,2	32,2	29,3	32,1	26,2	26,6	21,1	25,6
0,75—0,80	9,3	10,0	13,1	23,3	14,8	26,7	27,2	33,5	37,6	32,6
0,80—0,85	—	1,9	—	2,0	1,0	7,0	5,1	12,6	16,3	11,3
0,85—0,90	—	1,9	—	0,6	0,6	1,7	0,8	0,5	4,2	1,8
0,90—0,95	0,6	—	—	—	0,1	—	0,4	—	1,1	0,4
	$\lambda = 572 \text{ нм}$					$\lambda = 627 \text{ нм}$				
0,45—0,50	—	0,4	0,2	—	0,2	—	0,4	0,2	—	0,2
0,50—0,55	1,2	—	0,2	0,3	0,3	1,2	—	—	0,3	0,2
0,55—0,60	2,9	3,7	1,2	0,3	1,7	1,2	0,7	0,7	—	0,6
0,60—0,65	4,7	10,4	7,5	2,6	6,3	2,9	6,3	3,7	2,0	3,7
0,65—0,70	15,1	21,6	15,2	6,8	14,1	2,9	14,9	11,3	5,4	9,2
0,70—0,75	31,9	25,7	21,0	18,4	22,8	17,4	21,6	21,1	15,8	19,1
0,75—0,80	29,1	25,9	32,5	34,6	31,3	28,5	26,4	26,4	26,4	26,7
0,80—0,85	13,4	7,8	19,6	33,6	20,2	27,3	23,0	27,1	31,7	27,6
0,85—0,90	1,7	3,0	2,6	3,4	2,8	18,0	4,5	9,3	18,1	12,0
0,90—0,95	—	1,5	—	—	0,3	0,6	2,2	0,2	0,3	0,7

Таблица 4

Статистические характеристики эмпирического распределения коэффициентов спектральной прозрачности атмосферы

Сезон	$P_{\lambda \text{ ср}}$	σ	M	m	A	E	N
$\lambda = 344 \text{ нм}$							
Зима	0,433	0,039	0,434	0,40—0,45	-0,29	-0,36	141
Весна	0,413	0,047	0,416	0,40—0,45	-0,40	-0,12	213
Лето	0,437	0,041	0,437	0,40—0,45	-0,32	0,33	389
Осень	0,448	0,042	0,454	0,45—0,50	-0,49	0,03	348
Год	0,436	0,044	0,438	0,40—0,45	-0,44	0,16	1091
$\lambda = 369 \text{ нм}$							
Зима	0,467	0,055	0,474	0,45—0,50	-1,02	1,57	172
Весна	0,474	0,058	0,476	0,50—0,55	-0,01	0,16	269
Лето	0,489	0,047	0,493	0,50—0,55	-0,06	0,62	429
Осень	0,501	0,048	0,505	0,50—0,55	-0,48	0,46	356
Год	0,486	0,052	0,490	0,45—0,55	-0,55	0,76	1226
$\lambda = 463 \text{ нм}$							
Зима	0,674	0,065	0,677	0,65—0,70	-0,29	1,45	172
Весна	0,680	0,071	0,682	0,70—0,75	0,06	0,10	269
Лето	0,682	0,063	0,688	0,70—0,75	-0,56	0,21	421
Осень	0,707	0,061	0,713	0,70—0,75	-0,46	0,32	356
Год	0,688	0,066	0,692	0,70—0,75	-0,33	0,35	1218
$\lambda = 530 \text{ нм}$							
Зима	0,721	0,069	0,727	0,70—0,75	-0,63	0,88	172
Весна	0,712	0,070	0,719	0,75—0,80	-0,36	0,08	256
Лето	0,734	0,065	0,744	0,75—0,80	-0,71	0,46	429
Осень	0,755	0,065	0,762	0,75—0,80	-0,38	0,74	356
Год	0,734	0,069	0,742	0,75—0,80	-0,52	0,52	1213
$\lambda = 572 \text{ нм}$							
Зима	0,737	0,065	0,741	0,70—0,75	-0,64	0,69	172
Весна	0,726	0,073	0,727	0,75—0,80	0,02	0,27	269
Лето	0,747	0,067	0,757	0,75—0,80	-0,57	0,14	429
Осень	0,744	0,065	0,781	0,75—0,80	-0,89	1,09	354
Год	0,749	0,068	0,757	0,75—0,80	-0,54	0,27	1224
$\lambda = 627 \text{ нм}$							
Зима	0,786	0,071	0,793	0,75—0,80	-1,01	1,61	172
Весна	0,757	0,073	0,762	0,75—0,80	-0,27	0,21	269
Лето	0,768	0,069	0,775	0,80—0,85	-0,64	0,71	429
Осень	0,792	0,063	0,800	0,80—0,85	-0,58	0,47	349
Год	0,775	0,070	0,782	0,80—0,85	-0,62	0,58	1219

различием высот над уровнем моря этих пунктов наблюдений (приблизительно 200 и 2000 м соответственно).

Для выявления возможной связи коэффициентов прозрачности в различных участках спектра были рассчитаны корреляционные матрицы по материалам наблюдений в июне и декабре (табл. 2). Во всех рассмотренных случаях коэффициенты корреляции $r > 0,6$ и в ряде случаев $r > 0,9$. Более низкие значения коэффициентов корреляции, вероятно, вызваны тем, что в этих случаях в рассматриваемых участках спектра действуют разные причины ослабления радиации.

Более полное представление о совокупности значений коэффициентов спектральной прозрачности, чем табл. 1, дают табл. 3 и 4. В табл. 3 для каждой градации ($\Delta P_{\lambda \text{ ср}} = 0,05$) дано число случаев в процентах от общего числа наблюдений как для отдельных сезонов, так и для всего года в целом. В табл. 4 приведены основные статистические характеристики представленных в табл. 3 распределений: средний за сезон коэффициент прозрачности $\bar{P}_{\lambda \text{ ср}}$, среднее квадратическое отклонение σ , медиана M , интервал с модальными значениями m , коэффициенты асимметрии A и эксцесса E ; N — число случаев, использованных для расчета параметров.

Из табл. 3 и 4 следует:

1. Во всех участках спектра наибольшие значения $\bar{P}_{\lambda \text{ ср}}$ отмечаются в осенний сезон, средние годовые значения $\bar{P}_{\lambda \text{ ср}}$ ближе всего к летним.

2. Среднее квадратическое отклонение σ показывает, что рассеяние значений $P_{\lambda \text{ ср}}$ невелико. Из сравнения σ и $\bar{P}_{\lambda \text{ ср}}$ следует, что коэффициент изменчивости $v_P = \sigma / \bar{P}_{\lambda \text{ ср}}$ имеет наибольшие значения (0,10—0,11) весной, наименьшие (0,07—0,10) осенью. В интервале от $P_{\lambda \text{ ср}} - \sigma$ до $\bar{P}_{\lambda \text{ ср}} + \sigma$ содержится более 70 % всех случаев.

3. Медиана (величина, меньше которой и больше которой в эмпирическом распределении по $1/2$ всех случаев) несколько превосходит среднюю величину, для всех случаев $|\bar{P}_{\lambda \text{ ср}} - M| \leq 0,01$.

4. Неравенство нулю коэффициентов асимметрии и эксцесса свидетельствует о том, что распределение коэффициентов прозрачности отлично от нормального. В большинстве случаев $A < 0$ (средняя величина меньше моды), т. е. наиболее часто встречаются величины $P_{\lambda \text{ ср}}$, превышающие средние значения $\bar{P}_{\lambda \text{ ср}}$; величина $E > 0$, т. е. вершина эмпирического распределения выше, чем при нормальном распределении, вследствие чего в интервале $[\bar{P}_{\lambda \text{ ср}} - \sigma; \bar{P}_{\lambda \text{ ср}} + \sigma]$ и располагается более $2/3$ всех случаев.

На рис. 2 в качестве примера приводится сравнение эмпирического распределения $P_{\lambda \text{ ср}}$ с рассчитанным при соответствующих значениях $\bar{P}_{\lambda \text{ ср}}$ и σ . При расчетах использована методика, предложенная в [8].

5. Несмотря на отличие эмпирического распределения от нор-

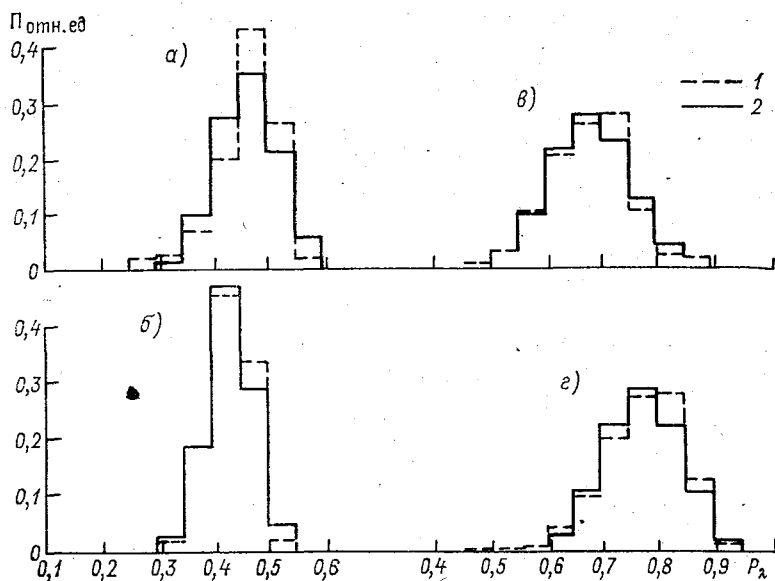


Рис. 2. Сравнение эмпирических (1) и рассчитанных (2) распределений коэффициентов спектральной прозрачности.

а) $\lambda=369$ нм, зима; б) $\lambda=344$ нм, зима; в) $\lambda=463$ нм, весна; г) $\lambda=627$ нм, год.

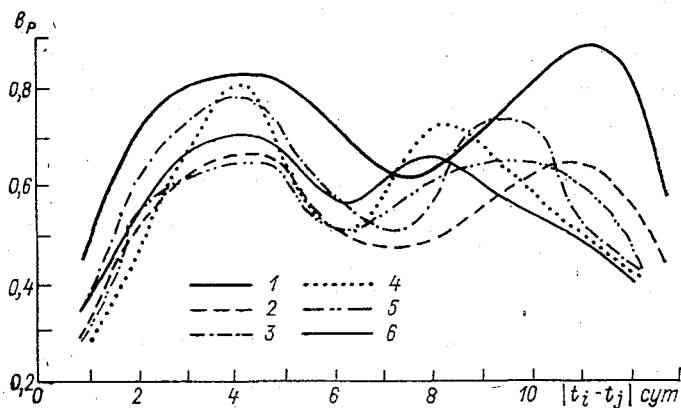


Рис. 3. Структурные функции коэффициентов спектральной прозрачности в разных участках спектра.

1) $\lambda=344$ нм; 2) $\lambda=369$ нм; 3) $\lambda=463$ нм; 4) $\lambda=530$ нм;
5) $\lambda=572$ нм; 6) $\lambda=627$ нм.

мального, практически всюду выполняется правило 3σ , т. е. почти все случаи попадают в интервал $[\bar{P}_{\lambda \text{ ср}} - 3\sigma; \bar{P}_{\lambda \text{ ср}} + 3\sigma]$.

Чтобы получить представление об изменении прозрачности во времени, по результатам наблюдений за июнь были рассчитаны временные структурные функции [2] с шагом квантования в одни сутки для всех рассмотренных участков спектра.

Временной структурной функцией элемента P называют средний квадрат разности значений P в одной и той же точке в два различных момента времени t_i и t_j :

$$B_P(t_i, t_j) = \overline{[P(t_i) - P(t_j)]^2}.$$

Результаты расчетов представлены на рис. 3, где нанесены значения нормированной структурной функции

$$b_P(t_i, t_j) = \frac{B_P(t_i, t_j)}{2\sigma^2}$$

в зависимости от $|t_i - t_j|$. Величина σ для разных участков спектра меняется от 0,03 до 0,06.

Вследствие ограниченности выборок, использованных для расчета, точность структурной функции b_P для $|t_i - t_j| \leq 11$ не превышает 10—15 %, для $|t_i - t_j| > 11$ она еще ниже.

Из рис. 3 следует, что во всех рассмотренных участках спектра изменение коэффициентов прозрачности имеет колебательный характер, при этом первый пик b_P для всех λ соответствует $|t_i - t_j|$, равным 4—5 сут, второй максимум в зависимости от участка спектра располагается при $|t_i - t_j|$, равных 8, 9, 10, 11 сут, а расположенный между ними $\min b_P$, близкий по значению к b_P при $|t_i - t_j| = 2$, отмечается при $|t_i - t_j|$, равных 6—7 сут.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гущин Г. П. Некоторые результаты систематических измерений спектральной прозрачности атмосферы и аэрозоля на территории СССР. — Труды ГГО, 1974, вып. 344, с. 83—102.
2. Дроздов О. А., Шепелевский А. А. Теория интерполяции в стохастическом поле метеорологических элементов и ее применение к вопросам метеорологических карт и рационализации сети. — Труды НИУ ГУГМС, 1946, сер. 1, вып. 13, с. 65—115.
3. Кондратьев К. Я. Актинометрия. — Л.: Гидрометеиздат, 1965. — 690 с.
4. Методические указания по производству и обработке наблюдений за спектральной прозрачностью и характеристиками атмосферных аэрозолей /Сост. Г. П. Гущин. — Л.: Гидрометеиздат, 1972. — 52 с.
5. Общее содержание атмосферного озона и спектральная прозрачность атмосферы. Справочные данные по станциям СССР за 1972—1973 гг. /Под ред. Г. П. Гущина. — Л.: Гидрометеиздат, 1978. — 158 с.
6. То же. Справочные данные по станциям СССР за 1974—1975 гг. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 339 с.
7. То же. Справочные данные по станциям СССР за 1976—1977 гг. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 315 с.
8. ЩигOLEB Б. М. Математическая обработка наблюдений. — М.: Наука, 1969. — 344 с.

ГАЗОАНАЛИТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ МОНИТОРИНГА КОНЦЕНТРАЦИИ CO_2 В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ

1. Предполагаемая важная роль атмосферного углекислого газа как антропогенного фактора изменения климата обусловила заметный рост числа научных программ, в рамках которых проводятся регулярные измерения концентрации атмосферного CO_2 в различных точках земного шара [1]. Осуществляемое в соответствии с рекомендациями ВМО [9, 10] развитие глобальной сети мониторинга CO_2 опирается в основном на опыт более чем двадцатилетних измерений CO_2 на фоновых станциях США [3, 4]. Измерения, проводимые в разных странах, выполняются практически по единой методике [1, 8] и с применением однотипной аппаратуры. В частности, в качестве измерительного прибора в газоаналитических установках для контроля концентрации атмосферного CO_2 повсеместно используются приборы, работающие на одном принципе, — оптико-акустические (или, как их называют за рубежом, недисперсионные) инфракрасные газоанализаторы¹.

Для участия в программе ВМО по мониторингу CO_2 в ГГО создана газоаналитическая установка на базе оптико-акустического газоанализатора URAS-2T (ФРГ). В процессе ее изготовления, монтажа и наладки использовались материалы по газоаналитическим установкам для измерений концентрации атмосферного CO_2 , применяемым в программе НУОА США «Геофизический мониторинг изменений климата» (ГМИК) [5, 6].

Данная статья содержит краткое описание устройства газоаналитической установки ГГО и основных принципов ее работы.

2. Устройство газоанализатора URAS (совпадающее в общих чертах с устройством оптико-акустических газоанализаторов других типов [2, 7]) схематично показано на рис. 1. В основных чертах его работу можно описать следующим образом. Модулированное излучение от двух источников ИК радиации (И) проходит через измерительную (K_1) и сравнительную (K_2) кюветы. Через эти кюветы прокачиваются соответственно измеряемый и сравнительный газы. Сравнительный газ служит в качестве опорного при измерениях, концентрация CO_2 в нем определяет положение нуля шкалы газоанализатора, поэтому ее обычно выбирают близкой к концентрации CO_2 в атмосферном воздухе. Однако знать точно концентрацию CO_2 в сравнительном газе нет необходимости, так как концентрация CO_2 в измеряемом газе определяется путем сравнения отсчетов газоанализатора для изме-

¹ На фоновых станциях для мониторинга CO_2 используются в основном оптико-акустические газоанализаторы производства ФРГ (URAS, UNOR, ULTRAMAT) и США (LIRA).

прямого газа и специальных градуировочных смесей. Концентрация CO_2 в этих смесях предварительно определена с высокой точностью независимым методом. Измеряемый газ и градуировочные смеси последовательно прокачиваются через измерительную кювету, в то время как через сравнительную кювету постоянно протекает один и тот же сравнительный газ. В кюветах K_1 и K_2 происходит частичное поглощение ИК радиации от источников углекислым газом. Остаточная радиация, пройдя кюветы, попадает на оптико-акустический приемник (П), представляющий собой две герметичные камеры, заполненные смесью CO_2 с Ag и разделенные гибкой мембраной (С). Прошедшее в приемник излучение, селективно поглощаясь углекислым газом, вызывает нагрев газовой смеси и, следовательно, изменение общего давления в каж-

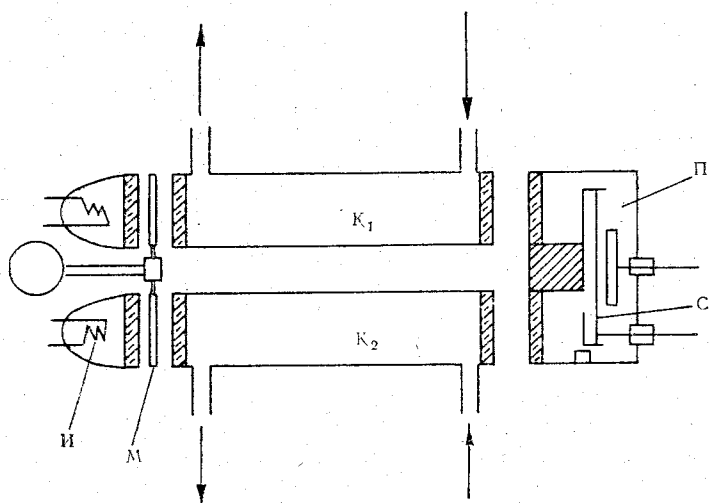


Рис. 1. Схема оптико-акустического газоанализатора типа URAS.

И — источник ИК радиации; М — модулятор; K_1 — измерительная кювета; K_2 — сравнительная кювета; П — оптико-акустический приемник; С — мембрана.

дой камере приемника. Эти изменения пропорциональны величине остаточной радиации, поглощенной в каждой камере, и вызывают прогиб мембраны при неодинаковом ослаблении радиации в измерительной и сравнительной кюветах. Мембрана является одной из обкладок конденсатора, емкость которого изменяется при прогибе мембраны. Поскольку на приемник попадает модулированное излучение, мембрана колеблется с частотой модуляции, и в результате на выходе приемника (на конденсаторе) появляется переменный электрический сигнал. Амплитуда этого сигнала пропорциональна разности концентраций углекислого газа в измерительной и сравнительной кюветах.

Высокая чувствительность газоанализатора обусловлена тем, что в наполненном исследуемым газом оптико-акустическом приемнике происходит селективное поглощение излучения на тех же длинах волн, на которых происходило поглощение радиации в сравнительной и измерительной кюветах до поступления в приемник. Установленные на пути излучения фильтрующие окошки выделяют из спектра излучения источников интервал в области 4,3 мкм, соответствующий сильной полосе поглощения CO_2 . Поскольку в этой области имеются еще и линии поглощения другой компоненты атмосферы (водяного пара), частично перекрывающие линии CO_2 , атмосферный воздух до поступления в газоанализатор должен осушаться. Обычно это делается с помощью специальных вымораживающих ловушек. Таким образом, в состав газоаналитической установки помимо самого газоанализатора должны входить дополнительные устройства для забора и предварительной подготовки газовых смесей (осушение, очистка от пыли, приведение к одинаковой температуре), устройства, обеспечивающие возможность незагрязняющей перекоммутации и продува газовых каналов для последовательной прокачки через газоанализатор различных газовых смесей, и т. д.

3. На рис. 2 приведена схема газоаналитической установки ГГО. В установке предусмотрена возможность работы в одном из двух режимов: непрерывном или дискретном.

В первом режиме осуществляется анализ атмосферного воздуха, непрерывно забираемого из атмосферы в районе расположения установки и прокачиваемого через газоанализатор. В таком режиме происходит работа газоаналитических установок на фоновых станциях [3—5].

Во втором режиме на установке проводится анализ отдельных проб воздуха объемом не менее 500 см^3 при нормальном давлении. Установка, работающая в дискретном режиме, используется, например, в центральной лаборатории программы ГМИК в Боулдере (Колорадо) для анализа проб, взятых на кораблях, в местах предполагаемого расположения фоновых станций, а также на действующих фоновых станциях для обеспечения сопоставимости результатов непрерывных наблюдений CO_2 на этих станциях [5].

В непрерывном режиме установка ГГО работает следующим образом: через пылезащищенный зонд воздух при помощи мембранной помпы 1 нагнетается в магистраль, ведущую к установке. При этом в магистрали существует небольшое избыточное давление, снижающее опасность загрязнения воздухом из помещений, где расположена сама установка. Затем воздух из магистрали через переключатель газовых каналов попадает в предварительный электрический холодильник, где происходит его осушение до влажности, соответствующей точке росы ($+1...+3$) °C. Основное осушение происходит на следующем этапе, при прохождении воздуха через вымораживающую стеклянную ловушку, погруженную в сосуд, в котором находятся куски твердой углекислоты, залитые спиртом. После прохождения ловушки воздух имеет влажность,

соответствующую точке росы (приблизительно -77°C). По газопроводящим путям, достаточно длинным для того, чтобы охлажденный газ принял температуру газоанализатора, термостатируемого при 60°C , подготовленный к анализу воздух подается в газоанализатор со скоростью около 20 л/ч. Пройдя через измерительную кювету, он свободно выходит наружу, в лабораторию. Один раз в час вместо воздуха подаются по очереди из баллонов также со скоростью 20 л/ч две градуировочные газовые смеси, концентрация CO_2 в которых известна. Концентрация CO_2 в воздухе определяется по отсчетам, соответствующим этим двум смесям, путем линейной интерполяции.

Осуществление измерений в дискретном режиме (анализ отдельных проб воздуха из сосудов) является технически более сложной задачей, так как объем воздуха, требуемый для анализа в оптико-акустических газоанализаторах, довольно велик (около 130 см^3 при нормальном давлении). Для проведения измерения необходимо забрать это количество воздуха из пробоотборного сосуда объемом около 500 см^3 и перекачать его с предварительным осушением, но без заметных потерь и загрязнений в измерительную кювету газоанализатора. Ранее эта процедура выполнялась при помощи ртутного насоса Тёплера. Однако работа с этим насосом довольно трудоемка и не может быть автоматизирована. Недавно в центральной лаборатории ГМИК в Боулдере была разработана специальная перекачивающая помпа, позволяющая частично автоматизировать процесс анализа проб воздуха [6]. Аналогичная помпа использована в установке ГГО. Она представляет собой кварцевый цилиндр объемом около 700 см^3 со свободно плавающим герметичным поршнем. Герметичность обеспечивается применением специальных фторопластовых уплотнителей.

Анализ проб воздуха с использованием этой помпы проводится следующим образом. Сосуды с пробами воздуха (f_1 ; f_2 ; f_3 ; f_4 ; f_5 ; f_6) герметично присоединяются к установке. При закрытых входных кранах сосудов помпа и все магистрали, ведущие от нее к сосудам, откачиваются форвакуумным насосом до остаточного давления около $0,05\text{--}0,07\text{ гПа}$. После этого клапаны v закрываются, откачка помпы прекращается. Открывается клапан, перекрывающий вход сосуда f_1 , и воздух из него заполняет откачанную помпу. Поршень помпы при этом отодвигается в крайнее левое положение. Затем клапан сосуда f_1 закрывается и открывается клапан p , впуская в левую часть помпы толкающий газ из специального баллона. Под действием толкающего газа, создающего избыточное давление около 500 гПа , поршень начинает перемещаться вправо, сжимая анализируемый воздух в помпе. При достижении давления, несколько большего 1000 гПа , открывается клапан e и воздух через вымораживающую ловушку вытесняется из помпы в газоанализатор. При этом отсчет газоанализатора снимается в статистическом режиме, т. е. при неподвижном газе в измерительной кювете. Для обеспечения корректности процедуры градуировки газоанализатора снятие отсчетов, соответствующую

щих градуировочным смесям, также проводится в статистическом режиме. Для анализа следующей пробы помпа вновь откачивается и вся процедура повторяется.

4. Как следует из изложенного, измерения при помощи оптико-акустических газоанализаторов — это относительные измерения, опирающиеся на градуировочные газовые смеси. Поэтому систематическая погрешность данных измерений определяется погрешностью тех значений концентраций CO_2 , которые приписаны используемым градуировочным смесям. Случайная же ошибка характеризуется воспроизводимостью показаний прибора и может быть оценена по разбросу экспериментальных данных. В [3] приведены оценки случайной погрешности измерений для установки Скриппсовского института океанографии (Калифорния), где находится центральная лаборатория ВМО по мониторингу атмосферного CO_2 . Согласно этим оценкам, средняя квадратическая погрешность единичного измерения концентрации CO_2 для установки Скриппсовского института составляет около $0,5 \text{ млн}^{-1}$. Испытания установки ГГО в непрерывном режиме показали, что случайная погрешность для нее не превышает погрешности, указанной для американской установки. В настоящее время начаты первые пробные натурные измерения на установке ГГО с использованием непрерывного режима. Проводятся также испытания работы установки в режиме анализа проб.

Авторы искренне благодарны сотрудникам ГГО А. А. Елисееву, К. В. Казаковой, В. А. Ковалеву, А. Б. Новикову и В. И. Привалову за практическую помощь и внимание к работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каменоградский Н. Е., Шашков А. А. Экспериментальные исследования атмосферного углекислого газа (обзор). — Труды ИЭМ, 1981, вып. 10(84), с. 66—72.
2. Павленко В. А. Газоанализаторы. — М.—Л.: Машиностроение, 1965. — 365 с.
3. Keeling C. D., Bacastow R. B. et al. Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna-Loa Observatory, Hawaii. — *Tellus*, 1976, v. 28, N 6, p. 538—552.
4. Keeling C. D., Adams J. A., Ekdahl C. A. et al. Atmospheric carbon dioxide variations at the South Pole. — *Tellus*, 1976, v. 28, N 6, p. 552—564.
5. Komhyr W. D., Harris T. B. Measurements of atmospheric CO_2 at the U. S. GMCC baseline stations. — Report and Proceedings of the Conference on Atmospheric Pollution Measurement Techniques, Gothenburg, 1976. Spec. Environ. Rep. N 10, WMO, N 460, Geneva, 1977.
6. Komhyr W. D., Taylor W. R., Harris T. B. A semi-automatic flask sample CO_2 analyser. — Paper presented at the WMO Technical Conference on Regional and Global Observations of Atmospheric Pollution Relative to Climate, Boulder, 1979.
7. Smith V. N. A recording infrared analyser. — *Instruments*, 1953, v. 26, p. 421—427.
8. WMO. Operations for sampling and analyses in air and precipitation. — WMO N 299, Geneva, 1971.
9. WMO. Report and Proceedings of the Conference on Atmospheric Pollution Measurement Technique, Gothenburg, 1976. Spec. Environ. Rep. N 10, WMO N 460, Geneva, 1977.
10. WMO. Report of the Scientific Workshop on Atmospheric Carbon Dioxide, Washington, 1976. WMO N 474, Geneva, 1977.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРОПУСКАНИЯ НЕЙТРАЛЬНЫХ СВЕТОФИЛЬТРОВ

Известно, что далеко не все метеорологические измерения обеспечены эталонными и образцовыми средствами измерения, которые позволили бы правильно организовать метрологическую службу метеорологических измерений. Метрологическое обеспечение оптических измерений интересующих нас характеристик, таких, как метеорологическая дальность видимости, прозрачность атмосферы, яркость фона или неба, естественная освещенность, неудовлетворительно.

В настоящее время на сети станций нашли широкое применение современные фотоэлектрические фотометры, обеспечивающие достаточно высокую точность оптических измерений. Средства поверки этих фотометров должны обладать существенно более высокими метрологическими характеристиками, чем сами фотометры.

Во всех случаях фотометрирования непосредственно измеряемой величиной является или поток излучения (в подавляющем большинстве случаев в относительных единицах), или отношение двух потоков. Градуировка шкал фотометров в этих случаях будет определять зависимость между потоком или отношением потоков на входе фотометра и выходным параметром фотометра, характеризующую отсчетами по шкале самого фотометра или измерительного прибора, включенного на выходе и измеряющего напряжение, ток, частоту и другие параметры, которые являются аналогами измеряемому потоку или отношению потоков. Интересующая нас характеристика, например метеорологическая дальность видимости, яркость, общее содержание озона и др., определяется путем расчета по формулам, устанавливающим связь этой характеристики с измеренным фотометром потоком или отношением потоков.

Основной операцией поверки подобных фотометров является установление погрешности вышеуказанной связи входного и выходного параметров фотометра, т. е. градуировки шкалы фотометра; при этом все погрешности, возникающие в процессе перехода от непосредственно измеренной фотометром величины к искомому параметру, характеризуют лишь точность методики расчета и в подавляющем большинстве случаев не могут быть метрологически строго оценены из-за отсутствия эталонных и образцовых средств контроля этих характеристик. Следовательно, поверка ряда фотометров, используемых в метеорологии, может ограничиваться лишь поверкой точности измерения фотометром потока излучения или отношения потоков.

Самым удобным, надежным и достаточно точным средством подобной поверки являются нейтральные светофильтры, позволяющие изменять световой поток, поступающий в фотометр, в ши-

роких пределах. Промышленность выпускает унифицированные наборы нейтральных светофильтров, снабженные данными о средних спектральных характеристиках оптической плотности фильтров. Точность этих данных такова, что коэффициент пропускания фильтра не может быть установлен с погрешностью менее 2 %, особенно для тех случаев, когда спектральная чувствительность фотометра соответствует кривой относительной видимости.

В данной статье рассмотрена методика точных измерений коэффициентов пропускания нейтральных светофильтров, которая могла бы быть использована для аттестации комплектов нейтральных светофильтров в качестве образцовых.

Под коэффициентом пропускания нейтрального светофильтра понимаем отношение потока излучения, прошедшего сквозь данный фильтр, к потоку излучения, упавшего на него; при этом предполагается, что падающий поток является параллельным световым пучком, а спектральная характеристика излучения соответствует кривой относительной спектральной чувствительности глаза.

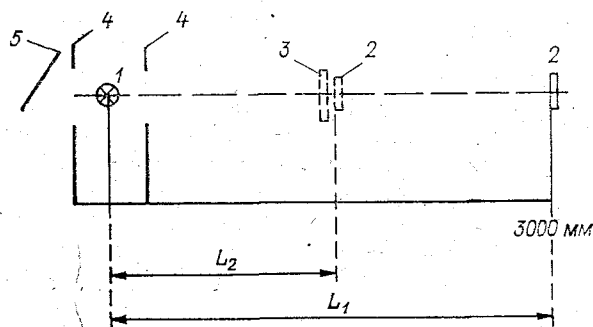


Рис. 1. Схема измерения.

1 — источник света; 2 — фотоэлемент; 3 — нейтральный фильтр; 4 — бархатный экран с отверстием; 5 — бархатный экран.

Измерения производятся на фотометрической скамье типа ФС-М с длиной шкалы, равной 3000 мм. Используется нулевой компенсационный метод как наиболее точный и надежный. В качестве источника света может быть использована лампа поверяемого фотометра в том режиме горения, который использован в фотометре, или образцовая лампа при цветовой температуре нити накала, соответствующей цветовой температуре нити накала лампы фотометра в рабочем режиме. Выполнение этого требования связано с тем, что реальные светофильтры не обладают действительно нейтральным ослаблением излучения, поэтому результат измерения может несколько зависеть от спектрального состава излучения.

В качестве приемника света используется фотоэлемент от

люксметра типа Ю-116 или люксметров старых типов Ю-17 или Ю-16, спектральная чувствительность которых соответствует кривой относительной спектральной чувствительности глаза. Фотоэлемент устанавливается в специальном приспособлении на подвижной каретке скамьи так, чтобы приемная поверхность фотоэлемента располагалась строго в вертикальной плоскости, проходящей через риску каретки, совмещенную с отметкой шкалы скамьи 3000 мм (рис. 1). На расстоянии 5—10 см от приемной поверхности фотоэлемента устанавливается рамка для закрепления нейтральных светофильтров, при этом плоскость фильтра, установленного в рамке, должна быть параллельна приемной поверхности фотоэлемента. Таким образом, фотоэлемент вместе с фильтром, закрепленным в рамке, может перемещаться по направляющим фотометрической скамьи от 3000-го деления к нулевому. Источник света устанавливается неподвижно на стойке или каретке скамьи так, чтобы нити лампы располагались в вертикальной плоскости, проходящей через нулевое деление шкалы. Высота центра тела накала лампы должна быть равна высоте центра приемной поверхности фотоэлемента. В тех случаях, когда применяется лампа с телом накала в виде цилиндрической спирали, ось цилиндра должна располагаться в вертикальной плоскости, проходящей через деление 0 мм.

Практика измерений показала, что вышеуказанные совмещения с нулевым и 3000-м делением можно обеспечить с погрешностью не более ± 1 мм.

Питание источника света производится стабилизированным напряжением. Для повышения его стабильности можно использовать двойную стабилизацию. Напряжение сети подается на феррорезонансный стабилизатор, например типа С-0,16, затем выходное напряжение этого стабилизатора подается на электронный стабилизатор, в качестве которого можно применить, например стабилизатор типа Б5-21 при питании низковольтных ламп накаливания или типа Б2-2 при питании высоковольтных ламп накаливания.

Для контроля освещенности фотоэлемента в простейшем случае используется зеркальный гальванометр типа М195/1 или другого типа с сопротивлением рамки не более 60 Ом и чувствительностью порядка 10^{-8} А/дел. Более сложная схема контроля освещенности фотоэлемента предполагает использование усилителя постоянного тока фотоэлемента, например типа Ф18. В этом случае существенно повышаются чувствительность метода и точность отсчета расстояния по шкале скамьи.

Процесс измерений заключается в следующем. Каретку с фотоэлементом, но без фильтра устанавливают на конце шкалы скамьи точно на 3000-м делении и отмечают показания гальванометра. Они должны составлять не менее 80 % шкалы прибора. Далее в рамку устанавливают нейтральный светофильтр и, передвигая каретку с фотоэлементом и фильтром, добиваются восстановления того отсчета по шкале гальванометра, который был за-

фиксирован в начале измерения (при отсутствии фильтра). Это положение каретки на шкале скамьи измеряют в миллиметрах. Для снижения случайных погрешностей указанные измерения с каждым фильтром повторяют многократно, каждый раз фиксируя показания гальванометра при отсутствии фильтра и положении каретки на 3000-м делении шкалы. Естественно, что в процессе измерений должно быть исключено попадание на фотоэлемент света, отраженного от стен и других поверхностей, расположенных вблизи фотоприемника и за источником света, т. е. необходимо выполнить те требования, которые обычно выполняются при производстве светотехнических измерений на фотометрической скамье.

Освещенность фотоэлемента при отсутствии в рамке нейтрального светофильтра

$$E_1 = I/L_1^2,$$

где I — сила света лампы; L_1 — расстояние между фотоэлементом и телом накала лампы при отсутствии фильтра.

Освещенность фотоэлемента при наличии в рамке нейтрального фильтра

$$\tau E_2 = I/L_2^2,$$

где L_2 — расстояние между фотоэлементом и телом накала лампы; τ — коэффициент пропускания нейтрального светофильтра. Так как выполняется условие $E_1 = \tau E_2$, то

$$\tau = \frac{E_1}{E_2} \quad \text{или} \quad \tau = \left(\frac{L_2}{L_1} \right)^2. \quad (1)$$

Анализ формулы (1) показывает, что относительная погрешность измерения коэффициента пропускания нейтрального светофильтра

$$\frac{\Delta \tau}{\tau} = 2 \frac{\Delta L_1}{L_1} + 2 \frac{\Delta L_2}{L_2}, \quad (2)$$

а абсолютная погрешность

$$\Delta \tau = \frac{2L_2}{L_1^3} \cdot (L_1 \Delta L_2 + L_2 \Delta L_1). \quad (3)$$

Рассмотрим более подробно вопрос о составляющих погрешности измерения и их источниках. Основными факторами, вызывающими появление систематической составляющей погрешности, являются: неточность совмещения положения плоскости фотоэлемента и нити накала лампы соответственно с 3000-м и нулевым делениями шкалы скамьи, непараллельность падающего на светофильтр светового пучка, отклонение положения плоскости фильтра от вертикальной плоскости, влияние отраженного от различных поверхностей света на результат измерения.

Случайная составляющая погрешности обусловлена главным образом нестабильностью светового потока лампы в процессе из-

мерений и погрешностями в восстановлении контролируемого по гальванометру отсчета при двух положениях каретки.

Как было указано ранее, систематические погрешности в определении расстояния L_1 и L_2 могут достигать ± 2 и ± 1 мм соответственно. Эти погрешности могут привести к появлению систематической составляющей абсолютной и относительной погрешностей измерения коэффициентов пропускания фильтров (табл. 1).

Таблица 1

Систематическая составляющая абсолютной ($\Delta\tau$) и относительной ($\Delta\tau/\tau$) погрешностей измерения коэффициентов пропускания (τ) нейтральных фильтров

Характеристика	τ							
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
L_2 мм	948,7	1341,6	1643,2	1897,4	2121,3	2323,8	2510,0	2683,3
$\Delta\tau \cdot 10^{-2}$	0,0344	0,0534	0,0765	0,0956	0,113	0,131	0,149	0,166
$(\Delta\tau/\tau) \cdot 10^{-2}$	0,344	0,282	0,255	0,239	0,227	0,219	0,213	0,208

Данные табл. 1 показывают, что систематическая составляющая абсолютной погрешности при измерении коэффициентов пропускания фильтров за счет неточности совмещения положения плоскости фотоэлемента с 3000-м делением и нити накала с нулевым делением шкалы скамьи очень незначительна. Даже при измерении коэффициента пропускания фильтра, равного 0,8, погрешность не превышает 0,00166.

Сделаем оценку систематической составляющей погрешности, возникающей за счет неперпендикулярного падения лучей на плоскость фильтра, связанного с использованием конусного пучка света и возможным отклонением плоскости фильтра от вертикальной плоскости.

Известно [1], что светопропускание фильтра τ_λ толщиной d мм для монохроматического света вычисляется по формуле

$$\tau_\lambda = (1 - \rho)^2 \cdot 10^{-K_\lambda d}, \quad (4)$$

где ρ — коэффициент отражения света на плоскостях фильтра, K_λ — спектральный показатель поглощения стекла НС.

Для малых углов падения (менее 30°) коэффициент отражения может быть рассчитан по формуле

$$\rho = [(n' - n)/(n' + n)]^2,$$

где n и n' — показатели преломления соответственно воздуха и стекла. Так как размер приемной поверхности фотоэлемента равен 45×45 мм, а расстояние L_2 при измерении коэффициента пропускания фильтра, равного 0,1, составляет 948,7 мм, то крайние лучи светового пучка будут падать на фильтр в этом неблагоприят-

ятном случае под углом $2^\circ 40'$. Следовательно, коэффициент отражения не изменится (по сравнению с перпендикулярным падением), даже если бы все лучи пучка падали на фильтр под таким углом или даже большими углами. При падении лучей пучка на плоскость фильтра под углом изменяется также длина пути луча в стекле фильтра и, следовательно, коэффициент пропускания фильтра. Отношение коэффициента пропускания фильтра при перпендикулярном падении лучей (τ_λ) к коэффициенту пропускания при падении лучей под углом к поверхности фильтра (τ'_λ) равно

$$\frac{\tau_\lambda}{\tau'_\lambda} = 10^{K_\lambda d \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right)}, \quad (5)$$

где α — угол преломления. Так как коэффициент преломления нейтрального стекла равен 1,5, то угол преломления будет равен $1^\circ 50'$ при угле падения $2^\circ 40'$.

