

К.Я. Кондратьев, И.Н. Мельникова, В.И. Биненко

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПРОФИЛИ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ РАССЕЯНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ СЛОИСТОЙ ОБЛАЧНОСТИ ПО ДАННЫМ САМОЛЕТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Выведены формулы, выражающие объемные коэффициенты рассеяния и поглощения через полусферические потоки солнечной радиации внутри оптически толстого бесконечно протяженного и горизонтально-однородного слоя с учетом сильной вертикальной неоднородности. Формулы, приведенные в данной статье и в более ранних статьях, применены к результатам спектральных радиационных измерений внутри слоистых облаков, проведенных во время трех самолетных экспериментов. Определены спектральные зависимости оптических параметров отдельных слоев облаков.

Введение

Как известно, слоистые облака неоднородны в вертикальном направлении. Однако ранее при определении радиационных и оптических характеристик слоистых облаков они чаще всего рассматривались как однородные образования. Так как исследование вертикальной структуры слоистых облаков представляет большой интерес для изучения физических характеристик слоистой облачности и формирующих ее процессов [1], в настоящей статье приведены результаты применения метода определения оптических параметров слоистой облачности, описанного ранее [2], к данным радиационных самолетных измерений на различных уровнях внутри облака или между облачными слоями в случае многослойной облачности.

Ранее было обнаружено [3], что атмосферные аэрозоли, в том числе и антропогенного происхождения, аккумулируются в облаках нижнего яруса, причем их распределение в облаках меняется с ростом высоты. Таким образом, полученные ниже результаты могут быть полезны при исследовании аэрозольных загрязнений облачной атмосферы и особенностей их распределения в слоистых облаках. Слоистые облака выбраны потому, что они отличаются большой протяженностью и временной стабильностью и оказывают сильное влияние на радиационный режим атмосферы [4–6]. При этом слоистая облачность хорошо моделируется плоским рассеивающим слоем большой оптической толщины, однородным и бесконечным в горизонтальном направлении, что позволяет применять для интерпретации результатов наблюдений аналитический метод теории переноса излучения.

Рассматривается коротковолновый диапазон длин волн (0,35–0,95 мкм), так как: 1) на видимый диапазон приходится большая часть солнечной энергии (поток излучения на длине волны 0,4 мкм в несколько раз превосходит поток на длине волны 0,9 мкм); 2) в этом диапазоне поглощение света в облаке достаточно слабое по сравнению с рассеянием и поэтому возможно использование разложений по

малому параметру для расчета асимптотических констант и функций.

Применим точные формулы для оптических характеристик (альbedo однократного рассеяния ω_0 и оптической толщины τ_0) в облачных слоях, полученные в [2], для анализа данных самолетных спектральных измерений солнечной радиации F^\downarrow , F^\uparrow в облачной атмосфере.

Применение асимптотических формул для интерпретации данных самолетных измерений

Исходными данными для решения задачи являются результаты самолетных измерений в слоистой облачности, полученные 24.09.72 (зенитный угол Солнца $\theta = 74^\circ$); 20.04.85 ($\theta = 49^\circ$) над Ладожским озером (рис. 1, а, в, з) и 01.10.72 над Карским морем (рис. 1, б) ($\theta = 84^\circ$) [6–9]. Были измерены спектральные значения полусферических потоков рассеянной солнечной радиации над, внутри на одном [8] или нескольких уровнях [6, 7, 9] и под облаком (см. рис. 1). Условия проведения экспериментов следующие:

а) наблюдалась двухслойная облачность; измерения проводились над верхним слоем ($z = 4,1$ км), внутри него ($z = 3$ км), между слоями облачности ($z = 1,6$ км), внутри нижнего слоя ($z = 0,6$ км) и под нижним слоем ($z = 0,05$ км) [6];

б) однослойная облачность: высота верхней границы 1,05 км, нижней – 0,75 км [8];

в, г) однослойная облачность: высоты верхней и нижней границ 1,4 и 0,9 км [7, 9].

Спектральный диапазон в экспериментах а) и б) составлял $0,45 \div 0,85$ мкм, количество точек по спектру соответственно 41 и 17, а в эксперименте в, г) $0,35 \div 0,95$ мкм, данные приведены для 180 значений длины волны.

В рассматриваемых экспериментах подстилающая поверхность была различна: а) поверхность воды (альbedo $A \sim 0,20$); б) поверхность воды со льдом ($A \sim 0,40$); в, г) снег со льдом ($A \sim 0,65$).

