

О.Б. Васильев

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЛАЧНЫХ СЛОЕВ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ПО ПРОГРАММАМ «ПОЛЭКС-76» И «ГАРЭКС»

Рассчитываются характеристики пропускания, отражения и поглощения радиации слоистообразными облаками по наблюдениям по программам «ПОЛЭКС-76» (29 мая 1976 г.) и «ГАРЭКС» (20 апреля 1985 г.) с учетом подсветки снизу, от подстилающей поверхности, а также оценивается вертикальный профиль монохроматических (на $\lambda = 650$ нм) потоков радиации, в облаках (по наблюдениям 20.04.85 г.).

1. Спектральное распределение лучистого притока энергии и эффективного коэффициента поглощения потока излучения в облачных слоях

Применим выведенные в [1] соотношения к интерпретации экспериментальных данных, полученных лабораторией коротковолнового излучения атмосферы Ленинградского госуниверситета на самолетах ИЛ-18 и ИЛ-14 по программе «ПОЛЭКС-76» над Карским морем 29 мая 1976 г. и по программе «ГАРЭКС» над Ладожским озером 20 апреля 1985 г. [2]. В обоих случаях наблюдались облака слоистых форм, в первом случае облачный слой имел толщину около 7,5 км (наблюдения выполнялись на уровнях 0,2 и 8,0 км), во втором — около 1,5 км (наблюдения выполнялись на уровнях 0,2 и 1,7 км). Высота Солнца над горизонтом была примерно одинаковой: в первом случае $\cos Z_{\odot} \approx 0,57$, во втором — $\cos Z_{\odot} \approx 0,65$. Подстилающей поверхностью был снег (лежащий на поверхности льда) с очень высоким значением альbedo: 35÷40% в первом случае и 45÷65% во втором.

Во время зондировки 20 апреля 1985 г. над Ладожским озером измерения выполнялись не только над и под облачным слоем, но и на высотах до 5,0 км, что позволяет получить спектральные радиационные характеристики (СРХ) свободной атмосферы над облачным слоем.

Между выполнением рассматриваемых экспериментов используемая спектральная аппаратура была существенно модернизирована [3]. Измерения 23 мая 1976 г. выполнялись с шагом по длине волны в 20 нм, при этом сглаженная кривая проводилась через значения СРХ, соответствующие участкам спектра, свободным от полос молекулярного поглощения (в «непрерывном» спектре). Измерения 20 апреля 1985 г. выполнялись с шагом по длине волны в 10 нм. Назначения СРХ, несомненно, оказывает влияние поглощение в молекулярных полосах O_2 , H_2O и др., однако указанного спектрального разрешения недостаточно, чтобы правильно описать контуры соответствующих полос поглощения. В этом нет большой беды, так как в дальнейшем будет рассматриваться лишь поглощение в «непрерывном» спектре.

Значения нисходящих и восходящих спектральных потоков излучения, альbedo, балансов и притоков лучистой энергии на основных уровнях наблюдений даны в [2]. Здесь (см. таблицу) мы представим лишь данные о вычисляемых дополнительно параметрах [1]; об эффективных спектральных коэффициентах поглощения K , пропускания T и спектральном альbedo A облачных слоев, а также об абсолютных b и относительных β притоках лучистой энергии в свободной атмосфере над облачным слоем (20 апреля 1985 г.).

Притоки лучистой энергии в отдельных атмосферных слоях показаны на рис. 1, 2. Здесь же приведены и сглаженные кривые поглощения в «непрерывном» спектре. Отметим, что 29 мая 1976 г. поглощение относится к слою с Δp 620 мб, а 20 апреля 1985 г. поглощение в свободной атмосфере наблюдалось в слое с $\Delta p \approx 240$ мб, в облаках — в слое с $\Delta p \approx 160$ мб.

Поглощение лучистой энергии в «непрерывном» спектре 20 апреля 1985 г. в слое атмосферы над облаками было порядка 2÷3 мВт/см² мкм и примерно одинаково по спектру с небольшим подъемом в области полосы поглощения озона Шапюи (0,55÷0,65 мкм). В относительном притоке лучистой энергии (рис. 2) наблюдается увеличение от 2% в синем участке спектра (400–500 нм) до приблизительно 4% в инфракрасном (800÷900 нм) участке спектра — «красное» поглощение (среда, поглощающая в красном участке больше, чем в синем, очевидно, визуально должна приобретать синий оттенок, поэтому будем ее в дальнейшем называть «синей»).