Для оценки возможных предельных систематических погрешностей измерения за счет указанного фактора произведем расчет отношения коэффициентов пропускания по формуле (5) и составляющей абсолютной погрешности (табл. 2). Характеристики фильтров примем равными тем, которые характерны для стандартных фильтров, выпускаемых промышленностью. Показатель поглощения примем для длины волны 0,55 мкм.

Таблица 2

Систематическая составляющая абсолютной погрешности $\Delta\tau_\lambda$
и отношения коэффициентов пропускания фильтров $\tau_\lambda/\tau'_\lambda$

Характеристика	$\tau_\lambda = 0,55$				Характеристика	$\tau_\lambda = 0,55$			
	0,1	0,2	0,4	0,8		0,1	0,2	0,4	0,8
K_λ	0,55	0,26	0,106	0,03	$\tau_\lambda/\tau'_\lambda$	1,0012	1,00075	1,00040	1,00011
d мм	1,9	2,5	3,3	1,9	$\Delta\tau_\lambda$	0,00012	0,00015	0,00016	0,00009

Как видно из табл. 2, систематическая составляющая абсолютной погрешности коэффициентов пропускания, возникающая за счет того, что мы работаем с конусным световым пучком, а плоскость фильтра может быть несколько наклонена по отношению к оси пучка, ничтожно мала и ее можно не учитывать.

Погрешности, связанные с влиянием света, отраженного от различных поверхностей, исключаются полностью путем экранирования с помощью бархатных экранов и диафрагм.

Случайные составляющие погрешности измерения коэффициентов пропускания связаны с погрешностями измерения расстояния L_2 и появляются они из-за колебаний светового потока лампы

в процессе измерений и погрешностей в восстановлении контролируемого отсчета по прибору. Свести к минимуму эти погрешности можно, повышая стабильность светового потока и чувствительность контроля тока фотоэлемента.

Для оценки уровня случайных погрешностей при измерении коэффициентов пропускания фильтров в неблагоприятных условиях, а именно при стабилизации потока только с помощью феррорезонансного стабилизатора и контроле тока фотоэлемента с помощью гальванометра М195/1, нами были выполнены серии измерений коэффициентов пропускания пяти комплектов промышленных фильтров.

Для иллюстрации уровня случайных погрешностей, приводим результаты измерений и обработки данных для одного комплекта фильтров (табл. 3). Из табл. 3 видно, что значения случайных погрешностей (σ) очень незначительны.

Рассмотренные в статье результаты исследования источников погрешностей измерения коэффициентов пропускания нейтральных светофильтров на фотометрической скамье типа ФС-М подтверди-

Таблица 3

Результаты измерения коэффициентов пропускания нейтральных светофильтров комплекта № 995 ($L_1 = 3000$ мм)

L_2 мм	τ	$\bar{L}_2$ мм	$\bar{\tau}$	σ
2535, 2536, 2533,	0,7140; 0,7146; 0,7129;	2535,3	0,7142	0,0015
2535, 2537, 2536	0,7140; 0,7151; 0,7146			
2392, 2394, 2394,	0,6357; 0,6368; 0,6368;	2393,5	0,6365	0,00095
2393, 2394, 2394	0,6363; 0,6368; 0,6368			
2133, 2133, 2135,	0,5055; 0,5055; 0,5064;	2133,5	0,5057	0,0012
2133, 2135, 2132	0,5055; 0,5064; 0,5050			
1942, 1948, 1944,	0,4190; 0,4216; 0,4199;	1943,7	0,4198	0,0019
1942, 1942, 1944	0,4190; 0,4190; 0,4199			
1575, 1574, 1575,	0,2756; 0,2752; 0,2756;	1574,8	0,2755	0,0009
1577, 1575, 1573	0,2763; 0,2756; 0,2749			
1244, 1243, 1244,	0,1720; 0,1719; 0,1720;	1244,7	0,1721	0,00045
1245, 1247, 1245	0,1722; 0,1727; 0,1722			
985, 983, 982,	0,1078; 0,1074; 0,1071;	983,0	0,1074	0,00044
983, 983, 982	0,1074; 0,1074; 0,1071			

ли ранее высказанное предположение, что данная методика может быть использована для аттестации комплектов нейтральных фильтров в качестве образцовых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник конструктора опτικο-механических приборов. Л.: Машиностроение, 1980, с. 44—47.

Г. П. Гушин, Г. В. Корницкая, Т. А. Павлюченкова

РЕЗУЛЬТАТЫ МНОГОЛЕТНИХ СРАВНЕНИЙ ОЗОННОГО СПЕКТРОФОТОМЕТРА ДОБСОНА И ОЗОНОМЕТРА М-83

В период 1971—1979 гг. в Воейково проводились длительные сравнения показаний озонметрических приборов: спектрофотометра Добсона № 108 и озонметров М-83 № 94 и 69. Методика наблюдений по этим приборам и их конструкции значительно отличаются [6, 8]. Приборы выделяют различные участки спектра как по длинам волн, так и по ширине. Для сравнений использовались данные по суммарному озону (СО) X, полученные по обоим приборам только по прямому солнечному свету. Спектрофотометр Добсона работал на стандартной двойной паре длин волн АД ($\lambda_1=305,5$ нм; $\lambda_2=325,4$ нм; $\lambda_3=317,6$ нм; $\lambda_4=339,8$ нм) с полушириной участков спектра 1,5—3,0 нм. В озонметре М-83 использовались два стандартных светофильтра, выделяющие участки спектра с длинами волн в максимуме пропускания 300 и 326 нм и полушириной в обоих случаях около 20 нм. Из вышесказанного следует, что влияние аэрозольного ослабления должно по-разному сказываться на показаниях этих приборов.

Результаты рассматриваемого длительного эксперимента позволили, во-первых, оценить, насколько велики расхождения в показаниях приборов, во-вторых, зная независимую от эксперимента погрешность приборов, оценить суммарное для двух приборов значение аэрозольной погрешности, под которой понимается разность между значениями максимальных расхождений в показаниях СО и суммарной погрешностью обоих приборов.

Как известно, до настоящего времени не удалось достоверно оценить значение аэрозольной погрешности измерений СО. Попытки теоретической оценки этой величины привели к неоднозначным результатам [1, 7, 9, 10], что обусловлено отсутствием точных данных об аэрозольном ослаблении вследствие большой изменчивости его и сложной зависимости ослабления от длины волны. Поэтому упомянутые данные совместных многолетних наблюдений за СО являются уникальными, другие подобные данные нигде не публиковались.

Результаты других сравнений различных озонметрических приборов (в основном кратковременных) приводятся в работах [2—5].

Предельные относительные погрешности измерения CO спектрофотометром Добсона и озонметром М-83 рассчитывались по известной формуле:

$$\delta X = \pm 100 \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial \ln f}{\partial y_i} \right| \Delta y_i, \quad (1)$$

где Δy_i — предельная абсолютная погрешность аргументов функции $X = f(y_1, y_2, \dots, y_n)$, $\frac{\partial \ln f}{\partial y_i}$ — частная производная от натурального логарифма функции f .

В качестве функции f использовались известные формулы для расчета CO :

Таблица 1

Предельные погрешности измерения CO озонным спектрофотометром Добсона № 108

Компонента	Погрешность, компоненты		Вклад компоненты в абсолютную погрешность измерения CO , атм-см
	абсолютная	относительная	
$(I_0/I'_0)_A$	—	0,02	0,00313
$(I/I')_A$	—	0,01	0,00156
$(I_0/I'_0)_D$	—	0,02	0,00313
$(I/I')_D$	—	0,01	0,00156
β_A	0,002	—	0,00143
β'_A	0,002	—	0,00143
β_D	0,002	—	0,00143
β'_D	0,002	—	0,00143
m	0,005	—	0,00002
μ	0,005	—	0,00075
α_A	0,005	—	0,00108
α'_A	0,005	—	0,00108
α_D	0,005	—	0,00108
α'_D	0,005	—	0,00108
Сумма			0,02020
δX %			$\pm 6,7$

для спектрофотометра Добсона

$$X = \frac{\left(\lg \frac{I_0}{I'_0} - \lg \frac{I}{I'}\right)_A - \left(\lg \frac{I_0}{I'_0} - \lg \frac{I}{I'}\right)_D - [(\beta - \beta')_A - (\beta - \beta')_D]m}{[(\alpha - \alpha')_A - (\alpha - \alpha')_D]\mu}; \quad (2)$$

для озонометра М-83

$$X = \frac{\lg \frac{I_0}{I'_0} - \lg \frac{I}{I'} - (\beta - \beta')m}{(\alpha - \alpha')\mu}, \quad (3)$$

где I и I_0 — прямая солнечная радиация на поверхности земли и на верхней границе атмосферы, β — оптическая плотность рэле-евской атмосферы, α — показатель поглощения озона, m и μ — оптические массы атмосферы и слоя озона. Величины без штриха относятся к длине волны λ , со штрихом — к длине волны λ' . В формулах (2) и (3) не учитывается аэрозольное ослабление солнечного излучения, в формуле (3) выбраны эффективные длины

Таблица 2

Предельные погрешности измерения СО модернизированным озонометром М-83

Компонента	Погрешность компоненты		Вклад компоненты в абсолютную погрешность измерения СО, атм-см
	абсолютная	относительная	
I_0/I'_0	—	0,02	0,00542
I/I'	—	0,02	0,00542
β	0,002	—	0,00250
β'	0,002	—	0,00250
m	0,005	—	0,00031
μ	0,005	—	0,00075
α	0,01	—	0,00375
α'	0,01	—	0,00375
Сумма			0,02471
$\pm X \%$			$\pm 8,2$

волн, соответствующие оптической массе $m=2$ ($\lambda=308$ нм, $\lambda'=326$ нм). В результате дифференцирования выражений (2) и (3) и расчета соответствующих частных производных в выражении (1) были получены предельные относительные погрешности измерения СО спектрофотометром Добсона (табл. 1) и озонометром М-83 (табл. 2).

Как видно из табл. 1 и 2, предельная относительная погрешность единичного измерения СО спектрофотометром Добсона для

средних условий равна $\pm 6,7\%$, а озонметра М-83 для тех же условий (высота солнца $\Theta = 30^\circ$, $X = 0,3$ атм-см) $\pm 8,2\%$. Суммарная предельная относительная погрешность для обоих приборов равна $14,9\%$.

Сравнение озонметрических приборов производилось в течение 9 лет на крыше актинометрического павильона в Воейково. Расхождение во времени между отсчетами по обоим приборам не превышало 5 мин.

Таблица 3

Сведения о калибровках спектрофотометра Добсона № 108

Год	Пункт	N^* при $R=100$	N при $R=150$	Примечание
1968	Англия, фирма Веск	0,830	1,330	
1975	ПНР, Бельск	0,779	1,311	Привязка клина без его инструментальной калибровки
1978	США, Боулдер	0,830	1,341	С новой калибровкой клина

$$* N(R) = \lg \frac{I_0}{I} - \lg \frac{1}{R}, \text{ где } R - \text{отсчет по клину.}$$

Сведения о калибровках и градуировках сравниваемых приборов приводятся в табл. 3 и 4. Как видно из табл. 4, коэффициенты привязки озонметров М-83 № 94 и 69 практически не изменялись в период сравнений.

Таблица 4

Сведения о градуировках озонметров М-83 в Воейково

Номер озонметра	Дата градуировки	Значение коэффициента привязки K_{Π}	Период работы озонметров с указанными K_{Π}
94	5 1970 г.	0,94	1970—1975 гг.
	5 1971 г.	0,95	
69	5 1975 г.	1,02	1975—1981 гг.
	6 1976 г.	1,01	
	6 1980 г.	1,01	

Основные результаты сравнений озонметрических приборов приведены в табл. 5 и 6.

Как видно из табл. 5, средние за год значения СО по обоим приборам в течение 9 лет отличались друг от друга в пределах $-1,44...1,99\%$.

Таблица 5

Средние за год отклонения (%) значения СО, полученные озонометром М-83 и спектрофотометром Добсона № 108 (n — число синхронных измерений)

Год	n	$\frac{\bar{X}_{\text{М-83}} - \bar{X}_{\text{Д}}}{\bar{X}_{\text{Д}}} \cdot 100\%$	Год	n	$\frac{\bar{X}_{\text{М-83}} - \bar{X}_{\text{Д}}}{\bar{X}_{\text{Д}}} \cdot 100\%$
Озонометр М-83 № 94			Озонометр М-83 № 69		
1971	298	0,30	1975	150	0,06
1972	268	0,17	1976	321	0,12
1973	181	-1,44	1977	276	0,61
1974	264	-0,56	1978	44	1,55
			1979	15	1,99

Таблица 6

Распределение по градациям отклонений (абсолютные величины) значений СО, полученных озонометром М-83 и спектрофотометром Добсона № 108 (числитель — число синхронных измерений, знаменатель — число измерений в процентах от общего числа измерений)

Год	Градация, %					Общее число из- мерений
	0-2	2-5	5-10	10-15	>15	
Озонометр М - 83 № 94						
1971	103	113	68	9	5	298
	34,6	37,9	22,8	3,0	1,7	100
1972	144	96	25	3	0	268
	53,7	35,8	9,3	1,1	0,0	100
1973	85	61	31	2	2	181
	47,0	33,7	17,1	1,1	1,1	100
1974	118	92	51	3	0	264
	44,7	34,8	19,3	1,1	0,0	100
Сзонэметр М - 83 № 69						
1975	75	55	15	3	2	150
	50,0	36,7	10,0	2,0	1,3	100
1976	160	89	49	26	1	325
	49,2	27,4	15,1	8,0	0,3	100
1977	144	105	19	7	1	276
	52,2	38,0	6,9	2,5	0,4	100
1978	20	21	3	0	0	44
	45,5	47,7	6,8	0,0	0,0	100
Среднее	106,1	79,0	32,6	6,6	1,4	225,7
	47,2	36,5	13,4	2,4	0,6	100

Значительный интерес представляет табл. 6, в которой приведено распределение по градациям отклонений значений CO , полученных в период сравнений по спектрофотометру Добсона и озонометрам М-83. Как видно из табл. 6, количество отклонений, превышающих 10 %, в среднем меньше 3,0 %, а превышающих 15 % — меньше 0,6 %. Это означает, что за пределы суммарной относительной погрешности сравниваемых приборов ($\delta X_{\text{сум}} = 14,9 \%$) вышло не более 1,7 % пар случаев, которые можно отнести к промахам измерений. С другой стороны, это означает, что суммар-

Таблица 7

Оценка среднего квадратического отклонения значений разности данных измерений CO по озонометру М-83 и по спектрофотометру Добсона № 108 ($S(\bar{A})$) и относительная погрешность данных измерений по озонометру М-83 (δX)

Дата	$\bar{X}_D$ матм-см	n	$S(\bar{A})$ матм-см	$\delta X \%$	Дата	$\bar{X}_D$ матм-см	n	$S(\bar{A})$ матм-см	δX
Озонометр М - 83 № 94					Озонометр М - 83 № 69				
8.5 1972 г.	411	23	2,0	1,2	8.6 1975 г.	303	21	1,6	2,05
20.7	305	17	3,3	4,1	24.6	328	18	1,4	3,0
1.8	339	19	2,4	1,7	3.7	342	15	1,7	1,6
11.5 1973 г.	336	13	1,5	1,5	20.5 1976 г.	381	21	1,7	1,4
16.7	362	14	2,0	3,1	22.5	410	21	2,3	1,8
25.9	297	12	2,3	2,2	28.5	399	21	3,3	1,9
29.3 1974 г.	335	21	2,8	3,8	15.6 1977 г.	333	21	1,0	1,2
30.3	346	26	3,0	2,0	18.6	341	24	2,7	1,9
31.3	348	23	2,6	1,8	8.7	336	21	1,4	1,1
					30.5 1978 г.	373	6	4,1	2,7
					6.6	332	6	1,8	2,6
					26.7	346	6	3,5	3,2
					Среднее	348	17,6	2,3	2,2

ная аэрозольная погрешность измерения CO не превышает предельную суммарную погрешность измерения CO , указанную в табл. 3 и 4.

Учитывая то обстоятельство, что спектрофотометр Добсона № 108 является региональным образцовым средством измерения CO , была произведена обработка данных сравнений по отношению к данным спектрофотометра Добсона. С этой целью была найдена оценка среднего квадратического отклонения значений разности данных измерений CO по озонометру М-83 от данных по спектрофотометру Добсона $S(\bar{A})$ и относительная погрешность данных измерений озонометра М-83 δX .

Величина $S(\bar{\Delta})$ находилась по формуле

$$S(\bar{\Delta}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{n(n-1)}}, \quad (4)$$

где

$$\Delta_i = X_{\text{М-83}} - X_{\text{Д}}, \quad \bar{\Delta} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n},$$

$X_{\text{Д}}$ — СО по спектрофотометру Добсона; $X_{\text{М-83}}$ — СО по озонометру М-83; n — число синхронных измерений.

Относительная погрешность измерений СО по озонометру М-83 определялась по формуле

$$\delta X = \pm 100 \frac{|\bar{\Delta}| + 2S(\bar{\Delta})}{\bar{X}_{\text{Д}}}, \quad (5)$$

где

$$\bar{X}_{\text{Д}} = \frac{\sum_{i=1}^n X_{\text{Д}i}}{n}.$$

Формула (5) выведена в предположении, что надежность δX равна 0,95.

Результаты расчета $S(\bar{\Delta})$ и δX для 21 серии синхронных измерений приведены в табл. 7.

Из табл. 7 следует, что значения $S(\bar{\Delta})$ колеблются в пределах 1,0—4,1 матм-см со средним значением 2,3 матм-см, а δX — в пределах 1,1—4,1 % со средним значением 2,2 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гушин Г. П. К методике введения аэрозольной поправки в результаты измерения общего содержания атмосферного озона. — Труды ГГО, 1969, вып. 237, с. 69—80.
2. Гушин Г. П. Озонометрическая сеть СССР. — Метеорология и гидрология, 1979, № 3, с. 111—116.
3. Гушин Г. П., Ромашкина К. И., Шаламянский А. М. Опыт измерения общего содержания озона модернизированным озонометром М-83 в Воейково в 1971—1974 гг. — Труды ГГО, 1976, вып. 357, с. 106—120.
4. Ковалев В. А., Ромашкина К. И., Елисеев А. А. Сравнение приборов для измерения общего содержания атмосферного озона на фоновой станции Мауна-Лоа. — Метеорология и гидрология, 1978, № 6, с. 110—113.
5. Ковалев В. А., Соколенко С. А. Сравнения образцовых озонометрических приборов СССР и США. — Труды ГГО, 1980, вып. 445, с. 69—72.
6. Методические указания по производству и обработке наблюдений за общим содержанием атмосферного озона/Сост. Г. П. Гушин. — Л.: Гидрометеоиздат, 1981. — 45 с.
7. Basher R. E. The approximation of particulate scattering coefficients in the determination of total ozone. — Q. J. Roy. Meteorol. Soc., 1976. v. 102, p. 667—673.
8. Dobson G. M. B. Observers handbook for the ozone spectrophotometer. — Ann. I. G. Y., 1957, v. 5, Pt. 1, p. 46—89.
9. Dziejewska-Losiowa A. The influence of the scattering of solar radiation by aerosol on measured total ozone in the atmosphere. — Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci., 1979, D-9 (132), p. 39—57.
10. Gardiner B. G. Generalized treatment of particulate scattering in Dobson ozone spectrophotometer calculations. — Q. J. Roy. Meteorol. Soc., 1978, v. 104, p. 623—629.

Г. П. Гущин, С. А. Соколенко

К МЕТОДИКЕ ИЗМЕРЕНИЯ СУММАРНОГО ОЗОНА ПО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ ОТ ЗЕНИТА НЕБА

Как известно, по суммарному озону (СО) около половины публикуемых мировых данных получены в результате измерения СО по рассеянному излучению, идущему от участка неба в зените [3]. В СССР для зенитных измерений СО используется методика, разработанная в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова [5]. В этой методике для измерений используется пара участков спектра, выделяемых озонометром М-83 [5]. За рубежом для аналогичных целей используются две пары длин волн, выделяемых озоновым спектрофотометром Добсона [1, 6]. При использовании двух участков спектра из синхронных данных наблюдений по солнцу и зениту неба находят зенитный коэффициент градуировки:

$$K_z = \frac{\left(\frac{I_1}{I_2}\right)_c}{\left(\frac{I_1}{I_2}\right)_z}, \quad (1)$$

с помощью которого входят в озонную номограмму для расчета СО. В формуле (1) I_1 и I_2 — отсчеты по прибору для 1-го и 2-го светофильтров, а индексы с и з указывают на источник излучения (с — солнце, з — зенит). На практике это отношение часто определяется из озонной номограммы по данным о суммарном озоне [5].

Значение K_z зависит от высоты солнца θ . Пример такой зависимости, полученной для конкретного прибора М-83 в результате градуировки, показан на рис. 1. Из рис. 1 видно, что в интервале высот солнца $8-60^\circ$ K_z изменяется нелинейно и возрастает с увеличением θ почти в три раза. Это обстоятельство значительно осложняет градуировку прибора М-83 для зенитных наблюдений, поскольку значения K_z приходится находить для разных высот солнца.

С целью избавления от указанного недостатка предлагается измерения СО производить по трем участкам спектра, выделяе-

мым озонметром М-83 (1, 2 и 3-й светофильтры). В качестве измерительного параметра используется двойное отношение

$$\frac{I_1}{I_2} / \frac{I_2}{I_3} = \frac{I_1 I_3}{I_2^2}, \quad (2)$$

где I_3 — отсчет по 3-му светофильтру, а в качестве зенитного коэффициента —

$$K'_3 = \left(\frac{I_1 I_3}{I_2^2} \right)_c / \left(\frac{I_1 I_3}{I_2^2} \right)_3. \quad (3)$$

Для выяснения вида зависимости K'_3 от высоты солнца были теоретически рассчитаны значения K_3 и K'_3 для четырех разных вертикальных распределений атмосферного озона и ряда высот

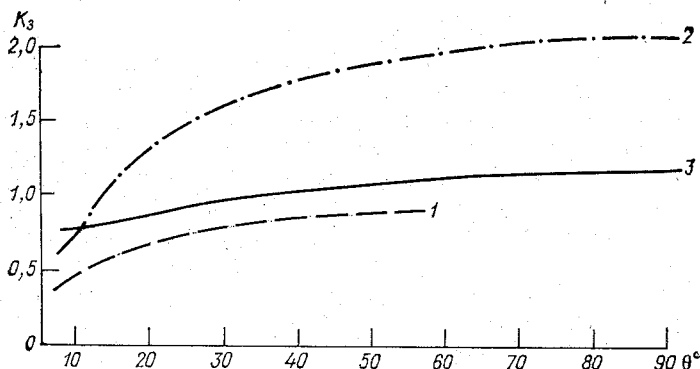


Рис. 1. Зависимость зенитного коэффициента градуировки K_3 от высоты солнца θ .

1 — экспериментальные данные; 2 — данные расчета K_3 ; 3 — данные расчета K'_3 .

солнца. При этом использовалась известная формула для рассеянной солнечной радиации, идущей от зенита неба [1]:

$$D_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \omega_{\lambda, i} S_{0, \lambda} \int_0^H \beta_{h, \lambda}^{\varphi} \left[10^{-\int_h^H \left(\alpha_{\lambda} \rho_3 + h + \frac{\beta_{\lambda} \rho_h}{H_0 \rho_0} \right) \operatorname{cosec} \theta_h dh} \times \right. \\ \left. \times 10^{-\int_0^h \left(\alpha_{\lambda} \rho_3 h + \frac{\beta_{\lambda} \rho_h}{H_0 \rho_0} \right) dh} \right] dh d\lambda d\omega, \quad (4)$$

где

$$\beta_{h, \lambda}^{\varphi} = 2,3 \frac{3 \beta_{\lambda} \rho_h}{16 \pi H_0 \rho_0} (1 + \sin^2 \theta), \quad (5)$$

$$\operatorname{cosec} \theta_h = \frac{1}{\sqrt{1 - \left[\frac{R}{R+h} \frac{n(0)}{n(h)} \right]^2 \cos^2 \theta}}. \quad (6)$$

В формулах (4), (5) и (6) $\omega_{\lambda, i}$ — спектральная чувствительность озонометра М-83 (i равно 1, 2 и 3 в соответствии с номерами светофильтров); $S_{0, \lambda}$ — прямая солнечная радиация на верхней границе атмосферы для длины волны λ ; α_{λ} — показатель поглощения озона; β_{λ} — оптическая плотность рэлеевской атмосферы; ρ_h и ρ_0 — плотность воздуха на высоте h и уровне моря; H — высота верхней границы атмосферы (принималось $H=100$ км); H_0 — высота однородной атмосферы ($H_0=8$ км); $\rho_{\lambda, h}$ — плотность озона на высоте h ; θ — высота солнца; R — радиус Земли ($R \approx 6371$ км); $n(0)$ и $n(h)$ — коэффициенты преломления воздуха на высоте 0 и h ; $d\omega$ — телесный угол.

Значения редуцированной прямой солнечной радиации для выбранных светофильтров рассчитывались по формуле

$$S_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \omega_{\lambda, i} S_{0, \lambda} 10^{-(\mu X \alpha_{\lambda} + m \beta_{\lambda})} d\lambda. \quad (7)$$

При учете линейности озонометра и предположении, что многократное рассеяние мало влияет на значения величин в формулах (1) и (3), были рассчитаны K_3 и K'_3 для разных вертикальных распределений озона $\rho_{\lambda, h}$ и высот солнца θ . Предположение о малом влиянии многократного рассеяния в этом случае основывается на том, что формулы типа (4) используются на практике для расчета вертикального распределения озона с оценкой вклада многократного рассеяния, не превышающей 1–3 % при $\theta > 15^\circ$ [1]. Расчет K_3 и K'_3 производился по формулам (1), (3) и (4) с применением линейного соотношения $I_i = cD_i$, где c — постоянный коэффициент. В качестве кривых вертикального распределения озона были использованы четыре кривые, приведенные в работе [4], с соответствующими значениями СО, равными 0,297; 0,359; 0,375; 0,469 атм-см.

Результаты расчета значений K_3 и K'_3 приведены в табл. 1 и на рис. 1 (кривые 2 и 3). Как видно из рис. 1, ход теоретических значений K_3 близок к экспериментальному ходу. Значения K_3 и K'_3 сравнительно мало зависят от СО. В отличие от коэффициента K_3 , коэффициент K'_3 почти линейно зависит от высоты солнца. Последнее обстоятельство позволяет при практических расчетах СО считать коэффициент K'_3 линейным, что удобно при расчетах СО и значительно облегчает нахождение этой величины в период градуировки прибора. В результате этого повышается точность определения K'_3 и значительно сокращается время, необходимое для его нахождения при совместных измерениях I_i по солнцу и зениту неба. Кроме того, двойные отношения, которые используются для определения K'_3 , в меньшей степени будут за-

висеть от вида облачности, и поэтому методика наблюдений и градуировки зенитных наблюдений по трем светофильтрам будет проще, чем по двум светофильтрам.

Таблица I

Значения K_z и K'_z в зависимости от высоты солнца θ и суммарного озона X

θ°	X атм-см							
	0,297		0,359		0,375		0,469	
	K_z	K'_z	K_z	K'_z	K_z	K'_z	K_z	K'_z
8	0,613	0,879	0,566	0,809	0,602	0,834	0,564	0,771
10	0,777	0,868	0,726	0,804	0,763	0,824	0,720	0,764
12	0,924	0,875	0,871	0,815	0,908	0,832	0,863	0,775
14	1,052	0,891	1,002	0,835	1,035	0,848	0,990	0,792
16	1,164	0,908	1,115	0,855	1,145	0,866	1,101	0,812
18	1,259	0,927	1,214	0,876	1,241	0,884	1,199	0,832
20	1,343	0,945	1,301	0,897	1,324	0,902	1,284	0,851
25	1,508	0,986	1,473	0,942	1,490	0,943	1,454	0,895
30	1,629	1,021	1,601	0,990	1,612	0,978	1,581	0,932
35	1,722	1,052	1,698	1,012	1,705	1,009	1,678	0,963
40	1,793	1,077	1,772	1,039	1,778	1,034	1,753	0,989
50	1,895	1,117	1,880	1,081	1,882	1,075	1,862	1,031
60	1,961	1,145	1,948	1,110	1,948	1,103	1,932	1,060
70	2,001	1,163	1,990	1,129	1,989	1,122	1,974	1,079
75	2,014	1,170	2,005	1,136	2,004	1,129	1,989	1,086
90	2,029	1,177	2,022	1,144	2,019	1,136	2,007	1,095

Для улучшения методики наблюдений СО по зениту неба в настоящее время разрабатывается способ измерения I_1 , I_2 и I_3 с промежутком времени между взятием отсчетов меньше 0,1 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гущин Г. П. Исследование атмосферного озона.—Л.: Гидрометеиздат, 1963.—267 с.
2. Гущин Г. П. Озонометрическая сеть СССР.—Метеорология и гидрология, 1979, № 3, с. 111—116.
3. Гущин Г. П., Ромашкина К. И., Шаламянский А. М. Общее содержание атмосферного озона и спектральная прозрачность атмосферы. Справочные данные по станциям СССР за 1978 г.—Л.: Гидрометеиздат, 1980.—168 с.

4. Гушин Г. П., Черняк Т. И. Озонные массы для пяти вертикальных распределений озона в атмосфере. — Труды ГГО, 1970, вып. 255, с. 80—90.

5. Методические указания по производству и обработке наблюдений за общим содержанием атмосферного озона/Сост. Г. П. Гушин. — Л.: Гидрометеониздат, 1981. — 45 с.

Г. П. Гушин, С. А. Соколенко

МАКЕТ НОВОГО ПРИБОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СУММАРНОГО ОЗОНА

В настоящее время используются несколько приборов для измерения суммарного озона (СО) [1, 2, 6, 8—10]. Как правило, эти приборы основаны на регистрации энергетической освещенности ультрафиолетового излучения в полосе поглощения озона и вне этой полосы. По конструктивному исполнению эти приборы отличаются друг от друга в основном способом регистрации излучения и способом выделения нужных длин волн в спектре излучения.

Для измерения СО на сети озонметрических станций сейчас широко применяются два прибора: спектрофотометр Добсона [10] и фильтровый озонметр М-83 [1, 6]. Подробное описание этих приборов приводится в работах [1, 4, 6, 10]. К сожалению, оба эти прибора в настоящее время не выпускаются в промышленном исполнении. В последние годы было разработано несколько озонметрических приборов, которые выпускаются в виде единичных образцов и применяются для опытных измерений.

В университете в Торонто (Канада) под руководством Бревера [9] был разработан новый озонметр с дифракционными решетками, способный, по замыслу авторов, заменить спектрофотометр Добсона. С помощью этого озонметра выполняются четыре вида наблюдений:

- 1) наблюдения СО по прямому солнечному или лунному свету,
- 2) наблюдения СО по зениту неба,
- 3) наблюдения СО по прямому солнечному свету через рассеиватель из молочного кварца или нейтральный светофильтр,
- 4) контрольные наблюдения излучения стандартной вольфрамовой лампы.

Измерения проводятся в пяти участках ультрафиолетовой области спектра с центрами на следующих длинах волн: 306,20; 309,95; 313,40; 316,70; 319,90 нм и с шириной спектральных областей $0,60 \pm 0,05$ нм. Главное преимущество прибора заключается в его способности производить измерения практически одновременно в пяти участках спектра. Быстродействие прибора значительно увеличивает количество данных, полученных в условиях изменяющейся дымки или облачного покрова. Прибор управляет-

ся микрокалькулятором. Приемником излучения заданных длин волн является фотоумножитель. Стоимость прибора составляет около 20 000 долл.

В Новой Зеландии группой авторов [8] был разработан новый озонометрический прибор с узкополосными светофильтрами. Используются шесть интерференционных светофильтров с длинами волн в максимуме пропускания, близкими к аналогичным длинам волн, выделяемым спектрофотометром Добсона (пары А, С и Д). Максимумы пропускания светофильтров соответствуют длинам волн: 305,5; 312; 317; 324; 331; 340 нм, величина пропускания в максимуме светофильтров составляет 3—7,5 %, ширина кривых пропускания на половине высоты 1,5—2,2 нм. В качестве приемника света используется фотоумножитель. Телесный угол прибора (в плоском измерении) составляет в одном случае 2,3°, в другом 4,6°. Прибор имеет портативную следящую систему за солнечным диском. Светофильтры монтируются на диске, который вращается со скоростью 2 об/с. На фотоумножитель последовательно падает радиация, прошедшая каждый из шести светофильтров. Для опознавания каждого светофильтра электронная система получает фазовые импульсы от двух фотореле, состоящих из маленькой лампы и фотодиода, причем свет отражается от маленьких зеркал, закрепленных в диске со светофильтрами. Основные трудности при производстве новозеландского прибора заключаются в изготовлении узкополосных светофильтров. Стоимость этого прибора составляет 15—20 тыс. долл.

В СССР озонометр с узкополосными интерференционными светофильтрами был независимо разработан в Ленинградском государственном университете, а описание этого прибора приводится в работе [13].

Помимо указанных выше приборов, для исследовательских целей эпизодически применялись озонометры различных конструкций [2, 3, 5, 11—13], описание которых приводится в указанных работах.

Расчет СО для большинства из этих приборов производился по методике, разработанной Добсоном [10], или близкой к ней [11]. Для прибора, описанного в работе [12], использовалась эмпирическая методика расчета СО, которая, однако, больше нигде не применялась. Расчет СО для приборов М-83 производился по интегральной методике [4, 6].

Озонометр М-83 используется на сети советских и зарубежных озонометрических станций более 20 лет [4]. Он имеет два приемника излучения [4]: фотоэлемент — для работы по прямому солнечному свету, фотоумножитель — для работы по рассеянному свету, идущему от участка неба в зените. Применение двух приемников излучения с неодинаковой спектральной чувствительностью приводит к дополнительной погрешности измерения величины СО, поскольку спектральная чувствительность, необходимая для построения озонной номограммы, определяется по одному приемнику — фотоумножителю.

Для предохранения светофильтров от воздействия пыли и влаги герметизируется вся полость приемной части прибора М-83. При длительной эксплуатации наблюдалась разгерметизация прибора. В результате трения подвижных частей внутри герметизированной полости образуется металлическая пыль, которая, оседая на светофильтрах, искажала выдаваемые значения СО. Фотоэлектрическая схема озонметра М-83 устарела и не отвечает современным требованиям. В этих условиях представлялась целесообразной разработка нового озонметрического прибора для сети станций Советского Союза.

Основной идеей, заложенной в разработку макета нового озонметрического прибора, была идея создания малогабаритного, легкого, удобного в эксплуатации прибора с устойчивой спектральной чувствительностью в УФ области спектра. Эти задачи решаются в предложенной разработке за счет применения одного приемника излучения вместо двух, микросхемы вместо лампы и ряда других конструктивных изменений.

В разработанном макете прибора — фильтровом озонметре — для предохранения светофильтров от воздействия влаги и пыли предусмотрено размещение их в герметизированных капсулах, торцы которых закрыты кварцевыми стеклами с герметизирующими прокладками. Оптическая схема макета озонметра показана на рис. 1.

Съемный ручной гелиостат 1 предназначен для наводки озонметра на диск солнца. Контроль за наводкой осуществляется по световому пятну на внешней поверхности входной диафрагмы. Основным элементом ручного гелиостата является поворотная кварцевая пластина. Прямой солнечный свет, отражаясь от этой пластинки, проходит тубус и попадает на фотоэлемент.

Тубус с диафрагмами 2 служит для ограничения светового пучка, поступающего в прибор от диска солнца или участка неба в зените.

Светофильтры 3 в количестве трех штук предназначены для выделения трех спектральных участков в ультрафиолетовой области спектра, один из которых находится в полосе поглощения озона [6]. Длины волн в максимуме пропускания светофильтров равны соответственно 300 ± 2 нм; 326 ± 2 нм; 348 ± 2 нм. Светофильтры представляют собой комбинации цветных оптических стекол (ГОСТ 9411-75). Размещаются они в герметизированных капсулах.

Устройство для смены светофильтров 4 используют для поочередной установки трех светофильтров на пути светового пучка, падающего на фотоэлемент.

Приемник излучения 5 служит для преобразования светового сигнала в электрический ток.

В качестве приемника излучения выбран фотоэлемент Ф-4, спектральная чувствительность которого охватывает ультрафиолетовую и видимую части спектра.

Важной составной частью фотоэлектрической системы макета

озонметра является разработанный одним из авторов настоящей статьи усилитель постоянного тока, который позволяет производить измерения СО как по прямому солнечному свету, так и по рассеянному свету от зенита неба с помощью фотоэлемента. Эта возможность была достигнута в результате применения микросхемы с высоким собственным входным сопротивлением R и с большими коэффициентами передачи усилителя K без обратной связи. В данной разработке применялся ОУПТ серии 140УД8А, у которого $R=5 \cdot 10^9$ см, а $K=5 \cdot 10^5$. Усилитель с микросхемой 140УД8А собран по схеме неинвертирующего усилителя и приве-

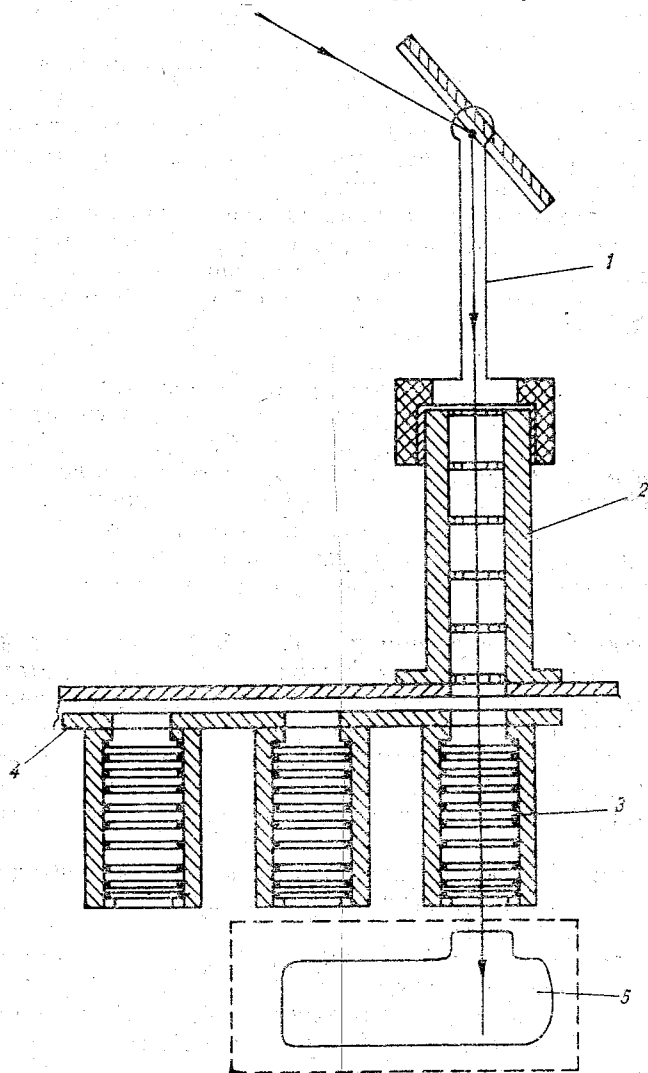


Рис. 1. Оптическая схема макета озонметра.

ден на рис. 2. Как показали лабораторные исследования, усилитель линеен во всех диапазонах чувствительности, что улучшает метрологические характеристики озонометра.

Батареи электропитания для усилителя и фотоэлемента должны давать напряжение в пределах 12—18 и 40—100 В при токах $1 \cdot 10^{-2}$ и $1 \cdot 10^{-7}$ А соответственно. В качестве отсчетного прибора применяется микроамперметр М1692 класса 0,5 со шкалой 0—100 мкА.

Методика измерения и обработки данных наблюдений за СО аналогичны изложенным в методических указаниях [6].