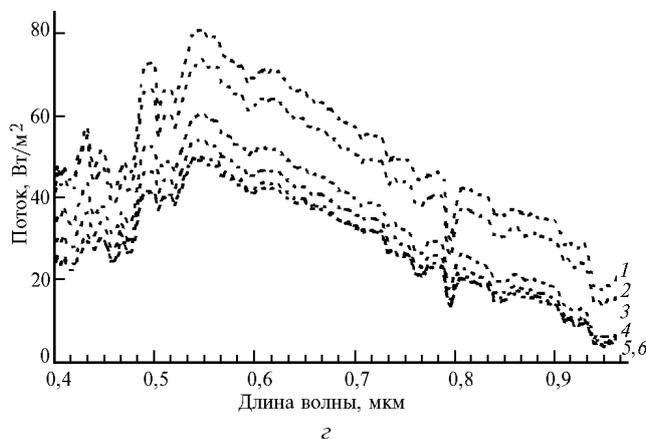
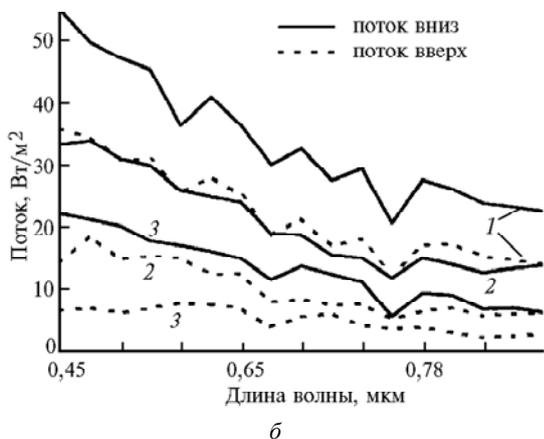
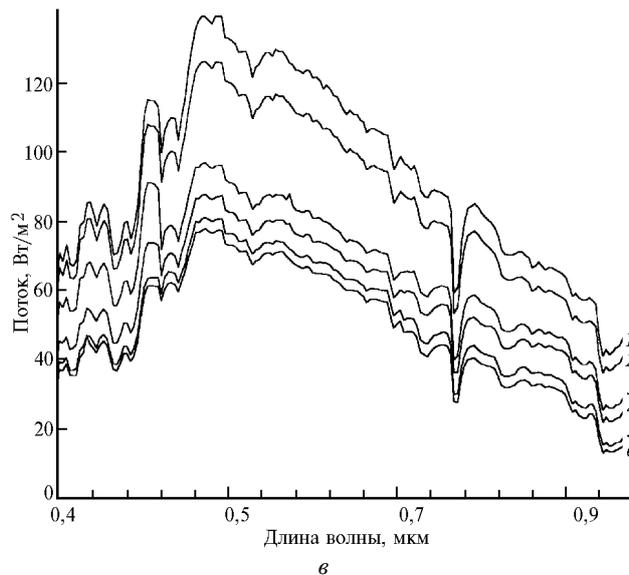
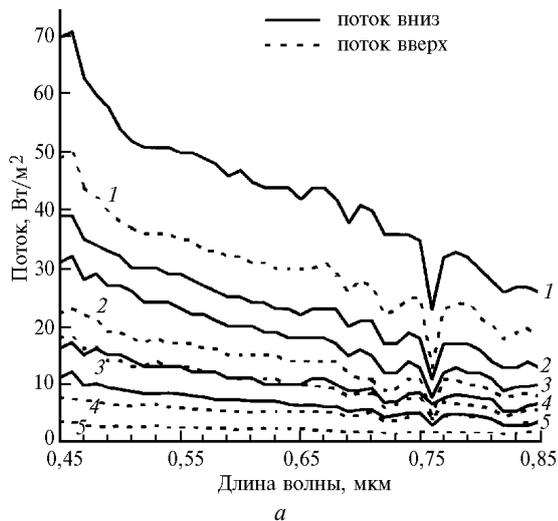


Рис. 1. Полушарические нисходящие и восходящие потоки солнечной радиации в облачной атмосфере, а, б, в соответственно по результатам экспериментов а), б) и в). Цифры у кривых указывают уровень измерений (а – 1 – 4,1; 2 – 3; 3 – 1,6; 4 – 1,6; 5 – 0,6; б – 0,05 км; б – 1 – 1,1; 2 – 0,95; 3 – 0,6 км; в, г – 1 – 1,4; 2 – 1,3; 3 – 1,2; 4 – 1,1; 5 – 0,95; б – 0,8 км; нисходящие (б) и восходящие (г) потоки)

Формулы, выражающие величины ω_0 и τ_0 через потоки радиации, были применены для обработки данных наблюдений. В эксперименте а) использовались также формулы, полученные для существенно вертикально неоднородной системы 2 облачных слоев. Принимая во внимание спектральные значения параметра g [10], получены спектральные зависимости оптической толщины для отдельных слоев рассматриваемых слоистых облаков. Результаты приведены в табл. 1–3: значения альбедо однократного рассеяния и оптической толщины.