Поглощение в облачном слое, хотя и более тонком, существенно больше и более селективно: в максимуме на длине волны порядка 680 нм оно достигает около 8 мВт/см² · мкм. Соответственно выглядит и поглощение во всем наблюдавшемся слое атмосферы, где оно достигает в максимуме около 11 мВт/см² · мкм. Сопоставление поглощения в облаках и над ними с учетом различия толщин слоев на длинах волн больших 750 нм, показывает, что поглощательная способность облачного слоя примерно в два раза превышает поглощательную способность атмосферы, свободной от облаков. Это, очевидно, обусловлено тем, что в облачном слое равной толщины со слоем свободной атмосферы фотоны проходят больший путь до выхода из него, а следовательно, испытывают и большее истинное

поглощение. Нижняя кривая *b* на рис. 1 представляет собой разность кривой поглощения облачного слоя и удвоенной кривой поглощения слоя свободной атмосферы (пересчитанных на слой равной толщины с $\Delta p = 100$ мб). Характер этой кривой, напоминающей спектральную зависимость поглощения хлорофилла в этой области спектра, позволяет сделать предположение, что в облачном слое сверх тех частиц, которые присутствуют в свободной атмосфере над облаком, были, по-видимому, также и частицы органического происхождения с отмеченной выше спектральной зависимостью поглощательной способности.

Таблица

Спектральные радиационные характеристики слоистых облаков

Наблюдения 29 мая 1976 г.				Наблюдения 20 апреля 1985 г.						
λ , нм	A, %	T, %	K, %	A, %	T, %	K, %	$A_{\text{обл.}}$ %	$B \frac{\text{мВт}}{\text{см}^2 \cdot \text{мкм}}, \Delta H =$ $= 1,7-4,5 \text{ км}$	$\beta, \%, \Delta H =$ $= 1,7-4,5 \text{ км}$	$B \frac{\text{мВт}}{\text{см}^2 \cdot \text{мкм}}, \Delta H =$ $= 0,2-4,5 \text{ км}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
400				76,8	22,2	0,9	53,4	0,7	0,7	1,8
410	22,1	65,0	12,9	77,9	21,7	0,4	56,7	1,8	1,6	2,4
420				76,1	23,8	0,1	56,8	3,0	2,8	3,1
430	22,6	65,3	12,1	75,7	24,1	0,2	58,1	1,6	1,5	2,0
440				75,2	24,5	0,3	59,2	1,4	1,2	1,9
450	24,4	65,9	12,7	73,9	24,3	1,8	59,3	1,7	1,3	4,5
460				73,5	25,3	1,2	60,1	2,7	2,0	4,8
470	25,0	62,5	12,5	72,4	26,3	1,3	60,1	3,5	2,6	5,7
480				71,4	27,3	1,3	60,1	4,2	3,1	6,4
490	25,0	66,2	11,8	69,8	29,2	1,0	59,4	2,8	2,2	4,4
500				70,1	28,8	1,1	60,5	3,5	2,7	5,3
510	20,5	67,6	11,9	69,7	28,2	2,1	60,8	3,5	2,8	6,7
520				69,2	28,7	2,1	61,0	2,7	2,3	5,9
530	19,5	68,3	12,0	68,8	28,9	2,3	61,2	2,1	1,7	5,6
540				68,2	28,8	3,0	61,1	2,3	1,8	7,1
550	19,4	67,5	13,1	68,0	28,7	3,3	61,4	3,1	2,5	8,3
560				67,6	28,4	4,0	61,5	2,5	2,0	8,7
570	17,5	68,8	13,7	68,3	27,9	3,8	62,6	4,3	3,5	10,0
580				66,6	28,9	4,5	61,3	3,1	2,6	9,8
590	19,0	67,6	13,4	67,0	29,1	3,9	62,0	3,3	2,8	9,0
600				66,5	28,6	4,9	61,9	4,6	3,9	11,7
610	17,3	66,9	15,8	66,6	29,3	4,1	62,3	4,3	3,7	10,2
620				66,2	29,2	4,6	62,1	3,6	3,2	10,0
630	17,9	66,3	15,8	66,0	28,9	5,1	62,2	4,2	3,8	11,2
640				64,5	29,7	5,8	60,9	3,4	3,4	11,1
650	18,1	65,5	16,4	65,3	28,7	6,0	61,9	3,5	3,3	11,3
660				64,7	29,0	6,3	61,5	3,1	3,0	11,2
670	20,6	66,8	12,6	65,3	28,7	6,0	62,3	3,8	3,7	11,3
680				65,6	27,3	7,1	62,8	4,1	4,0	13,0
690	10,7	65,4	23,9	62,2	31,4	6,4	59,6	4,0	4,2	11,7
700				63,0	29,3	7,7	60,5	3,7	4,0	12,7
710	17,3	67,9	14,8	64,4	27,1	8,5	61,0	4,1	4,4	13,7
720				64,0	27,1	8,9	61,8	4,3	4,7	14,0
730	17,7	60,1	22,2	61,3	31,1	7,6	59,2	2,3	2,6	10,4
740				62,4	33,1	4,5	60,4	3,7	4,4	8,3
750	18,7	65,3	16,0	62,3	33,4	4,3	60,4	3,5	4,1	7,2
760				57,9	33,3	8,8	56,1	8,6	13,8	14,6
770	12,0	59,8	28,2	60,9	32,5	6,6	59,2	7,6	10,4	13,0
780				62,2	34,0	4,0	60,6	3,4	4,3	7,2
790	20,0	61,7	18,3	62,0	33,5	4,5	60,5	3,8	4,8	8,0
800				61,8	33,7	4,5	60,3	4,1	5,3	8,1
810	19,2	56,7	24,1	62,0	32,9	5,1	60,6	4,4	5,8	8,8
820				59,5	31,2	9,3	58,2	7,7	10,7	15,3
830	20,3	52,1	27,7	60,0	31,8	8,2	58,7	6,9	9,7	13,7
840				61,1	33,2	5,7	59,9	3,8	5,4	8,6
850	20,5	60,1	19,4	61,6	33,9	4,5	60,5	2,7	4,0	6,4
860				62,2	33,3	4,5	61,1	2,7	4,0	6,3
870	21,8	59,6	18,6	61,3	33,8	4,9	60,3	2,1	3,2	6,0
880				62,2	33,7	4,1	61,2	3,1	4,8	6,3
890	22,6	56,5	20,9	61,5	33,4	5,1	60,5	3,3	5,1	7,0
900				58,0	30,5	11,5	57,1	8,2	13,2	16,0
910	21,7	48,9	29,4							
930	18,8	37,8	43,4							
950	18,5	29,4	52,1							