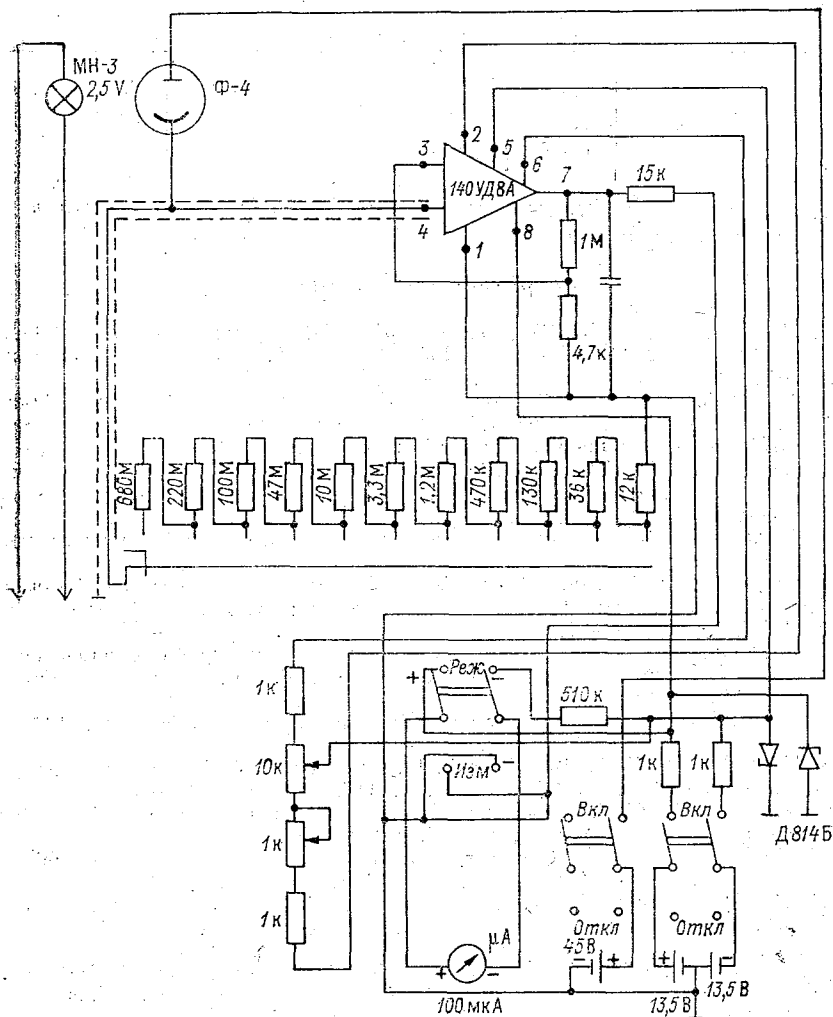


Рис. 2. Электрическая схема усилителя макета озонометра.

Полевые испытания макета озонметра проводились на экспериментальной базе ГГО в Воейково. Данные, полученные с помощью макета озонметра, сравнивались с данными, полученными по контрольному озонметру М-83 № 69 (табл. 1).

Таблица 1

Средние за день значения СО (атм-см), полученные по разным приборам в период сравнения

Дата	М-83 № 69	Фильтровый озонметр		Дата	М-83 № 69	Фильтровый озонметр	
		без отра- жателя	с отра- жате- лем			без отра- жателя	с отра- жате- лем
20.8 80	0,330	0,340	0,340	01.9	0,327	0,335	0,335
27.8	0,362	0,362	0,360	02.9	0,337	0,327	0,334
28.8	0,360	0,370	0,370				

Как видно из таблицы, расхождения между показаниями двух приборов не превышали 3,0 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 160877 (СССР). Озонметр/Г. П. Гушин. — Заявл. 14.06.62, № 783014/426—10; 26.02.64. — В кн.: Бюлл. открытий, изобретений и промышленных образцов и товарных знаков, 1964, № 5.
2. А. с. 285294 (СССР). Озонметр/А. С. Бритаев, В. М. Ратьков. — Заявл. 28.01.69 № 1300562/18—10; 24.05.71. — В кн.: Бюлл. открытий, изобретений, промышленных образцов и товарных знаков, 1971, № 3.
3. Безверхний Ш. А., Ошерович А. Л., Родионов С. Ф. Фотоэлектрические озонметры. — В кн.: Международный геофизический год. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1960, с. 81—104.
4. Гушин Г. П. Исследование атмосферного озона. — Л.: Гидрометеоздат, 1963. — 269 с.
5. Иозенас В. А., Кузнецов А. П. Фотоэлектрический спектрофотометр для наблюдений за атмосферным озоном. — В кн.: Атмосферный озон. — М.: Изд-во МГУ, 1961, с. 14—17.
6. Методические указания по производству и обработке наблюдений за общим содержанием атмосферного озона/Сост. Г. П. Гушин. — Л.: Гидрометеоздат, 1981. — 43 с.
7. Павлов А. В. Оптико-электронные приборы. — М: Энергия, 1974. — 144 с.
8. Matthews W. A., Basher R. E., Fraser G. J. Filter ozone spectrophotometer. — Pure Appl. Geophys., 1974, v. 112, N 6, p. 931—938.
9. Brewer A. W. A replacement for the Dobson spectrophotometer — Pure Appl. Geophys. 1973, v. 106—108, N 5—7, p. 919—927.
10. Dobson G. M. B. Observers handbook for the ozone Spectrophotometer. — Ann. I. G. Y., 1957, v. 5, N 1, p. 46—191.
11. Kuznetsov G. I. New multiwave method and instrument for observation of atmospheric ozone and aerosol. — Mat. Prace Inst Geofiz., 1975, v. 90, p. 13—20.
12. Leroy B. A four-filter photometer for the measurement of total ozone in the atmosphere. — J. Appl. Meteorol., 1977, v. 16, N 10, p. 1082—1088.
13. Osherovich A. L. e. a. Investigation of the atmospheric ozone by means of ozonometer with narrow-band interference light filters. — Mat. Prace Inst. Geofiz., 1875, 90, p. 21—30.

О ВОЗМОЖНОСТИ ЭМПИРИЧЕСКОЙ ГРАДУИРОВКИ ЛИДАРА В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

Уравнение лазерной локации в приближении однократного рассеяния и чисто рассеивающей однородной атмосферы имеет вид:

$$P(z) = \frac{Aq(z) \exp(-2\beta_s z)}{z^2}, \quad (1)$$

где $P(z)$ — сигнал обратного рассеяния с расстояния z ; A — множитель, зависящий от параметров лидара; β_s — объемный коэффициент рассеяния; $q(z)$ — геометрическая аппаратная функция лидара.

Проведенные эксперименты [4] показали, что при работе в ближней зоне использование уравнения лазерной локации в канонической форме (1) может приводить к существенным систематическим расхождениям между объемными коэффициентами рассеяния, определяемыми с помощью лидаров (β'_s) и базисных приборов (β_s). При этом независимо от метода обработки связь между β'_s и β_s оказывается корреляционной, причем уравнение регрессии имеет вид

$$\beta'_s = a\beta_s + b, \quad (2)$$

где $a \neq 1$ и $b \neq 0$, как это следовало бы ожидать, если бы выражение (1) точно соответствовало бы получаемым реальным сигналам. Коэффициенты корреляции между β_s и β'_s оказываются обычно достаточно высокими. Например, для лидара № 2 [4] $a=1,85$, $b=-0,30$, $r=0,95$ (сигналы обратного рассеяния обрабатывались по методу логарифмической производной [1], а $q(z)$ определялось, как указано в работе [2]).

Указанный эффект может быть обусловлен влиянием многократного рассеяния, нелинейностью преобразования сигнала в приемно-регистрирующем тракте и т. д. Есть основания считать, что этот эффект, проявляющийся в разной степени для лидаров с разной геометрией, обусловлен в значительной степени влиянием многократного рассеяния [4]. Следует заметить, что в ближней зоне лидара относительный вклад многократного рассеяния в сигнал

обратного рассеяния очень существен [3, 5]. Наличие искажающих факторов эквивалентно зависимости геометрического фактора от β_s . С учетом этого обстоятельства выражение для сигнала $P(z)$ можно записать в виде

$$P(z) = \frac{Aq_3(z) \exp(-2\beta_s z)}{z^2}. \quad (3)$$

Функция $q_3(z) = q(z, \beta_s)$ включает в себя такие факторы, как геометрический, многократное рассеяние и др.

Наличие хорошей корреляции β_s и β_s позволяет допустить, что при измерениях в однородной атмосфере все искажающие факторы можно учесть путем введения соответствующих эмпирических поправок.

Возникает естественный вопрос, нельзя ли определять β_s по эмпирически найденному уравнению регрессии. Однако делать это нецелесообразно по следующим обстоятельствам.

Во-первых, строго линейная зависимость между β_s и β_s получается лишь в случае, когда $\frac{d}{dz} \ln \left[\frac{q_3(z)}{q(z)} \right]$ линейно меняется с изменением β_s . При наличии нелинейной зависимости $\frac{d}{dz} \ln \left[\frac{q_3(z)}{q(z)} \right]$ от β_s появляются систематические отклонения значений β_s от линии регрессии (2).

Во-вторых, при наличии сильной зависимости $q_3(z)$ от β_s линейный участок $\ln \left[\frac{P(z) z^2}{q(z)} \right]$ (где $q(z)$ находится по серии осциллограмм, полученной при высокой прозрачности атмосферы) не будет зафиксирован в определенных пределах по z . Последнее приводит к сильному разбросу экспериментальных точек β_s относительно линии регрессии (2).

В-третьих, в случае когда коэффициент a значительно больше единицы, возникают существенные погрешности при определении β_s по уравнению регрессии (2) из-за крутого хода прямой.

В настоящей работе излагаются вопросы учета искажающих факторов при наличии нелинейной зависимости $\frac{d}{dz} \ln \left[\frac{q_3(z)}{q(z)} \right]$ от β_s . Изложенная ниже методика рассчитана в основном на обработку сигналов обратного рассеяния из ближней зоны лидара, где искажающие факторы наиболее сильно проявляются. Для того чтобы решить уравнение (3), найдем предварительно $q_3(z)$, используя результаты синхронных измерений величины β_s с помощью лидара и контрольных базисных приборов.

Обозначим

$$S(z) = P(z) z^2. \quad (4)$$

Функцию $\ln[q_3(z)]$ представим в виде отрезка ряда Тэйлора по β_s :

$$\ln[q_3(z)] = f_0(z) + f_1(z) \beta_s + f_2(z) \beta_s^2, \quad (5)$$

где $f_0(z)$, $f_1(z)$, $f_2(z)$ — некоторые неизвестные функции. Пусть известны функции $S_1(z)$, $S_2(z)$, $S_3(z)$, полученные с использованием предварительно осредненных по большим сериям сигналов лидача при β_{s1} , β_{s2} , β_{s3} , где последние определяются по контрольному базисному прибору. Учитывая соотношения (3—5), получим систему уравнений для нахождения функций $f_0(z)$, $f_1(z)$, $f_2(z)$:

$$\left. \begin{aligned} f_0(z) + f_1(z)\beta_{s1} + f_2(z)\beta_{s1}^2 &= 2\beta_{s1}z + \ln S_1(z) - \ln A_1; \\ f_0(z) + f_1(z)\beta_{s2} + f_2(z)\beta_{s2}^2 &= 2\beta_{s2}z + \ln S_2(z) - \ln A_2; \\ f_0(z) + f_1(z)\beta_{s3} + f_2(z)\beta_{s3}^2 &= 2\beta_{s3}z + \ln S_3(z) - \ln A_3. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Полагая $A_1=1$, $A_2=1$, $A_3=1$, найдем, решив систему уравнений (6), функции $f_0(z)$, $f_1(z)$, $f_2(z)$ с точностью до постоянных слагаемых:

$$\left. \begin{aligned} f_2(z) &= \frac{1}{\beta_{s2} - \beta_{s3}} \left\{ \frac{\ln \left[\frac{S_1(z)}{S_2(z)} \right]}{\beta_{s1} - \beta_{s2}} - \frac{\ln \left[\frac{S_1(z)}{S_3(z)} \right]}{\beta_{s1} - \beta_{s3}} \right\}; \\ f_1(z) &= 2z + \frac{\ln \left[\frac{S_1(z)}{S_2(z)} \right]}{\beta_{s1} - \beta_{s2}} - f_2(z)(\beta_{s1} + \beta_{s2}); \\ f_0(z) &= 2\beta_{s1}z + \ln S_1(z) - f_1(z)\beta_{s1} - f_2(z)\beta_{s1}^2. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

С учетом (5) уравнение лазерной локации (3) запишется в виде

$$P(z) = \frac{A \exp \{f_0(z) + [f_1(z) - 2z]\beta_s + f_2(z)\beta_s^2\}}{z^2}, \quad (8)$$

где $f_0(z)$, $f_1(z)$ и $f_2(z)$ определяются соотношениями (7). Предполагая, что β_s находится в интервале (β_{s1}, β_{s3}) , решим уравнение (8). Величину β_s можно найти из условия минимума выражения:

$$F = \sum_{i=1}^M \{ \ln[S(z_i)] - \ln A - f_0(z_i) - [f_1(z_i) - 2z_i]\beta_s - f_2(z_i)\beta_s^2 \}^2, \quad (9)$$

где M — число дискретных отсчетов сигнала обратного рассеяния $P(z)$ в интервале (z_0, z_1) .

Необходимым условием минимума выражения (9) является равенство нулю частных производных

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial A} &= 0; \\ \frac{\partial F}{\partial \beta_s} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Подставляя F из (9) в (10), дифференцируя и исключая из обоих уравнений A , легко получить уравнение третьей степени для определения β_s . Корни последнего можно найти по формулам Кардано [6]. Если получается более одного корня, то выбирается тот

из них, при котором достигается наименьшее значение величины F в (9).

Изложенная выше методика была проверена на экспериментальном материале, полученном по вышеупомянутому лидару № 2. При обработке сигналы обратного рассеяния логарифмически осреднялись [2]. В случае высокой прозрачности атмосферы ($0,1 < \beta_s \text{ км}^{-1} < 0,75$) функция $q_s(z)$ определялась в интервале от $z_0 = 80$ м до $z_1 = 260$ м по трем сериям осциллограмм: $\beta_{s1} = 0,11 \text{ км}^{-1}$ (45 осциллограмм), $\beta_{s2} = 0,38 \text{ км}^{-1}$ (45 осциллограмм), $\beta_{s3} = 0,59 \text{ км}^{-1}$ (25 осциллограмм). В случае низкой прозрачности атмосферы ($0,8 < \beta_s \text{ км}^{-1} < 6$) функция $q_s(z)$ определялась в интервале от $z_0 = 20$ м до $z_1 = 155$ м по трем сериям осциллограмм:

Таблица 1

Сравнение объемных коэффициентов рассеяния, полученных с помощью лидаров (β'_s) и базисных приборов (β_s)

$\beta'_s \text{ км}^{-1}$	$\beta_s \text{ км}^{-1}$	Количество осциллограмм в серии	$\beta'_s \text{ км}^{-1}$	$\beta_s \text{ км}^{-1}$	Количество осциллограмм в серии
0,45	$0,36 \pm 0,01$	9	0,61	$0,65 \pm 0,04$	5
0,31	$0,37 \pm 0,02$	10	0,59	$0,72 \pm 0,18$	11
0,34	$0,38 \pm 0,01$	10	1,5	$0,86 \pm 0,02$	10
0,38	$0,38 \pm 0,01$	9	1,26	$0,87 \pm 0,02$	10
0,43	$0,41 \pm 0,01$	7	1,73	$1,48 \pm 0,04$	16
0,67	$0,44 \pm 0,08$	13	3,09	$2,75 \pm 0,6$	8
0,29	$0,52 \pm 0,03$	10	3,0	$3,5 \pm 0,7$	7
0,59	$0,57 \pm 0,01$	10	6,8	$6,8 \pm 0,6$	10
0,58	$0,58 \pm 0,01$	10	7,2	$7,5 \pm 1,2$	6
0,84	$0,6 \pm 0,1$	9			

$\beta_{s1} = 0,87 \text{ км}^{-1}$ (20 осциллограмм), $\beta_{s2} = 3,1 \text{ км}^{-1}$ (15 осциллограмм), $\beta_{s3} = 6,8 \text{ км}^{-1}$ (10 осциллограмм). В табл. 1 приведены результаты обработки лидарных данных в сравнении с данными по базисным приборам. Коэффициент корреляции β'_s и β_s равен 0,99. Уравнение регрессии, рассчитанное по сериям, содержащим более четырех осциллограмм, имеет вид

$$\beta'_s = 0,99 \beta_s + 0,09. \quad (11)$$

Соотношение $\beta'_s \approx \beta_s$ выполняется довольно хорошо для значений β_s в диапазоне $0,2—7,5 \text{ км}^{-1}$ и существенно хуже при $\beta_s < 0,2 \text{ км}^{-1}$.

Следовательно, с помощью изложенной методики можно определять прозрачность атмосферы в ближней зоне по данным любого лидара, который предварительно градуируется по базисному прибору.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Игнатенко В. М., Ковалев В. А., Рыбаков Е. Е. Влияние инструментальных погрешностей на точность лидарного определения прозрачности атмосферы. — Труды ГГО, 1980, вып. 419, с. 89—99.
2. Игнатенко В. М., Ковалев В. А. Некоторые вопросы интерпретации сигналов при лидарном зондировании атмосферы. — См. наст. сб.
3. Некоторые результаты лазерного зондирования атмосферы по вертикальным и наклонным трассам/А. Л. Скрябин, А. П. Иванов, Л. В. Николаев, И. С. Хутко. — Изв. АН СССР, ФАО, 1975, т. 11, № 4.
4. Некоторые результаты экспериментальных сравнений лидаров и базисных регистраторов прозрачности/В. А. Ковалев, В. И. Козинцев, Г. Н. Балденков и др. — См. наст. сб.
5. Креков Г. М., Крекова М. М. Результаты статистического моделирования диффузии излучения в атмосферно-оптическом канале. — В кн.: Тезисы докладов VI Всесоюзного симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Томск, 1980, с. 80—84.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. — М.: Наука, 1968, с. 47—48.

В. М. Игнатенко, В. А. Ковалев

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СИГНАЛОВ ПРИ ЛИДАРНОМ ЗОНДИРОВАНИИ АТМОСФЕРЫ

В настоящей работе излагаются некоторые методические принципы интерпретации сигналов лидарного зондирования атмосферы, использованные при обработке экспериментальных данных, полученных в Воейково за период с октября 1979 г. по ноябрь 1980 г. [10]. При обработке использовались серии осциллограмм, осредненных предварительно следующим образом:

$$\overline{P(z)} = \exp \left[\frac{\sum_{k=1}^N \ln P_k(z)}{N} \right], \quad (1)$$

где $\overline{P(z)}$ — осредненный сигнал обратного рассеяния; $P_k(z)$ — сигнал обратного рассеяния, соответствующий k -й осциллограмме; z — расстояние от лида; N — количество осциллограмм в серии.

Приведем обоснование такого осреднения. Уравнение лазерной локации в приближении однократного рассеяния и чисто рассеивающей атмосферы имеет следующий вид:

$$P(z) = \frac{Aq(z)\beta_{\pi}(z) \exp \left[-2 \int_{z_0}^z \beta_s(z) dz \right]}{z^2}, \quad (2)$$

где $P(z)$ — сигнал обратного рассеяния с расстояния z ; A — множитель, зависящий от параметров лида и прозрачности атмо-

сферы на начальном участке трассы от $z=0$ до $z=z_0$; $q(z)$ — геометрическая аппаратная функция лидара; $\beta_{\pi}(z)$ — объемный коэффициент обратного рассеяния; $\beta_s(z)$ — объемный коэффициент рассеяния. На основании работ [1, 8, 16, 17] будем считать, что выполняется соотношение

$$\beta_{\pi}(z) = K_0[\beta_s(z)]^n \quad (3)$$

(n и K_0 — постоянные коэффициенты) и что профили $\beta_s(z)$, соответствующие отдельным осциллограммам, имеют малую дисперсию относительно среднего профиля $\beta_s(z)$, где

$$\overline{\beta_s(z)} = \frac{\sum_{k=1}^N \beta_{sk}(z)}{N} \quad (4)$$

С учетом (1) и (3) $\overline{P(z)}$ соответствует уравнению лазерной локации относительно $\beta_s(z)$, поскольку

$$\exp \left[\frac{\sum_{k=1}^N \ln \beta_{sk}(z)}{N} \right] \approx \overline{\beta_s(z)}. \quad (5)$$

Таким образом достигается конечная цель осреднения: осредненный сигнал обратного рассеяния соответствует уравнению лазерной локации относительно среднего по серии осциллограмм профиля $\beta_s(z)$. Кроме этого, в определенной степени компенсируются случайные инструментальные погрешности.

Решение уравнения (2) можно записать следующим образом [13]:

$$\beta_s(z) = \frac{n \varphi(z)}{E - 2 \int_{z_0}^z \varphi(z) dz}, \quad (6)$$

где

$$E = n(AK_0)^{1/n}, \quad \varphi(z) = \left[\frac{P(z)z^2}{q(z)} \right]^{1/n}.$$

Выражение (6) содержит неизвестные величины n , $q(z)$, E . Параметр n задается априорно. Например при обработке экспериментальных данных, полученных при горизонтальном зондировании атмосферы, можно положить $n=1$ [7].

Использование прямого расчета геометрической аппаратной функции лидара $q(z)$ [2, 9, 12, 14] требует определения угловых характеристик и диаграмм направленности приемника и передатчика с высокой точностью, что представляет довольно сложную экспериментальную задачу. Кроме того, могут существовать и другие факторы, неучет которых будет приводить к искажению расчетной функции $q(z)$ относительно истинной. Нами использо-

вался более простой вариант, основанный на привлечении данных независимого контрольного прибора. Были взяты большие серии осциллограмм ($N > 50$), полученные при горизонтальном зондировании в условиях высокой прозрачности атмосферы. Предполагалось, что профиль $\beta_s(z)$, соответствующий осредненному сигналу обратного рассеяния $\overline{P_0(z)}$, удовлетворяет условию $\beta_s(z) = \text{const}$. В этом случае искомая функция $q(z)$ выражается с точностью до постоянного множителя следующим образом:

$$cq(z) = z^2 \overline{P_0(z)} \exp(2\overline{\alpha_m} z), \quad (7)$$

где $\overline{\alpha_m}$ — средний по серии объемный коэффициент рассеяния, определяемый из параллельных измерений с помощью контрольного базисного прибора.

Существующие методы решения уравнения лазерной локации (2) различаются способом определения параметра E . Асимптотический метод, основы которого были заложены в серии работ [4—6], дает для конечных участков трассы (z_0, z_1) следующую оценку параметра E :

$$E = 2 \int_{z_0}^{z_1} \varphi(z) dz. \quad (8)$$

Использование значения E , найденного по (8), приводит к так называемому краевому эффекту [3]. Для того чтобы избавиться от этого эффекта, т. е. для нахождения добавки

$$\Delta E = 2 \int_{z_1}^{\infty} \varphi(z) dz, \quad (9)$$

применяют различную регуляризацию искомого решения уравнения лазерной локации (2), например стягивание решения в одной точке трассы к наиболее вероятному [11]. Это требует дополнительной информации о вероятных значениях объемного коэффициента рассеяния в данной точке, а кроме того, что особенно важно, идентификации состояния атмосферы. Ввиду непрерывности протекания процессов в атмосфере последнее связано с определенными трудностями.

Суть регуляризации, разработанной авторами настоящей работы, состоит в том, что для нахождения добавки ΔE используется аналитическое продолжение функций $P(z)$ и $q(z)$ за пределы участка (z_0, z_1) при $z > z_1$. Чтобы осуществить последнее, необходимо предварительно представить $P(z)$ и $q(z)$ в пределах (z_0, z_1) в виде некоторых функций, зависящих от нескольких параметров. Последние можно найти по осредненным осциллограммам, воспользовавшись методом наименьших квадратов. Необходимо отметить, что аналитические выражения для $P(z)$ и $q(z)$ должны быть положительны в интервале (z_0, ∞) и обеспечивать сходимость интеграла (9). В качестве аналитического

выражения осредненного сигнала обратного рассеяния нами использовалась следующая функция:

$$\Phi(z) = \frac{\exp \sum_{k=1}^4 A_k z^{k-3}}{z^2}. \quad (10)$$

Коэффициенты A_k ($k=1, 2, 3, 4$) находились по методу наименьших квадратов при условии минимума выражения:

$$F = \sum_{i=1}^M \left\{ \ln \left[\frac{\overline{P(z_i)}}{\Phi(z_i)} \right] \right\}^2, \quad (11)$$

где M — число дискретных отсчетов сигнала $\overline{P(z)}$ в интервале (z_0, z_1) . Имея аналитическое выражение $\Phi(z)$ для осредненного сигнала обратного рассеяния $\overline{P(z)}$, можно, воспользовавшись формулой (7), построить аналитическое выражение для $q(z)$. Полученный экспериментальный материал подтверждает, что сигнал обратного рассеяния в ближней зоне лидара при горизонтальном зондировании атмосферы в большинстве случаев описывается соотношением (10).

Параметр E можно выразить в виде

$$E = 2 \int_{z_0}^{z_1} \varphi(z) dz + 2 \int_{z_1}^{\infty} \left[\frac{\Phi(z) z^2}{q(z)} \right]^{1/n} dz. \quad (12)$$

Учитывая близость функций $\overline{P(z)}$ и $\Phi(z)$, параметр E может быть рассчитан по формуле

$$E = 2 \int_{z_0}^{\infty} \exp \left[\frac{2 \overline{\alpha_M} z + \sum_{k=1}^4 (A_k - B_k) z^{k-3}}{n} \right] dz, \quad (13)$$

где A_k и B_k ($k=1, 2, 3, 4$) — аппроксимационные параметры, определяемые по соотношению (10) при условии минимума (11) (A_k — для осредненного сигнала обратного рассеяния, подлежащего обработке; B_k — для осредненного сигнала обратного рассеяния, используемого для нахождения $q(z)$); $\overline{\alpha_M}$ — средний по трассе объемный коэффициент ослабления (рассеяния), используемый для нахождения $q(z)$ и определяемый по контрольному базисному прибору.

Среднее значение объемного коэффициента рассеяния $\overline{\beta_s(z_0, z_1)}$ на промежутке (z_0, z_1) , согласно (6), выразится в виде

$$\overline{\beta_s(z_0, z_1)} = - \frac{n}{2(z_1 - z_0)} \ln \left[\frac{\int_{z_1}^{\infty} f(z) dz}{\int_{z_0}^{\infty} f(z) dz} \right], \quad (14)$$

где $f(z)$ — подынтегральная функция выражения (13).

Асимптотический метод обладает определенной устойчивостью к неточности задания параметра n . Оценка этого вида погрешности приведена в [7]. Рассмотрим погрешности определения $\overline{\beta_s(z_0, z_1)}$, обусловленные наличием разброса значений осредненных сигналов обратного рассеяния относительно аппроксимационных кривых (10). Средняя квадратическая погрешность этой величины может быть оценена по формуле

$$\Delta \overline{\beta_s(z_0, z_1)} = \sqrt{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 3}}^4 \left[\frac{d \overline{\beta_s(z_0, z_1)}}{d A_j^*} \Delta A_j^* \right]^2}, \quad (15)$$

где

$$A_j^* = A_j - B_j, \quad (\Delta A_j^*)^2 = (\Delta A_j)^2 + (\Delta B_j)^2, \quad j = 1, 2, 4.$$

Из (14) следует

$$\frac{d \overline{\beta_s(z_0, z_1)}}{d A_j^*} = \frac{n}{2(z_0 - z_1)} \left[\frac{\int_{z_1}^{\infty} f(z) z^{j-3} dz}{\int_{z_1}^{\infty} f(z) dz} - \frac{\int_{z_0}^{\infty} f(z) z^{j-3} dz}{\int_{z_0}^{\infty} f(z) dz} \right], \quad (16)$$

где $j=1, 2, 4$. Воспользовавшись теорией метода наименьших квадратов, найдем $\Delta A_j, \Delta B_j$ ($j=1, 2, 4$). Предположим, что экспериментальные точки $Y_i = \ln[P(z_i) z_i^2]$ разбросаны вокруг аппроксимационной кривой

$$Y_{\text{анпр}} = \sum_{k=1}^4 A_k z^{k-3} \quad (17)$$

по закону, близкому к нормальному, с одинаковой дисперсией σ^2 . Тогда матрица, обратная матрице ошибок, будет иметь следующие элементы [15]:

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F}{\partial A_i \partial A_j}, \quad (18)$$

где

$$F = \frac{\sum_{l=1}^M \left[Y_l - \sum_{k=1}^4 A_k z_l^{k-3} \right]^2}{\sigma^2}, \quad i, j = 1, 2, 3, 4, \quad (19)$$

M — число дискретных отсчетов сигнала обратного рассеяния $\overline{P(z)}$ в интервале (z_0, z_1) .

Следовательно, имеем

$$B_{ij} = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{k=1}^M z_k^{i+j-6}. \quad (20)$$

Обращая матрицу B , получим

$$(\Delta A_i)^2 = \frac{A_{ii}}{\det(B)}, \quad (21)$$

где A_{ii} — алгебраическое дополнение элемента B_{ii} матрицы B , а $\det(B)$ — определитель этой же матрицы. Величина σ^2 находится из принципа максимального правдоподобия:

$$\sigma^2 = \frac{1}{M} \sum_{l=1}^M \left[Y_l - \sum_{k=1}^4 A_k z_l^{k-3} \right]^2. \quad (22)$$

Величины $(\Delta A_i)^2$ и $(\Delta B_i)^2$ ($i=1, 2, 4$) отличаются лишь множителем σ^2 . Следовательно, величину $(\Delta A_i^*)^2$ можно рассчитывать по формуле (21), используя $\sigma^2 + \sigma_0^2$ вместо σ^2 . Величина σ_0^2 рассчитывается по формуле (22) для осредненного сигнала обратного рассеяния, используемого для вычисления геометрической аппаратной функции лидара по формуле (7). Поскольку асимптотический метод не требует абсолютной калибровки аппаратуры, то численное значение постоянного множителя c в формуле (7) несущественно. Для удобства можно считать $c=1$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бартенева О. Д., Довгялло Е. Н., Полякова Е. А. Экспериментальные исследования оптических свойств приземного слоя атмосферы. — Труды ГГО, 1967, вып. 220, с. 226.
2. Даничкин С. А., Самохвалов И. В. Уравнение лазерного зондирования. — В кн.: Тезисы докладов IV Всесоюзного симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Томск, 1976, с. 74—78.
3. Кавкянов С. И. К оценке точности восстановления профиля коэффициента ослабления при лазерном зондировании. — В кн.: Тезисы докладов IV Всесоюзного симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Томск, 1976, с. 95—98.
4. Ковалев В. А. Теоретическая модель схемы измерения прозрачности атмосферы по интенсивности рассеянного назад света. — Труды ГГО, 1970, вып. 255, с. 165—171.
5. Ковалев В. А. Измерение прозрачности атмосферы с помощью световых импульсов малой длительности. — Труды ГГО, 1972, вып. 279, с. 194.
6. Ковалев В. А. Об одном способе обработки сигналов лазерного лоатора. — Труды ГГО, 1973, вып. 312, с. 128—133.
7. Ковалев В. А., Игнатенко В. М. Влияние вариаций индикатрисы рассеяния на точность лидарного определения прозрачности атмосферы. — Труды ГГО, 1980, вып. 445, с. 63—68.
8. Лопухин Е. А. Результаты измерения хода суммарной освещенности. — Метеорология и гидрология, 1948, № 6, с. 315—321.
9. Метлицкий Б. И., Чайнова Э. А. Способ увеличения дальности действия лазерного измерителя высоты облачности. — В кн.: Тезисы докладов Всесоюзного симпозиума «Радиофизические исследования атмосферы», Л.: ГГО, 1975, с. 2—4.
10. Некоторые результаты экспериментальных сравнений лидаров и базисных регистраторов прозрачности/В. А. Ковалев, В. И. Козинцев, Г. Н. Балденков и др. — См. наст. сб.
11. Об интерпретации лидарных сигналов из области больших опти-

ческих толщ/В. Е. Зуев, Г. О. Задде, С. И. Кавкьянов, Б. В. Кауль.— В кн.: Дистанционное зондирование атмосферы. Новосибирск, 1978, с. 60—68.

12. Определение прозрачности атмосферы по эхо-сигналу «ближней зоны» лидара/В. Н. Шулейкин, А. П. Тихонов, А. Е. Тяботов и др.— В кн.: Тезисы докладов Всесоюзного симпозиума «Радиофизические исследования атмосферы», Л.: ГГО, 1975, с. 22—23.

13. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии.— Л.: Гидрометеоиздат, 1973.— 342 с.

14. Тихомиров А. А. К оценке геометрического фактора лидара.— В кн.: Тезисы докладов IV Всесоюзного симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Томск, 1976, с. 301—304.

15. Худсон Д. Статистика для физиков.— М.: Мир, 1970.— 199 с.

16. Silverman B. A. Report at 2nd Annual Weather Modification Conference, Santa Barbara, 1970.— 12 p.

17. Vogt H. Visibility measurements using backscattered light.— Atm. Sci., 1968, v. 25, p. 912—916.

**В. А. Ковалев, В. И. Козинцев, Г. Н. Балденков,
В. М. Игнатенко, Е. Э. Ковалькова, А. Г. Кузьмин,
М. И. Миленкий, Е. Е. Рыбаков**

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СРАВНЕНИЙ ЛИДАРОВ И БАЗИСНЫХ РЕГИСТРАТОРОВ ПРОЗРАЧНОСТИ

В 1979—1980 гг. на полевой базе ГГО в Воейково проводились синхронные измерения прозрачности атмосферы базисными приборами и лазерными локаторами. На разных этапах этих сравнений использовались разные лидары. На первом этапе (октябрь 1979—март 1980 г.) использовался лидар № 1, построенный на базе лазерного измерителя высоты облаков типа ЛИВО со следующими параметрами: длина волны зондирующего излучения 0,694 мкм, энергия излучения 0,15 Дж, угловое расхождение светового луча 2', диаметр выходного зрачка излучателя 50 мм, угол поля зрения приемника 3', диаметр выходного зрачка приемника 60 мм, расстояние между центрами выходных зрачков приемника и излучателя 65 мм, частота повторения импульсов 1 посылка в минуту. На втором этапе (август—сентябрь 1980 г.) использовался лидар № 2 аналогичного типа. Однако если у первого лидара оптические оси излучателя и приемника были параллельны, то у лидара № 2 они были смещены по отношению друг к другу примерно на 1—2'. На третьем этапе (октябрь—ноябрь 1980 г.) использовался лидар № 3, который отличался от первых двух существенно большей частотой посылок импульсов (1 Гц) и наличием автоматической системы регистрации и обработки данных, обеспечивающей измерения амплитуд стробов принятого сигнала с заданным шагом квантования и непосредственную обработку данных с помощью ЭВМ. Основные параметры лидара № 3: длина волны излучения 0,694 мкм, средняя мощность в импульсе 20—30 мВт, длительность импульсов излучения 15—25 нс. В ка-

честве приемной оптики в лидаре использовался телескоп Максутова с диаметром 290 мм.

Контрольная аппаратура, с помощью которой проводилась независимая регистрация метеорологической дальности видимости (МДВ), включала в себя регистратор прозрачности РДВ-2 на стандартной базе 2×100 м [2] и регистратор прозрачности на основе прибора М-37 [1], у которого для расширения диапазона измеряемых МДВ до значений 30—50 км измерительная база увеличена до 960 м.

При обработке сигналов лазерных локаторов использовались методы, не требующие дополнительных независимых измерений (метод асимптотического сигнала без регуляризации [5] и с регуляризацией, описанной в работе [3], а также метод логарифми-

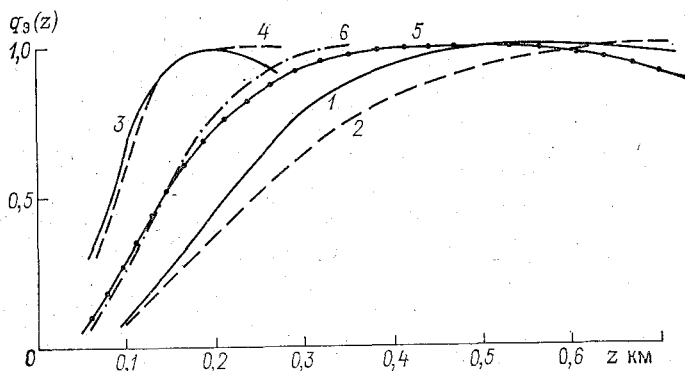


Рис. 1. Нормированные геометрические функции $q_3(z)$ для лидаров № 1 (1, 2), № 2 (3, 4) и № 3 (5, 6) по экспериментальным данным, полученным при различных значениях метеорологической дальности видимости S_M . 1 — $S_M = 20$ км, 45 осциллограмм, 5 серий; 2 — $S_M = 10$ км, 10 осциллограмм, 1 серия; 3 — $S_M = 30$ км, 45 осциллограмм, 5 серий; 4 — $S_M = 9$ км, 45 осциллограмм, 5 серий; 5 — $S_M \geq 100$ км, 25 осциллограмм, 5 серий; 6 — S_M равно 6—10 км, 20 осциллограмм, 4 серии.

ческой производной [4]). Перед обработкой проводилось предварительное осреднение эхо-сигналов лидара по серии из 5—10 осциллограмм, полученных с интервалами около 1 мин для лидаров № 1 и 2 и через 10—15 с для лидара № 3.

Геометрические аппаратные функции (ГАФ) лидаров $q_A(z)$, определяющие степень перекрытия конусов световых лучей лазеров и конусов полей зрения приемников в ближней зоне, для всех лидаров находились экспериментальным путем непосредственно по сигналам лидаров, полученным при высокой прозрачности атмосферы. Эти функции, нормированные на их максимальные значения, для перечисленных выше лидаров показаны на рис. 1 сплошными линиями (кривые 1, 3, 5).

Сравнения результатов, полученных при одновременном измерении прозрачности атмосферы лазерными локаторами и базисными приборами, выявили следующие характерные особенности. Применение для интерпретации сигналов лидаров уравнения лазерной локации в его обычной форме с использованием ГАФ лидара, полученной экспериментальным путем, может приводить к появлению систематических расхождений между показаниями лидаров и базисных регистраторов прозрачности. Эти расхождения, как правило, более сильно выражены на краях диапазона, т. е. при высокой прозрачности и в плотных туманах, и существенно увеличиваются при работе лидара в зоне неполного пересечения конусов поля зрения приемника и светового луча лазера. Однако, несмотря на то что показатели ослабления (рассеяния), полученные при синхронных измерениях базисными приборами (β_s) и лазерными локаторами (β'_s), могут существенно отличаться друг от друга, между этими величинами, как показывает анализ, существует довольно устойчивая связь. Эта связь имеет корреляционный характер и может быть выражена уравнением регрессии вида

$$\beta'_s = a \beta_s + b, \quad (1)$$

где численные значения коэффициентов a и b зависят от параметров используемого лидара, а для одного и того же лидара — от выбранной методики обработки и от принципа выбора участка зондируемой трассы, по которому определяется искомое значение β'_s . Коэффициенты корреляции между значениями β'_s и β_s обычно оказываются достаточно высокими ($R=0,8-0,9$ и более), особенно если эта связь рассматривается в широком диапазоне измеряемых значений β_s . При уменьшении диапазона значений β_s коэффициент корреляции существенно уменьшается. Наибольший разброс между β_s и β'_s относительно линии регрессии (1) наблюдается для точек, полученных по малым сериям (количество осциллограмм в серии < 5) и в условиях быстро меняющейся видимости.

Для выяснения причин вышеописанного эффекта были проведены исследования хода геометрической функции $q_0(z)$ при разных значениях МДВ. Для анализа было отобрано более 300 осциллограмм, полученных исследуемыми лидарами в результате зондирования по горизонтальным трассам при различных значениях видимости и в условиях относительно стабильной атмосферы. Данные лазерного зондирования для каждого лидара были разбиты по отдельным градациям МДВ при ширине градации примерно $\pm 20\%$ среднего значения. Кривые $q_0(z)$ с точностью до постоянного множителя определялись по осредненному (в пределах градации) сигналу лидара и соответствующему значению показателя ослабления, полученному из параллельных измерений базисными регистраторами прозрачности.

Проведенные исследования выявили наличие систематического изменения хода геометрической функции $q_0(z)$ в ближней зоне в зависимости от МДВ. Этот эффект обнаруживается уже при больших значениях МДВ (рис. 1), однако наиболее сильно сказывается при малых значениях видимости, причем имеет место не только в ближней зоне лидара, но и в прилегающей к ней области, где, согласно геометрическим расчетам, $q_0(z)$ должна быть постоянной и равной единице. Обнаруженная зависимость хода функций $q_0(z)$ от МДВ может быть вызвана разными причинами; наиболее вероятной, по-видимому, является неучет влияния фона многократного рассеяния.