При использовании формул, полученных в первой части [2], для обработки результатов эксперимента а) трудностей не встретилось. Оптическая толщина между уровнями измерений достаточно велика, и погрешности, связанные с областью применимости формул, оказались меньше, чем погрешности, вызванные ошибками измерений. В результате погрешности восстановления оптических параметров

в случае а) составляют $\Delta(1 - \omega_0) / (1 - \omega_0) \sim 6\%$, $\Delta\tau/\tau \sim 10\%$.

Отметим, что в экспериментах а) и б) (1972 г.) применялась первая модель спектрометра, а обработка результатов велась без помощи ЭВМ. Поэтому погрешности измерений в этих случаях значительно больше $\Delta F^{\uparrow\downarrow}/F^{\uparrow\downarrow} \sim 5-6\%$ (что выражается на рис. 1, а, б более сильной «рябью» на кривых), чем в эксперименте в, г) (1985 г., $\Delta F^{\uparrow\downarrow}/F^{\uparrow\downarrow} \sim 1-2\%$), проводившемся на базе улучшенной модификации прибора в совокупности с компьютерной обработкой результатов.

В случае интерпретации результатов эксперимента б) оптическая толщина слоя мала, погрешности определения оптических параметров больше ($\Delta(1 - \omega_0) / (1 - \omega_0) \sim 10\%$, $\Delta\tau/\tau \sim 15-20\%$), чем в случаях а) и в, г), и оптическую толщину нижнего слоя не удалось определить – слой слишком тонкий. В эксперименте в, г) в нижнем подслое оптическую толщину оценивали, применяя формулы для чистого

рассеяния света. Для более точного решения задачи в слоях произвольной оптической толщины необходим другой аналитический подход. Приближенную оценку можно также сделать, вычисляя оптическую толщину нижнего подслоя как разность суммарной толщины и

толщины верхнего подслоя $\tau_2 = \tau_{\text{Sum}} - \tau_1$. Суммы полученных значений τ_i по высоте – оптические толщины всего слоя облаков, обозначены Sum в табл. 1–3. Значения величины s^2 в нижнем подслое вычислить не удалось.

Таблица 1

Альbedo однократного рассеяния и оптическая толщина в слоистом облаке, полученные в результате самолетных измерений потоков солнечной радиации 24.09.72

λ , мкм	z, км								
	3,55		2,30		1,10		0,33		3,55–0,33
	ω_0	τ_1	ω_0	τ_2	ω_0	τ_3	ω_0	τ_4	τ_{Sum}
0,45	0,9972	21,80	0,9912	38,00	0,9947	28,52	0,9961	3,88	92,20
0,46	0,9968	18,48	0,9953	39,91	0,9945	27,00	0,9950	3,25	88,64
0,47	0,9956	20,93	0,9979	46,74	0,9943	28,20	0,9953	4,22	100,09
0,48	0,9959	23,12	1,0000	43,65	0,9939	27,91	0,9930	3,74	98,42
0,49	0,9966	18,87	0,9972	41,09	0,9827	27,69	0,9914	3,34	90,99
0,50	0,9973	23,47	1,0000	43,49	0,9932	31,17	0,9903	2,96	101,09
0,51	0,9974	22,01	1,0000	42,72	0,9913	27,24	0,9821	3,63	95,60
0,52	0,9971	21,01	0,9952	40,49	0,9951	33,45	0,9951	4,67	96,62
0,53	0,9971	20,74	0,9950	39,47	0,9950	32,60	0,9950	4,55	97,36
0,54	0,9972	18,03	0,9967	41,79	0,9931	30,95	0,9945	4,20	94,97
0,55	0,9970	20,75	0,9948	38,10	0,9949	32,12	0,9927	3,67	94,64
0,56	0,9964	21,68	0,9952	39,50	0,9957	32,95	0,9949	4,08	98,21
0,57	0,9951	17,19	0,9968	41,87	0,9936	29,81	0,9931	3,69	92,56
0,58	0,9955	18,46	0,9971	42,52	0,9953	28,46	0,9923	3,73	93,17
0,59	0,9962	18,28	0,9969	43,38	0,9934	26,87	0,9963	4,59	93,12
0,60	0,9954	17,58	0,9969	43,11	0,9934	26,70	0,9963	4,56	91,95
0,61	0,9954	20,28	0,9975	43,77	0,9937	25,30	0,9938	3,97	93,37
0,62	0,9963	19,92	0,9973	45,79	0,9943	19,82	1,0000	5,12	90,65
0,63	0,9947	23,81	1,0000	44,42	0,9944	25,56	0,9993	5,31	99,10
0,64	0,9954	18,35	0,9971	47,69	0,9930	28,16	0,9972	5,37	99,57
0,65	0,9964	25,12	0,9970	44,14	0,9925	29,05	0,9959	5,22	103,53
0,66	0,9952	18,61	0,9973	43,50	0,9938	31,32	0,9929	4,10	97,52
0,67	0,9964	22,02	0,9984	51,40	0,9921	29,34	0,9921	4,04	106,78
0,68	0,9957	16,85	0,9968	43,85	0,9924	27,07	0,9962	5,40	93,17
0,69	0,9952	17,10	0,9970	41,00	0,9912	25,67	0,9934	4,24	88,01
0,70	0,9964	21,76	0,9891	37,72	0,9898	22,77	0,9960	4,97	87,22
0,71	0,9961	22,32	0,9882	38,51	0,9912	24,00	0,9977	6,25	91,08
0,72	0,9915	17,13	0,9916	39,81	0,9882	22,97	0,9949	4,50	84,41
0,73	0,9933	18,64	0,9913	40,60	0,9913	23,09	0,9989	5,04	87,37
0,74	0,9962	17,42	0,9949	37,12	0,9907	24,86	0,9962	5,54	84,94
0,75	0,9966	18,39	0,9956	44,32	0,9919	25,51	0,9989	7,46	95,68
0,76	0,9808	20,32	0,9740	46,72	0,9600	23,68	0,9972	7,64	98,32
0,77	0,9964	19,64	0,9974	45,24	0,9928	25,03	0,9993	7,46	97,37
0,78	0,9968	19,84	0,9964	45,19	0,9866	22,54	0,9984	7,59	95,12
0,79	0,9988	20,73	0,9953	41,71	0,9899	26,23	0,9972	6,63	95,30
0,80	0,9974	20,91	0,9996	46,53	0,9863	23,89	0,9965	6,24	97,56
0,81	0,9962	16,86	0,9980	44,58	0,9841	29,81	0,9948	5,49	96,65
0,82	0,9958	17,75	0,9969	46,05	0,9875	26,93	0,9944	4,31	95,04
0,83	0,9959	19,45	0,9995	45,43	0,9882	27,07	0,9950	4,60	96,55
0,84	0,9978	18,06	0,9956	42,04	0,9936	30,95	0,9940	3,52	94,57
0,85	0,9954	17,42	0,9969	45,40	0,9918	33,85	0,9931	1,93	98,60