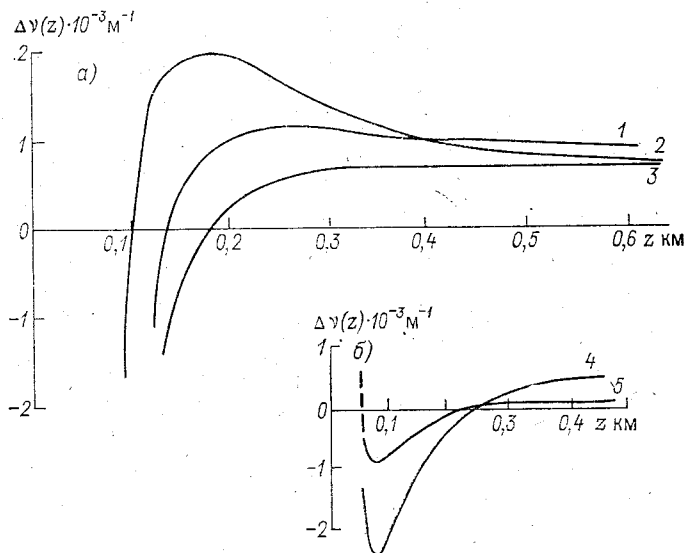


Рис 2. Вид функций $\Delta v(z)$ для лидаров № 1 (а) и № 3 (б).
1 — $S_M = 2,4$ км; 2 — $S_M = 3,5$ км; 3 — $S_M = 10$ км; 4 — S_M равно 15—
20 км; 5 — S_M равно 30—40 км.

В качестве характеристики, использованной для исследования характера искажающих факторов, вызывающих зависимость хода функций $q_0(z)$ от МДВ, применялась функция вида

$$\Delta v(z) = \frac{1}{N} \frac{d}{dz} \sum_{i=1}^N \ln P_i(z) - \frac{1}{M} \frac{d}{dz} \sum_{j=1}^M \ln P_j(z) + 2(\bar{\beta}_{sN} - \bar{\beta}_{sM}), \quad (2)$$

где $\bar{\beta}_{sN}$ и $\bar{\beta}_{sM}$ — показатели рассеяния (ослабления), полученные по контрольным базисным приборам в дымке (или в тумане) и при высокой прозрачности соответственно. Первое слагаемое в (2) определяется путем осреднения N профилей логарифмов сигналов обратного рассеяния $P_i(z)$, полученных в условиях дым-

ки или тумана ($\beta_s = \bar{\beta}_{sN}$), второе — путем осреднения M профилей, полученных в условиях высокой прозрачности атмосферы при $\beta_s = \bar{\beta}_{sM}$. На рис. 2 приведен вид функций $\Delta v(z)$, полученных при разных значениях МДВ для исследуемых лидаров № 1 и 3. Значения $\bar{\beta}_{sM}$ равны 0,15 и 0,03 км⁻¹ соответственно. Вид этих функций хорошо согласуется с физическими представлениями о распределении вклада многократного рассеяния в зависимости от степени пересечения конусов поля зрения приемника и излучателя. Наличие протяженных горизонтальных участков функций $\Delta v(z)$ ($\Delta v(z) = \text{const}$) при $z \geq 300$ м соответствуют выводу работы [6] о пропорциональности (при положении светового луча целиком внутри поля зрения приемника) относительной добавки многократного рассеяния оптической толщине зондируемого слоя. Отметим попутно, что величина $\Delta v(z)$ характеризует абсолютную погрешность измерения $\beta'_s(z)$, обусловленную наличием многократного рассеяния (или другого искажающего фактора). Например, при определении показателя рассеяния методом логарифмической производной на локальных участках зондируемой трассы, находящихся на расстоянии z от локатора, $\Delta v(z) = 2\Delta\beta'_s(z)$.

Таким образом, наличие любого искажающего фактора, имеющего систематический характер, например фона многократного рассеяния, приводит при его неучете к систематическим расхождениям между β_s и β'_s . Для исследования наличия и характера искажающего фактора для конкретных лидаров можно использовать появление в этом случае фиктивной зависимости геометрической функции лидара от МДВ, которая может быть оценена с помощью функции $\Delta v(z)$, рассчитываемой по формуле (2).

Методы, которые использовались при обработке полученных сигналов лидаров (метод логарифмической производной, метод асимптотического сигнала) удобны тем, что при определенных допущениях они не требуют независимых измерений каких-либо дополнительных параметров. Однако здесь появляется трудность в выборе участков трассы, для которых эти допущения справедливы. Поясним это на конкретном примере обработки сигналов лидара, например методом логарифмической производной. Здесь всегда существует неопределенность при выборе участка трассы, в пределах которого атмосферу можно считать однородной, или конкретно — в выборе участка Δz , в пределах которого функция

$$Y(z) = \ln P(z) z^2 \frac{1}{q_A(z)} \quad (3)$$

($P(z)$ — сигнал лидара с расстояния z) хорошо аппроксимируется уравнением прямой $Y_a(z) = m - nz$.

Наличие дисперсии точек функции $Y(z)$ относительно аппроксимирующей прямой $Y_a(z)$ приводит к появлению большей или меньшей зависимости величины определяемого параметра $n = 2\beta'_s$ от выбранных границ участка Δz , по которому производится аппроксимация.

В качестве иллюстрации сказанного в табл. 1 приведен типичный результат обработки на ЭВМ одной из серий (осреднение по 5 посылкам), полученный при зондировании атмосферы лидаром № 3. Обработка проводилась по методу наименьших квадратов [4]. Здесь R — коэффициент корреляции, ΔR — средняя квадратическая погрешность тесноты корреляции, $\Delta\beta'_s$ и $\Delta\beta'_s/\beta'_s$ — абсолютные и относительные погрешности величины β'_s , оцененные по стандартным формулам регрессионного анализа. При рассмотрении данных, представленных в табл. 1, возникает естественный вопрос, какой же участок зондируемой трассы следует считать

Таблица 1

Пример обработки результирующего эхо-сигнала лидара методом логарифмической производной при выборе для определения β'_s разных участков трассы $\Delta z = z_2 - z_1$ (28.10 1980 г., 16 ч 49 мин, $S_M = 6$ км, $\beta_s = 0,5$ км⁻¹, шаг стробирования по дальности 20 м)

z_1 км	z_2 км	Расчетное значение β'_s км ⁻¹	$\Delta\beta'_s$ км ⁻¹	$\Delta\beta'_s/\beta'_s$ %	R	ΔR
0,06	0,56	0,85	0,07	8	0,89	0,04
0,06	0,58	0,81	0,07	9	0,88	0,04
0,06	0,60	0,75	0,07	10	0,86	0,05
0,06	0,62	0,70	0,07	11	0,85	0,05
0,06	0,66	0,65	0,07	11	0,84	0,05
0,06	0,68	0,62	0,07	11	0,83	0,05
0,06	0,70	0,59	0,07	11	0,82	0,06
0,06	0,72	0,55	0,07	12	0,80	0,06
0,04	0,72	0,51	0,07	13	0,78	0,07

однородным и какова соответственно искомая величина β'_s , поскольку все параметры, которые могли бы служить критерием линейности функции $Y(z)$, непрерывно изменяются при изменении выбираемого участка трассы Δz . Аналогичная неопределенность в той или иной степени имеет место и при использовании других методов обработки. В конкретном случае, приведенном в табл. 1, причиной монотонного измерения β'_s при изменении Δz является, по-видимому, несоответствие функции $q_s(z)$ в данных условиях выбранной ГДФ лидара. Однако принципиально аналогичный эффект будет иметь место при наличии любых сколько-нибудь устойчивых локальных неоднородностей на зондируемой трассе.

Из сказанного следует, что зависимость между β_s и β'_s носит в известной степени случайный характер. На рис. 3 нанесены линии регрессии для лидаров № 1 и 2, полученные при разных методах обработки. Из рис. 3 следует, что даже один и тот же метод может для одних и тех же данных давать отличающиеся линии регрессии (кривые 2 и 3), если применяются разные критерии линейности функции $Y(z)$. Отметим также существенное увеличе-

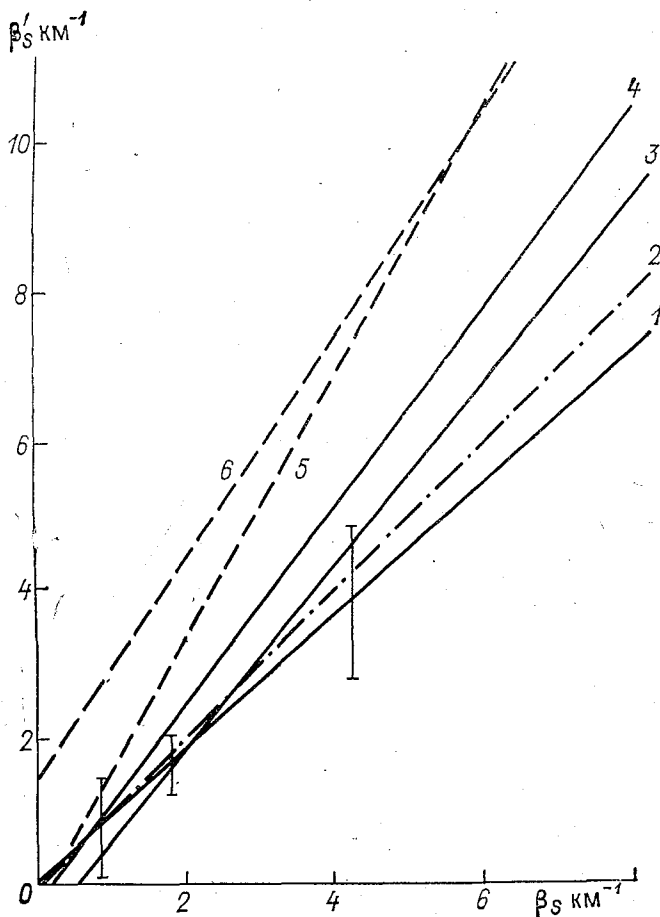


Рис. 3. Линии регрессии для лидаров № 1 (2, 3, 4) и № 2 (5, 6) при обработке сигналов методами логарифмической производной (2, 3, 5) и асимптотического сигнала (4, 6).

1 — линия равных значений β_s и β'_s ; 2 — $a=0,91$, $b=0,03$, $R=0,88$; 3 — $a=1,25$, $b=-0,6$, $R=0,89$; 4 — $a=1,35$, $b=0,22$, $R=0,91$; 5 — $a=1,8$, $b=-0,3$, $R=0,94$; 6 — $a=1,5$, $b=1,4$, $R=0,92$.

ние кривизны линии регрессии для лидара № 2, объясняющееся тем, что весь полезный сигнал, принимаемый приемником этого лидара, приходит из ближней зоны, где относительный вклад добавки многократного рассеяния уменьшается с расстоянием z . Очевидно, что, варьируя положение участка зондируемой трассы Δz , по сигналу от которого определяется прозрачность атмосферы, можно получить значения a в уравнении регрессии (1) и больше, и меньше, и равные единице.

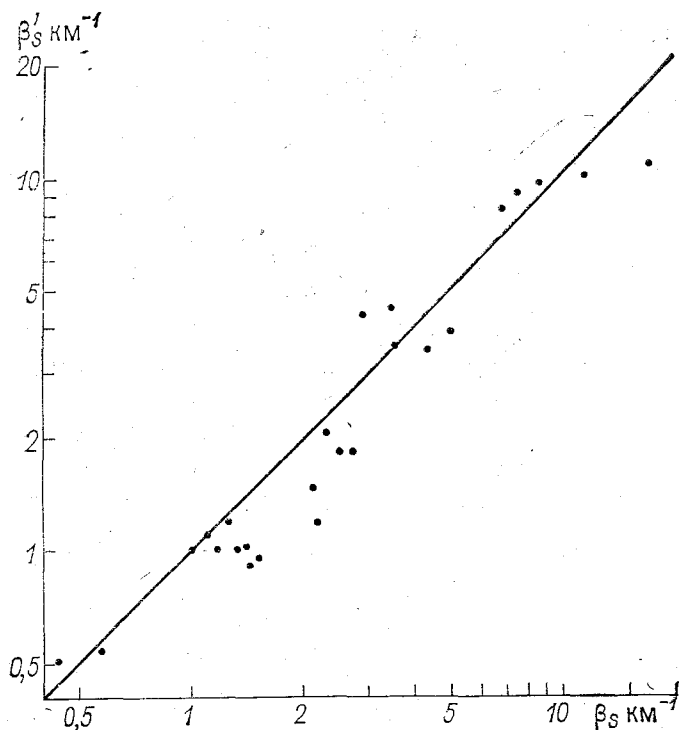


Рис. 4. Зависимость между β_s и β'_s для лидара № 3 (обработка сигналов лидара по методу логарифмической производной).

В заключение в качестве примера приведем результаты сравнений данных контрольных базисных приборов (β_s) и лидара № 3 (β'_s), проведенных 1—2 ноября 1980 г. (рис. 4). Обработка сигналов лидара выполнена методом логарифмической производной по сериям, состоящим из 5 посылок. Рассмотрение полученных результатов показало, что приемлемая сходимость величин β_s и β'_s имеет место в том случае, если при определении β'_s использовать участки Δz , для которых абсолютная погрешность $\Delta\beta'_s$,

определенная по стандартным методам регрессионного анализа, имеет минимальное значение, а при равных $\Delta\beta'$ выбирать участок, наибольший по протяженности. Этот критерий (который не следует рассматривать как общую рекомендацию) и был использован при построении рис. 4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горышин В. И. Установка для регистрации прозрачности атмосферы. — Труды ГГО, 1960, вып. 100, с. 74—85.
2. Горышин В. И. Серийный образец компенсационного фотометра для измерения и регистрации прозрачности атмосферы. — Труды ГГО, 1968, вып. 213.
3. Игнатенко В. М., Ковалев В. А. Некоторые вопросы интерпретации сигналов при лидарном зондировании атмосферы. — См. наст. сб.
4. Игнатенко В. М., Ковалев В. А., Рыбаков Е. Е. Влияние инструментальных погрешностей на точность лидарного определения прозрачности атмосферы. — Труды ГГО, 1980, вып. 419, с. 89—99.
5. Ковалев В. А. Измерения прозрачности атмосферы с помощью световых импульсов малой длительности. — Труды ГГО, 1973, вып. 312, с. 128—133.
6. Самохвалов И. В. Теория двухкратного рассеяния и ее приложения к задачам лазерного зондирования аэрозоля. — В кн.: Дистанционные методы исследования атмосферы, 1980, Новосибирск: Наука, с. 90—134.

Л. В. Луцько, С. И. Зачек, В. В. Гранин

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ЗАЩИТНОГО ОКНА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ БАЛАНСОМЕРА М-10М ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ КОРОТКОВОЛНОВОЙ РАДИАЦИИ

В настоящее время наиболее распространенным способом защиты балансомера от влияния ветра является использование полиэтиленовой пленки (плоской или полусферической формы) над приемными поверхностями прибора [2, 6, 7, 8 и др.]. Однако сведений о влиянии защитного окна на характеристики балансомера в литературе недостаточно.

Целью данной работы явилось исследование основных характеристик балансомера с защитными окнами из полиэтиленовой пленки: стабильности показаний, постоянной времени, линейности и влияния ветра.

С обеих сторон балансомера М-10М устанавливалась плоская полиэтиленовая пленка параллельно приемной поверхности на расстоянии d от нее. Величина зазора d менялась от 1 до 17 мм. Все исследования проводились с одним и тем же экземпляром балансомера, облучавшимся лампой накаливания.

Стабильность излучения лампы контролировалась актинометром М-3, который облучался через тройное стеклянное окно, защищавшее актинометр от длинноволнового излучения лампы и ее

деталей. Сигналы приборов измерялись цифровым вольтметром В7-21.

Для затенения балансомера применялся трехслойный экран из блестящего алюминия. Поверхность, обращенная к балансомеру, была окрашена черной матовой краской.

1. Проверка стабильности показаний балансомера проводилась путем сравнения выходных сигналов в начале облучения и в процессе непрерывного облучения лампой накаливания при радиации, поступающей на приемную поверхность прибора, порядка $1,5 \text{ кВт/м}^2$. Измерения выполнялись при зазорах 1, 3, 5, 7, 10 и 17 мм. При $d=17$ мм объем воздуха под пленкой соответствует по величине объему под полусферой, диаметр которой равен диагонали приемной поверхности балансомера. Для каждого случая было проведено по 3—5 серий измерений при непрерывном облучении продолжительностью от 0,5 до 6 ч. Изменения показаний балансомеров во всех сериях при непрерывном облучении оказались меньше 0,5 % показания при установившемся режиме, что лежит в пределах погрешности измерений. Таким образом, можно сказать, что в рассмотренных случаях искажений показаний балансомеров за счет излучения объема воздуха под защитной пленкой (что могло бы происходить из-за нагрева его радиацией) не обнаружено.

2. Постоянная времени балансомеров существенным образом зависит от объема воздуха под защитной пленкой. Ниже представлены значения времени t_y установления показаний балансомера с пленкой после прекращения облучения до уровня 0,99 от показания при облучении для различных d :

d мм	1	3	5	6	7	10	15	20
t_y с	32	39	45	48	52	62	77	93

У этого же прибора без пленки $t_y=18$ с. Таким образом, у балансомера с пленкой при зазоре 1 мм значение t_y повышается в 1,8 раза. При дальнейшем увеличении d значение t_y растет медленнее и зависит от d линейно.

3. Проверка линейности (пропорциональности изменения выходного сигнала балансомера изменению измеряемой радиации) проводилась с использованием вращающихся поглотителей (дисков), описание которых приведено в [3]. В качестве характеристики линейности вычислялось отклонение ΔK значений радиации, измеренной с данным диском, от радиации, рассчитанной по результатам измерений без диска с учетом коэффициента пропуска τ данного диска:

$$\Delta K = \frac{N_u - N_0 \tau}{N_0 \tau} \cdot 100 \%,$$

где N_0 , N_u — выходной сигнал балансомера, полученный без диска и с диском соответственно, мВ. Измерения выполнялись

для балансомера без пленки и с пленкой при зазорах 17 и 10 мм. На приемную поверхность приборов поступала радиация около 0,42 кВт/м². Были использованы 9 вращающихся поглотителей со значениями τ от 0,05 до 0,8. При каждом диске проводилась серия измерений с попеременным затенением и облучением балансомера. Одна серия состояла не менее чем из трех отсчетов по облученному прибору. Интервал времени перед отсчетом после затенения или облучения строго выдерживался.

Таблица 1

Отклонения ΔK (%) от линейности показаний балансомера М-10М без защитной пленки и с пленкой на расстоянии d от приемной поверхности, погрешность δ (%) измерений и уровень радиации, ослабленной диском с коэффициентом пропускания τ

τ	Без защиты		С защитой			Уровень радиации, кВт/м ²
	ΔK %	δ %	ΔK %		δ %	
			$d = 17$ мм	$d = 10$ мм		
0,803	0,4	0,6	0,5	0,1	0,4	0,34
0,671	-0,2	0,8	0,0	—	0,6	0,28
0,559	—	0,7	-0,1	—	0,6	0,24
0,503	0,1	0,6	0,2	0,2	0,5	0,21
0,336	0,5	0,6	0,0	—	0,6	0,14
0,253	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,11
0,203	0,8	0,7	1,4	1,4	0,8	0,09
0,103	0,7	1,4	0,7	0,7	1,1	0,04
0,052	2,5	2,3	1,3	1,6	1,8	0,02

В табл. 1 представлены значения ΔK для балансомера без защитной полиэтиленовой пленки и с пленкой на расстояниях 17 и 10 мм от приемной поверхности, а также погрешность δ определения ΔK . Значение δ указано в процентах от измеряемой с данным диском радиации и оценивалось по погрешности коэффициента пропускания диска, а также по разбросу измеренных сигналов затененного и облученного балансомера внутри серии. В последней графе таблицы указан уровень радиации, поступавшей на приемную поверхность балансомера при измерениях с каждым диском. Представленные данные показывают, что применение полиэтиленовой защиты у балансомера М-10М даже при достаточно большом объеме воздуха под нею не ухудшает характеристик линейности прибора. При этом погрешность измерения параметров у балансомера без защиты заметно выше, чем у балансомера с пленкой, вследствие меньшей устойчивости показаний как при облучении, так и при затенении.

Если без пленки и с пленкой при зазоре $d=17$ мм балансомер линейен, то он должен быть линейен также и при меньших значениях d , что подтверждают данные, полученные для $d=10$ мм. Поэтому для других значений d измерения не проводились.

4. Эффективность защиты балансомера от ветра полиэтиленовой пленкой проверялась в аэродинамической трубе ГГО. При различных скоростях воздушного потока измерялся сигнал балансомера способом «солнце — тень».

Стабильность излучения лампы контролировалась актинометром и вольтметром. Величина сигнала балансомера соответствовала радиации около $0,6$ кВт/м². При каждой скорости ветра выполнялась серия из 3—5 отсчетов по облученному балансомеру, которые снимались между отсчетами по затененному. Разность Δ между показаниями балансомера при штиле и данной скорости ветра V м/с вычислялась в процентах от показания при штиле. Погрешность определения Δ составляла $\pm 1\%$ от значения радиации при $U=0$ м/с.

На рис. 1 показан ход Δ в зависимости от скорости ветра при разных зазорах d (балансиомера М-10М). Из рис. 1 видно, что при $d=1$ мм изменения Δ показаний при $U=15$ м/с составляют около 4% . В диапазоне U от 0 до 2 м/с имеет место резкий скачок Δ почти на 2% . При увеличении объема воздуха под защитной пленкой влияние ветра уменьшается.

Полученные результаты указывают на необходимость учета зависимости показаний балансомера от ветра при поверках балансомера с пленкой в лабораторных условиях, а также в поверочной трубе, где прибор защищен от воздействия ветра.

Представленные в п. 1—4 экспериментальные данные позволяют определить оптимальные условия для защиты балансомера М-10М: объем воздуха под пленкой должен соответствовать заключенному под плоской пленкой на расстоянии 6 мм от прием-

ной поверхности до пленки в зависимости от скорости воздушного потока V (м/с).

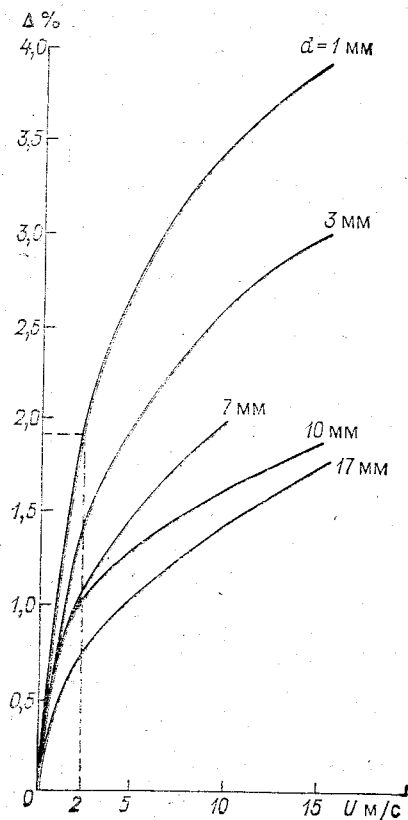


Рис. 1. Изменение Δ (%) показаний балансомера М-10М с плоской защитной пленкой при различных расстояниях d от приемной поверхности до пленки в зависимости от скорости воздушного потока V (м/с).

ной поверхности. При этом значении d изменения показаний при скорости ветра до 15 м/с лежат в пределах 2,5 %, соблюдается линейность показаний, а постоянная времени такого же порядка, как у головки пиранометра М-80М.

В дополнение к экспериментальным данным выполнен расчет характеристик балансомера при воздействии воздушного потока. Оценка погрешности балансомера с полиэтиленовыми пленками, вызываемой воздействием ветра, может быть произведена на основании полуэмпирической теории теплообмена [1] исходя из анализа уравнений теплообмена, полученных для стационарного теплового режима балансомера.

Считая, что балансомер обладает полной симметрией, можно написать:

$$B = \frac{1}{\delta} \left[h_{\lambda} + \frac{h_{\lambda}}{1 + \frac{h_{\lambda}}{h_{\kappa}}} + h_u \right] \Delta T, \quad (1)$$

где B — радиационный баланс, Вт/м²; δ — коэффициент поглощения радиации приемными поверхностями; h_{λ} — коэффициент теплообмена между приемными поверхностями и корпусом через вещество термопар и другие материалы конструкции; h_{λ} — коэффициент теплообмена между приемными поверхностями и защитными полиэтиленовыми окнами через воздушные прослойки; h_{κ} — коэффициент теплообмена между наружными сторонами окон и окружающим воздухом; h_u — коэффициент лучистого теплообмена между приемными поверхностями и окружающей средой, Вт/(м·К); ΔT — разность температур приемных поверхностей, К.

Из предыдущего соотношения легко получить выражение для чувствительности K_u по температуре, пропорциональной чувствительности K по напряжению, т. е.

$$K_u = \frac{\Delta T}{B} \sim K. \quad (2)$$

Воздействие ветрового потока, как известно, учитывается с помощью поправочного множителя F_u :

$$F_u = \frac{K_{u0}}{K_{ui}}, \quad (3)$$

где K_{u0} , K_{ui} — чувствительность балансомера, согласно (2), при скоростях ветрового потока $U=0$ и $U \neq 0$ соответственно.

При подстановке в (3) выражений для чувствительности из (2) и (1) с индексами, соответствующими $U=0$ и $U \neq 0$, получаем

$$F_u = \frac{h_{\lambda} + \frac{h_{\lambda}}{1 + \frac{h_{\lambda}}{h_{\kappa}}} + h_u}{h_{\lambda} + \frac{h_{\lambda}}{1 + \frac{h_{\lambda}}{h_{\kappa,0}}} + h_u}, \quad (4)$$

где $h_{к0}$ — коэффициент теплообмена при $U=0$; h_k — коэффициент теплообмена при $U \neq 0$.

Расчет коэффициентов теплообмена $h_{к0}$, h_k и h_u производится по формулам [5—7]:
для свободной конвекции

$$h_{к0} = 0,54 \left(\frac{Gr Pr}{\Delta T_k} \right)^{0,25} \frac{\lambda}{l} \Delta T_k^{0,25}; \quad (5)$$

для вынужденной конвекции

$$h_k = 0,67 Re^{0,5} Pr^{0,33} \frac{\lambda}{l}; \quad (6)$$

$$h_u = 4 \delta \sigma T^3, \quad (7)$$

где Gr , Pr , Re — критерии подобия Грасгофа, Прандтля, Рейнольдса; λ — коэффициент молекулярной теплопроводности воздуха; l — линейный размер приемной поверхности; ΔT_k — разность между температурами наружной поверхности полиэтиленового окна и окружающего воздуха, K ; δ — коэффициент поглощения черной краски; σ — постоянная Больцмана.

Расчеты выполнены при некоторых упрощающих допущениях: зазор между приемной поверхностью и полиэтиленовым окном имеет вид плоской щели; предполагается, что для принятой толщины слоя воздуха в щели перенос тепла происходит за счет молекулярной теплопроводности; пространственная ориентация приемных поверхностей мало влияет на коэффициент теплообмена в случае вынужденной конвекции при условии параллельности ветрового потока этим поверхностям; конвективные тепловые потоки являются одномерными.

Формулы (3) и (6) применены для случая, когда теплоотдающая поверхность окна обращена вверх.

Перепад температуры ΔT_k определяется по формуле

$$\Delta T = \Delta T_k + \frac{3,88}{h_\lambda} \Delta T_k^{1,25}. \quad (8)$$

Указанное соотношение находится из условия, что конвективный поток тепла в атмосфере с наружной поверхности окна равен потоку тепла в воздушной прослойке между окном и приемной поверхностью.

Расчеты F_u по указанным выше формулам выполнены для скоростей воздушного потока $U=0, 1, 2, 5, 10$ и 15 м/с. Расчет ветровой погрешности Θ_v производили по формуле

$$\Theta_v = \frac{K_{u0} - K_{ui}}{K_{u0}} \cdot 100 \%. \quad (9)$$

Результаты этих расчетов для плоских окон с воздушной прослойкой 1 и 10 мм приведены в табл. 2. Выполненные расчеты показывают, что увеличение воздушной прослойки между полиэтиленовой пленкой и приемной поверхностью уже при сравни-

тельно небольших толщинах d существенным образом снижает зависимость чувствительности балансомера от ветра.

Сравнение расчетных данных с экспериментальными позволяет сделать заключение, что предложенный метод расчета дает результаты, сравнимые с экспериментальными, в пределах погрешностей измерений ($\pm 1\%$). Он может быть использован для выполнения соответствующих расчетов при разработке новых конструкций балансомеров и ветровых защит.

Таблица 2

Расчетные и измеренные значения ветровой погрешности (Θ_v) и расчетные значения коэффициента теплообмена (h_k) при различных скоростях ветра ($h_\lambda = 2,59$ Вт/(м²·К))

U м/с	$d = 1$ мм			$d = 10$ мм		
	Расчетные		Измеренные Θ_v %	Расчетные		Измеренные Θ_v %
	h_k Вт/(м ² ·К)	Θ_v %		h_k Вт/(м ² ·К)	Θ_v %	
0	4,68	0	—	3,88	0	—
1	28,1	—1,7	—0,7	28,1	—0,20	—0,7
2	39,7	—2,1	—1,7	39,7	—0,22	—1,0
5	62,8	—2,9	—2,8	62,8	—0,23	—1,3
10	88,8	—3,3	—3,5	88,8	—0,23	—1,6
15	108,8	—3,5	—3,9	108,8	—0,24	—1,9

Выводы

1. Показания балансомера М-10М при использовании в качестве защиты плоской полиэтиленовой пленки на расстоянии $d = 1$ мм от приемной поверхности при скоростях ветра U от 0 до 15 м/с изменяются на 4 %.

2. Зависимость показаний балансомера с защитной пленкой от скорости ветра имеет нелинейный характер. При изменении скорости ветра от 0 до 1 м/с при всех значениях d имеет место скачок в показаниях балансомера, что необходимо учитывать при переходе от поверки прибора в лабораторных условиях и в поверочной трубе ($U=0$ м/с) к работе в естественных условиях ($U \neq 0$ м/с).

3. Постоянная времени балансомера существенно зависит от объема воздуха под защитной пленкой.

4. При увеличении зазора между пленкой и приемной поверхностью балансомера до 17 мм линейность прибора не нарушается. Отсутствуют также изменения сигнала в зависимости от продолжительности облучения.

5. Получен метод расчета оценки погрешности, вызываемой влиянием ветра, для балансомера с пленкой. Расчетные данные согласуются с экспериментальными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лыков А. В. Тепломассообмен. Справочник, М.: Энергия, 1978.
2. Методические указания по производству метеорологических и актинометрических наблюдений на судах в период проведения АТЭП, Л.: ГГО, 1974.
3. Мишин А. А. Экспериментальная проверка линейности пиранометров разных типов. — Труды ГГО, 1977, вып. 384.
4. Büttner K. Physikalische Bioklimatologie. — Probl. kosm., Bd 18, 1938.
5. Enz J. W., Klink J. C., Baker D. G. Solar radiation effects on pyranometer performance. — J. Appl. Meteorol., 1975, 14, N 7.
6. Funk J. P. Improved polythene-shielded net radiometer. — J. Sci. Instr. 1959, 36.
7. Schulze N. Über die Verwendung von Polyäthylen für Strahlungsmessungen. — Arch. für Meteorol. Geophys. Bioklim. Ser. B. 1961, Bd. 11, N 2.
8. Sonntag D. Ein Strahlungsbilanzmesser mit galvanisen erzeugter Thermosäule. — Zf. Meteorol., 1977, Bd. 27, N. 4.

Е. Л. Махоткина, Т. К. Ястребова, Б. М. Ильин

АЛГОРИТМЫ МАШИННОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕГИСТРАЦИИ РАДИАЦИОННОГО БАЛАНСА И ЕГО СОСТАВЛЯЮЩИХ

Существующая в настоящее время система автоматизированной обработки актинометрической информации наземных станций основана на использовании ЭВМ М-222. Программы обработки, составленные на языке алгол-60, позволяют автоматизировать расчеты, связанные в основном с обработкой срочных актинометрических наблюдений [3, 5]. Что касается обработки данных регистрации, то существующая система автоматизирует лишь работу по подготовке наблюдений к публикации. На данном этапе автоматизации входная информация о регистрируемых потоках радиации согласно требованиям, изложенным в [3], заносится на технический носитель в виде часовых сумм радиации, выраженных в $\text{Мдж} \cdot \text{м}^{-2}$. Алгоритм обработки данных регистрации [5] составлен в соответствии с методикой обработки, представленной в [7]. При этом первичная обработка наблюдений на станции включает в себя выполнение таких трудоемких операций, как:

- разметка времени на лентах;
- нахождение средних ординат для каждого часового промежутка с записью;
- составление графика чувствительности регистрирующей установки;
- перевод средних ординат в часовые суммы радиации.

Вместе с тем основные принципы построения автоматизированной системы обработки информации, согласно [1], предполагают занесение информации на технический носитель в наиболее ранней стадии и осуществление всех операций по обработке машинными методами.

Так как в системе Госкомгидромета осуществляются работы по оснащению центров обработки вычислительными машинами серии ЕС, возникла необходимость разработать алгоритмы и программы по обработке, контролю и архивации результатов актиметрических наблюдений для ЕС ЭВМ. Эта разработка была выполнена с учетом недостатков существующей системы обработки, в результате чего была существенно сокращена доля ручного труда в процессе первичной обработки данных регистрации и повышена точность обработки.

Входная информация о результатах регистрации радиационного баланса и его составляющих представляется по следующей схеме:

$$\begin{aligned} & ((\text{ДД}, \\ & = 10, n_{0S}, tt, \bar{n}_S, \bar{n}_S, \dots, \bar{n}_S; \\ & = 11, n_{0D}, tt, \bar{n}_D, \bar{n}_D, \dots, \bar{n}_D; \\ & = 12, n_{0Q}, tt, \bar{n}_Q, \bar{n}_Q, \dots, \bar{n}_Q; \\ & = 13, n_{0B}, \pm \bar{n}_B, \pm \bar{n}_B, \pm \bar{n}_B, \dots, \pm \bar{n}_B; \\ & = 14, n_{0R}, tt, \bar{n}_R, \bar{n}_R, \dots, \bar{n}_R; \\ & = 15, n_{0V}, \bar{n}_V, \bar{n}_V, \dots, \bar{n}_V; \end{aligned}$$

где ((ДД — признак временного блока и дата, за которую представляются данные регистрации; $=10, =11, =12, =13, =14, =15$ — признаки блоков информации о регистрации радиационного баланса и его составляющих; n_{0i} — место нуля самописца для соответствующего вида радиации; tt — час, после которого часовая сумма радиации впервые отличается от нуля; $\bar{n}_i$ — средняя за час ордината записи самописца для соответствующего вида радиации.

Значения $n_{0i}, tt, \bar{n}_i$ определяются в процессе первичной обработки результатов регистрации в пункте наблюдений. Величина n_{0i} введена в блоки для случая использования перфоратора графиков [6]. Для обработки данных, представленных в блоках $=10 \dots =15$, в массив входной информации в зависимости от типа регистратора вводятся специальные градуировочные блоки. При использовании в качестве регистраторов самописцев типа МСЩ-Пр0618, МСЩ-Пр354 и самописца Крова — Савинова градуировочный блок имеет вид:

$$= 03, n_S, n_Q, n_D, n_R, \pm n_B,$$

где n — ордината точки на ленте самописца, регистрирующего определенный вид радиации, соответствующей моменту окончания срочных наблюдений (для составления графиков чувствительности).

Для самописцев КПС-4 или ЭПП-09 вводятся три градуировочных блока:

$$= 04, n_D, \pm n_B;$$

$$\begin{aligned}
&= 06, a_S, a_Q, a_R, a_V, K, D_1^S D_1^S, D_1^Q D_1^Q, D_1^R D_1^R, D_1^V D_1^V, \\
&\quad a_{S1}, a_{Q1}, a_{R1}, a_{V1}, K_1, D_2^S D_2^S, D_2^Q D_2^Q, D_2^R D_2^R, D_2^V D_2^V, \\
&\quad a_{S2}, a_{Q2} a_{R2} a_{V2} K_2; \\
&= 09, F_{15}, D_1 D_1, F_{15}, D_2 D_2, F_{15}.
\end{aligned}$$

Блок =04 содержит информацию для обработки данных о рассеянной радиации и радиационном балансе, аналогичную информации, представленной в блоке =0,3. В блоке =06 представлены значения цены деления самописца КСП-4 (ЭПП-09) для различных видов измеряемой радиации, а также температурный коэффициент чувствительности актиометра K [4]. В блоке =06 предусмотрен автоматический учет возможных изменений цены деления самописца. В отличие от существующей системы механизированной обработки [3], настоящая система предусматривает трехкратное изменение цены деления ($D_1 D_1, D_2 D_2$ — даты смены цены деления). Блок =09 вводится для автоматического учета влияния ветра на показания балансомера. Введение в макет кода входных данных блоков =03 и =04 позволяет отказаться от ручного составления графиков чувствительности самописца, что существенно повышает степень автоматизации обработки результатов регистрации, а также точность обработки, так как отсутствует элемент субъективности при составлении таких графиков [7].

График чувствительности самописца при машинной обработке определяется путем установления корреляционной связи между ординатами самописца, занесенными в блок =03 или =04, и соответствующими значениями радиации, полученными в результате обработки срочных наблюдений. Для получения данной зависимости используются наблюдения за все без исключения сроки независимо от погодных условий. Как показали методические проработки, для всех видов радиации связь между ординатами записи самописца и значениями радиации удобно представлять в виде линейной функции вида $y = a_0 + a_1 x$. Линейная аппроксимация опробована на большом количестве графиков чувствительности (более 30). При этом для самописцев МСЩ-Пр0618, МСЩ-Пр354 и самописцев Крова—Савинова часовые суммы радиационного баланса и его составляющих определяются по формулам:

$$\begin{aligned}
\sum S &= 3,6[a_{0S} + a_{1S}(\bar{n}_S - n_{0S})]; \\
\sum D &= 3,6[a_{0D} + a_{1D}(\bar{n}_D - n_{0D})]; \\
\sum Q &= 3,6[a_{0Q} + a_{1Q}(\bar{n}_Q - n_{0Q})]; \\
\sum R_k &= 3,6[a_{0R} + a_{1R}(\bar{n}_R - n_{0R})]; \\
\sum B &= 3,6[a_{0B} + a_{1B}(\bar{n}_B - n_{0B})]; \\
\sum B &= 3,6[a_{0B} + a_{1B}(n_{0B} - \bar{n}_B)],
\end{aligned} \tag{1}$$

где $\bar{n}_i$ — средняя за час ордината записи самописца, занесенная

в блоки =10—14; n_{0i} — место нуля на ленте регистратора. Два алгоритма обработки информации о регистрации радиационного баланса в формуле (1) предусмотрены на случай обработки лент перфоратором графиков [6].

Если регистрация проводится с помощью самописца КСП-4 (ЭПП-09), используется формула (1) для обработки только двух видов информации — рассеянной радиации и радиационного баланса без прямой солнечной радиации.

Часовые суммы суммарной и отраженной радиации рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned}\sum Q &= 3,6a_Q(\bar{n}_Q - n_{0Q}); \\ \sum R_k &= 3,6a_R(\bar{n}_R - n_{0R}),\end{aligned}\quad (2)$$

где a_Q и a_R — значения цены деления самописца, представленные в блоке =06; $\bar{n}_i$ — средняя за час ордината записи самописца соответственно из блоков =12 и =14; n_{0i} — место нуля из этих же блоков.

Часовые суммы прямой солнечной радиации, приходящей на перпендикулярную поверхность, вычисляются с учетом зависимости чувствительности актинометра от температуры:

$$\sum S = 3,6a_S(\bar{n}_S - n_{0S})/[1 - K_S(T_B - 20)], \quad (3)$$

где a_S — цена деления самописца; K_S — температурный коэффициент чувствительности актинометра, помещенный в блоке =0,6; T_B — температура актинометра, определяемая для середины соответствующего часового интервала линейной интерполяцией значений T_B , измеряемых в процессе срочных наблюдений.

Для исключения влияния ветра на показания балансомера был использован подход, предложенный в работе [2], согласно которому существует эмпирическая зависимость для поправок на ветер, используемая для всех балансомеров:

$$F_V = 1 + KV^{0,8}. \quad (4)$$

Исходя из этого часовые суммы радиационного баланса вычисляются в следующей последовательности: по данным о F_{15} из блока =09 определяется параметр K , характерный для данного балансомера,

$$K = \frac{F_{15} - 1}{8,727};$$

рассчитывается средняя за час скорость ветра $\bar{V} = a_V(\bar{n}_V - n_{0V})$; на основании данных о K и $\bar{V}$ вычисляется сумма радиационного баланса без прямой солнечной радиации:

$$\begin{aligned}\sum B - S' &= 3,6\{[a_{0B} + a_{1B}(\bar{n}_B - n_{0B})](1 + K\bar{V}^{0,8})\}; \\ \sum B - S' &= 3,6\{[a_{0B} + a_{1B}(n_{0B} - \bar{n}_B)](1 + K\bar{V}^{0,8})\}.\end{aligned}\quad (5)$$

Использование двух алгоритмов обработки для одного и того же вида радиации обеспечивает применение перфоратора графика

ков [6], позволяющего избежать промежуточный этап — кодирование.

Вычисление высоты солнца для середины каждого часового промежутка, определение часовых сумм прямой солнечной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность, расчет суточных и месячных сумм радиации производится по алгоритму, не отличающемуся от изложенного в работе [5].

Выводы

1. Разработанные алгоритмы существенно сокращают долю ручного труда при обработке результатов регистрации и повышают точность обработки. Они могут быть реализованы на любой ЭВМ.

2. Применение перфоратора графиков для обработки лент сокращает ручной труд и позволяет без промежуточного этапа записи и кодирования автоматически перфорируют данные на перфоленте для ввода в ЭВМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афиногенов Л. П., Русин Н. П. Задачи автоматизации геофизических измерений и научных исследований. — Труды ГГО, 1972, вып. 300, с. 3—14.
2. Барашкова Е. П. О параметризации поправочного множителя на скорость ветра к показаниям термоэлектрического балансомера М-10. — Труды ГГО, 1981, вып. 456, с. 3—6.
3. Временные методические указания по машинной обработке и контролю данных гидрометеорологических наблюдений. Вып. 5, ч. 1, разд. 1. — Обнинск, 1974. — 23 с.
4. Методические указания гидрометеорологическим станциям по использованию электронных потенциометров в КСП-4 для регистрации составляющих радиационного баланса. — Л.: Гидрометеиздат, 1978. — 55 с.
5. Новожилова Р. М. К автоматизации обработки актинометрической информации. — Труды ГГО, 1975, вып. 364, с. 25—32.
6. Перфоратор графиков. Паспорт Л52. 891. 041 ПС, ЦКБ Госкомгидромета. Обнинск, 1979.
7. Руководство гидрометеорологическим станциям по регистрации радиации. — Л.: Гидрометеиздат, 1961. — 119 с.

О. А. Немец, К. В. Казакова

ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СВЕТОФИЛЬТРОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Широкое применение интерференционных светофильтров (ИФ) в научно-исследовательской работе обусловило необходимость исследования зависимостей их спектральных характеристик от внешних факторов, в частности от температуры. Согласно исследованиям, опубликованным в [1—3], влияние температуры фильтра

сказывается (причем неоднозначно) в первую очередь на такой существенной его характеристике, как длина волны максимума кривой спектрального пропускания фильтра ($\lambda_{\max}$).

Так, в работе [2] показано, что ИФ можно разделить на несколько групп (по способу изготовления), различающихся характерной реакцией на изменение температуры фильтра. У большинства [2] фильтров $\lambda_{\max}$ сдвигается в коротковолновую область спектра при нагревании, а также при последующем охлаждении. У фильтров, подвергнутых предварительной термообработке при 200°C и заклеенных стеклом К-8, и у фильтров, изготовленных напылением в вакууме на нагретую подложку или катодным распылением в кислороде, $\lambda_{\max}$ при нагревании сдвигается в длинноволновую область спектра, а при остывании — в коротковолновую [2].

В [1] указано, что с возрастанием температуры кривая пропускания фильтров смещается в коротковолновую область, а при сильном охлаждении фильтров наблюдается небольшой сдвиг всей кривой спектрального пропускания в коротковолновую область спектра.

У авторов [3] исследована группа ИФ, изготовленных способом термического испарения в вакууме и осаждения на подложки из LiF и кварца. При этом оказалось, что с увеличением температуры $\lambda_{\max}$ сдвигается в длинноволновую область спектра, а при обратном ходе температуры $\lambda_{\max}$ возвращается к первоначальному значению. Значения температурных коэффициентов находятся в пределах 0,17—0,67 нм/°С.

На основании проведенных исследований оказывается невозможным приписать определенное значение температурному коэффициенту используемого фильтра, а в различных фильтровых приборах, как указано, например, в [4], возможен нагрев фильтров. По-видимому, в каждом конкретном случае необходимо исследовать зависимость спектральных характеристик используемых ИФ от температуры, времени и других внешних параметров.

В данной работе исследованы зависимости длины волны максимума пропускания $\lambda_{\max}$, полуширины $\Delta\lambda_{0,5}$ и максимального пропускания $P_{\max}$ от температуры в интервале температур 20—60°C для узкополосных интерференционных светофильтров, работающих в области 2,07 мкм. Исследуемые ИФ изготовлены в Институте физики АН БССР.

Нагрев фильтров осуществляли в медной кювете со стеклянными окнами. Исследования кюветы показали, что ее пропускание не менялось при нагреве до 60°C. Фильтры выдерживались при заданной температуре 30—40 мин. Температура контролировалась платиновым термометром сопротивления ТСП-995М и устанавливалась терморегулятором ЭРА-М с погрешностью регулирования температуры $\pm 1^\circ\text{C}$.

Кривая спектрального пропускания регистрировалась спектрофотометром UR-20 (ГДР, „Карл Цейсс Йена“). Измерения кривой спектрального пропускания сопровождалась неоднократным

(не менее трех раз за время проведения эксперимента) контролем частотной градуировки спектрофотометра (ν) по линиям поглощения жидкого бензола. Этим исключалась систематическая погрешность в определении ν . Случайная погрешность определения ν не превосходила $\pm 1 \text{ см}^{-1}$ ($\Delta\lambda = \pm 0,4 \text{ нм}$), воспроизводимость показаний по шкале пропусканий спектрофотометра была лучше чем $\pm 0,5 \%$ от всей шкалы.

Были исследованы два фильтра, изготовленные в 1975 г., и три фильтра из партии фильтров, изготовленных в 1977 г., с параметрами, приведенными в табл. 1.

При нагревании исследуемых фильтров максимум пропускания фильтров смещался в длинноволновую область спектра. В интервале температур $20\text{--}60^\circ\text{C}$ зависимость $\lambda_{\text{max}} = f(t)$ оказалась практически линейной с наклоном, соответствующим коэффициенту температурной зависимости ($k = 0,086 \text{ нм}/^\circ\text{C}$ ($k = \frac{\Delta\lambda_{\text{max}}}{\Delta t}$) для всей группы исследованных фильтров (см. табл. 1).

Таблица 1

Значения спектральных аттестационных характеристик и полученных температурных коэффициентов исследованных фильтров

№ фильтра	λ_{max} нм	P_{max} %	$\Delta\lambda_{0,5}$ нм	K нм/ $^\circ\text{C}$
1	2072	62	23	0,086
2	2073	67	31	0,086
3	2059	65	32	0,086
4	2080	70	31	0,086
5	2062	66	32	0,086

При остывании фильтров максимум пропускания смещался в коротковолновую область спектра, причем в течение суток λ_{max} не достигала первоначального значения. Зависимость λ_{max} от температуры показана на рис. 1 для фильтра № 3.

Кривая спектрального пропускания ИФ, смещаясь при нагревании в длинноволновую область спектра, заметно не изменилась (рис. 2). Практически неизменными остались полуширина кривой спектрального пропускания ИФ и пропускание в максимуме этой кривой. Однако смещение кривой спектрального пропускания приводит к уменьшению пропускания фильтра на начальной λ_{max} , в результате чего возможно появление систематической относительной погрешности до $5,8 \%$ в определении пропускания при использовании фиксированной λ_{max} .

Изложенные выше результаты исследований показывают, что при использовании ИФ в приборах, где неизбежен их нагрев, необходимо учитывать зависимость длины волны максимума про-

пускания от температуры или свести до минимума тепловое воздействие на ИФ.

Исследования проводились в течение двух лет, поэтому удалось проследить ход $\lambda_{\max}$ во времени для фильтров № 1 и 2 при их неоднократном нагревании до 60°C. В процессе исследования, т. е. периодического нагрева и остывания фильтров, для фильтра № 1 наблюдалось постоянное смещение длины волны максимума пропускания в коротковолновую область спектра (на 5,15 нм за два года), у фильтра № 2 эта тенденция через некоторое время

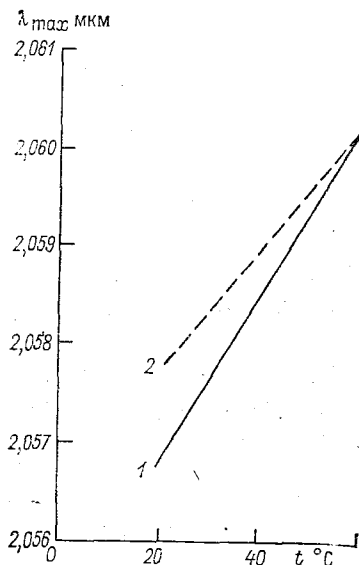


Рис. 1. Зависимость длины волны максимума пропускания ($\lambda_{\max}$) от температуры (для фильтра № 3).
1 — нагрев; 2 — остывание.

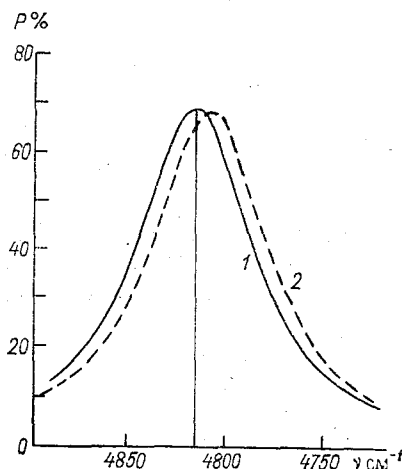


Рис. 2. Кривая спектрального пропускания фильтра № 4 при 20°C (1) и 60°C (2).

изменилась на противоположную. Проследить ход $\lambda_{\max}$ от времени для фильтров № 3 и 4 не представилось возможным, а у фильтра № 5 в результате нагрева произошло необратимое искажение кривой спектрального пропускания. Неопределенность зависимости $\lambda_{\max}$ от времени требует регулярного контроля длины волны максимума пропускания используемого фильтра.

Таким образом, при исследовании зависимости спектральных характеристик интерференционных узкополосных светофильтров, максимум пропускания которых расположен около 2,07 мкм, от температуры получена температурная зависимость

$$\lambda_{\max} = \lambda_{\max}^0 + k(t_i - t_0),$$

где $\lambda_{\max}^0$ и t_0 — длина волны максимума пропускания и температура фильтра до нагревания; $\lambda_{\max}^t$ и t_t — длина волны максимума пропускания и температура нагретого фильтра; $k=0,086$ нм/°С (в интервале 20—60 °С) для указанных выше фильтров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисевич Н. А., Верещагин В. Г., Валидов М. А. Инфракрасные фильтры. — Минск, 1971. — 228 с.
2. Фурман Ш. А., Левина М. Д. Исследование зависимости оптических свойств диэлектрических узкополосных фильтров от температуры. — Оптика и спектроскопия, 1970, т. 28, вып. 4, с. 766—774.
3. Чайкин А. С., Пухонин В. В. Исследование зависимости параметров интерференционных фильтров от температуры и времени. — Журнал прикладной спектроскопии, 1970, т. 13, вып. 5, с. 894—897.
4. Шашков А. А., Фролов А. Д. Выбор оптимальных параметров светофильтров для измерения содержания CO_2 в атмосфере оптическим методом. — Труды ГГО, 1976, вып. 369, с. 48—56.

*О. А. Немец, Н. Н. Парамонова,
К. В. Казакова, Э. С. Андреева*

ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРАМ НА ОСЛАБЛЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИЗЕМНЫМ СЛОЕМ АТМОСФЕРЫ

1. При изучении влияния аэрозоля на распространение излучения в атмосфере большой интерес представляют совместные исследования аэрозольных и оптических характеристик атмосферы. Таким экспериментам в последнее время уделяется большое внимание [1].

Особое значение имеют комплексные измерения в ИК окнах прозрачности, поскольку до настоящего времени предметом дискуссии остается важный вопрос о соотношении вкладов континуума водяного пара и аэрозольного ослабления для области 8—12 мкм.

Эксперименты, в которых измерения пропускания атмосферы в широкой области спектра, включая окно прозрачности 8—12 мкм, сопровождались определением распределения аэрозольных частиц по размерам, еще очень малочисленны [7, 9, 13]. Целесообразно продолжать такие исследования в различных климатических районах и проводить сравнения полученных результатов.

В течение ряда лет (1974—1980) в Воейково проводились исследования пропускания ИК радиации атмосферой. Для полученного массива данных проведен статистический анализ связей ослабления ИК излучения с метеопараметрами и оптической плотностью атмосферы в видимой области спектра, а также рассмотрена автокорреляция ослабления по спектру [12]. В последние го-

ды (1978 и 1980) измерения пропускания атмосферы сопровождались определением распределения аэрозольных частиц по размерам. В данной работе рассмотрены статистические связи между распределением аэрозольных частиц по размерам, ослаблением излучения для длин волн 0,55; 2,14; 3,7; 11,1 мкм и метеопараметрами. Представляет интерес также рассмотрение особенностей собственно распределения аэрозольных частиц по размерам.

2. Измерения пропускания приземного слоя атмосферы в ИК области спектра осуществлялись на горизонтальном канале установки ИКАУ-1 [4]. Погрешности определения оптической плотности атмосферы указаны в [12].

Метеорологические параметры атмосферы — температура (t), относительная (r) и абсолютная (e) влажность, метеорологическая дальность видимости (S_m) — определялись непосредственно на трассе измерений.

Таблица 1

Средние значения числа частиц для разных направлений ветра
(n — число измерений)

Направление ветра	n	Ядра конденсации ($a < 0,1$ мкм)		Частицы ($a > 0,2$ мкм)	
		$\bar{N}$ см ⁻³	σ_N	$\bar{N}$ см ⁻³	σ_N
С, СВ,	18	1035	1118	3,2	2,5
В,	7	1583	563	19,3	8,2
Ю, ЮЮЗ, ЮВ,	9	3098	1780	47,0	40,0
З,	15	7091	4179	27,7	27,5

Число аэрозольных частиц измерялось фотоэлектрическим счетчиком АЗ-5 в диапазонах радиусов: 0,2—0,25; 0,25—0,3; 0,3—0,35; 0,35—0,4; 0,4—0,45; 0,45—0,5; 0,5—0,75; 0,75—1; 1—2; 2—3,5; 3,5—5 и >5 мкм. Кроме того, счетчиком Шольца [16] определялась концентрация ядер конденсации в диапазоне радиусов $\Delta a = 0,001—0,1$ мкм [6].

Средняя квадратическая погрешность единичного измерения счетчиком Шольца, как указано в [11], составляет примерно $\pm 40\%$. В данной работе значение концентрации определялось как среднее из пяти измерений. Ошибка среднего значения соответственно снижается до $\pm 15—20\%$.

Как и все фотоэлектрические счетчики аэрозольных частиц, АЗ-5 обладает рядом существенных недостатков: его показания зависят от оптических констант исследуемого аэрозоля, для чисто рассеивающих частиц градуировочная кривая имеет области неоднозначности [2]. В [9] отмечается влияние аэродинамического канала на показания счетчика, особенно для частиц с большим радиусом ($a > 0,75$ мкм). Оценка погрешности измерения распре-

деления аэрозольных частиц по размерам в силу указанных выше причин затруднена. Однако воспроизводимость результатов удовлетворительная. Исследования, проведенные в [9], показали, что среднее квадратическое отклонение для серии из 20 измерений не превышает 11 %. Поэтому данные таких измерений могут быть использованы для качественной оценки изменчивости аэрозольного состояния атмосферы. Кроме того, представляет интерес выявление статистических связей ослабления излучения атмосферой

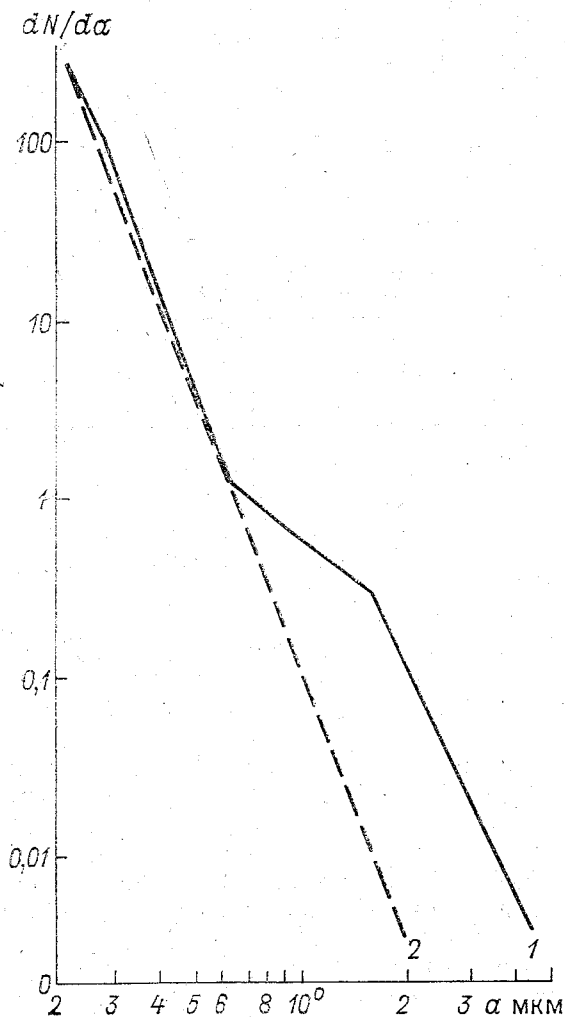


Рис. 1. Среднее экспериментальное распределение аэрозольных частиц по размерам в сравнении с распределением Юнге.

1 — экспериментальное распределение; 2 — распределение Юнге.

с количеством аэрозольных частиц, определяемым серийным прибором.

3. Всего было проведено 75 серий синхронных измерений распределения аэрозольных частиц по размерам и ослабления видимого и ИК излучения, 49 из них сопровождались определением числа ядер конденсации.

Для разных направлений ветра в районе измерений были рассчитаны средние значения числа частиц (табл. 1). Из табл. 1 видно, что максимальное количество частиц наблюдалось при западных и южных направлениях ветра, минимальное — при северных и северо-восточных. Эти результаты согласуются с выводами более ранних исследований числа ядер конденсации [11] и фильтровых проб аэрозоля [10], проведенных в Воейково. Наши данные показывают также, что при ветрах, направленных от Ленинграда, происходит существенно большее увеличение числа частиц с $a < 0,1$ мкм, чем более крупных частиц ($a > 0,2$ мкм).

На рис. 1 показано сравнение среднего экспериментального распределения аэрозольных частиц по размерам (75 серий) с распределением Юнге, определяемым по формуле

$$\frac{dN}{da} = \frac{A}{a^i}.$$

Существенное превышение числа крупных ($a > 0,6$ мкм) частиц по сравнению с юнговским распределением подтверждает результаты ряда предыдущих исследований, представленных, например, в [5].

Таблица 2

Влияние относительной влажности на средние значения числа частиц в 1 см³ воздуха

Δa мкм	$\bar{N}$		$\frac{\bar{N}(r > 65\%)}{\bar{N}(r < 65\%)}$	Δa мкм	$\bar{N}$		$\frac{\bar{N}(r > 65\%)}{\bar{N}(r < 65\%)}$
	$r < 65\%$	$r > 65\%$			$r < 65\%$	$r > 65\%$	
0,001—0,1	2661	2438	0,67	0,5—2	0,528	0,851	1,61
0,2—0,35	17,25	28,27	1,64	>2	0,054	0,055	1,04
0,35—0,5	0,937	2,05	2,19				

Для выяснения влияния относительной влажности полученный в данной работе массив данных был разделен на два множества в зависимости от значений относительной влажности: $r > 65\%$ и $r < 65\%$. Для этих множеств рассчитаны средние значения числа частиц по градациям размеров: 0,001—0,1; 0,2—0,35; 0,35—0,5; 0,5—2; >2 мкм; последние 4 образованы из 12 первоначальных путем их объединения (табл. 2).

Как видно из табл. 2, при увеличении относительной влажности происходит уменьшение числа ядер конденсации ($a < 0,1$) и увеличение числа частиц с радиусом a , равным 0,2—2 мкм, самая

Таблица 3

Коэффициенты автокорреляции числа частиц разных размеров

$\Delta a, \text{мкм}$	0,001—0,1	0,2—0,25	0,25—0,3	0,3—0,35	0,35—0,4	0,4—0,45	0,45—0,5	0,5—0,75	0,75—1,0	1—2	2—3,5	3,5—5	>5	$\bar{N}$	σ_N
0,001—0,1	1	0,12	—0,05	—0,02	—0,02	—0,09	—0,11	—0,10	0,023	—0,08	—0,01	—0,02	—0,04	2016,8	2789,4
0,2—0,25		1	0,67	0,75	0,69	0,50	0,58	0,56	0,59	0,60	0,49	0,50	0,36	15,52	12,53
0,25—0,3			1	0,94	0,92	0,86	0,82	0,73	0,66	0,63	0,48	0,47	0,36	5,57	7,09
0,3—0,35				1	0,95	0,89	0,86	0,77	0,66	0,62	0,41	0,44	0,29	1,75	2,42
0,35—0,4					1	0,85	0,84	0,76	0,69	0,64	0,46	0,46	0,35	0,845	1,260
0,4—0,45						1	0,82	0,79	0,57	0,53	0,34	0,36	0,24	0,542	0,887
0,45—0,5							1	0,72	0,73	0,70	0,47	0,48	0,34	0,304	0,427
0,5—0,75								1	0,84	0,80	0,58	0,55	0,34	0,338	0,450
0,75—1,0									1	0,91	0,73	0,66	0,50	0,176	0,211
1—2										1	0,85	0,80	0,62	0,276	0,317
2—3,5											1	0,84	0,81	0,051	0,056
3,5—5												1	0,68	0,007	0,009
>5													1	0,003	0,004

крупная фракция ($a > 2$ мкм) остается практически без изменений. Этот результат можно интерпретировать как следствие конденсационного процесса: ядра конденсации, постепенно укрупняясь, переходят в область более крупных размеров. Ранее уменьшение числа ядер конденсации с ростом r и увеличение числа субмикронных частиц по отдельности отмечалось в [3] и [9]. В [3] уменьшение числа частиц с $a < 0,1$ мкм связывалось с конденсационными процессами.

В табл. 3 приведены коэффициенты автокорреляции числа частиц разных размеров (R_{NN}). Видно, что корреляция числа частиц с $a < 0,1$ мкм с числом более крупных частиц ($a > 0,2$ мкм) отсутствует. Предыдущие исследования числа ядер конденсации [3] дают основание считать, что указанная корреляция может проявиться при проведении подробного анализа с выделением выборок по диапазонам изменения относительной влажности. Такое рассмотрение не проведено в данной работе из-за недостаточного объема экспериментального материала.

Для частиц с $a > 0,2$ мкм R_{NN} постепенно уменьшается с увеличением разности размеров частиц. Отмеченного в [7] резкого изменения R_{NN} для частиц с $a = 1,1$ мкм не обнаружено.

4. Коэффициенты корреляции числа частиц радиусом 0,001—0,1; 0,2—0,35; 0,35—0,5; 0,5—2; > 2 мкм с метеопараметрами и оптической плотностью атмосферы для $\lambda = 0,55; 2,14; 3,7; 11,1$ мкм приведены в табл. 4. В области 11,1 мкм показана корреляция как с полным непрерывным ослаблением, так и с остаточным ($\alpha_{ост11,1}$), получаемым после вычитания поглощения в континууме водяного пара на основании лабораторных данных Берча [15].

Определенных корреляционных связей числа частиц с метеопараметрами в рассматриваемом массиве данных не проявилось. Их выявление, вероятно, требует более тщательного анализа. Так, при рассмотрении зависимости числа частиц от относительной влажности следует учитывать, что в общем массиве данных на закономерные конденсационные процессы накладываются изменения в концентрации частиц, происходящие при смене воздушных масс, а также под воздействием местных источников аэрозоля. Влияние этих факторов на оптические и микрофизические характеристики аэрозоля показано, например, в работах [8, 14].

Трансформацию распределения аэрозольных частиц по размерам при увеличении относительной влажности (табл. 2) удалось проследить потому, что за счет осреднения в двух рассмотренных выборках влияние смены воздушных масс и локальных источников было в значительной степени ослаблено.

Связи микроструктуры аэрозоля с его оптическими проявлениями существенно устойчивее.

Как видно из табл. 4, существует устойчивая корреляция числа частиц радиусом 0,2—0,35 мкм с ослаблением в видимой области спектра. С увеличением размеров частиц эта корреляция ослабевает, что соответствует установившимся представлениям о том,

что в видимой области спектра основной вклад в ослабление вносит субмикронный аэрозоль.

В ближней ИК области спектра (2,14; 3,7 мкм) связь α_λ с количеством субмикронных частиц слабее, чем для $\lambda=0,55$ мкм, в то время как корреляция с крупнодисперсной фракцией аэрозоля возрастает. Эти факты свидетельствуют об относительном росте вклада крупнодисперсного аэрозоля в ослабление при переходе в ИК область спектра.

Таблица 4

Коэффициенты корреляции числа частиц с метеопараметрами и ослаблением в видимой и ИК областях спектра

Δa мкм	R_{Nr}	R_{Nt}	R_{Ne}	$R_{N\alpha_{0,55}}$	$R_{N\alpha_{2,14}}$	$R_{N\alpha_{3,7}}$	$R_{N\alpha_{11,1}}$	$R_{N\alpha_{ост11,1}}$
0,001—0,1	—0,10	0,13	0,02	0,02	—0,08	—0,2	—0,1	—0,16
0,2—0,35	0,23	0,23	0,39	0,76	0,45	0,45	0,52	0,18
0,35—0,5	0,22	0,12	0,27	0,62	0,51	0,45	0,36	0,15
0,5—2	0,14	0,15	0,27	0,46	0,53	0,45	0,30	0,06
2	—0,12	0,44	0,42	0,18	0,38	0,35	0,36	—0,02

Как было показано в [12], в области 11,1 мкм наблюдается исключительно высокая корреляция ослабления с e , обусловленная сильным влиянием континуума водяного пара. Указанная закономерность сохраняется и для рассматриваемого в данной работе массива данных ($R_{\alpha_{11,1}e}=0,9$). Как видно из табл. 4, коэффициенты корреляции числа частиц с $\alpha_{11,1}$ существенно меньше $R_{\alpha_{11,1}e}$, что подтверждает выводы [12].

Следует иметь в виду, что корреляция числа частиц с $\alpha_{11,1}$ так же как связь $\alpha_{11,1}$ с $\alpha_{0,55}$ и r [12], может проявляться опосредованно через сильную зависимость $\alpha_{11,1}$ от e и корреляцию N с e .

После вычитания континуума связь остаточного ослабления $\alpha_{ост11,1}$ с $\alpha_{2,14}$ и $\alpha_{3,7}$ увеличивается по сравнению с корреляцией $\alpha_{2,14}$ и $\alpha_{3,7}$ с полным непрерывным ослаблением в области 11,1 мкм. $R_{\alpha\alpha}$ равно 0,42; 0,28; 0,42 для $\lambda=0,6$; 2,14; 3,7 мкм, в то время как соответствующие коэффициенты корреляции для остаточного ослабления составляют 0,38; 0,53; 0,66. Этот факт указывает на то, что на аэрозольное ослабление в области 11,1 мкм оказывают влияние фракции аэрозоля, вносящие вклад в ослабление у 2,14 и 3,7 мкм, т. е. как субмикронные, так и крупнодисперсные частицы.

В то же время, как видно из табл. 4, непосредственная корреляция $\alpha_{ост11,1}$ с числом частиц различных фракций практически отсутствует, что, вероятно, связано с весьма большими погрешно-

стями обеих коррелируемых величин (среднее значение $\alpha_{\text{ост } 11,1}$ составляет $0,02 \text{ км}^{-1}$ при погрешности единичного измерения $\pm 0,02 \text{ км}^{-1}$, погрешности определения N также велики и окончательно не выяснены). При рассмотрении же автокорреляции ослабления по спектру не имеет значения часть погрешностей в α_λ , одинаковых для всей спектральной области.

Корреляции числа частиц с $a < 0,1 \text{ мкм}$ с ослаблением в видимой и ближней ИК областях спектра, как и следовало ожидать, нет в области $11,1 \text{ мкм}$, где влияние мелких частиц могло проявиться за счет поглощения излучения аэрозолем [13], корреляция $\alpha_{11,1}$ с N ($a < 0,1 \text{ мкм}$) также отсутствует.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Направление ветра оказывает влияние на концентрацию аэрозольных частиц.

2. Подтверждаются данные предыдущих исследований об увеличенном по сравнению с юнговским распределением содержания в приземном слое атмосферы частиц с радиусом $> 0,7 \text{ мкм}$.

3. При увеличении относительной влажности наблюдается трансформация аэрозоля: в результате конденсационных процессов происходит укрупнение частиц с радиусом $< 0,1 \text{ мкм}$.

4. Корреляция числа частиц ($a > 0,2 \text{ мкм}$) с ослаблением видимого и ИК излучения показывает, что при переходе в ИК область спектра увеличивается относительный вклад в ослабление крупнодисперсного аэрозоля. Частицы с радиусом $< 0,1 \text{ мкм}$ не влияют на ослабление радиации во всем рассматриваемом диапазоне спектра.

5. В рассмотренном массиве данных вариации ослабления в области $11,1 \text{ мкм}$ обусловлены главным образом непрерывным поглощением водяным паром.

В заключение авторы выражают благодарность А. М. Броунштейну за постоянное внимание к работе, М. П. Жуковой и Т. Н. Капустиной за помощь в обработке материалов измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атмосферный аэрозоль и его влияние на перенос излучения/Под ред. К. Я. Кондратьева. — Л.: Гидрометеиздат, 1978. — 120 с.
2. Баланова Р. А., Иванченко Л. В., Баширова Р. Я. Сравнение расчетной и экспериментальной градуировок аэрозольного фотозлектрического счетчика. — Изв. АН СССР, ФАО, 1976, т. 12, № 8, с. 886.
3. Беляшова М. А. Влияние влажности воздуха на концентрацию мелкодисперсных аэрозолей. — Труды ГГО, 1979, вып. 418, с. 123—131.
4. Броунштейн А. М., Демидов В. В., Казакова К. В. Методика измерений абсолютной спектральной прозрачности горизонтальных приземных слоев воздуха в ИК области спектра. — Труды ГГО, 1976, вып. 357, с. 18—30.
5. Влияние аэрозоля на перенос излучения: возможные климатические последствия/К. Я. Кондратьев, О. Б. Васильева, Л. С. Ивлев и др./Под ред. К. Я. Кондратьева. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1973 — 266 с.
6. Грабовский Р. И. О природе атмосферных ядер конденсации. — Метеорология и гидрология, 1951, № 4, с. 39—41.

7. Иванов В. П., Филиппов В. Л., Сидоренко В. И. Количественные данные оценки роли мелкодисперсной фракции атмосферного аэрозоля в ослаблении инфракрасного излучения. — В кн.: Тезисы докладов XI Всесоюзного совещания по актинометрии. Ч. V. Радиация, аэрозоль и облака. Таллин, 1980, с. 85—87.
8. Любовцева Ю. С. О фотохимической и конденсационной изменчивости субмикронной фракции природного аэрозоля. — Изв. АН СССР, ФАО, 1978, т. 14, № 2, с. 229.
9. О связи между статистическими характеристиками спектра аэрозоля и коэффициентами ослабления/Ю. С. Георгиевский, С. М. Пирогов, А. И. Чавро, А. Х. Шукуров. — Изв. АН СССР, ФАО, 1978, т. 14, № 4, с. 405—411.
10. Свистов П. Ф. Исследование состава и некоторых физико-химических свойств атмосферных аэрозолей над разными районами: Автореф. дис. на соискание учен. степени канд. физ.-мат. наук. — Л., 1967. — 130 с.
11. Селезнева Е. С. Атмосферные аэрозоли. — Л.: Гидрометеиздат, 1966. — 173 с.
12. Статистические характеристики ослабления ИК излучения приземных слоев атмосферы/Н. Н. Парамонова, А. М. Броунштейн, К. В. Казакова, О. А. Немец. — См. наст. сб.
13. Субмикронная фракция аэрозоля и поглощение света в окне прозрачности 8—12 мкм/Г. В. Розенберг, Ю. С. Георгиевский, В. П. Капустин и др. — Изв. АН СССР, ФАО, 1977, т. 13, № 11, с. 1185—1192.
14. Филиппов В. Л., Иванов В. П. Синоптические аспекты оптики атмосферного аэрозоля. — В кн.: Материалы всесоюзного совещания по распространению оптического излучения в дисперсной среде. — М.: Гидрометеиздат, 1978, с. 101—105.
15. Roberts E. R., Selby I. E. A., Biberman L. M. Infrared continuum absorption by atmospheric water vapor in the 10—12 μm window. — Appl. Opt., 1976, v. 15, N 9, p. 2085—2090.
16. Scholz J. Vereinfachter Bau eines Kernzählers. — Meteorol. Z. 1932, Bd. 49, N 10, S. 145—153.

Н. Н. Парамонова, А. М. Броунштейн

СРАВНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСЛАБЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИЗЕМНЫМ СЛОЕМ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ РАЗНЫХ МАССИВОВ ДАННЫХ

К настоящему времени несколькими группами исследователей [3, 6—11] проведен статистический анализ массивов данных по ослаблению видимого и ИК излучения приземным слоем атмосферы. Такой анализ был проведен и для экспериментального материала, полученного на горизонтальном канале установки ИКАУ-1 в Воейково [7]. В данной работе статистические характеристики, полученные в [7], сравниваются с результатами предыдущих исследований [6, 8, 9] с целью выявления общих закономерностей и анализа возможных причин расхождений.

В [7] измерения ослабления ИК излучения приземным слоем атмосферы проводились в микроокнах прозрачности для λ , равных 2,14; 3,7 и 11,1 мкм, оптическая плотность атмосферы в видимой области спектра определялась по метеорологической дальности видимости (S_m). Сравнения с [6, 8, 9] производятся для указанных участков спектра.

Спектральные измерения в обоих исследованиях сопровождались определением метеопараметров — температуры (t), относительной (r) и абсолютной (e) влажности.

Рассматривались следующие статистические характеристики: средние значения метеопараметров и оптической плотности атмосферы, их средние квадратические отклонения, коэффициенты корреляции ослабления с метеопараметрами и автокорреляция ослабления по спектру. В [6, 8, 9] определялись, кроме того, собственные вектора и собственные числа корреляционной матрицы. Указанные характеристики находились для всего массива данных (генеральный ансамбль) и для отдельных выборок, сформированных по диапазонам изменения e и r . В [7], кроме того, были сделаны выборки по $\alpha_{0,55}$, а в [9] — по условиям замутненности, ко-

Таблица 1

Средние значения и средние квадратические отклонения (σ)

Величина	ГГО		ИФА	
	среднее значение	σ	среднее значение	σ
n	195	—	142	—
t	12,1	8,9	5,6	6,0
e	9,8	5,9	7,8	3,3
r	61,0	15,0	79,4	15,8
$\alpha_{0,55}$	0,25	0,18	0,31	0,23
$\alpha_{2,14}$	0,05	0,03	0,11	0,06
$\alpha_{3,7}$	0,05	0,02	0,09	0,06
$\alpha_{11,1}$	0,11	0,09	0,18	0,08

Таблица 2

Коэффициенты корреляции

Коррелируемые величины	ГГО	ИФА	Коррелируемые величины	ГГО	ИФА
te	0,86	0,89	$r \alpha_{0,55}$	0,58	0,39
rt	-0,06	0,09	$r \alpha_{2,14}$	0,38	0,36
er	0,37	0,46	$r \alpha_{3,7}$	0,28	0,36
$\alpha_{0,55} \alpha_{2,14}$	0,67	0,78	$r \alpha_{11,1}$	0,48	0,43
$\alpha_{0,55} \alpha_{3,7}$	0,55	0,69	$e \alpha_{0,55}$	0,34	0,51
$\alpha_{0,55} \alpha_{11,1}$	0,50	0,67	$e \alpha_{2,14}$	0,18	0,71
$\alpha_{2,14} \alpha_{3,7}$	0,89	—	$e \alpha_{3,7}$	0,15	0,53
$\alpha_{2,14} \alpha_{11,1}$	0,37	—	$e \alpha_{11,1}$	0,94	0,74
$\alpha_{3,7} \alpha_{11,1}$	0,35	—			

торые определялись по виду отклонения конкретных спектров от среднего спектра и генерального ансамбля (апостериорные ансамбли). В табл. 1 и 2 приведены основные статистические характеристики для генерального ансамбля [7] (ГГО) и исследований [6, 8, 9] (ИФА).

Остановимся вначале на различиях в структуре ансамблей ГГО и ИФА, подразумевая под структурой распределение данных по условиям измерений.

1. Сравнение $\bar{e}$ и σ_e в табл. 1 показывает, что измерения, проведенные в ГГО, охватывают более широкий диапазон изменения парциального давления водяного пара. Можно отметить также, что при $e > 10$ гПа в ГГО получено 80 спектров, а в ИФА — 32 спектра.

2. Среднее аэрозольное ослабление в видимой области спектра ($\alpha_{0,55}$) по данным ГГО меньше, чем по данным ИФА (табл. 1).

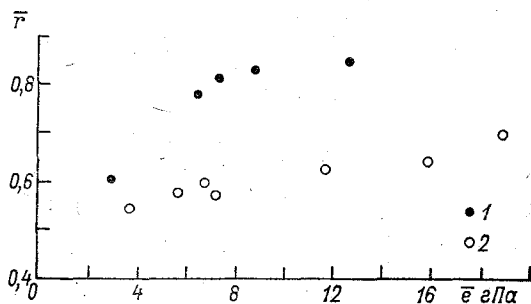


Рис. 1. Зависимость средних значений $\bar{r}$ от $\bar{e}$ в выборках, сделанных по диапазонам изменения e .

1 — массив данных ИФА; 2 — массив данных ГГО.

3. В ансамбле ГГО представлены данные при высокой прозрачности атмосферы в широком диапазоне изменения парциального давления водяного пара. В выборке при $\alpha_{0,55} < 0,2$ км⁻¹ (119 спектров) $\bar{e} = 8,2$ гПа и $\sigma_e = 4,2$ гПа. В ансамбле ИФА отсутствуют данные с малым $\alpha_{0,55}$ при высоком парциальном давлении водяного пара. Так, при $e > 10$ гПа среднее значение $\alpha_{0,55}$ в массиве ИФА составляет 0,52 км⁻¹, в то время как для такой же выборки в массиве ГГО $\alpha_{0,55} = 0,28$ км⁻¹.

4. Из табл. 1 видно, что данные ГГО получены при значительно меньших значениях r и при одинаковых в ИФА и ГГО диапазонах изменения этого параметра. Так, при $r > 70$ % в ГГО получено 53 спектра, а в ИФА 116 спектров. Следует отметить практически полное отсутствие измерений при $r > 90$ % в массиве ГГО, в то время как в ИФА получено 33 таких спектра. С другой стороны, в ГГО получен большой массив данных при низкой относительной влажности (51 спектр при $r < 50$ %), а в ИФА при $r < 70$ % проведено 26 серий измерений.

Кроме того, следует отметить, что для массива ИФА характерно резкое возрастание относительной влажности при увеличении парциального давления водяного пара. Это различие показано на рис. 1, где приведены зависимости средних значений $\bar{r}$ от $\bar{e}$ для выборок, сделанных по диапазонам изменения e .

Структура массивов данных в значительной степени может быть обусловлена микроклиматическими особенностями места наблюдений.