С учетом полученных значений величин s^2 и τ' , а также расстояний между уровнями измерений потоков и спектральных зависимостей параметра индикатрисы рассеяния g [10] были определены величины объемных коэффициентов поглощения и рассеяния для слоев облака между уровнями измерений, представленные на рис. 2 и 3.

Погрешности восстановления значений оптических параметров изменяются с ростом длины волны, так как они зависят от величины поглощения. Оценка погрешностей в среднем по спектру дала 6–10%

для ω_0 и 15% для τ , σ и k . Погрешности больше в УФ-области, так как они возрастают за счет погрешностей измеряющего прибора, и в экспериментах а) и б), когда применялась менее совершенная модель спектрометра. Погрешности также возрастают с усилением поглощения, потому что при сильном поглощении точность асимптотик уменьшается. «Рябь» на кривых вызвана погрешностями измерения потоков радиации, как видно в эксперименте в), проводившемся с использованием более точной аппаратуры, кривые зависимостей $\sigma(\lambda)$ и $k(\lambda)$ более гладкие.

Обсуждение результатов

Обращают на себя внимание величины альbedo однократного рассеяния (см. табл. 1–3). Подчеркнем, что во всех случаях интерпретации данных радиационных экспериментов (например, [11]) значения альbedo однократного рассеяния значительно меньше получаемых из расчетов по теории Ми на основе общепринятых микрофизических моделей. Мы полагаем, что этот факт является отображением на уровне элементарного объема эффекта «избыточного» («аномального») коротковолнового поглощения в облаке, широко обсуждавшегося в научной литературе в последние годы. По-видимому, элементарный объем, обычно выбираемый в моделях для расчета радиационных характеристик на базе теории переноса излучения и усредняющий параметры трех основных компонентов облака (молекулы, аэрозоль вне капель и капли облака), слишком велик. Поэтому усреднение происходит на начальном этапе решения физической задачи, а не в конце. Это обстоятельство приводит к неверному результату – недооценке расчетной величины поглощения радиации, противоречащей данным наблюдений, что и составляет суть эффекта «избыточного» поглощения в облаке. В целом спектральный ход ве-

личины ω_0 для рассматриваемой спектральной области аналогичен полученным ранее зависимостям [11].