Измерения, представленные в [7], проводились в Воейково на хорошо продуваемой возвышенности, расположенной в местности с холмистым рельефом. Высота над уровнем моря 70 м, лесные массивы расположены внизу. Таким образом, на 100-метровом участке, где расположена многоходовая система установки ИКАУ-1, как правило, воздух постоянно сменяется и условия для устойчивого развития местных аэрозольных процессов редки. Следовательно, измеряемые здесь оптические характеристики аэрозоля, по всей видимости, отражают свойства, присущие «фоновому» аэрозолю воздушной массы, приходящей в район наблюдений, и, как нам думается, являются репрезентативными для большего района, чем в случае измерений в условиях заторможенного горизонтального обмена залесенных равнин или низин, где легче наблюдать локальные аэрозольные процессы.

Возможно, этими особенностями объясняется более высокая дальность видимости и редкие случаи экстремально большой относительной влажности, наблюдавшейся в период получения ансамбля данных ГГО. Широкий диапазон изменения абсолютной влажности связан, видимо, с синоптическими особенностями района наблюдений, где происходят частые смены воздушных масс и резкие изменения погодных условий.

Различия в структуре ансамблей ГГО и ИФА сказались и на коэффициентах корреляции (табл. 2).

В обоих массивах данных наблюдаются следующие общие закономерности:

1) высокая корреляция полного непрерывного ослабления в области 11,1 мкм с парциальным давлением водяного пара;

2) автокорреляция ослабления по спектру.

Имеется также ряд существенных различий:

1) зависимость $\alpha_{11,1}$ от парциального давления водяного пара в ансамблях ГГО проявляется более сильно, чем в ансамбле ИФА, а корреляция ослабления в ИК области спектра с $\alpha_{0,55}$ более слабо;

2) в ансамбле ИФА наблюдается довольно высокая корреляция ослабления в видимой и ближней ИК областях спектра с e , в ансамбле же ГГО она очень слабая;

3) связь $\alpha_{0,55}$ с относительной влажностью в ансамбле ГГО сильнее.

Отмеченное различие в коэффициентах корреляции между $\alpha_{0,55}$ и r , с нашей точки зрения, не является существенным, поскольку, как неоднократно отмечалось [1], в общем массиве дан-

ных закономерное изменение аэрозольного ослабления под воздействием конденсационных процессов может не прослеживаться из-за одновременного влияния таких факторов, как смена воздушных масс и действие местных источников аэрозоля.

Наблюдающаяся в ансамбле ИФА зависимость ослабления в видимой и ИК областях спектра от e позволяет авторам [6, 8, 9] сделать вывод о существовании дополнительного механизма выноса аэрозоля с подстилающей поверхности в условиях сильного ее увлажнения и нагрева.

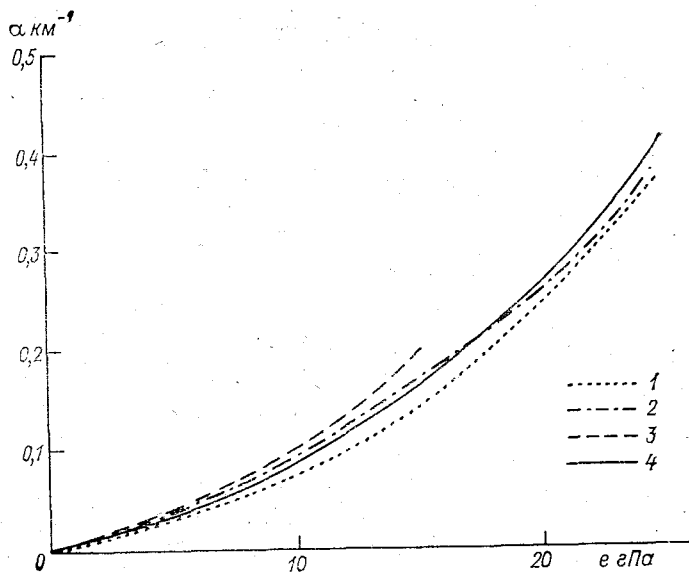


Рис. 2. Зависимость минимальных (при данной влажности e) значений $\alpha_{11,1}$ от парциального давления водяного пара, $\nu = 900 \text{ см}^{-1}$.

1 — данные [7]; 2 — данные [2]; 3 — данные [6, 3, 9]; 4 — расчет по лабораторным данным Берча [12].

Следует отметить, что указанная зависимость для видимой и ближней ИК областей спектра не проявилась не только в ансамбле ГГО (несмотря на более широкий диапазон изменения e), но и в исследованиях [10], основанных на большом объеме экспериментального материала (~ 400 реализаций). Возможно, что в ансамбле ИФА она в значительной степени возникает из-за отмеченной выше особенности структуры ансамбля: измерения при $e > 7 \text{ гПа}$ осуществлялись при высокой относительной влажности ($\sim 80\%$). Это могло привести к увеличению ослабления при высоких значениях e за счет влияния конденсационных процессов в условиях высокой относительной влажности, что создает кажущуюся зависимость от e . Это объяснение не исключает возмож-

ности дополнительного влияния выноса аэрозоля с подстилающей поверхности при высоких значениях влажности и температуры.

Отмеченные различия в статистических характеристиках вызывают и различия в выводах [7] и [6, 8, 9]. Так, в [7] на основании высокой корреляции $\alpha_{11,1}$ с e делается вывод о сильном влиянии континуума водяного пара в области 11,1 мкм. Высокая автокорреляция ослабления в видимой и ИК областях спектра в ансамбле ИФА позволяет авторам [6, 8, 9] сделать вывод о том, что ослабление вызвано одним общим фактором, которым может быть субмикронная фракция аэрозоля, ослабляющая радиацию за счет рассеяния в видимой области спектра и за счет поглощения в ИК (8—12 мкм). При интерпретации данных естественно исходить из представления, что оба эти фактора в реальной атмосфере действуют совместно. Различия же в статистических характеристиках обусловлены разными условиями измерений. Так, меньшее влияние аэрозольного ослабления (малые $\alpha_{0,55}$ и r) и широкий диапазон изменения e в совокупности привели к тому, что влияние континуума водяного пара в ансамбле ГГО проявилось сильнее. Корреляция же ослабления в видимой и ИК областях спектра, характеризующая влияние общего фактора — аэрозольного ослабления, оказывается в ансамбле ГГО хуже, чем в ансамбле данных ИФА.

Следует отметить, что разное соотношение вкладов ослабления водяным паром и аэрозолем в области 8—12 мкм (при фиксированных значениях e), которое является одной из причин различия в статистических характеристиках, возникает за счет изменения абсолютного вклада аэрозольного ослабления в разных условиях и массивах данных.

Минимальные при данной влажности (e) значения $\alpha_{11,1}$, которые дают оценку вклада континуума водяного пара (метод минимальных точек [4]), оказываются близкими в массивах данных, полученных разными группами исследователей. Это видно из рис. 2, на котором показаны кривые, полученные в результате аппроксимации минимальных значений $\alpha_{11,1}$ для массивов ИФА и ГГО, а также зависимость $\alpha_{11,1}$ от e , полученная в условиях высокой прозрачности атмосферы в видимой области спектра [2, 10, 11].

Лабораторные данные Берча [12] по поглощению в континууме водяного пара, как видно из рис. 2, хорошо описывают результаты натурных измерений. Соответствие лабораторных [12] и натурных данных по континууму водяного пара было подробно показано в [5, 7].

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Различия в структуре рассматриваемых ансамблей сказываются на получаемых статистических характеристиках.
2. Оценки вклада непрерывного поглощения водяным паром в области 11,1 мкм, проведенные по разным массивам экспериментальных данных в открытой атмосфере, дают близкие результаты, соответствующие лабораторным данным Берча [12].

3. Влияние аэрозольного ослабления различно для двух приведенных ансамблей данных, что также сказывается на рассмотренных статистических характеристиках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Георгиевский Ю. С., Розенберг Г. В. Влажность как фактор атмосферного аэрозоля. — Изв. АН СССР, ФАО, 1973, т. 9, № 2, с. 126—138.
2. Макаров А. С., Филиппов В. Л. Некоторые материалы исследования коэффициентов ослабления излучения ($\lambda=8-12$ мкм) в естественной атмосфере. — Изв. вузов. Радиофизика, 1978, т. 21, № 3, с. 368—371.
3. Некоторые результаты исследований оптических свойств морской прибрежной дымки/В. Е. Зуев, М. В. Кабанов, М. В. Панченко и др. — Изв. АН СССР, ФАО, 1978, т. 14, № 12, с. 1268—1274.
4. О прозрачности атмосферы в ИК области спектра/М. С. Малкевич, Г. В. Георгиевский, Г. В. Розенберг, А. Х. Шукуров. — Изв. АН СССР, ФАО, 1973, т. 9, № 12, с. 1257—1268.
5. Парамонова Н. Н., Броунштейн А. М. О непрерывном ослаблении солнечной радиации в ИК окнах прозрачности атмосферы. — Труды ГГО, 1979, вып. 419, с. 110—119.
6. Связь между статистическими характеристиками спектральной структуры ослабления радиации и метеорологических параметрами в приземном слое воздуха/А. И. Чавро, Ю. С. Георгиевский, М. С. Малкевич, А. Х. Шукуров. — Изв. АН СССР, ФАО, 1977, т. 13, № 12, с. 1257—1268.
7. Статистические характеристики ослабления ИК излучения приземным слоем атмосферы/Н. Н. Парамонова, А. М. Броунштейн, К. В. Казакова, О. А. Немец. — См. наст. сб.
8. Статистические характеристики спектральной структуры ослабления радиации в приземном слое воздуха/М. С. Малкевич, Ю. С. Георгиевский, А. И. Чавро, А. Х. Шукуров. — Изв. АН СССР, ФАО, 1977, т. 13, № 12, с. 1257—1267.
9. Статистические характеристики спектральной структуры ослабления радиации при различной замутненности приземного слоя атмосферы/М. С. Малкевич, Ю. С. Георгиевский, А. И. Чавро, А. Х. Шукуров. — Изв. АН СССР, ФАО, 1978, т. 14, № 3, с. 273—284.
10. Филиппов В. А., Иванов В. П. О зависимости аэрозольного ослабления оптического излучения от влажности воздуха. — Метеорология и гидрология, 1979, № 4, с. 65—69.
11. Филиппов В. А., Иванов В. П., Макаров А. С. Статистические характеристики ослабления оптического излучения в приземном слое атмосферы (весна, осень). — Оптико-мех. промышленность, 1978, № 1, с. 58—62.
12. Roberts E. R., Selby I. E. A., Biberman L. M. Infrared continuum absorption by atmospheric water vapor in the 10—12 μm window — Appl. Opt., 1976, v. 5, N 9, p. 2085—2090.

*Н. Н. Парамонова, А. М. Броунштейн,
К. В. Казакова, О. А. Немец*

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСЛАБЛЕНИЯ ИК ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИЗЕМНЫМ СЛОЕМ АТМОСФЕРЫ

Исследованию закономерностей непрерывного ослабления ИК радиации атмосферой в настоящее время уделяется большое внимание. Особенно остро обсуждается в литературе вопрос соотно-

шении двух факторов, влияющих на ослабление радиации в окне прозрачности атмосферы 8—12 мкм, — аэрозольного ослабления и непрерывного поглощения водяным паром.

Благодаря работам ИФА АН СССР [6] при анализе данных оптических исследований атмосферы стал применяться статистический метод, который расширил возможности количественных оценок закономерностей ослабления излучения атмосферой. Такой подход был использован несколькими группами исследователей, получивших достаточно большие массивы экспериментальных данных [3—5, 7, 8, 10—15]. Наиболее обстоятельный статистический

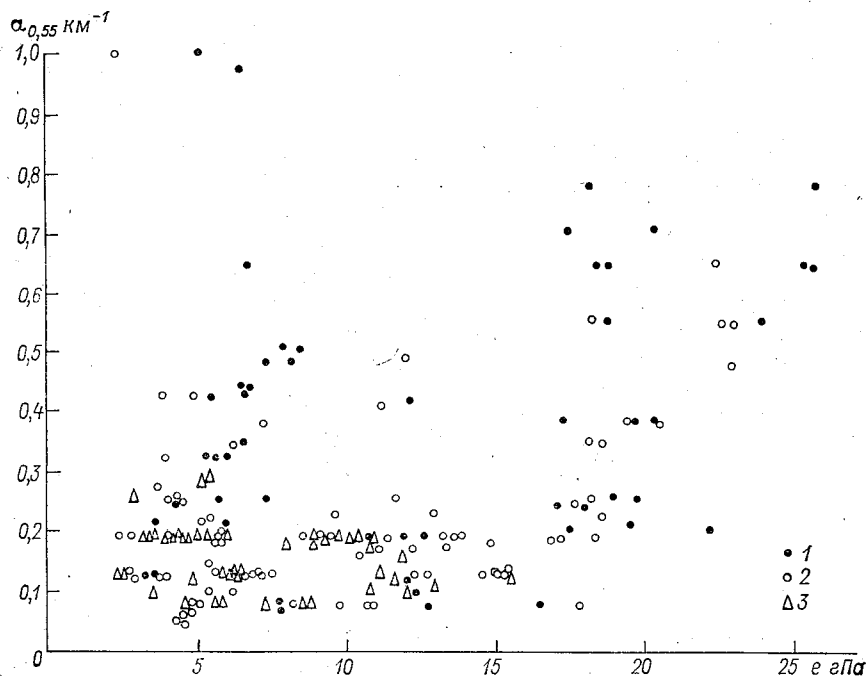


Рис. 1. Распределение данных по условиям измерений.
1 — $r > 70\%$; 2 — $50\% < r < 70\%$; 3 — $r < 50\%$.

анализ ослабления излучения атмосферой проведен в работе [10—12].

Сравнение результатов статистического анализа, проведенного разными авторами на своем экспериментальном материале, показывает, что по ряду вопросов имеются расхождения в выводах. Поэтому представляется необходимым продолжение исследований в различных условиях с целью дальнейшего обобщения результатов.

В настоящей работе представлены результаты статистического анализа данных по ослаблению ИК радиации приземным слоем

атмосферы, полученных в Воейково на установке ИКАУ-1, горизонтальный канал которой построен в виде многоходовой системы с базой 100 м.

Описание установки и методики измерений приведено в работах [1, 2]. Рассматриваемый экспериментальный материал состоит из 195 серий измерений пропускания приземного слоя воздуха в микроокнах прозрачности вблизи 2,14; 3,7; 11,1 мкм со спектральным разрешением 6, 2 и 3 см⁻¹ соответственно. Распределение данных по условиям измерений приведено на рис. 1.

Измерения проводились при длине пути 1,6 и 2 км. Исследование погрешностей измерений показало, что средняя квадратическая случайная погрешность единичного измерения оптической плотности атмосферы не превышает $\pm 0,02$ км⁻¹, систематическая погрешность не более $\pm 0,02-0,03$ км⁻¹ (она связана главным образом с процедурой градуировки методом нулевых спектров).

Во время измерений пропускания атмосферы непосредственно на 100-метровой базе многоходовой системы определялась температура (t), абсолютная (e) и относительная (r) влажность, а также метеорологическая дальность видимости в районе измерений (S_m).

Были рассмотрены следующие статистические характеристики: среднее арифметическое ($\bar{x}$) и среднее квадратическое (σ_x) отклонения, а также коэффициенты корреляции величин x и y (R_{xy}), вычисляемые по обычным формулам:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad \sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2};$$

$$R_{xy} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y}.$$

Для получения более полной информации статистические характеристики определялись не только для всего массива данных (генеральный ансамбль), но и для выборок, сформированных, как и в [10], по диапазонам изменения абсолютной и относительной влажности. Кроме того, были образованы выборки по диапазонам изменения оптической плотности атмосферы в видимой области спектра ($\alpha_{0,55}$), которая определялась по метеорологической дальности видимости (S_m):

$$\alpha_{0,55} = \frac{3,9}{S_m}.$$

Перечень всех рассмотренных выборок приведен в табл. 1. Статистические характеристики представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что наблюдается заметная корреляция ослабления в видимой области спектра с относительной влажностью. Для генерального ансамбля $R_{\alpha_{0,55} r}$ составляет 0,58. Наиболее

Таблица 1

Перечень рассматриваемых ансамблей данных

Номер вы- борки	Число реали- заций	Интервал выборки фик- сированного параметра	$\bar{t}^{\circ}\text{C}$	σ_t	$\bar{e}_{\text{гПа}}$	σ_e	$\bar{r} \%$	σ_r
I	195	Генеральное множество e гПа	12,1	8,9	9,8	5,9	0,61	0,15
II	46	<5	1,4	3,7	3,7	0,7	0,55	0,09
III	67	5—10	9,2	5,0	6,8	1,3	0,60	0,19
IV	115	<10	6,1	6,1	5,6	1,9	0,58	0,15
V	152	<15	9,2	7,9	7,2	3,3	0,58	0,14
VI	149	>5	15,4	7,3	11,7	5,5	0,63	0,15
VII	80	>10	20,8	3,6	15,8	4,1	0,65	0,14
VIII	43	>15	22,4	2,5	19,0	2,8	0,71	0,10
$r \%$								
IX	51	$<0,5$	12,5	8,2	6,8	3,2	0,43	0,05
X	82	0,5—0,7	11,8	9,3	9,6	5,7	0,60	0,05
XI	142	$<0,7$	12,2	9,0	8,8	5,2	0,54	0,10
XII	53	$>0,7$	11,8	8,8	12,5	6,6	0,80	0,07
XIII	27	0,7—0,8	12,8	8,9	12,4	6,0	0,74	0,03
XIV	26	$>0,8$	10,8	8,7	12,7	7,3	0,86	0,03
$\alpha_{0,55} \text{ км}^{-1}$								
XV	64	$<0,15$	11,4	7,7	8,1	4,1	0,54	0,11
XVI	119	$<0,2$	11,8	8,2	8,2	4,2	0,53	0,11
XVII	76	$>0,2$	12,6	10,0	12,4	7,2	0,72	0,12
XVIII	45	0,2—0,4	12,4	9,6	11,5	6,5	0,68	0,12
XIX	31	$>0,4$	12,8	10,5	13,6	7,9	0,78	0,10
XX	21	$>0,5$	15,8	10,5	16,2	7,7	0,79	0,10

устойчивая и высокая корреляция между $\alpha_{0,55}$ и r проявляется в выборках, сделанных по диапазонам изменения e . При ограничении диапазонов изменения r (выборки IX—XIV) и $\alpha_{0,55}$ (выборки XV—XX, а также в множестве II ($e < 5$ гПа), которое также характеризуется малыми вариациями $\alpha_{0,55}$ и r , происходит закономерное уменьшение $R_{\alpha_{0,55} r}$.

Сравнение $R_{\alpha_{0,55} r}$ в ансамблях IV и V, а также в VI и VIII показывает, что существует тенденция уменьшения связи $\alpha_{0,55}$ и r с ростом абсолютной влажности.

**Средние значения, средние квадратические отклонения
и коэффициенты корреляции**

	Номер выборки									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Средние значения										
$\bar{\alpha}_{0,55}$	0,25	0,20	0,24	0,23	0,22	0,27	0,28	0,38	0,16	0,23
$\bar{\alpha}_{2,14}$	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05	0,06	0,04	0,05
$\bar{\alpha}_{3,7}$	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05
$\bar{\alpha}_{11,1}$	0,11	0,04	0,06	0,05	0,07	0,13	0,19	0,25	0,05	0,11
$\bar{\alpha}_B$	0,09	0,02	0,04	0,03	0,05	0,11	0,17	0,23	0,04	0,08
Средние квадратические отклонения										
$\sigma_{\alpha_{0,55}}$	0,18	0,15	0,16	0,15	0,16	0,19	0,19	0,21	0,05	0,16
$\sigma_{\alpha_{2,14}}$	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03
$\sigma_{\alpha_{3,7}}$	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02
$\sigma_{\alpha_{11,1}}$	0,09	0,02	0,03	0,03	0,04	0,09	0,09	0,07	0,03	0,08
σ_{α_B}	0,09	0,01	0,02	0,02	0,04	0,09	0,08	0,07	0,03	0,08
Коэффициенты корреляции между указанными переменными										
te	0,86	0,72	0,59	0,81	0,87	0,80	0,52	0,40	0,95	0,95
rt	-0,06	-0,55	-0,80	-0,47	-0,39	-0,27	-0,36	-0,57	-0,48	0,05
er	0,37	0,17	-0,02	0,11	0,06	0,31	0,59	0,50	-0,24	0,24
$\alpha_{0,55} \alpha_{2,14}$	0,67	0,56	0,69	0,65	0,65	0,70	0,69	0,67	0,48	0,60
$\alpha_{0,55} \alpha_{3,7}$	0,54	0,59	0,56	0,57	0,55	0,54	0,50	0,47	0,48	0,53
$\alpha_{0,55} \alpha_{11,1}$	0,50	0,51	0,41	0,44	0,21	0,51	0,77	0,69	0,00	0,49
$\alpha_{2,14} \alpha_{3,7}$	0,89	0,94	0,86	0,90	0,89	0,88	0,89	0,87	0,76	0,93
$\alpha_{2,14} \alpha_{11,1}$	0,37	0,75	0,47	0,48	0,28	0,41	0,57	0,60	0,13	0,27
$\alpha_{3,7} \alpha_{11,1}$	0,35	0,79	0,60	0,55	0,35	0,39	0,41	0,48	0,33	0,24
$r_{\alpha_{0,55}}$	0,58	0,29	0,69	0,61	0,55	0,61	0,52	0,48	0,08	0,41
$r_{\alpha_{2,14}}$	0,38	0,08	0,55	0,41	0,33	0,45	0,30	0,37	0,05	0,23
$r_{\alpha_{3,7}}$	0,28	0,11	0,46	0,34	0,24	0,32	0,18	0,24	-0,14	0,25
$r_{\alpha_{11,1}}$	0,48	0,25	0,47	0,43	0,33	0,46	0,65	0,55	-0,07	0,36
$e_{\alpha_{0,55}}$	0,34	-0,24	-0,05	0,02	-0,11	0,34	0,70	0,64	-0,20	0,28
$e_{\alpha_{2,14}}$	0,18	-0,14	0,04	-0,04	-0,09	0,24	0,42	0,46	-0,04	0,03
$e_{\alpha_{3,7}}$	0,15	-0,15	-0,01	-0,09	-0,07	0,20	0,23	0,29	0,07	0,00
$e_{\alpha_{11,1}}$	0,94	0,31	0,50	0,62	0,82	0,94	0,95	0,93	0,83	0,94
$\alpha_B \alpha_{11,1}$	0,97	0,31	0,68	0,70	0,85	0,97	0,96	0,94	0,85	0,96

	Номер выборки									
	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX
Средние значения										
$\bar{\alpha}_{0,55}$	0,20	0,38	0,28	0,49	0,11	0,15	0,42	0,29	0,60	0,67
$\bar{\alpha}_{2,14}$	0,04	0,06	0,06	0,07	0,03	0,03	0,07	0,06	0,09	0,09
$\bar{\alpha}_{3,7}$	0,05	0,06	0,06	0,06	0,04	0,04	0,07	0,06	0,08	0,08
$\bar{\alpha}_{11,1}$	0,09	0,16	0,15	0,17	0,07	0,07	0,16	0,14	0,20	0,24
$\bar{\alpha}_B$	0,07	0,14	0,13	0,15	0,06	0,06	0,13	0,12	0,16	0,20
Средние квадратические отклонения										
$\sigma_{\alpha_{0,55}}$	0,13	0,23	0,18	0,23	0,02	0,04	0,19	0,06	0,16	0,16
$\sigma_{\alpha_{2,14}}$	0,02	0,04	0,03	0,04	0,01	0,01	0,03	0,03	0,04	0,03
$\sigma_{\alpha_{3,7}}$	0,02	0,03	0,03	0,03	0,01	0,01	0,03	0,02	0,03	0,02
$\sigma_{\alpha_{11,1}}$	0,07	0,10	0,09	0,12	0,05	0,05	0,11	0,09	0,12	0,12
σ_{α_B}	0,07	0,11	0,09	0,13	0,05	0,05	0,11	0,09	0,13	0,13
Коэффициенты корреляции между указанными переменными										
te	0,89	0,96	0,98	0,98	0,88	0,88	0,95	0,95	0,96	0,95
rt	-0,06	-0,18	-0,20	-0,15	-0,05	-0,14	-0,09	-0,03	-0,24	-0,33
er	0,33	-0,00	-0,10	-0,04	0,37	0,29	0,14	0,23	-0,08	-0,16
$\alpha_{0,55} \alpha_{2,14}$	0,58	0,68	0,73	0,61	0,30	0,35	0,42	0,30	0,21	0,47
$\alpha_{0,55} \alpha_{3,7}$	0,49	0,56	0,58	0,60	0,30	0,33	0,27	0,21	0,20	0,32
$\alpha_{0,55} \alpha_{11,1}$	0,53	0,30	0,40	0,22	0,15	0,07	0,28	0,16	0,16	-0,26
$\alpha_{2,14} \alpha_{3,7}$	0,89	0,89	0,90	0,89	0,63	0,78	0,87	0,86	0,89	0,83
$\alpha_{2,14} \alpha_{11,1}$	0,26	0,33	0,50	0,19	0,10	0,01	0,12	0,10	-0,62	-0,01
$\alpha_{3,7} \alpha_{11,1}$	0,24	0,39	0,46	0,33	0,16	0,11	0,11	0,03	0,10	0,14
$r \alpha_{0,55}$	0,41	0,56	0,30	0,40	-0,04	-0,07	0,39	0,05	0,20	0,21
$r \alpha_{2,14}$	0,19	0,38	0,11	0,57	-0,20	-0,14	0,05	-0,33	0,16	0,47
$r \alpha_{3,7}$	0,15	0,29	0,21	0,64	-0,07	-0,18	-0,02	-0,28	0,12	0,45
$r \alpha_{11,1}$	0,48	0,11	0,03	0,08	0,46	0,41	0,17	0,24	-0,09	-0,09
$e \alpha_{0,55}$	0,32	0,16	0,25	0,10	0,08	0,01	0,17	0,12	0,07	-0,38
$e \alpha_{2,14}$	0,05	0,17	0,27	0,10	0,15	-0,07	-0,04	-0,06	-0,14	-0,15
$e \alpha_{3,7}$	0,03	0,20	0,20	0,20	0,10	-0,01	-0,06	-0,13	-0,06	-0,04
$e \alpha_{11,1}$	0,93	0,96	0,94	0,97	0,95	0,93	0,96	0,95	0,97	0,97
$\alpha_B \alpha_{11,1}$	0,96	0,98	0,97	0,98	0,97	0,95	0,97	0,95	0,98	0,99

С увеличением относительной влажности возрастает влияние этого параметра на ослабление видимого излучения атмосферой. Так, при попарном сопоставлении выборок с близкими значениями σ_r (IX и X; XI и XII; XIII и XIV) - видно, что σ_a и $R_{\alpha_{0,55}r}$ больше в множествах, характеризующихся более высокими средними значениями $\bar{r}$.

При увеличении длины волны до 4 мкм корреляция ослабления с относительной влажностью в большинстве выборок умень-

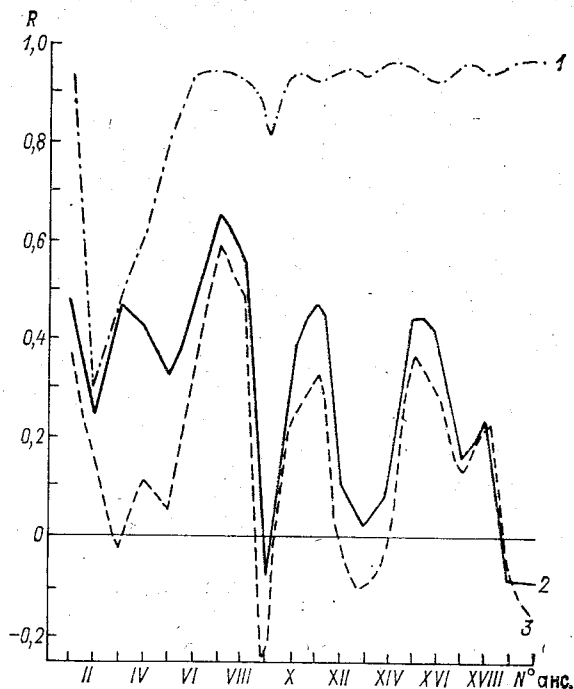


Рис. 2. Значения $R_{\alpha_{11,1}e}$ (1); $R_{\alpha_{11,1}r}$ (2) и R_{er} (3) для рассматриваемых выборок.

шается. Обратная тенденция — возрастание $R_{\alpha_{\lambda}r}$ при увеличении длины волны — происходит для ансамблей XIV и XX, характеризующихся высокими средними значениями $\bar{r}$ и $\alpha_{0,55}$. Это может быть связано с увеличением влияния грубодисперсной фракции аэрозоля, эффективной в ближней ИК области спектра. Однако в сходных по условиям ансамблях XIII и XIX отмеченная тенденция не проявляется.

В области 11,1 км корреляция ослабления с относительной влажностью в генеральном и в ряде других ансамблей несколько возрастает по сравнению с $R_{\alpha_{\lambda}r}$ для λ , равных 2,14 и 3,7 мкм. Анализ статистических характеристик показывает, что это возрас-

тание обусловлено появлением дополнительного к аэрозольному механизма связи $\alpha_{11,1}$ с r через сильную корреляцию $\alpha_{11,1}$ с e и небольшую корреляцию e с r . Так, из рис. 2 видно, что для ансамблей I, VI—XX, в которых $R_{\alpha_{11,1}e}$ составляет примерно 0,9, изменение $R_{\alpha_{11,1}r}$ происходит синхронно с изменением R_{er} . Синхронность нарушается лишь для ансамблей II—V, в которых уменьшается само значение $R_{\alpha_{11,1}e}$.

Корреляция ослабления в видимой области спектра с парциальным давлением водяного пара в целом значительно слабее, чем с относительной влажностью. Для генерального ансамбля $R_{\alpha_{0,55}e}$ равно 0,34. В большинстве ансамблей $R_{\alpha_{0,55}e}$ не превышает 0,3 и в ряде выборок становится отрицательным. Значительное увеличение $R_{\alpha_{0,55}e}$ происходит в ансамблях VII и VIII, характеризующихся высокими значениями R_{er} .

В области 2,14 и 3,7 мкм связь ослабления с e практически отсутствует, для генерального ансамбля $R_{\alpha_{\lambda}e}$ равно 0,18 ($\lambda = 2,14$ мкм) и 0,15 ($\lambda = 3,7$ мкм). Увеличение $R_{\alpha_{2,14}e}$, так же как и для видимой области спектра, происходит для ансамблей VII и VIII.

Особое внимание обращает на себя исключительно высокая корреляция $\alpha_{11,1}$ с парциальным давлением водяного пара. В большинстве ансамблей $R_{\alpha_{11,1}e}$ больше 0,9. Уменьшение корреляции происходит лишь для ансамблей II, III, IV, характеризующихся малыми средними значениями $\bar{e}$, а также сравнительно узкими диапазонами изменения этого параметра. Такая высокая корреляция $\alpha_{11,1}$ с e может быть легко объяснима сильным влиянием в этой области спектра континуума водяного пара.

Кроме $R_{\alpha_{11,1}e}$ были вычислены коэффициенты корреляции $\alpha_{11,1}$ с оптической плотностью водяного пара α_B , рассчитанной на основании зависимостей, полученных в лабораторных условиях [16]. Связь ослабления в области 11,1 мкм с α оказывается несколько выше, чем с e , для всех рассматриваемых выборок. Для генерального ансамбля $R_{\alpha_{11,1}e} = 0,94$ и $R_{\alpha_{11,1}\alpha_B} = 0,97$.

Возрастание коэффициентов линейной корреляции $R_{\alpha_{11,1}\alpha_B}$ по сравнению с $R_{\alpha_{11,1}e}$ возможно указывает на то, что обнаруженная в лабораторных измерениях квадратическая зависимость $\alpha(e)$ проявляется в натуральных условиях. Частично улучшение корреляции может быть обусловлено также учетом при определении α_B обнаруженной в лабораторных условиях температурной зависимости ослабления в континууме водяного пара.

Высокая корреляция $\alpha_{11,1}$ с e проявляется и в тесной зависимости средних значений $\alpha_{11,1}$ от средних значений $\bar{e}$ для рассматриваемых выборок (рис. 3 а).

На рис. 3 б и 3 в приведены зависимости средних значений $\alpha_{0,55}$ соответственно от $\bar{r}$ и $\bar{e}$ для всех рассматриваемых ансамб-

лей. Видно, что происходит увеличение $\overline{\alpha_{0,55}}$ с ростом как относительной, так и абсолютной влажности. Особенно четко указанные зависимости проявляются при отдельном рассмотрении выборок, сформированных по одному из параметров (r , e или $\alpha_{0,55}$).

На рис. 3 б и в видно также, что при близких значениях $\bar{e}$ и $\bar{r}$ наблюдаются значительные различия в $\overline{\alpha_{0,55}}$. Так, в множествах XIII и XVII $\bar{e}_{\text{XIII}} = \bar{e}_{\text{XVII}} = 12,4$ гПа, $\bar{r}_{\text{XIII}} \approx \bar{r}_{\text{XVII}}$ (74 и 72 %), а $\alpha_{0,55}$ значительно отличаются (0,28 и 0,42 км⁻¹).

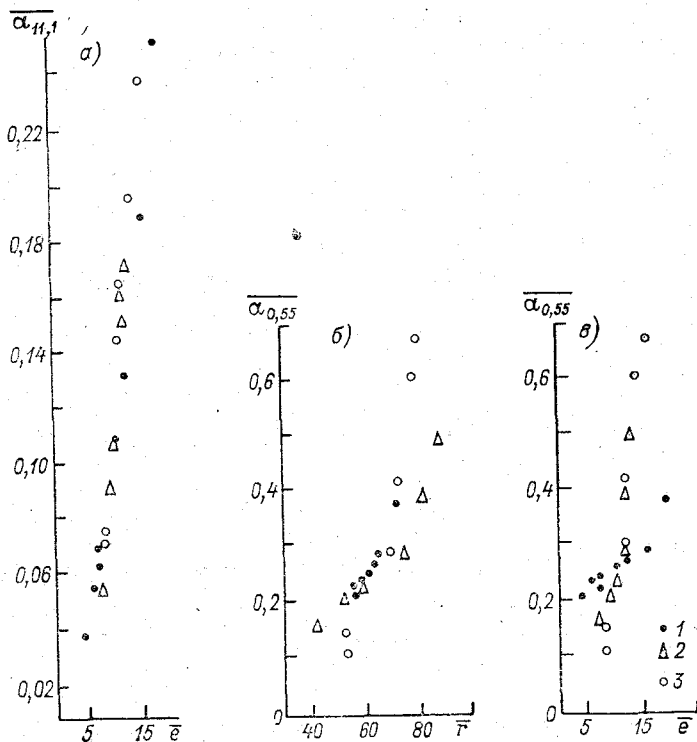


Рис. 3. Зависимость средних по выборкам значений $\overline{\alpha_{11,1}}$ от $\bar{e}$ (а) и $\overline{\alpha_{0,55}}$ от $\bar{r}$ (б) и $\bar{e}$ (в).

1 — выборки по e ; 2 — выборки по r ; 3 — выборки по $\alpha_{0,55}$

По существующим представлениям влияние относительной влажности на ослабление видимого излучения атмосферой, которое проявилось для рассматриваемого массива данных как в корреляционных связях, так и в зависимости $\overline{\alpha_{0,55}}$ от $\bar{r}$, обусловлено воздействием конденсационных процессов на распределение аэрозольных частиц по размерам и их оптические константы.

Влияние парциального давления водяного пара на $\alpha_{0,55}$, отмеченное при анализе данного экспериментального материала (зави-

симость $\bar{\alpha}_{0,55}$ от $\bar{e}$ и увеличение $R_{\alpha_{0,55}e}$ в условиях высокой абсолютной влажности), с одной стороны, вероятно, проявляется через связь относительной и абсолютной влажности и, с другой стороны, может быть, как указывалось в [10, 12], вызвано дополнительными механизмами образования аэрозольных частиц в условиях высокого увлажнения атмосферы и подстилающей поверхности. Важным фактором, влияющим на связь $\alpha_{0,55}$ и e , является давно установленная известная консервативность этих характеристик для воздушных масс различного происхождения.

Существенные отличия $\bar{\alpha}_{0,55}$ для ансамблей, характеризующихся одинаковыми $\bar{r}$ и $\bar{e}$, указывают на влияние других факторов, таких, по-видимому, как различия в концентрации аэрозольных частиц и их химическом составе, возникающие при смене воздушных масс в районе измерений.

Рассмотрим автокорреляционные связи ослабления. Из табл. 2 видно, что наблюдается довольно высокая и устойчивая корреляция ослабления в области 2,14 мкм с $\alpha_{0,55}$. Для генерального ансамбля $R_{\alpha_{2,14} \alpha_{0,55}}$ составляет 0,67. В выборках по e $R_{\alpha_{2,14} \alpha_{0,55}}$ остается примерно постоянным. При ограничении диапазонов изменения r и особенно $\alpha_{0,55}$ происходит закономерное уменьшение $R_{\alpha_{2,14} \alpha_{0,55}}$.

В области 3,7 мкм корреляция ослабления с $\alpha_{0,55}$ становится несколько слабее (для генерального ансамбля $R_{\alpha_{3,7} \alpha_{0,55}} = 0,54$) и имеет в основном такие же закономерности, как и для области 2,14, что определяется высокими коэффициентами корреляции между ослаблением вблизи 2,14 и 3,7 мкм.

Ослабление в области 2,14 и 3,7 мкм лучше связано с $\alpha_{0,55}$, чем с характеристиками влажности. Так, для генерального ансамбля $R_{\alpha\alpha} = 0,67$; $R_{\alpha e} = 0,18$; $R_{\alpha r} = 0,38$ ($\lambda = 2,14$ мкм) и $R_{\alpha\alpha} = 0,54$; $R_{\alpha e} = 0,15$; $R_{\alpha r} = 0,28$ ($\lambda = 3,7$ мкм). Такое же соотношение $R_{\alpha\alpha}$ $R_{\alpha e}$ $R_{\alpha r}$ наблюдается и для большинства выборок.

$R_{\alpha_{11,1} \alpha_{0,55}}$ для генерального ансамбля примерно равно $R_{\alpha_{3,7} \alpha_{0,55}}$ (0,50 и 0,55 соответственно). Однако корреляция между $\alpha_{11,1}$ и $\alpha_{0,55}$ в рассматриваемых выборках не является устойчивой и в значительной степени зависит от связи между $\alpha_{0,55}$ и e . Этим, например, обусловлен ход $R_{\alpha_{11,1} \alpha_{0,55}}$ в ансамблях V, VI, VII и в выборках по r .

В области 11,1 мкм в отличие от области 2,14 и 3,7 мкм корреляция ослабления с парциальным давлением водяного пара существенно выше, чем с $\alpha_{0,55}$. Так, для генерального ансамбля $R_{\alpha_{11,1} e} = 0,94$, а $R_{\alpha_{11,1} \alpha_{0,55}} = 0,50$; $R_{\alpha_{11,1} r} = 0,48$. $R_{\alpha_{11,1} \alpha_{0,55}} > R_{\alpha_{11,1} e}$ только для ансамбля II ($e < 5$ гПа), где основной вклад в ослабление обусловлен аэрозолем.

В условиях малого влияния континуума водяного пара в области 11,1 мкм (выборки II, III, IV, характеризующиеся малыми

значениями $\bar{e}$) происходит увеличение корреляции ослабления вблизи 11,1 мкм с $\alpha_{3,7}$ и $\alpha_{2,14}$; в этих выборках $R_{\alpha_{11,1} \alpha_{3,7}} > R_{\alpha_{11,1} \alpha_{2,14}} > R_{\alpha_{11,1} \alpha_{0,55}}$. Отмеченное возрастание автокорреляции обусловлено тем, что при малых значениях e ослабление вблизи 11,1 мкм вызывается в основном тем же фактором, что и в ближней ИК области спектра, а именно аэрозолем. Более высокая корреляция $\alpha_{11,1}$ с $\alpha_{3,7}$, чем с $\alpha_{2,14}$ и $\alpha_{0,55}$, в условиях преобладающего вклада аэрозольного ослабления около 11,1 мкм соответствует обычным представлениям о постепенном увеличении вклада грубодисперсной фракции аэрозоля в ослабление радиации при переходе в более длинноволновую область спектра.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Наблюдается устойчивая корреляция ослабления излучения атмосферой в видимой области спектра с относительной влажностью, которая постепенно ослабевает при переходе к микроволнам вблизи 2,14 и 3,7 мкм. Корреляция $\alpha_{11,1}$ с r в значительной степени является опосредованной и проявляется через сильную зависимость $\alpha_{11,1}$ от e и корреляцию e с r .