Таблица 2

Альbedo однократного рассеяния и оптическая толщина в слоистом облаке, полученные в результате самолетных измерений потоков солнечной радиации 01.10.72

λ , мкм	z , км				
	1,0		0,8		Весь слой 1,05–0,75
	ω_0	τ_1	ω_0	τ_2	
0,45	0,9986	4,5	0,9874	1,7	6,2
0,48	–	3,8	0,9980	1,6	5,4
0,50	–	4,4	0,9935	1,5	5,9
0,53	–	3,5	0,9912	0,5	4,0
0,58	–	4,0	0,9967	0,4	4,4
0,60	0,9877	3,7	0,9855	0,1	3,8
0,65	–	3,2	0,9879	–	3,1
0,69	0,9218	3,5	0,9786	–	3,2
0,70	0,9792	3,7	0,9794	–	3,5
0,72	0,8636	–	0,9747	–	3,9
0,75	0,9251	1,5	0,9968	0,7	2,2
0,76	0,8189	–	0,9693	–	3,1
0,78	0,9582	3,6	0,9745	0,5	4,1
0,80	0,9667	3,2	0,9873	0,6	3,8
0,82	0,9811	2,0	0,9814	0,5	2,5
0,83	0,9584	–	0,9801	–	2,0
0,85	0,9218	–	0,9879	–	2,1

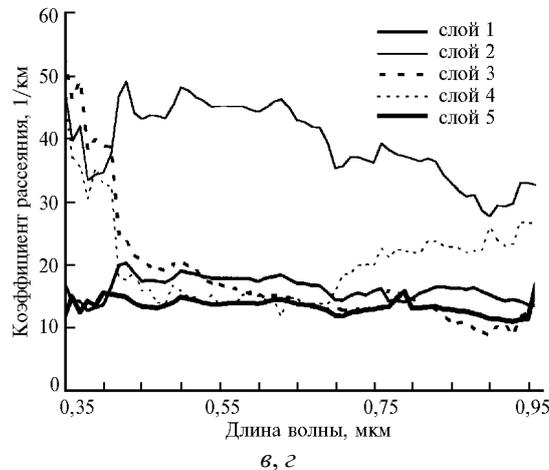
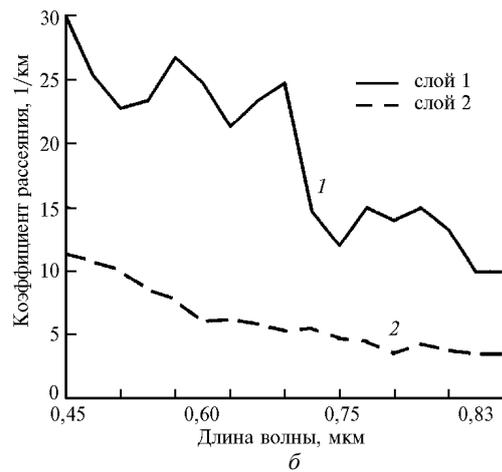
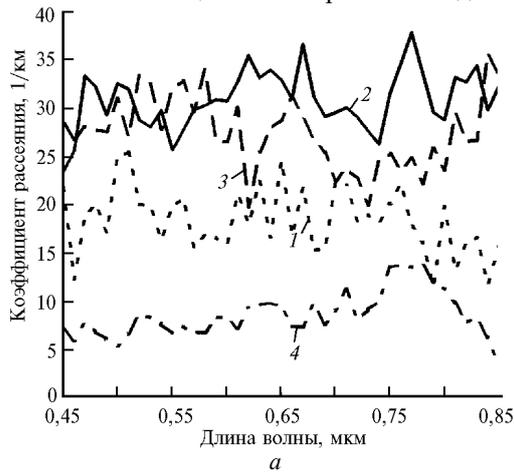


Рис. 2. Спектральные значения объемного коэффициента рассеяния в слоях облака между уровнями измерений. а, б, в, г – по экспериментам а), б) и в), г); цифры у кривых указывают номер слоя; а: 1 – слой 4,1–3; 2 – 3–1,6; 3 – 1,6–0,6; 4 – 0,6–0,05 км; б: 1 – слой 1,1–0,95; 2 – 0,95–0,6; в, г: 1 – слой 1,4–1,3; 2 – 1,3–1,2; 3 – 1,2–1,1; 4 – 1,1–0,95; 5 – 0,95–0,8 км

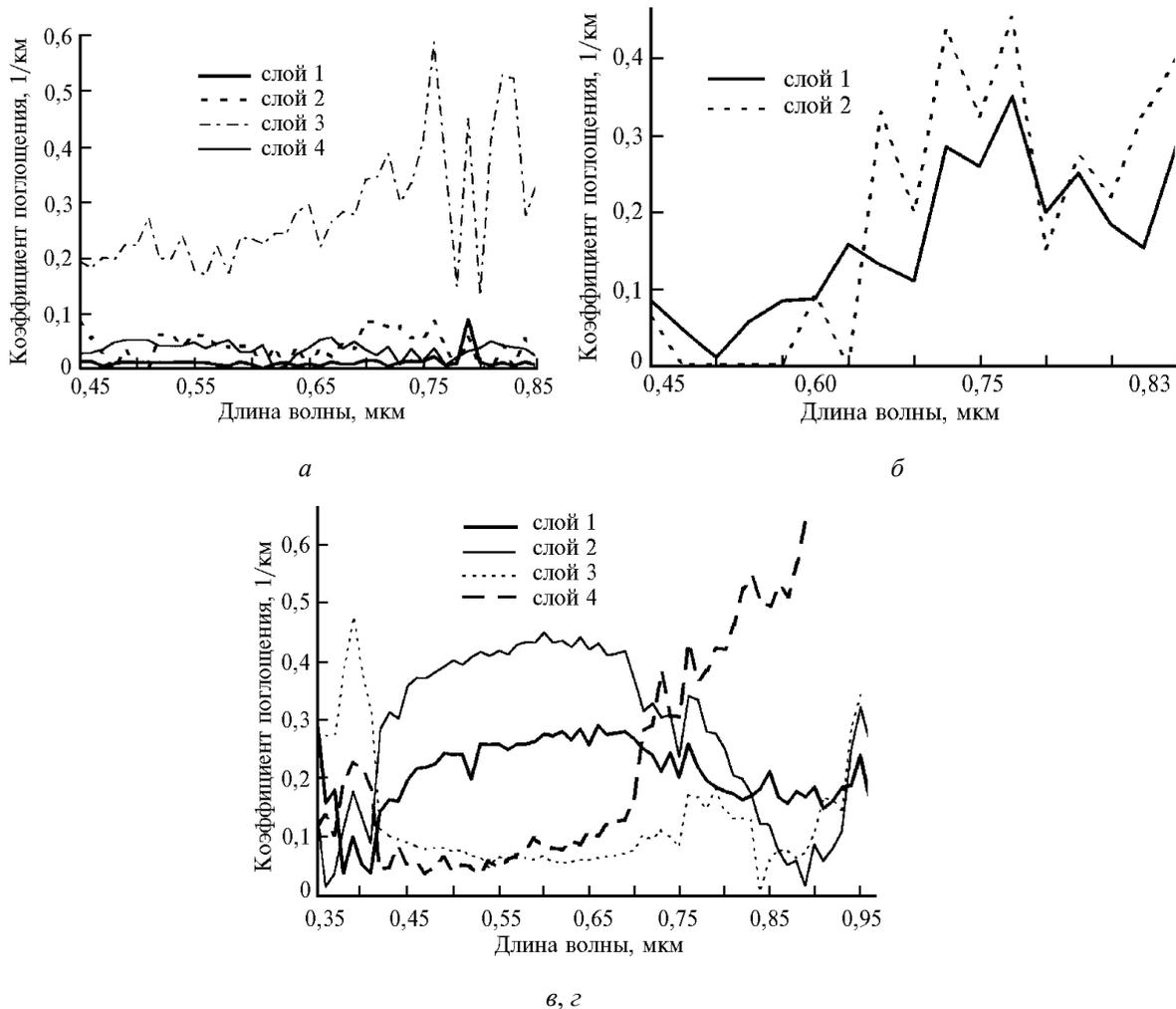


Рис. 3. Спектральные значения объемного коэффициента поглощения в слоях облака между уровнями измерений; а, б, в, г) по экспериментам а), б) и в), г); а и в, г – обозначения у кривых аналогичны рис. 2

Оптическая толщина отдельных подслоев не обнаруживает ярко выраженной спектральной зависимости на фоне колебаний, обусловленных погрешностями метода, но суммарные значения оптической толщины уменьшаются с длиной волны, что было отмечено ранее при интерпретации других данных наблюдений [11].

Спектральные зависимости объемного коэффициента рассеяния на рис. 2, а, в, г выявляют заметную неоднородность слоистого облака по вертикали: коэффициент рассеяния в верхних частях облака в обоих случаях превосходит коэффициент рассеяния нижней части. Объемный коэффициент рассеяния облака в целом, определенный ранее по измерениям потоков на границах облачных слоев [11], совпадает в пределах погрешностей со значениями σ , полученными здесь и усредненными по всему слою.

Объемный коэффициент поглощения отдельных слоев в облаке (см. рис. 3) тоже выявляет сильную вертикальную неоднородность облака. На спектральных зависимостях величины $k(\lambda)$ верхних частей облачных слоев в экспериментах б) и в), г), кроме полос поглощения кислорода и водяного пара (0,68; 0,72; 0,76 мкм и др.), проявляется полоса озона Шапной (0,65 мкм), в то время как на кривых для нижних частей облаков она отсутствует. Коэффициент поглощения больше по величине для более низких уровней в облаке в случаях б) и в), г), что может свидетельствовать о преимущественной аккумуляции атмосферных аэрозолей в нижней части облака.

В эксперименте в) коэффициент поглощения нижней части облачного слоя (1,1–1,0 км) монотонно увеличивается с длиной волны, что явно проявлялось ранее [11] при рассмотрении облачного слоя в целом и характерно для продуктов сгорания органического топлива.