2. Корреляция ослабления в видимой и ближней ИК областях спектра (до 4 мкм) с парциальным давлением водяного пара слабая, однако зависимость средних значений $\bar{\alpha}_\lambda$ от $\bar{e}$ для рассмотренных выборок указывает на возможность влияния этого параметра на аэрозольное состояние атмосферы.

3. Наблюдается исключительно высокая корреляция ослабления в области 11,1 мкм с парциальным давлением водяного пара. Корреляция $\alpha_{11,1}$ с оптической плотностью водяного пара α_b , рассчитанной по зависимостям, полученным в лабораторных условиях, несколько выше, чем корреляция с e . Это свидетельствует о сильном влиянии континуума водяного пара в области 11,1 мкм.

4. Наблюдается устойчивая автокорреляция ослабления в области 0,55—3,7 мкм, причем связь ослабления вблизи 2,14 и 3,7 мкм с $\alpha_{0,55}$ выше, чем с $\bar{e}$ и $\bar{r}$, что указывает на определяющее влияние аэрозольного ослабления в диапазоне 0,55—3,7 мкм.

5. В области 11,1 мкм корреляция ослабления с $\alpha_{0,55}$, $\alpha_{2,14}$ и $\alpha_{3,7}$ в большинстве выборок значительно ниже, чем с e , т. е. в рассматриваемом массиве данных вариации $\alpha_{11,1}$ обусловлены главным образом поглощением водяным паром.

6. В условиях малого влияния континуума водяного пара происходит увеличение корреляции $\alpha_{11,1}$ с ослаблением в ближней ИК области спектра. Уменьшение автокорреляции ослабления с увеличением разности длин волн излучения в условиях преобладающего влияния аэрозольного ослабления для 11,1 мкм соответствует обычным представлениям о постепенном возрастании вклада грубодисперсной фракции аэрозоля в ослабление излучения при переходе в более длинноволновую область спектра.

Выводы, сделанные на основании статистического анализа рассмотренного в данной работе экспериментального материала,

и сами статистические характеристики несколько отличаются от полученных другими авторами. Эти различия и их возможные причины рассмотрены в работе [9].

В заключение авторы выражают благодарность Т. М. Гуляевой, Э. С. Андреевой и Т. Н. Капустиной за помощь в проведении обработки материалов измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аппаратура и методика измерений спектральной прозрачности атмосферы в инфракрасной области спектра/С. С. Богданов, А. М. Броунштейн, В. В. Демидов, И. Л. Сакин. — Изв. АН СССР, ФАО, 1973, т. 9, № 1, с. 47—53.
2. Броунштейн А. М., Демидов В. В., Казакова К. В. Методика измерений абсолютной спектральной прозрачности горизонтальных приземных слоев воздуха в ИК области спектра. — Труды ГГО, 1976, вып. 357, с. 18—30.
3. Горчаков Г. И., Исаков А. А., Георгиевский Ю. С. Корреляционные связи между коэффициентом ослабления и коэффициентом направленного светорассеяния в области малых углов. — Изв. АН СССР, ФАО, 1976, т. 12, № 5, 514 с.
4. Горчаков Г. И., Свириденков М. А. Статистический анализ матриц рассеяния света. — Изв. АН СССР, ФАО, 1976, т. 12, № 9, 953 с.
5. Лактионов А. Г., Любовцева Ю. С., Малкевич М. С. Некоторые статистические характеристики микроструктуры аэрозоля в приземном слое атмосферы. — Изв. АН СССР, ФАО, 1973, т. 9, № 2, с. 138—145.
6. Малкевич М. С. Оптические исследования атмосферы со спутников. — М.: Наука, 1973. — 303 с.
7. Некоторые результаты исследований оптических свойств морской прибрежной дымки/В. Е. Зуев, М. В. Кабанов, М. В. Панченко и др. — Изв. АН СССР, ФАО, 1978, т. 14, № 12, с. 1268—1274.
8. О вариациях спектрального коэффициента ослабления в окнах пропускания/Ю. С. Георгиевский, Р. Х. Халикова, А. И. Чавро, А. Х. Шукуров. — Изв. АН СССР, ФАО, 1973, т. 9, № 6, с. 655—660.
9. Парамонова Н. Н., Броунштейн А. М. Сравнение статистических характеристик ослабления излучения приземным слоем атмосферы для разных массивов данных. — См. наст. сб.
10. Связь между статистическими характеристиками спектральной структуры ослабления радиации и метеорологическими параметрами в приземном слое воздуха/А. И. Чавро, Ю. С. Георгиевский, М. С. Малкевич, А. Х. Шукуров. — Изв. АН СССР, ФАО, 1978, т. 14, № 2, с. 157—169.
11. Статистические характеристики спектральной структуры ослабления радиации в приземном слое воздуха/М. С. Малкевич, Ю. С. Георгиевский, А. И. Чавро, А. Х. Шукуров. — Изв. АН СССР, ФАО, 1977, т. 13, № 12, с. 1257—1267.
12. Статистические характеристики спектральной структуры ослабления радиации при различной замутненности приземного слоя атмосферы/М. С. Малкевич, Ю. С. Георгиевский, А. И. Чавро, А. Х. Шукуров. — Изв. АН СССР, ФАО, 1978, т. 14, № 3, с. 273—284.
13. Субмикронная фракция аэрозоля и поглощения света в окне прозрачности 8—12 мкм/Г. В. Розенберг, Ю. С. Георгиевский, В. П. Капустин и др. — Изв. АН СССР, ФАО, 1977, т. 13, № 11, с. 1185—1192.
14. Филиппов В. А., Иванов В. П. О зависимости аэрозольного ослабления оптического излучения от влажности воздуха. — Метеорология и гидрология, 1979, № 4, с. 65—69.
15. Филиппов В. А., Иванов В. П., Макаров А. С. Статистические характеристики ослабления оптического излучения в приземном слое атмосферы (весна, осень). — Оптико-мех. промышленность, 1978, № 11, с. 58—62.
16. Roberts E. R., Selby I. E. A., Biberman L. M. Infrared continuum absorption by atmospheric water vapor in the 10—12 μm window. — Appl. Opt., 1976, v. 15, N 9, p. 2085—2090.

УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ МЕТОДИКА ГРАДУИРОВКИ

ОЗОНОМЕТРА М-83 ПО СВЕТУ ОТ ЗЕНИТА НЕБА

Общее содержание озона (ОСО) на сети озонометрических станций СССР измеряется озонометром М-83 по прямому солнечному свету и свету от зенита неба. Доля зенитных наблюдений в общем объеме озонометрических наблюдений особенно на станциях, расположенных примерно севернее 55° с. ш., значительна, а в осенне-зимне-весенний период при высотах солнца ниже $15-18^\circ$ все наблюдения проводятся только по зениту неба. Отсюда ясно, какое большое значение приобретает вопрос о точности измерения ОСО при зенитных наблюдениях.

После проведения в 1972 г. модернизации озонометра М-83, которая заключалась в основном в замене используемых в озонометре светофильтров на более коротковолновые, существенно повысилась точность измерения ОСО как при солнечных, так и при зенитных наблюдениях [1]. Однако точность зенитных наблюдений в большой степени зависит от точности определения зенитного коэффициента градуировки озонометра K_z . Напомним, что K_z определяется эмпирическим путем из сопоставления результатов солнечных и зенитных наблюдений, проводимых в один и тот же день [4], и зависит от высоты солнца и вида облачности в зените неба в момент проведения зенитных наблюдений. Значения K_z вычисляются по формуле

$$K_z = \left(\frac{I_1}{I_2} \right)_{\text{ном}} / \left(\frac{I_1}{I_2} \right)_{\text{набл}}, \quad (1)$$

где $(I_1/I_2)_{\text{ном}}$ — отношение, снятое с озонной монограммы по среднему дневному значению ОСО, измеренному по солнцу, и высоте солнца θ в момент проведения зенитного наблюдения, $(I_1/I_2)_{\text{набл}}$ — отношение отсчетов соответственно по 1-му и 2-му светофильтрам при зенитном наблюдении. Полученные за какой-то период наблюдений (первоначально это было несколько месяцев) значения K_z наносятся на график, подобный изображенному на рис. 1. По полученным точкам проводится линия, дающая среднее значение K_z в зависимости от θ .

Анализ обширного материала наблюдений, поступающего с сети станций, на которых измерения производились модернизированным озонометром, сразу же показал, что методика градуировки озонометров на станциях по зенитным наблюдениям, изложенная в Методических указаниях 1970 г. [2], должна быть существенно доработана. Требования к организации градуировочных зенитных наблюдений были использованы при переиздании методических указаний [3]. Основное требование заключалось в том, что зенитная градуировка должна проводиться в более короткие сроки (1—1,5 месяца), при этом в дни с благоприятными условиями погоды градуировочные зенитные наблюдения по ясному зениту

должны проводиться по учащенной программе особенно при высотах солнца 8—20°. Организованные таким образом наблюдения позволили, во-первых, более точно определять K_z при низких высотах солнца, а во-вторых, выявить зависимость K_z от значений ОСО и более четкую зависимость от вида облачности. Было установлено, что абсолютные значения K_z для ясного зенита, определенные осенью при низких значениях ОСО, меньше значений K_z ,

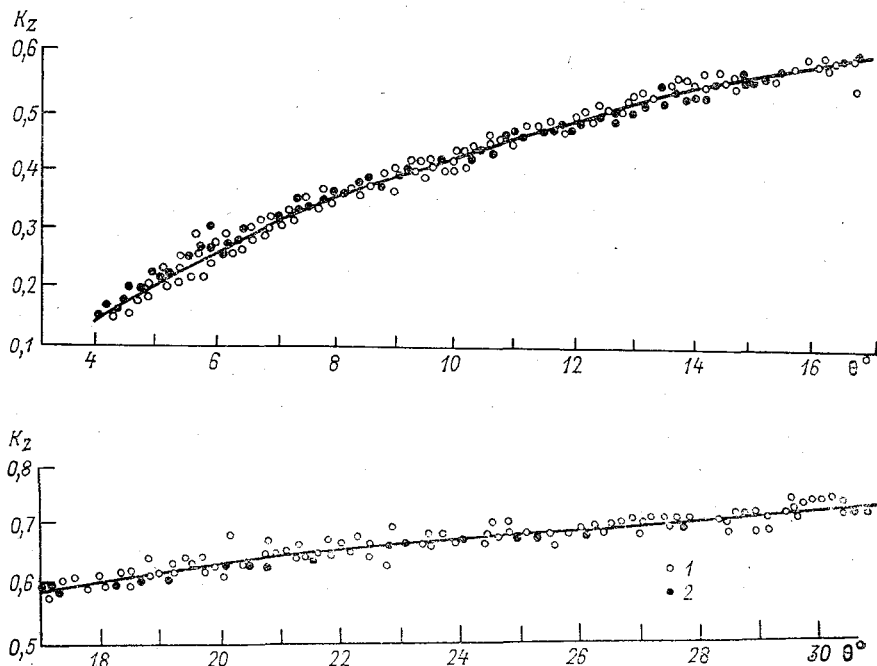


Рис. 1. График зенитной градуировки озонметра М-83 № 110. Станция Феодосия.

1 — наблюдения 15 и 17.7 1980 г., ОСО=0,324 атм-см; 2 — наблюдения 18.7 1980 г., ОСО=0,316 атм-см.

определенных весной при больших значениях ОСО. В табл. 1 представлены результаты определения K_z осенью и весной на нескольких станциях СССР. Как видно из таблицы, зависимость K_z от значений ОСО прослеживается отчетливо.

Введение на станциях с 1977 г. раздельной осенней и весенней зенитной градуировки озонметров и обработки зенитных наблюдений по соответствующим значениям K_z существенно повысило точность вычисления ОСО по зенитным наблюдениям.

Так, например, различие в значении K_z , равное 0,04—0,06 при высоте солнца 20—35° (см. табл. 1), дает различие в значениях ОСО 10—15 %. Иными словами, если обработка зенитных наблю-

дений весной будет проводиться по K_z , определенным осенью, то значения ОСО при такой обработке будут завышенными на 10—15 %.

Выявленная отчетливая зависимость K_z от ОСО объясняет и разброс точек, который обычно имел место при построении зенитного графика, поскольку для его построения использовались все зенитные наблюдения, проводимые при различных значениях ОСО, наблюдаемых осенью или весной. Для исключения этого разброса точек график следует строить по наблюдениям за два-три дня с достаточно близкими значениями ОСО и проводить в эти дни зенитные наблюдения при ясном зените во всем рабочем интервале высот солнца с шагом в 1—2°. При такой организации градуировочных зенитных наблюдений обеспечивается достаточно точное определение K_z .

Таблица 1

Значения зенитного коэффициента градуировки K_z озонометров М-83 при ясном зените на некоторых станциях СССР

Станция	Сезон	X 10—3 атм-см	θ°								
			10	12	15	20	25	30	35	40	45
Архангельск	Осень	320—360	0,38	0,43	0,51	0,59	0,64	0,68	0,70	0,72	0,73
	Весна	440—520	0,41	0,47	0,55	0,65	0,70	0,73	0,75	0,77	0,78
Печора	Осень	320—360	0,38	0,46	0,53	0,60	0,65	0,68	0,70	—	—
	Весна	440—520	0,40	0,48	0,56	0,65	0,72	0,75	0,76	0,78	—
Свердловск	Осень	320—360	0,37	0,40	0,47	0,55	0,61	0,65	0,68	0,70	0,71
	Весна	420—480	0,40	0,47	0,55	0,61	0,66	0,69	0,72	0,74	0,75
Иркутск	Осень	310—330	0,42	0,48	0,54	0,61	0,65	0,67	0,69	0,72	0,73
	Весна	500—540	—	—	0,61	0,68	0,73	0,76	0,78	0,80	0,82
Южно-Сахалинск	Осень	310—330	—	—	0,53	0,63	0,68	0,72	0,74	0,76	0,77
	Весна	470—500	—	—	0,56	0,67	0,73	0,78	0,82	0,84	0,85

В качестве примера построен график по наблюдениям на станции Феодосия (Карадаг) 15, 17 и 18,7 1980 г., когда значения ОСО были соответственно 0,323; 0,326; 0,316 атм-см, т. е. практически можно было считать, что значения K_z , представленные на этом графике, соответствуют среднему значению ОСО $X_0 = 0,320$ атм-см (рис. 1).

Таким образом, если имеются два таких графика, построенных при различных значениях ОСО (например, $X_{0,1} = 0,320$ и $X_{0,2} = 0,440$ атм-см), можно путем линейной интерполяции определить приращение зенитного коэффициента ΔK_z при увеличении ОСО на $\Delta X = 0,020$ для любой высоты солнца θ_n . Зная значения $\Delta K_{z,\theta_n}$ в зависимости от θ_n и значения K_{z,X_0} , снятые с одного из построенных графиков при каком-то значении ОСО X_0 , можно вычис-

лить зенитный коэффициент $K_{z, X_n \theta_n}$ для любых значений X_n и θ_n по формуле

$$K_{z, X_n \theta_n} = K_{z, X_0, \theta_n} + \Delta K_{z \theta_n} \times \frac{X_n - X_0}{0,020}. \quad (2)$$

Значения X_n и θ_n выбираются для удобства такими, для которых вычисляется и строится озонная номограмма.

Если вычисленный по формуле (2) зенитный коэффициент $K_{z, X_n \theta_n}$ ввести в солнечную озонную номограмму, т. е. все значения номограммы разделить на соответствующие значения $K_{z, X_n \theta_n}$, то получается зенитная номограмма, т. е. номограмма для определения ОСО по зенитным наблюдениям при ясном зените.

Возможность определения с большой точностью K_{z, X_0} для ясного зенита и особенно использование зенитной номограммы позволили установить и четко определить зависимость K_z от вида облачности. Следует напомнить, что анализ первых результатов зенитных наблюдений по модернизированному озонметру в ГГО (Воейково) привел к выводу о слабой зависимости K_z от вида облачности [1]. Однако после того как K_z при ясном зените стало определяться с большей точностью по описанной выше методике, дальнейший анализ большого материала наблюдений с сети станций показал, что вывод этот преждевременный. Стало ясно, что получаемый ранее на зенитном графике разброс точек, которым мы пренебрегали, объясняется зависимостью K_z как от ОСО, так и от вида облачности.

Из опыта эксплуатации озонметров как с первой, так и со второй модификацией светофильтров было установлено, что значения K_z при облачных наблюдениях увеличиваются с увеличением плотности облачности. Для уточнения этой зависимости на сеть станций было дано специальное разъяснение по определению вида облачности. За основную характеристику стали принимать плотность и мощность облачности, а не высоту ее расположения. Для удобства K_z при различных состояниях зенита неба стали обозначать цифровым кодом:

- 1 — ясный зенит, слабые следы C_i ;
- 2 — все виды просвечивающей облачности: все виды C_i , высоко-кучевые просвечивающие, высоко-слоистые просвечивающие, перисто-кучевые облака, поднявшийся туман и т. д.;
- 3 — все виды непросвечивающей облачности (средней по плотности, по цвету серой): высоко-кучевые непросвечивающие, слоистые туманообразные, слоистые волнистые облака и т. д.;
- 4 — все виды плотной непросвечивающей облачности (по цвету темно-серой, свинцовой): слоисто-дождевые, слоисто-кучевые, кучево-дождевые облака и т. д.

Анализ полученных наблюдений показал, что характер зависимости K_z от θ при облачном зените подобен этой зависимости для ясного зенита. Таким образом, K_z для каждого вида облачности ($K_{z, 2-4}$) равняется $K_{z, 1}$ для ясного зенита, умноженному на

некоторый поправочный облачный коэффициент, который обозначается соответственно для каждого вида облачности K_2 , K_3 , K_4 (K_{2-4}).

Определение этих коэффициентов проводится по результатам наблюдений при облачном зените, если в этот же день проводились наблюдения по солнцу или ясному зениту, т. е. ОСО за этот день известно. Значения K_{2-4} определяются по формуле, аналогичной (1), только в этом случае $(I_1/I_2)_{\text{ном}}$ определяется по зенитной номограмме. Из всех зенитных наблюдений при облачном зените, проведенных в течение нескольких дней, вычисляются

Таблица 2

Средние значения облачного коэффициента K_{2-4} для различных видов облачности

Станция	K_2			K_3			K_4		
	n	K_2	σ	n	K_3	σ	n	K_4	σ
Феодосия	43	1,05	0,02	72	1,12	0,02	45	1,20	0,02
Куйбышев	27	1,04	0,02	26	1,09	0,02	18	1,19	0,02
Омск	158	1,04	0,02	113	1,11	0,03	25	1,20	0,03
Марково	15	1,04	0,02	14	1,11	0,02	—	—	—
Печора	49	1,07	0,02	68	1,13	0,02	8	1,21	0,03
Архангельск	35	1,04	0,02	32	1,11	0,02	10	1,21	0,05
Мурманск	24	1,04	0,02	36	1,09	0,02	16	1,15	0,02

средние значения K_{2-4} . В табл. 2 приведены средние значения облачного коэффициента по нескольким станциям, а также приводится среднее квадратическое отклонение σ , вычисленное по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{K} - K_i)^2}{n}} \quad (3)$$

(n — число измерений).

Из табл. 2 видно, что средние значения K_{2-4} в пределах ошибок его определения близки друг к другу. Отметим, что определение K_{2-4} с использованием зенитной номограммы стало проводиться на некоторых станциях только со второй половины 1980 г., поэтому данные, представленные в табл. 2, неполные. Но в нашем распоряжении имеется большой материал по определению K_{2-4} непосредственно с зенитных графиков, построенных раздельно по весенним и осенним наблюдениям, когда превышение K_z для облачного зенита относительно линии K_z для ясного зенита снималось с графиков. При таком способе K_{2-4} определялись с боль-

шей погрешностью, но их значения были близки к представленным в табл. 2. Как видно из табл. 2, значения K_{2-4} на всех станциях приблизительно равны. Этот вывод не является неожиданным, поскольку значение коэффициентов K_{2-4} определяется только ослаблением рассеянной от зенита неба радиации облачным слоем. Это

Таблица 3

Повторяемость (%) отклонений средних дневных значений ОСО, измеренных по зениту неба, от значений, измеренных по солнцу, по градациям отклонений на некоторых станциях СССР в 1979—1980 гг. (n — число пар измерений по зениту неба и солнцу в течение года)

Станция	Год	n	Градация отклонений, %						
			0—1	1—2	2—3	3—4	4—5	5—8	0—3
Архангельск	1979	102	47,0	29,5	13,5	6,0	3,0	1,0	90
	1980	138	50,5	24,0	10,0	6,0	4,5	5,0	84
Печора	1979	111	50,0	28,0	11,5	6,5	2,0	2,0	89
	1980	115	55,0	27,0	10,5	4,5	1,5	1,5	92
Воронеж	1979	201	31,5	22,5	17,0	7,5	7,5	14	71
	1980	231	37,0	27,0	20,0	7,5	4,5	4,0	84
Цимлянск	1979	131	39,5	27,5	26,0	5,5	0	1,5	93
	1980	104	48,0	27,0	12,5	6,5	4,0	2,0	87
Омск	1979	174	40,0	20,5	16,5	14,5	8,5	0	76
	1980	205	54,0	22,0	10,5	6,5	6,5	0,5	86
Петропавловск	1979	88	60,0	26,5	13,5	0	0	0	100
	1980	89	56,5	32,5	8,0	2,0	1,0	0	97
Б. Елань	1979	170	25,5	17,5	17,5	10,5	10,0	19,0	60
	1980	157	37,5	15,5	21,0	9,5	4,5	12,0	74
Якутск	1979	129	25,0	24,0	22,5	16,0	8,5	4,0	71
	1980	84	24,0	23,0	20	10,5	7,0	15,5	67
Иркутск	1979	167	29,0	24,0	13,0	14,5	11,0	8,5	66
	1980	149	27,0	22,0	17,0	11,5	11,0	11,5	66
Ленинград	1979	150	30,0	18,0	16,5	11,5	8,5	15,5	65
	1980	130	40,5	25,5	9,5	10,0	6,5	8,0	76
	1978	99	31,0	28,0	24,0	12,0	2,0	2,0	83

обстоятельство позволяет использовать осредненные по станциям значения K_{2-4} при обработке наблюдений на тех станциях, где по каким-либо причинам они не могли быть определены. А это имеет место на полярных станциях, в экспедиционных условиях, а также при механизированной обработке озонметрической информации на ЭВМ, когда нет возможности оставлять информацию

без обработки на длительный период, а коэффициенты не определены вовремя.

Как уже указывалось, усовершенствованная методика зенитной градуировки озонметров М-83 в ее окончательном виде стала использоваться на некоторых станциях со второй половины 1980 г. (на всех станциях она будет внедрена в 1981 г.), однако представляет интерес провести предварительный анализ результатов наблюдений по солнцу и зениту неба на сети станций с использованием усовершенствованной методики зенитной градуировки в ее первом варианте (раздельное построение зенитных графиков для осени и весны с отдельным определением поправочных облачных коэффициентов K_{2-4}) и частично в окончательном виде (применение зенитных номограмм). По наблюдениям нескольких станций за 1979—1980 гг. были вычислены отклонения в процентах средних дневных значений ОСО, измеренных по зениту неба (с учетом всех видов зенитных наблюдений), от значений ОСО, измеренных по солнцу. Затем была определена повторяемость в процентах этих отклонений по градациям отклонений (без учета знака отклонения): 0—1, 1—2, 2—3, 3—4, 4—5. Отклонения, превышающие 5 %, были объединены в одну градацию из-за их малочисленности; максимальные отклонения не превышали 8 % (табл. 3). В последней графе дано также суммарное число отклонений (в процентах) в пределах $0 \dots \pm 3$ %. Для сравнения для ст. Ленинград представлены результаты подобных вычислений по спектрофотометру Добсона № 108 в 1978 г. (последняя строка). Как видно, распределение отклонений по градациям аналогично приведенным для озонметра М-83.

Как показал непосредственный анализ наблюдений на ст. Ленинград, отклонения, превышающие 5 %, наблюдаются при очень нестабильных условиях наблюдений, например при сильно изменяющейся облачности, когда, во-первых, трудно определить вид облачности, а во-вторых, увеличивается случайная ошибка при снятии отсчетов как при солнечных, так и при зенитных наблюдениях.

Таким образом, предварительная оценка показала, что практически все отклонения лежат в пределах $0 \dots \pm 5$ %, а на некоторых станциях на градацию $0 \dots \pm 3$ % приходится 80—90 % отклонений.

Следует подчеркнуть, что немаловажную роль в получении качественного материала наблюдений на сети станций играет наличие квалифицированных кадров с большим опытом работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гущин Г. П., Ромашкина К. И., Шаламянский А. М. Опыт измерения общего содержания озона модернизированным озонметром М-83 в Воейково в 1971—1974 гг. — Труды ГГО, 1976, вып. 357, с. 106—120.
2. Методические указания по производству и обработке наблюдений за общим содержанием атмосферного озона. — Л.: Гидрометеониздат, 1970, с. 22—28.

3. Методические указания по производству и обработке наблюдений за общим содержанием атмосферного озона. — Л.: Гидрометеиздат, 1981, с. 29—30.

4. Ромашкина К. И. Методика градуировки зенитной и лунной установок универсального озонметра. — В кн.: Атмосферный озон. Л.: Гидрометеиздат, 1965, с. 93—98.

Е. Е. Рыбаков, А. Д. Егоров

К ВОПРОСУ ОБ ОСРЕДНЕНИИ СИГНАЛОВ ПРИ ЛИДАРНОМ ЗОНДИРОВАНИИ АТМОСФЕРЫ

Сигналы лазерных локаторов (лидаров) осредняют для сглаживания кратковременных флуктуаций прозрачности и нахождения некоторого результирующего отклика атмосферы.

Можно сначала обрабатывать единичные эхо-сигналы, а затем осреднять искомые параметры атмосферы [1]. Такие способы весьма трудоемки и не всегда возможны из-за сильного влияния кратковременных флуктуаций, малого уровня сигналов и т. д.

Более распространен способ арифметического осреднения значений эхо-сигналов отдельных посылок с последующей обработкой полученной результирующей кривой [3]. Недостаток этого способа в том, что одновременно существуют флуктуации атмосферы и параметров аппаратуры, и, если мощность одного из посылаемых импульсов возрастет, соответствующие этому импульсу флуктуации атмосферы окажутся более сильно выраженными и при последующем осреднении могут исказить полученный результат. Это существенно при осреднении по малому числу импульсов.

Если осреднять логарифмы значений эхо-сигналов [2], то изменение параметров аппаратуры, которые входят постоянными множителями в уравнение лазерной локации, не будет влиять на значения искомых параметров атмосферы. Этот метод весьма прост и удобен в вычислениях. Однако, если измеренные значения эхо-сигналов распределены по нормальному закону с центром $\bar{P}$ и дисперсией σ^2 , логарифмическое осреднение будет занижать результирующий сигнал тем сильнее, чем меньше отношение $\bar{P}/\sigma$. Ниже приводится смещение значения $\bar{P}_{\text{лог}}$, полученного логарифмическим осреднением, относительно $\bar{P}$, в зависимости от отношения $\bar{P}/\sigma$, которое можно трактовать применительно к задачам лазерной локации как отношение сигнал/шум:

$\bar{P}/\sigma$	2	3	4	5	6	10
$\frac{\bar{P} - \bar{P}_{\text{лог}}}{\bar{P}} \%$	11	4,5	2,5	1,6	1,1	0,4

Этот пример иллюстрирует тот факт, что несоответствие способа осреднения закону распределения измеряемых величин может привести к смещению результата осреднения, особенно значительному при малых значениях отношения сигнал/шум. Такое

смещение можно ожидать прежде всего в тех случаях, когда для выделения сигнала на уровне шумов применяют статистическое накопление сигналов, например при высотном зондировании атмосферы и в ряде других задач.

Для случаев, когда нельзя пренебречь изменениями от выстрела к выстрелу таких параметров регистрирующей системы, как случайный дрейф нуля усилителя и случайная ошибка определения положения начала отсчета сигнала, что практически наблюдается, например, при зондировании атмосферы в условиях повышенной прозрачности, можно предложить следующий алгоритм осреднения. Имеем серию из n выстрелов. Разбиваем трассу зондирования на k частей. Пусть y_{ij} — значение сигнала с j -го участка трассы для i -го выстрела ($j=1, \dots, k$; $i=1, \dots, n$), регистрируемого системой с неизменными параметрами; P_{ij} — сигнал с учетом искажений в регистрирующей системе. Связь между ними можно записать так:

$$y_{ij} = c_i P_{ij} + a_{ij} x_i + K_i. \quad (1)$$

Здесь c_i — множитель, учитывающий изменение выходной мощности лидача и коэффициента передачи приемной системы, K_i — коэффициент, учитывающий случайный дрейф нуля усилителя;

$x_i = \frac{\Delta z_i}{\Delta z} c_i$, где Δz — шаг разбиения по расстоянию, Δz_i — коэффициент, учитывающий случайную ошибку при определении положения начала отсчета сигнала;

$$a_{ij} = \begin{cases} P_{i2} - P_{i1} & \text{при } \Delta z_i < 0, j = 1; \\ P_{ij} - P_{i, j-1} & \text{при } \Delta z_i < 0, j > 1; \\ P_{i, j+1} - P_{ij} & \text{при } \Delta z_i > 0, j < k; \\ P_{i, k} - P_{i, k-1} & \text{при } \Delta z_i > 0, j = k. \end{cases}$$

В этом случае задача нахождения результирующего сигнала сводится к оптимальному выбору параметров c_i , x_i , K_i для каждого выстрела, которые можно получить из условия минимума функции:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (c_i P_{ij} + a_{ij} x_i + K_i - \bar{y}_j)^2,$$

где

$$\bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{ij},$$

при выполнении условий:

$$\sum_{i=1}^n K_i = 0 \text{ — дрейф нуля усилителя случаен;}$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = 0 \text{ — ошибка при определении положения начала отсчета случайна;}$$

$\sum_{j=1}^k \bar{y}_j = A$ (A — произвольная конечная величина, не равная нулю).

Для рассмотренных выше способов осреднения была изучена их устойчивость к погрешностям регистрирующей системы, которые имитировались введением различных значений c_i , x_i , K_i . Оказалось, что указанные способы слабо реагируют на вариацию

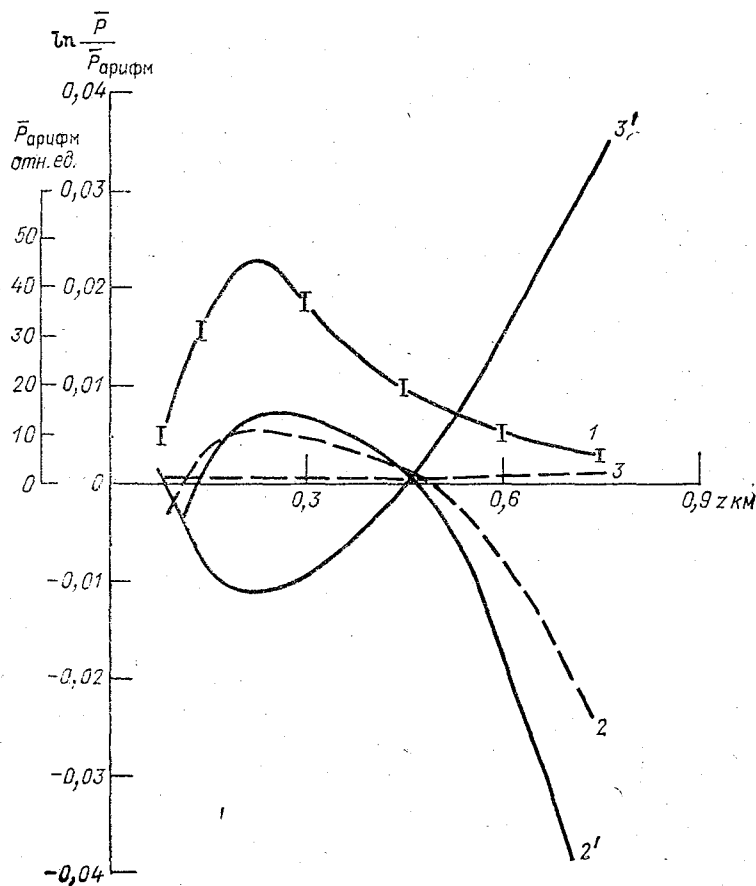


Рис. 1. Результаты обработки серии из 10 эхо-сигналов за 19.12.1979 г. при $S_m = 20$ км ($\beta_t = 0,15$ км $^{-1}$).

1 — амплитуда эхо-сигналов, полученных арифметическим осреднением; 2 — относительный ход кривой $\ln \bar{P}/\bar{P}_{\text{арифм}}$, полученной логарифмическим осреднением, при изменении K_i ; 3 — относительный ход кривой $\ln \bar{P}/\bar{P}_{\text{арифм}}$, полученной осреднением с вариацией параметров, при изменении K_i ; 2' — относительный ход кривой $\ln \bar{P}/\bar{P}_{\text{арифм}}$, полученной логарифмическим осреднением; 3' — относительный ход кривой $\ln \bar{P}/\bar{P}_{\text{арифм}}$, полученной осреднением с вариацией параметров.

c_i и x_i , а изменение K_i в небольших пределах приводит к существенному отличию результирующих сигналов друг от друга.

Кроме того, указанными способами были обработаны серии (5—10 выстрелов) эхо-сигналов и проведено сравнение результирующих сигналов. Оказалось, что они также отличаются друг от друга и отличие носит систематический характер.

Вышесказанное удобно рассмотреть на примере обработки серии из десяти эхо-сигналов за 19.12.1979 г. при метеорологической дальности видимости $S_m=20$ км (рис. 1). Кривая 1, полученная арифметическим осреднением, была принята за истинную. Затем имитировался случайный дрейф нуля усилителя введением параметра K_i . Пределы изменения K_i ($\pm 4\%$ от максимального значения сигнала) обозначены вертикальными отрезками. В результате осреднения кривых при различных значениях K_i рассчитаны зависимости функции $\ln \bar{P}/\bar{P}_{\text{арифм}}$ от расстояния. Здесь $\bar{P}$ получено логарифмическим осреднением (кривая 2) и осреднением с вариацией параметров (кривая 3). Из рисунка видно, что особенно сильное занижение результирующего сигнала дает логарифмическое осреднение в области, где амплитуда сигнала сравнима с K_i ($z \geq 0,6$ км).

На рисунке также представлены результаты непосредственного осреднения этой серии тремя указанными способами. При этом мы не знаем истинного профиля $\bar{P}(z)$ и поэтому можем судить лишь об относительном ходе результирующих кривых. В данном случае за истинный ход был условно принят результат арифметического осреднения (1), а результирующие кривые 2' и 3' строились относительно него. На рисунке видно, что результирующие сигналы отличаются скоростью затухания на заднем фронте (или нарастания на переднем). Это отличие тем сильнее, чем меньше амплитуда принимаемых сигналов, а следовательно, отношение сигнал/шум. Наибольшая скорость затухания (или нарастания) получается в результате логарифмического осреднения (кривая 2'), наименьшая — при осреднении с вариацией параметров (кривая 3'). Арифметическое осреднение занимает промежуточное положение, т. е. относительный ход такой же, как и для кривых 2' и 3'.

Результаты обработки около 200 эхо-сигналов показали, что относительный ход кривых 2' и 3' сохраняется во всех случаях. Таким образом, в зависимости от способа осреднения могут получаться различные скорости затухания сигнала и, следовательно, различные коэффициенты ослабления. Эта разница существенно зависит от самой величины среднего коэффициента ослабления $\bar{\beta}_t$ на трассе. Так, в условиях повышенной прозрачности ($\bar{\beta}_t=0,15$ км⁻¹) различие в значениях $\beta_t(z)$ на участке трассы 0,25—0,75 км достигает 70 %. В замутненной атмосфере ($\bar{\beta}_t=1,2$ км⁻¹) это различие существенно меньше и составляет на том же участке лишь 5 % (данные за 10.12. 1979 г.), что подтвер-

ждает особенно сильную зависимость результата от выбора способа осреднения в условиях повышенной прозрачности.

Выводы

Влияние выбора способа осреднения на результирующий сигнал может быть обусловлено различной реакцией рассмотренных способов на закон распределения амплитуд принимаемых сигналов и на случайные изменения параметров регистрирующей системы от выстрела к выстрелу.

На практике наибольшая скорость затухания на заднем фронте (или возрастания на переднем фронте) результирующего сигнала получается в результате логарифмического осреднения, наименьшая при осреднении с вариацией параметров, при этом различие проявляется наиболее сильно на участках с малым отношением сигнал/шум. Поэтому при осреднении следует исключать такие участки, если нет уверенности в правильности выбранного способа осреднения (если не известен закон распределения амплитуд сигналов). Наиболее сильное влияние на относительную величину искомого среднего коэффициента ослабления атмосферы оказывает выбор способа осреднения в условиях повышенной прозрачности атмосферы.

Следовательно, при осреднении сигналов лидара необходимо учитывать возможную зависимость результата от выбранного способа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галилейский В. П., Крутикова И. Б. Об определении погрешности лидарных измерений прозрачности атмосферы. — В кн.: Тезисы докладов V Всесоюзного симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Ч. 1. Томск, 1978, с. 76—79.
2. Игнатенко В. М., Ковалев В. А. Некоторые вопросы интерпретации сигналов при лидарном зондировании атмосферы. — См. наст. сб.
3. Лидарные исследования распределения аэрозолей в воздушном бассейне Ленинграда/Д. А. Ашкинадзе, В. И. Белобровик, М. И. Демчук и др. — В кн.: Тезисы докладов V Всесоюзного симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Ч. 1. Томск, 1978, с. 196—197.

В. Н. Цветкова, Н. И. Никитинская

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ СТЕКЛЯННЫХ ФИЛЬТРОВ ВЫСОКОГО ПРОПУСКАНИЯ С ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИЕМНИКОМ ДЛЯ УЗКИХ УЧАСТКОВ СОЛНЕЧНОГО СПЕКТРА

Исследования спектрального состава прямой солнечной радиации при различных высотах солнца $h_{\odot}$ являются одним из ценных источников информации о переменных компонентах, содержащихся в толще атмосферы. Однако с технической точки зрения такого рода работы в некоторых случаях оказываются доста-

точно сложными. Сложности и специфика постановки таких исследований определяются, в частности, тем ослабляющим эффектом (за счет рассеяния или поглощения лучистой энергии), который оказывает определенная компонента на прямой солнечный луч в заданном участке спектра по сравнению с эффектом рэлеевского рассеяния, а также зависимость выделения спектрального участка от его оптимальной ширины и протяженностью исследуемой области солнечного спектра. Поэтому во многих случаях, когда нет необходимости в исследованиях тонкой структуры спектра, использование диспергирующих устройств высокого разрешения необязательно и надежные данные могут быть получены с помощью узкополосных светофильтров. Среди задач такого рода можно назвать изучение временной изменчивости аэрозольной составляющей оптической толщи атмосферы и влагосодержания толщи атмосферы оптическим методом.

Заметим, что для повышения информативности получаемых данных исследования должны выполняться в широком диапазоне электромагнитного излучения, а при определении влагосодержания атмосферы наряду с настройкой фильтров на окна прозрачности необходима также настройка одного или нескольких светофильтров на полосы поглощения водяного пара [2, 13, 14].

В связи с этим возникает вопрос о типе используемых светофильтров и приемника излучения, которые требуются для выполнения работ подобного рода. В результате разработок, начатых еще в начале 50-х годов [8, 9], в качестве наиболее простого и проверенного на практике варианта установки используется измерительная схема, состоящая из системы интерференционных светофильтров в области 0,35—2,20 мкм (полуширины области пропускания 10—50 нм), термоэлектрического приемника лучистой энергии и низкоомного потенциометра Р-306. Эта установка обладает линейной шкалой, позволяет вести исследования в широком диапазоне электромагнитного спектра без смены приемника, стабильна, предельно проста в обращении, в обычных условиях не требует усиления малых напряжений, т. е. питания от сети переменного тока [3, 4]. Подобная необходимость возникает при малых высотах солнца $h_{\odot}$ и значительных мутностях атмосферы, поскольку точность измерений при этом может уменьшаться из-за недостаточности измеряемых потоков. Это особенно ощущается в ультрафиолетовых участках спектра. Поэтому и возникла мысль о возможной замене интерференционных светофильтров в упомянутой схеме на фильтры другого типа.