Альbedo однократного рассеяния и оптическая толщина в слоистом облаке, полученные в результате самолетных измерений потоков солнечной радиации 20.04.85

λ , мкм	z , км										
	1,35		1,25		1,15		1,05		0,87		1,4–0,8
	ω_0	τ_1	ω_0	τ_2	ω_0	τ_3	ω_0	τ_4	ω_0	τ_5	τ_{Sum}
0,35	0,9831	1,75	0,9968	4,86	0,9949	5,32	0,9974	4,61	–	1,75	18,30
0,36	0,9891	1,45	0,9996	3,98	0,9942	4,67	0,9964	3,78	–	3,75	17,63
0,37	0,9876	1,45	0,9991	4,21	0,9944	4,95	0,9971	3,58	–	1,87	16,05
0,38	0,9971	1,28	0,9966	3,36	0,9899	3,87	0,9937	3,08	–	2,15	13,74
0,39	0,9925	1,33	0,9949	3,46	0,9881	4,03	0,9936	3,56	–	1,28	13,66
0,40	0,9961	1,37	0,9962	3,48	0,9906	3,94	0,9934	3,33	–	2,35	14,47
0,41	0,9977	1,66	0,9976	3,78	0,9920	3,90	0,9944	3,26	–	2,31	14,91
0,43	0,9920	2,06	0,9937	4,95	0,9957	2,39	0,9973	1,77	–	2,25	13,41
0,45	0,9889	1,77	0,9918	4,36	0,9956	2,09	0,9967	1,66	–	2,01	11,89
0,47	0,9876	1,77	0,9916	4,41	0,9960	1,98	0,9974	1,48	–	1,98	11,62
0,49	0,9867	1,83	0,9914	4,58	0,9959	2,02	0,9962	1,69	–	2,11	12,23
0,50	0,9876	1,93	0,9918	4,90	0,9964	2,07	0,9971	1,63	–	2,26	12,74
0,51	0,9873	1,91	0,9917	4,82	0,9960	1,99	0,9966	1,59	–	2,21	12,52
0,53	0,9859	1,85	0,9910	4,66	0,9963	1,79	0,9973	1,38	–	2,10	11,77
0,55	0,9857	1,82	0,9908	4,57	0,9961	1,72	0,9965	1,40	–	2,08	11,60
0,57	0,9858	1,83	0,9906	4,57	0,9961	1,65	0,9954	1,50	–	2,10	11,65
0,59	0,9854	1,81	0,9904	4,52	0,9960	1,56	0,9939	1,62	–	2,10	11,62
0,60	0,9842	1,77	0,9898	4,43	0,9960	1,55	0,9945	1,50	–	2,09	11,35
0,61	0,9850	1,83	0,9904	4,55	0,9961	1,50	0,9943	1,48	–	2,12	11,49
0,63	0,9858	1,89	0,9909	4,69	0,9962	1,54	0,9939	1,59	–	2,21	11,91
0,65	0,9852	1,76	0,9903	4,36	0,9956	1,42	0,9928	1,53	–	2,10	11,16
0,67	0,9839	1,72	0,9903	4,25	0,9950	1,36	0,9919	1,51	–	2,06	10,91
0,69	0,9825	1,62	0,9895	4,01	0,9944	1,32	0,9908	1,44	–	1,93	10,31
0,70	0,9804	1,50	0,9903	3,74	0,9920	1,36	0,9865	1,59	–	1,82	10,01
0,71	0,9829	1,49	0,9912	3,62	0,9920	1,31	0,9849	1,88	–	1,85	10,14
0,73	0,9866	1,60	0,9918	3,76	0,9913	1,32	0,9819	2,13	–	1,92	10,73
0,75	0,9874	1,63	0,9935	3,66	0,9933	1,31	0,9849	2,05	–	1,97	10,62
0,77	0,9822	1,48	0,9913	3,88	0,9895	1,63	0,9830	2,18	–	2,02	11,19
0,79	0,9870	1,46	0,9926	3,78	0,9884	1,60	0,9815	2,30	–	2,02	11,16
0,80	0,9879	1,53	0,9934	3,71	0,9898	1,50	0,9808	2,27	–	2,00	10,96
0,81	0,9889	1,60	0,9943	3,68	0,9899	1,34	0,9795	2,28	–	2,01	10,91
0,83	0,9897	1,69	0,9952	3,68	0,9903	1,35	0,9777	2,47	–	2,04	11,24
0,85	0,9871	1,68	0,9963	3,36	0,9944	1,13	0,9790	2,38	–	1,96	10,05
0,87	0,9902	1,66	0,9982	3,12	0,9927	1,14	0,9774	2,28	–	1,92	10,12
0,89	0,9894	1,63	0,9993	2,90	0,9923	1,00	0,9720	2,34	–	1,83	9,70
0,90	0,9875	1,58	0,9968	2,71	0,9890	1,01	–	2,63	–	1,76	9,66
0,91	0,9899	1,52	0,9979	2,98	0,9836	1,06	–	2,44	–	1,74	9,74
0,93	0,9874	1,51	0,9962	3,01	0,9838	0,97	–	2,37	–	1,69	9,52
0,95	0,9826	1,42	0,9903	3,37	0,9737	1,32	–	2,71	–	1,75	10,57
0,96	0,9873	1,40	0,9917	3,30	–	1,32	–	2,60	–	1,75	10,45