Идея создания набора узкополосных и стеклянных комбинированных светофильтров, в основе которой лежит принцип комбинации цветных стекол из отечественного каталога оптического стекла, не нова. Так, например, неоднократно создавались комбинированные светофильтры, служащие для преобразования цветовой температуры и распределения энергии какого-либо конкретного источника света в цветовую температуру другого источника: светофильтры, приводящие спектральную чувствительность селе-

нового фотоэлемента к спектральной чувствительности глаза и т. д. [6]. Широкое развитие получили комбинации цветных стекол в экспериментах Г. П. Гушина, который использовал созданный им набор фильтров в области 326—627 нм для сетевых наблюдений за атмосферным озоном и прозрачностью атмосферы [4, 5]. В качестве приемника энергии в этих наблюдениях использовалась одна из разновидностей фотоэлектрического умножителя (ФЭУ), область чувствительности которого ограничена. По этой причине отпадала необходимость уничтожения «фона» светофильтров в длинноволновых областях спектра.

В настоящей работе были предприняты попытки создания светосильных и достаточно узкополосных фильтров из оптического цветного стекла [12] для использования их с термоэлектрическим (равноэнергетическим) приемником. Было произведено сравнение результатов, полученных в натуральных условиях с помощью комбинированных и интерференционных светофильтров, настроенных практически на одинаковые длины волн (в том числе на полосу поглощения водяного пара $\rho_{\text{от}}$). Изучалось влияние температуры на кривую пропускания фильтра.

Рассматривая кривые пропускания фильтров из цветных оптических стекол, даваемые каталогом [12], можно сделать заключение о возможности создания на его основе подобных светофильтров, области пропускания которых расположены либо вне линий и полос селективного поглощения атмосферными газами, либо включают именно эти участки спектра. С этой целью в виде опыта был составлен комплект комбинированных светофильтров с длинами волн в максимуме пропускания λ_{max} , равными 367, 395, 505 и 954 нм. Пропускание для этих длин волн составляло 37, 34, 47 и 25 %, а полуширины пропускания $\Delta\lambda$ — 38, 44, 51 и 84 нм соответственно. Два первых светофильтра практически не включают полос поглощения атмосферными газами, на область пропускания третьего оказывает некоторое слабое действие полоса Шаппюна (поглощение озоном), четвертый светофильтр оказался настроенным (хотя и не совсем удачно) на полосу поглощения водяного пара $\rho_{\text{от}}$ ($\lambda_{\text{max}}=0,940$ нм). Именно эти четыре светофильтра (а не изготовленные впоследствии после предварительного расчета и склейки) были подвергнуты экспериментальным исследованиям. Толщины светофильтров соответствовали толщинам стандартного набора: 1) СЗС-21 (3,0 мм) + УФС-6 (3,2 мм) + СЗС-24 (3,0 мм), 2) СЗС-22 (3,1 мм) + СЗС-24 (3,0 мм) + ПС-13 (2,0 мм), 3) СЗС-22 (7,7 мм) + ЖС-17 (3,2 мм) + СЗС-24 (3,2 мм), 4) ЗС-7 (4,8 мм) + ФС-7 (2,0 мм) + ИКС-1 (2,0 мм).

Как известно, изменение температуры ведет к изменению кривых пропускания практически всех светофильтров [6]. Но, так как воздействие изменений температуры проявляется неодинаково, требуется проведение соответствующих экспериментов, особенно для комбинированных светофильтров. В связи с этим кривые пропускания исследовались при использовании так называемой «водяной бани», т. е. сосуда с водой, где располагался ком-

бинированный светофильтр (первоначальная температура 40—50 °C). При естественном остывании этой системы кривая пропускания дважды регистрировалась на спектрофотометре СФ-16. На рис. 1 представлены кривые пропускания для второго и четвертого комбинированных светофильтров с указанием средних температур, соответствующих каждой из кривых. Перепады темпе-

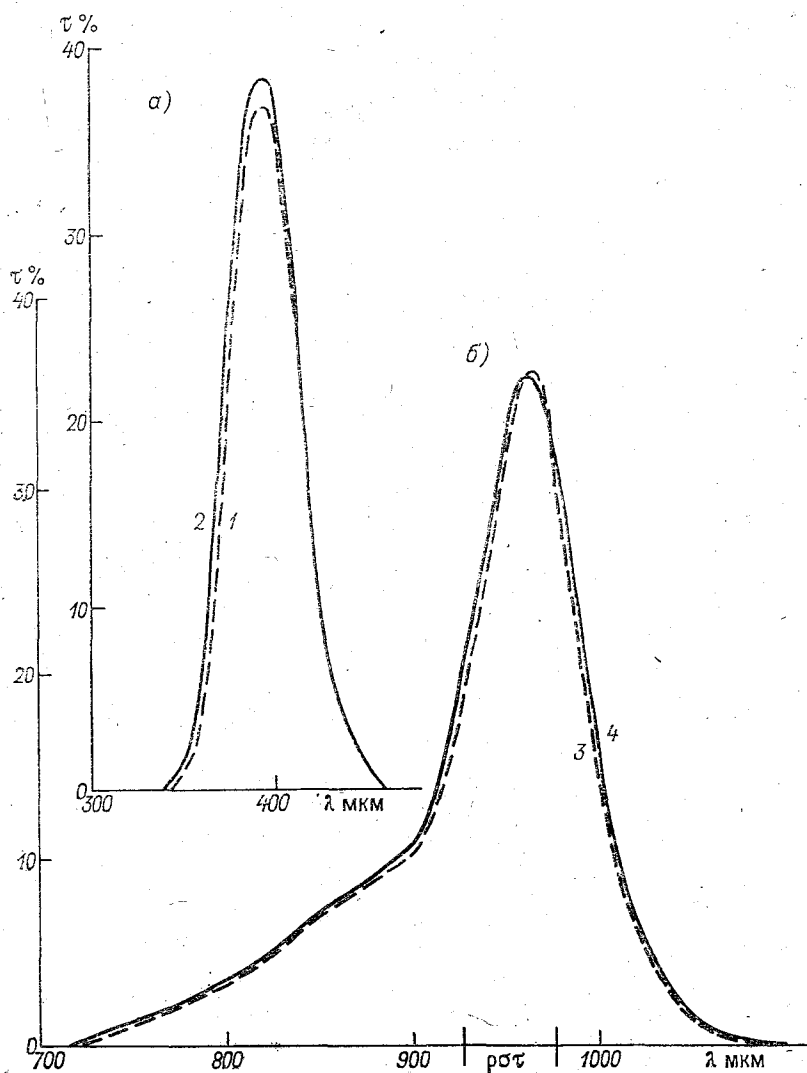


Рис. 1. Исследование влияния температуры на коэффициенты пропускания комбинированных светофильтров № 2 (а) и № 4 (б).

1) $\bar{t}=29$ °C; 2) $\bar{t}=12$ °C; 3) $\bar{t}=49$ °C; 4) $\bar{t}=19$ °C. (На оси абсцисс указаны границы полосы поглощения водяного пара рот.)

ратур составляли для второго и четвертого светофильтров $+17$ и $+30^{\circ}\text{C}$, а температурные коэффициенты в расчете на 10°C соответственно 1,5 % и десятые доли процента.

Был применен и другой метод учета влияния температуры на пропускание светофильтров: исследуемый фильтр совместно с термоэлектрическим приемником лучистой энергии (температурный коэффициент приемника был предварительно исследован и учитывался) располагался внутри камеры, температура в которой изменялась в первом случае (для второго светофильтра) от 0 до 40°C , а во втором (для четвертого светофильтра) — от -10 до $+40^{\circ}\text{C}$. Относительная влажность в обоих случаях поддерживалась в пределах 40 %. Контролируемая лампа накала находилась вне камеры.

Значения температурных коэффициентов этих фильтров (расчитанные на 10°C), полученные в результате испытаний, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения температурных коэффициентов (%) комбинированных светофильтров № 2 и 4

Светофильтр	Температура, $^{\circ}\text{C}$				
	-10—0	0—10	10—20	20—30	30—40
№ 2	—	2,5	0,5	2,5	2,5
№ 4	3,5	1,5	1	1	0

Таким образом, исследования влияния температуры на кривые пропускания комбинированных светофильтров, выполненные по двум методикам, удовлетворительно согласуются друг с другом.

Сравнение работы комбинированных светофильтров с соответствующими по длинам волн интерференционными светофильтрами выполнялось в биосферном заповеднике Репетек (Туркменская ССР) в период с 25.2 по 14.3 1979 г. во время проведения программы ГАРЭКС-79. Оптическая часть программы эксперимента включала измерения спектральной прозрачности толщи атмосферы в интервале 0,35—2,20 мкм и исследование ее влагосодержания.

Сравнение велось в течение десяти дней, три из которых были оптически стабильными [10]. Были проведены параллельные исследования оптических толщ атмосферы с помощью комбинированных светофильтров № 1, 2, 3 и влагосодержания атмосферы с помощью светофильтра № 4.

С этой целью по данным радиозондирования были построены две градуировочные кривые, позволяющие определять влагосодержание толщи атмосферы при известном отношении двух сигнала-

лов: получаемого с помощью светофильтра, настроенного на полюсу поглощения водяным паром, и соседнего, область пропускания которого свободна от его влияния (I_9/I_{10}). Указанное соотношение является функцией от $m\omega$, где m — масса атмосферы в момент наблюдения, ω — влагосодержание атмосферы в сантиметрах осажденной воды, определяемое с точностью около 10 % [2].

Результаты параллельных исследований аэрозольных составляющих оптической толщи атмосферы D_λ^* для близких по длине волны λ светофильтров различных типов даны в табл. 2, где указаны также полуширины области пропускания для интерференционных и комбинированных светофильтров и перепады масс атмосферы m за время наблюдений в течение каждого дня. Из табл. 2 видно, что расхождение в величинах D_λ^* , полученных

Таблица 2

Аэрозольные составляющие оптической толщи атмосферы D_λ^* , полученные с помощью интерференционных (и. ф.) и комбинированных стеклянных светофильтров (к. ф.) в биосферном заповеднике Репетек за период 26.2—12.3 1979 г. (дп — до полудня, пп — после полудня)

λ нм	$\Delta \lambda$ нм	26.2	1.3	3.3	4.3	6.3	7.3	8.3	8.3	12.3	12.3
		m									
		1,8 дп — 4,0 пп	1,7 дп — 4,0 пп	2,0 — 1,4 дп	3,5 дп — 1,8 пп	2,0 дп	3,5 дп — 1,8 пп	2,0 дп	2,0 — 4,0 пп	4,0 — 2,0 дп	2,0 — 4,0 пп
403 (и. ф.)	11	0,083	0,112	0,204	0,103	0,139	0,080	0,149	0,189	0,114	0,134
395 (к. ф.)	44	0,083	0,118	0,210	0,103	0,137	0,083	0,145	0,192	0,110	0,130
500 (и. ф.)	10	0,070	0,102	0,182	0,102	0,134	0,077	0,139	0,172	0,102	0,120
505 (к. ф.)	51	0,073	0,095	0,190	0,100	0,130	0,082	0,145	0,178	0,110	0,120

с помощью фильтров разных типов, не выходит за пределы случайных ошибок измерений, которые составляют для приводимых в таблице значений D_λ^* 5—10 % [3]. Исследования были выполнены при помощи термоэлектрического приемника радиации, имеющего угол зрения 2° . Озонные поправки были при необходимости учтены в соответствии с [6]. Заметим, что перепады температур прибора и светофильтров за весь период наблюдений не превышали 20°C , поэтому оказались малыми и соответствующие температурные поправки, вводимые при обработке наблюдений.

Для комбинированного стеклянного светофильтра с $\lambda_{\text{max}} = 367$ нм отсутствовал близкий по длине волны парный интерференционный фильтр, тем не менее значения D_λ^* , полученные с помощью только комбинированного светофильтра, подтвердили наличие общей зависимости $D_\lambda^* = f(\lambda)$, обнаруживаемой за каждый конкретный период наблюдений.

На рис. 2 представлены градуировочные графики для определения влагосодержания толщи атмосферы. Кривые $I_9/I_{10}=f(mw)$ построены по данным настроенных на полосу рсг светофильтров: интерференционного ($\lambda_{\max}=942$ нм) и стеклянного комбинированного светофильтра ($\lambda_{\max}=954$ нм). В качестве фильтра, настроенного на область вне полосы рсг (I_{10}), использовался интерференционный светофильтр с $\lambda_{\max}=1007$ нм. На рис. 2 отчетливо видно, что комбинированный светофильтр хуже настроен на упомянутую полосу поглощения. Настройка могла бы быть значительно улучшена за счет изменения толщин стеклянных светофильтров, образующих комбинированный светофильтр I_9 .

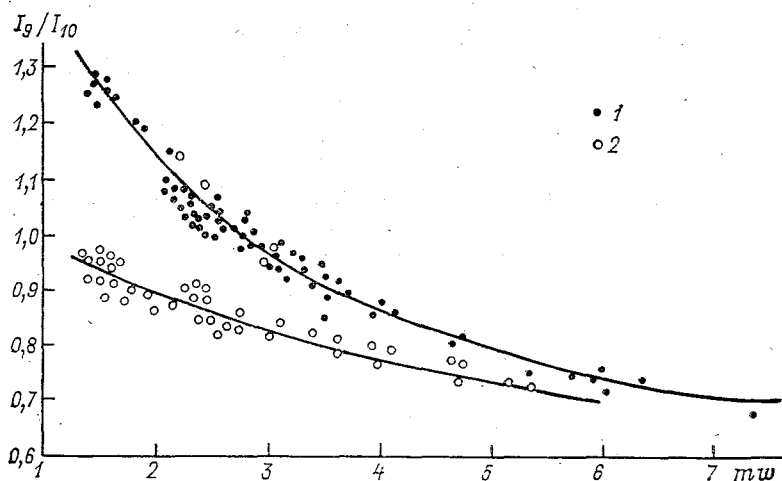


Рис. 2. Градуировочные графики для определения влагосодержания толщи атмосферы по данным аэрологического радиозондирования.

1 — интерференционный светофильтр, $\lambda_{\max}=942$ нм; 2 — комбинированный стеклянный светофильтр, $\lambda_{\max}=954$ нм.

В данной работе также предприняты попытки расчета и исследования кривых пропускания светофильтров, обладающих оптимальными кривыми пропускания. Кривая светофильтра характеризуется, помимо пропускания в максимуме $\tau_{\max}$, также эффективной шириной пропускания, областью полуширины пропускания, контрастным отношением, т. е. отношением $\tau_{\min}/\tau_{\max}$ (пропускание вне и внутри полосы пропускания) и так называемым коэффициентом формы (отношением ширины полосы пропускания на уровне половинного пропускания и на уровне пропускания 0,1 [1]). Идеальной формой кривой светофильтра явилась бы прямоугольная форма со 100 %-ным пропусканием и при полном отсутствии «фона». Что же касается эффективной ширины области пропускания светофильтра, то ее можно менять в зависимости от задачи.

Имея в виду цель настоящей работы, при расчете оптимальной формы кривых пропускания стремились к возможно более широкой области пропускания (иными словами, к большим энергиям, воспринимаемым приемником). Однако при этом учитывали, что необходимо избежать влияния эффекта Форбса и возможного влияния теллурических линий при вычислении величин D_{λ}^* . Из данных табл. 2 следует, что эти обстоятельства, видимо, не играли существенной роли. Хотя в каждом конкретном случае следует проводить специальные расчеты, но мы полагали, что значения $\Delta\lambda$, равные 30—40 нм, являются оптимальными при расчетах кривых пропускания (при отсутствии в этой области существенного влияния теллурических линий).

Оптимальные формы кривых были подобраны для трех светофильтров. Расчеты производились на ЭВМ БЭСМ-6 по формулам:

$$\tau_{\lambda} = \tau_{1\lambda} + \tau_{2\lambda} + \tau_{3\lambda} = 10^{-(k_1 \lambda d_1 + k_2 \lambda d_2 + k_3 \lambda d_3)}, \quad (1)$$

где $\tau_{1\lambda}$, $\tau_{2\lambda}$, $\tau_{3\lambda}$ — означают пропускания отдельных стекол, составляющих комбинированный светофильтр; $k_{1\lambda}$, $k_{2\lambda}$, $k_{3\lambda}$ — соответственно показатели ослабления стекол; d_1 , d_2 , d_3 — толщины стекол.

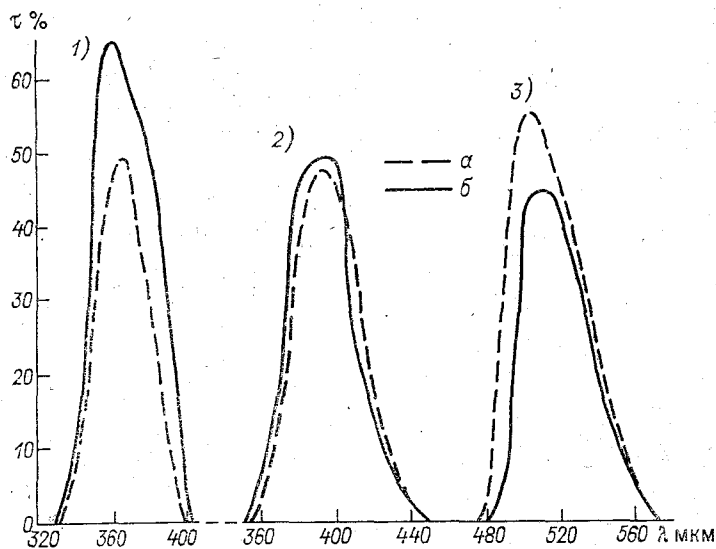


Рис. 3. Примеры экспериментальных (а) и расчетных (б) данных, полученных с помощью светофильтров с оптимальными сочетаниями толщин.

1) СЗС-21 (2,5 мм)+СЗС-24 (2,7 мм)+УФС-6 (3,5 мм); 2) СЗС-22× (3,7 мм)+СЗС-24 (3,6 мм)+ПС-13 (2,0 мм); 3) СЗС-22 (8 мм)+СЗС-25× (2,0 мм)+ЖС-17 (2,0 мм).

Максимальное пропускание светофильтра определяется формулой

$$\tau_{\max} = \frac{\int_{290}^{3030} \tau_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_{\max} - \frac{\Delta\lambda}{2}}^{\lambda_{\max} + \frac{\Delta\lambda}{2}} I_{\lambda} d\lambda}, \quad (2)$$

где I_{λ} — распределение энергии в спектре прямой солнечной радиации при различных массах атмосферы m . Пределы интегрирования в знаменателе относятся к эффективной ширине пропускания комбинированного светофильтра.

Наборы стекол были склеены специальным оптическим клеем ОК-72ФТ. Учитывалось отражение от поверхностей стекол, которое составляло 6—7 %. Данные, полученные светофильтрами с наилучшими комбинациями их толщин (расчетные и экспериментальные), представлены на рис. 3.

В связи с тем что исследования спектральной мутности толщи атмосферы во многих случаях являются составной частью более общих исследований, связанных со слежением за переменными компонентами атмосферы (таковы, например, программы КЭНЭКС, АТЭП и т. д.), особую важность приобретает идентификация исследуемых оптических толщ атмосферы по длинам волн, которая достигается созданием вполне одинаковых наборов светофильтров. Легкая замена светофильтров, выбывающих из строя, а также дешевизна их изготовления также будут способствовать успешному решению этой задачи.

Заметим, что создание оптимальных комбинаций стеклянных светофильтров открывают также возможности эксплуатации их в актинометрических приборах, не требующих параллельного падения пучка лучей (спектральные пиранометры, балансомеры и т. п.). Создание и практическое использование таких светофильтров представляется одной из ближайших задач спектральной актинометрии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барр С. Е. Прецизионные радиационные измерения в метеорологии /Пер. с англ. под ред. К. Я. Кондратьева, Л. Б. Красильщикова. — Л.: Гидрометеиздат, 1972, с. 1—352.
2. Бартенева О. Д., Никитинская Н. И., Полякова Е. А. О спектральной прозрачности содержания водяного пара в атмосфере над Памиром. — Труды ГГО, 1969, вып. 237, с. 101—109.
3. Бартенева О. Д., Веселова Л. К., Никитинская Н. И. К вопросу об измерении спектральной мутности атмосферы в экспедиционных условиях с помощью узкополосных светофильтров. — В кн.: Тезисы докладов XI Всесоюзного совещания по актинометрии. Ч. II. Таллин, 1980, с. 25—29.
4. Гушин Г. П. Методика и прибор для измерения спектральной прозрачности атмосферы и характеристик атмосферных аэрозолей. — Труды ГГО, 1974, вып. 324, с. 101—105.

5. Гушин Г. П. Методические указания по производству наблюдений за спектральной прозрачностью атмосферы и характеристиками атмосферных аэрозолей. — Л.: Гидрометеиздат, 1972, с. 1—53.
6. Каталог цветного стекла. — М.: Изд-во Машиностроение, 1967, с. 1—62.
7. Никитинская И. И., Бартенева О. Д., Веселова Л. К. Об изменчивости спектральной оптической аэрозольной толщи атмосферы в условиях высокой прозрачности. — Изв. АН СССР, ФАО, 1973, т. 9, № 4, с. 437—442.
8. Никитинская Н. И. Опыт исследования изменчивости спектрального коэффициента прозрачности атмосферы. — В кн.: Труды II Всесоюзного межведомственного совещания по актинометрии и оптике атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1961, с. 95—112.
9. Никитинская Н. И. Применение интерференционных светофильтров для спектральных исследований солнечной радиации. — Труды ГГО, 1951, вып. 26, с. 110—119.
10. Никитинская Н. И. О применимости метода Бугера — Ламберта для определения спектральной прозрачности толщи атмосферы. — В кн.: Труды II Всесоюзного межведомственного совещания по актинометрии и оптике атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1961, с. 90—95.
11. О связи характеристик мутности и степени поляризации света дневного неба с влажностью в пограничном слое атмосферы/О. Д. Бартенева, Э. О. Богданов, Л. К. Веселова и др. — В кн.: Тезисы докладов XI Всесоюзного совещания по актинометрии. Ч. V. Таллин, 1980, с. 32—35.
12. ГОСТ 9411-75. Стекло оптическое цветное. Гос. ком. Стандартов Сов. Министров СССР, М., 1980, с. 1—49.
13. Siversten S., Solheim J.-E. A field instrument for water vapour measurements. — *Infrared Phys.*, 1975, v. 15, N 2, p. 79—82.
14. Quenzol H. Ein Interferenzfilter-Aktinograph zur optischen Bestimmung des atmosphärischen Gesamtwasserdampfgehaltes. — *Beitr. Phys. Atm.*, 1966, Bd. 39, N 2, S. 112—144.

А. М. Шаламянский, Н. Д. Ионина

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА

Разделение поля общего содержания озона (ОСО) над северным полушарием на три области с разными значениями ОСО показало, что границы этих областей полностью совпадают с границами воздушных масс верхней тропосферы, а каждая область (воздушная масса) отличается своим сезонным ходом ОСО, малой пространственной изменчивостью и отсутствием резких изменений ОСО ото дня ко дню [4]. Анализ измерений за 1977—1979 гг. [1] полностью подтверждает выводы работы [4], которые были сделаны по наблюдениям за 1975—1976 гг.

Наряду с закономерностью временных изменений и пространственного распределения ОСО внутри каждой из воздушных масс арктического (АВ), умеренного (УВ) и тропического (ТВ) воздуха, пятилетний ряд наблюдений подтвердил также особенности распределения ОСО в АВ.

В работе [4] уже упоминалось, что в АВ рост ОСО в течение зимнего полугодия происходит неравномерно. Если воздушная масса смещается южнее 50° , то со временем в этом районе на-

блюдается заметное возрастание ОСО. Затем эта область повышенных значений ОСО как бы распространяется на всю массу АВ, в результате чего в ней увеличивается среднее содержание озона. Анализ ежедневных измерений за 1975—1979 гг. показывает, что в АВ область наибольших значений ОСО обычно наблюдается над территорией Восточной Сибири и Дальнего Востока, а область наименьших значений — на севере ЕТС.

Поскольку до сих пор нет отчетливого представления о причинах, приводящих к накоплению озона в высоких широтах в зимнее время, то выявление районов, отличающихся повышенным ростом ОСО и условий, способствующих этому росту, представляет особый интерес.

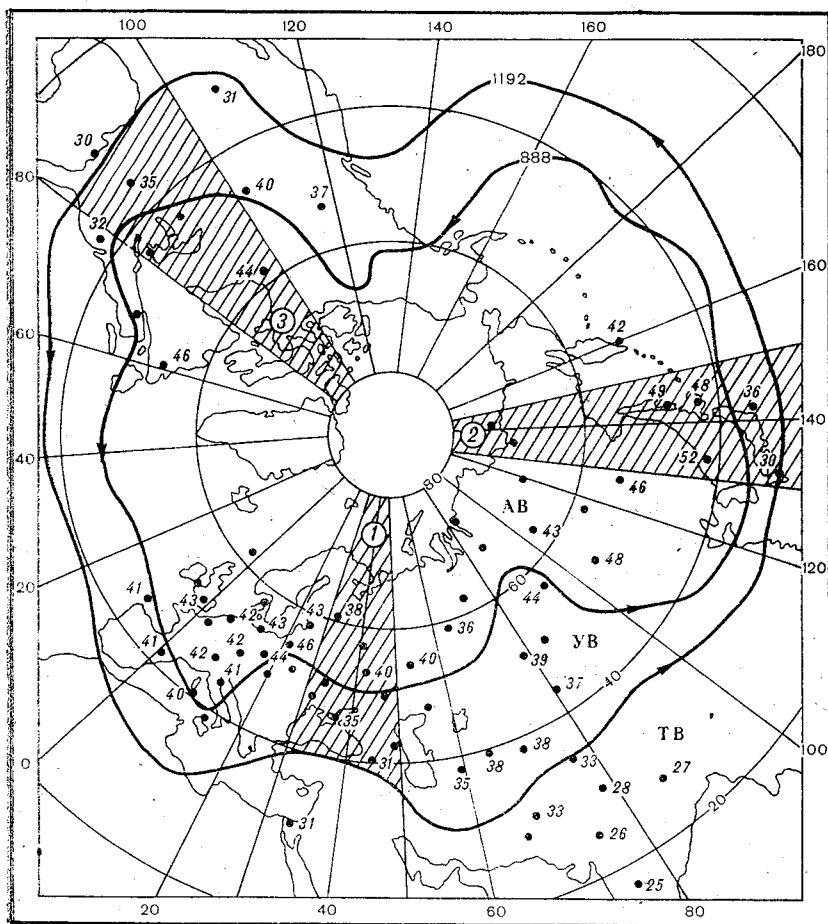


Рис. 1. Поле общего содержания озона 14.2 1977 г.
Линиями со стрелками указаны границы воздушных масс.

Настоящая работа ставит своей целью количественно оценить неравномерность распределения ОСО в АВ.

Для такой оценки по результатам качественного анализа ежедневных карт ОСО были выделены три района: 1) ЕТС в секторе, ограниченном меридианами 30 и 50° в. д.; 2) дальневосточный район в секторе между 130 и 150° в. д.; 3) восточная часть Северной Америки между 80 и 100° з. д. Эти районы примерно одинаково освещены данными озонометрических станций. В свою очередь в каждом секторе имеются три области: АВ, УВ и ТВ. Согласно работе [4], границами этих областей служат соот-

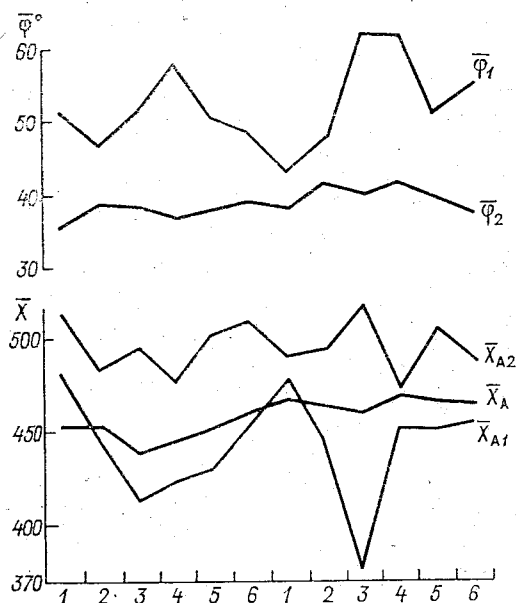


Рис. 2. Ход средних за пятидневку значений ОСО и границы АВ в секторах 1 и 2.

ветственно изогипсы поверхностей AT_{300} и AT_{200} , проходящие по осям полярнофронтовых и субтропических струйных течений.

На рис. 1 приведена карта средних дневных значений ОСО на станциях северного полушария за 14.2 1977 г. Различия в значениях ОСО в трех массах очевидно. Отчетливо проявляется и различие в содержании озона в секторах 1 и 2 в АВ. Следует подчеркнуть, что в зимний период из-за низких высот солнца и плохих погодных условий часто встречаются случаи, когда на территории одного сектора имеются данные только по одной — трем станциям. Именно это обстоятельство послужило основанием использовать средние за пятидневку и средние месячные значения ОСО для сравнения содержания озона в разных секторах.

Для анализа были рассчитаны среднемассовые значения ОСО в АВ ($\bar{X}_A$) и в УВ ($\bar{X}_Y$), а также средние значения ОСО в АВ в секторе 1 (2, 3) ($\bar{X}_{A1(2,3)}$), в УВ в секторе 1 (2, 3) ($\bar{X}_{Y1(2,3)}$). При этом отмечалась также широта, соответствующая среднему положению границы между АВ и УВ: φ_1 — в секторе 1 на пересечении с меридианом 40° в. д., φ_2 — в секторе 2 на пересечении с меридианом 140° , φ_3 — в секторе 3 на пересечении с меридианом 90° з. д.

На рис. 2 приведен ход средних за пятидневку значений ОСО $\bar{X}_A$, $\bar{X}_{A1}$, $\bar{X}_{A2}$ и φ_1 , φ_2 в течение февраля и марта 1977 г.

Сравнение содержания озона в секторах 1 и 2 показывает, что $\bar{X}_{A1}$ в основном меньше среднемассовых значений $\bar{X}_A$, а $\bar{X}_A$ всегда больше $\bar{X}_A$. Временной ход $\bar{X}_A$ очень устойчив. Мало меняется в течение рассматриваемого периода и $\bar{X}_{A2}$. В то же время

Таблица 1

Общее содержание озона $\bar{X}$ (матм-см) и среднее положение границы раздела масс в различных секторах АВ и УВ

Месяц, год	$\bar{X}_A$	$\bar{X}_{A1}$	φ_1	$\bar{X}_{A2}$	φ_2	$\bar{X}_{A3}$	φ_3	$\bar{X}_Y$	$\bar{X}_{Y1}$	$\bar{X}_{Y2}$	$\bar{X}_{Y3}$
9 1976 г.	324	311	60	321	57	328	55	315	317	317	313
10	335	318	58	354	46	323	49	303	307	317	315
11	350	346	53	380	44	359	48	309	311	324	329
12	378	394	52	405	41	364	45	323	334	318	316
1 1977 г.	422	396	52	438	39	421	45	359	368	331	362
2	450	442	51	497	38	435	44	371	386	355	371
3	465	443	53	493	40	499	46	369	384	368	352
5	428	416	59	434	48	424	60	370	386	390	372
7	364	367	62	362	60	362	54	341	351	337	349

в европейском секторе $\bar{X}_{A1}$ от пятидневки к пятидневке изменяется очень заметно. Если в основном $\bar{X}_{A1}$ ниже $\bar{X}_A$, то в отдельные периоды (1-я пятидневка февраля и 1-я пятидневка марта) $\bar{X}_{A1}$ становится выше среднемассового значения.

Сопоставление содержания озона в европейском и дальневосточном секторах с положением южной границы АВ в этих секторах показывает, что сравнительно высоким значениям $\bar{X}_{A2}$ (470—510 матм-см) соответствуют весьма низкие значения φ_2 (36—42°). В секторе 1 сильной изменчивости $\bar{X}_{A1}$ (от 380 до 480 матм-см) соответствуют большие колебания границы φ_1 (42—62°). В третьей пятидневке марта наиболее высокому положению границы соответствует наименьшее за рассмотренный период содержание озона, и, наоборот, в 1-й пятидневке марта, когда наблюдалось самое южное положение границы (42°), содержание озона выросло до 480 матм-см. Такие же различия в ходе содержания

озона между секторами наблюдаются в течение всего зимнего полугодия.

В табл. 1 приведены средние массовые значения ОСО в АВ и УВ, а также значения ОСО и среднее положение границ раздела между этими воздушными массами в секторах 1, 2, 3.

Следует учитывать, что значения $\bar{X}_{A1(2,3)}$ отражают вклад станций, расположенных близ южной границы АВ. Положение границы $\Phi_{1(2,3)}$, которая определялась только в те дни, когда имелись данные об ОСО, фактически ниже среднемесячного. В основном это относится к европейскому сектору, где граница часто смещена к северу.

Для сравнения зимних и летних распределений озона приведены значения этих величин за май и июль 1977 г. Особенности распределения ОСО в АВ наиболее заметны в сравнении с распределением ОСО в УВ.

Различие в содержании озона в секторах 1 и 2 АВ становится существенным начиная с октября и максимальным — в феврале, а с мая месяца различие исчезает. В секторе 3 наблюдаются промежуточные значения озона. В то же время УВ в течение всего года отличается пространственная однородность значений ОСО. Отметим также, что в АВ даже в секторе 1 с наименьшим содержанием озона $\bar{X}_{A1}$, значения ОСО заметно превосходят значения, наблюдаемые в УВ. На ежедневных картах граница между $\bar{X}_{A1}$ и $\bar{X}_{У1}$ в зимнее полугодие всегда хорошо прослеживается.

Если различие в содержании озона в разных регионах можно оценить количественно, то этого, к сожалению, нельзя сделать для оценки процесса размешивания порций воздуха с большим содержанием озона во всей массе АВ, приводящего к постоянно-му в течение зимы повышению озона в этой массе.

Малое количество станций, измеряющих содержание озона, не позволяет подробно ото дня ко дню проследить перемещение во всей массе АВ порций воздуха с большим содержанием озона.

Качественный анализ карт за четыре зимы 1975—1979 гг. показывает, что характер перемещения таких порций внутри массы АВ подобен распространению зимних потеплений [2]. Имеется и существенное различие. Температура переместившихся (часто из того же дальневосточного сектора [2]) порций теплого воздуха со временем падает до температуры окружающего воздуха, а содержание озона во всей массе АВ постепенно увеличивается.

Таким образом, качественный и количественный анализ полей ОСО показывает, что в областях АВ, которые в процессе циркуляции оказываются южнее 50° и достаточно долго там располагаются, начинается усиленное образование озона (повышение ОСО). Последующее развитие циркуляционных процессов приводит к перемещению этих областей и размешиванию озона во всей массе АВ.

Для восточной окраины азиатского материка наиболее характерна весьма низкая широта границы АВ, поэтому район Восточ-

ной Сибири и Дальнего Востока более всего претендует на роль источника высокого содержания озона в АВ.

Что же касается причин, вызывающих столь большие различия в содержании озона в европейском и дальневосточном регионах, то естественнее всего, на наш взгляд, объяснить это явление различными условиями образования и разрушения озона.

К середине зимы образование озона на территории севернее $50-60^\circ$ практически прекращается. В то же время именно в АВ в зимнее полугодие значительно уменьшено содержание водяного пара — одной из основных компонент, разрушающих озоновый слой. Предположение о влиянии водяного пара на озоновый слой, высказанное в работах Раманатана и затем подкрепленное расчетами Ханта, Ронея и др. [5—7] наиболее естественно объясняет широтный и сезонный ход ОСО. Эта гипотеза хорошо объясняет и региональные особенности распределения озона, рассмотренные выше.

В зимнее полугодие в дальневосточном секторе АВ, где граница часто бывает сдвинута далеко к югу, существуют благоприятные условия для образования озона, а малое содержание водяного пара в верхней тропосфере над выхолаженными пространствами Сибири и Дальнего Востока способствует накоплению озона в этом районе.

В европейском секторе в АВ при сдвинутой на север границе не может идти образование озона, а западный перенос, поставляя влажный воздух Атлантики, способствует разрушению озона. Лишь при смещении границы АВ на юг появляются условия, необходимые для образования озона и повышения его общего содержания.

Доказательством, подтверждающим гипотезу о влиянии водяного пара на распределение озона, должны служить достаточно надежные измерения содержания водяного пара на высотах 9—18 км и сопоставление полей водяного пара и ОСО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Общее содержание озона и спектральная прозрачность атмосферы. Справочные данные по станциям СССР за 1976—1977 гг. — Л.: Гидрометеоздат, 1978, с. 8—150.
2. Погосян Х. П. Общая циркуляция атмосферы. — Л.: Гидрометеоздат, 1972. — 394 с.
3. Синоптический бюллетень ГМЦ—ВНИИГМИ МЦД. Обнинск, 1976—77 г. Ч. I.
4. Шаламянский А. М., Ромашкина К. И. Распределение и изменение общего содержания озона в различных воздушных массах. — Изв. АН СССР, ФАО, 1980, т. 16, № 12, с. 1258—1265.
5. Hunt B. G. Photochemistry of ozone in a moist atmosphere. — J. Geophys. Res., 1966, v. 71, N 5, p. 1385—1398.
6. Ramathan K. R. Ozone and water vapour. — XII Assembly IUGG, Helsinki, 1960, p. 63—64.
7. Roney P. L. On the influence of water vapour on the distribution of stratospheric ozone. — J. Atm. and Terr. Phys., 1965, N 11—12, p. 1177—1190.

СОДЕРЖАНИЕ

Е. П. Барашкова, В. Н. Цветкова. Статистические характеристики спектральной прозрачности атмосферы (по наблюдениям в Чарджоу)	3
А. М. Броунштейн, Е. В. Фабер, А. А. Шашков. Газоаналитическая установка для осуществления мониторинга концентрации CO_2 в атмосферном воздухе	11
В. И. Горышин. Методика измерения коэффициентов пропускания нейтральных светофильтров	17
Г. П. Гушин, Г. В. Корницкая, Т. А. Павлюченкова. Результаты многолетних сравнений озонного спектрофотометра Добра и озонметра М-83	24
Г. П. Гушин, С. А. Соколенко. К методике измерения суммарного озона по ультрафиолетовому излучению от зенита неба	31
Г. П. Гушин, С. А. Соколенко. Макет нового прибора для измерения суммарного озона	35
В. М. Игнатенко. О возможности эмпирической градуировки лидара в ближней зоне	41
В. М. Игнатенко, В. А. Ковалев. Некоторые вопросы интерпретации сигналов при лидарном зондировании атмосферы	45
В. А. Ковалев, В. И. Козинцев, Г. Н. Балденков, В. М. Игнатенко, Е. Э. Ковалькова, А. Г. Кузьмин, М. Н. Миленький, Е. Е. Рыбаков. Некоторые результаты экспериментальных сравнений лидаров и базисных регистраторов прозрачности	51
Л. В. Луцко, С. И. Зачек, В. В. Гранин. К вопросу о влиянии защитного окна на характеристики балансомера М-10М при измерениях коротковолновой радиации	59
Е. Л. Махоткина, Т. К. Ястребова, Б. М. Ильин. Алгоритмы машинной обработки результатов регистрации радиационного баланса и его составляющих	66
О. А. Немец, К. В. Казакова. Зависимость спектральных параметров интерференционных светофильтров от температуры	70
О. А. Немец, Н. Н. Парамонова, К. В. Казакова, Э. С. Андреева. Влияние распределения аэрозольных частиц по размерам на ослабление излучения приземным слоем атмосферы	74
Н. Н. Парамонова, А. М. Броунштейн. Сравнение статистических характеристик ослабления излучения приземным слоем атмосферы для разных массивов данных	82
Н. Н. Парамонова, А. М. Броунштейн, К. В. Казакова, О. А. Немец. Статистические характеристики ослабления ИК излучения приземным слоем атмосферы	88
К. И. Ромашкина. Усовершенствованная методика градуировки озонметра М-83 по свету от зенита неба	100
Е. Е. Рыбаков, А. Д. Егоров. К вопросу об осреднении сигналов при лидарном зондировании атмосферы	107
В. Н. Цветкова, Н. И. Никитинская. Опыт применения комбинированных стеклянных фильтров высокого пропускания с термоэлектрическим приемником для узких участков солнечного спектра	111
А. М. Шаламянский, Н. Д. Иоанна. Региональные особенности распределения общего содержания озона	120