Заклучение

Отметим, что ранее в [12] решалась задача определения оптических параметров на одном уровне внутри облака в предположении чистого рассеяния света и на основе измерений с помощью фильтрового спектрометра в 15 длинах волн (в нашем случае используются для интерпретации измерения в спектральном диапазоне 0,35–0,95 мкм). В теоретическом рассмотрении возможностей применения радиационных измерений [13] был предложен метод, основанный на отношении интенсивностей или потоков рассеянной солнечной радиации на разных уровнях внутри облачного слоя, и получен соответствующий аналитический аппарат для реализации метода. К сожалению, нам не известны результаты его применения к данным измерений.

Использованная выше совокупность аналитических формул является полезной основой для интерпретации данных самолетных радиационных наблюдений с целью анализа вертикальных профилей оптических параметров слоистой облачности. Несмотря на значительные погрешности восстановления величин ω_0 и особенно τ , получены вполне реалистичные значения и спектральные зависимости искомых величин. Подчеркнем, что с увеличением точности измерений (усовершенствованная модель прибора в эксперименте 1985 г.) точность результата становится вполне приемлемой для задач атмосферной оптики. В целом видно, что рассмотренные результаты решения обратной задачи выявляют некоторые общие черты в структуре и строении слоистой облачности в различных условиях экспериментов. Несомненно, что при учете

климатообразующей роли облаков при численном моделировании климата важно принимать во внимание поглощение коротковолновой радиации облаками.

1. *Биненко В.И., Кондратьев К.Я.*, Вертикальные профили радиационных характеристик типичных облачных образований // Труды ГГО. 1975. Вып. 331. С. 3–16.
2. *Мельникова И.Н.* Вертикальный профиль спектральных коэффициентов рассеяния и поглощения слоистой облачности // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. N 1. С. 5–11.
3. *Радиация в облачной атмосфере* / Под ред. Е.М. Фейгельсон. Л.: Гидрометеоздат, 1981. С. 165–170.
4. *Аэрозоль и климат* / Под ред. К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 542 с.
5. *Марчук Г.И., Кондратьев К.Я., Козодеров В.А., Хворостьянов В.И.* Облака и климат. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 270 с.
6. *Кондратьев К.Я., Биненко В.И.* Влияние облачности на радиацию и климат. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 240 с.
7. *Гришечкин В.С., Мельникова И.Н.* Исследование потоков и притоков солнечной радиации в слоистых облаках в районах Арктики // Радиационное использование природных ресурсов и охрана окружающей среды. Л.: ЛПИ, 1989. С.60–67.
8. *Кондратьев К.Я., Биненко В.И.* Протяженная облачность и радиация // ПРЭ ПИГАН. Т. 2. Л.: Гидрометеоздат, 1981. С. 107–114.
9. *Васильев А.В., Мельникова И.Н., Михайлов В.В.* Вертикальный профиль спектральных потоков рассеянного солнечного излучения в слоистом облаке по данным самолетных измерений // Изв. РАН. Сер. ФАО. 1994. Т. 30. N 5. С. 630–635.
10. *Stephens G.L.* Optical properties of eight cloud types // Technical Paper of CSIRO, Atmosph. Phys. Division, Aspendale, Australia, 1979. N 36. P. 1–35.
11. *Melnikova I., Mikhailov V.* Spectral scattering and absorption coefficients in strati derived from aircraft measurements // J. Atmos. Sci. 1994. V. 51. N 4. P. 925–931.
12. *King M.D., Radke L., Hobbs P.V.* Determination of the spectral absorption of solar radiation by marine stratocumulus clouds from airborne measurements within clouds // J. Atmos. Sci. 1990. V. 47. N 4. P. 894–907.
13. *Duracz T. and McCormick N.J.* Equation for Estimating the Similarity Parameter from Radiation Measurements within Weakly Absorbing Optically Thick Clouds // J. Atmos. Sci. 1986. V. 43. N 5. P. 486–492.

Научно-исследовательский Центр экологической безопасности РАН,
г. С.-Петербург

Поступила в редакцию
7 апреля 1997 г.

K.Ya. Kondratyev, I.N. Melnikova, V.I. Binenko. **Vertical Profiles of Spectral Coefficients of Scattering and Absorption for Stratus Clouds from Airborne Measurements.**

The formulae expressing the volume scattering and absorption coefficients through irradiance inside optically thick extended and horizontally homogeneous layer were derived with taking into account of the significant vertical inhomogeneity. The formulae obtained here and in former studies were applied to the spectral radiation measurements during 3 aircraft experiments inside stratus clouds. The spectral dependences of optical parameters of the sublayers were determined.