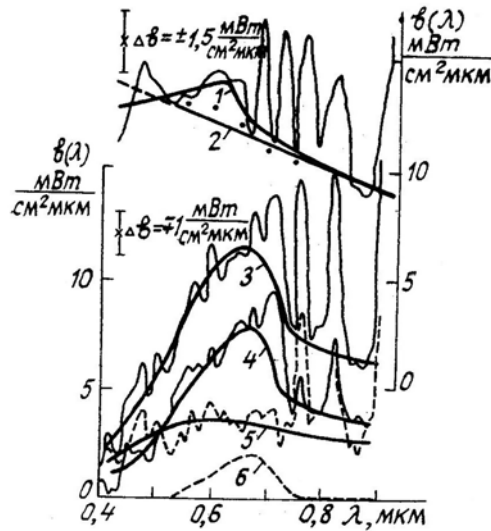


Рис. 1. Абсолютные « δ » притоки лучистой энергии в облачной атмосфере: кривая 1 — 29.05.1976 г., облачный слой между высотами 0,2÷8,0 км ($\Delta p = 620$ мб); 2 — то же, что и 1, но без полосы поглощения Шапню; 3 — 20.04.1985 г., слой облаков и вышерасположенной атмосферы между высотами 0,2÷4,5 км ($\Delta p = 400$ мб); 4 — 20.04.1985 г., облачный слой между высотами 0,2÷1,7 км ($\Delta p = 160$ мб); 5 — 20.04.1985 г., слой атмосферы над облаками между высотами 1,7÷4,5 км ($\Delta p = 240$ мб); 6 — 20.04.1985 г., разность между притоком в облачном слое и притоком в атмосфере (пересчитанном на $\Delta p = 160$ мб)

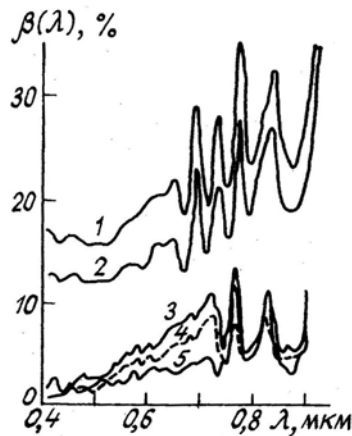


Рис. 2. Относительные « β » притоки лучистой энергии и эффективные коэффициенты поглощения « K » в облачной атмосфере: кривая 1 — 29.05.76 г., β между высотами 0,2–8,0 км ($\Delta p = 620$ мб); 2 — 29.05.76 г., K для тех же высот, что и 1; 3 — 20.04.85 г., β между высотами 0,2–1,7 км ($\Delta p = 160$ мб); 4 — 20.04.85 г., K для тех же высот, что и 3; 5 — 20.04.85 г., β между высотами 1,7–4,5 км ($\Delta p = 240$ мб)

Указанные особенности видны и в кривых (рис. 2) относительных спектральных притоков в облачном слое (кривая 3) и в атмосфере над ним (кривая 5). Помимо общего подъема от синей в инфракрасную часть спектра от 1 до приблизительно 5% наблюдается широкая полоса поглощения в интервале длин волн 550–750 нм, доходящая до 10%. Таким образом, как и в облачном слое, так и в атмосфере над ним присутствовал явно «синий» аэрозоль, к тому же в облаке, как уже было отмечено, по-видимому, дополнительно находились и частички с поглощательной способностью, похожей на поглощательную способность органических частиц. Отметим, что, увеличение поглощательной способности с увеличением длины волны характерно, например, для графита [4] и некоторых других аэрозолей минерального происхождения. Кстати, облака с такой спектральной зависимостью поглощения должны при наблюдении с земной поверхности, как это было отмечено выше, иметь синеватый оттенок, что действительно часто наблюдается в природе.

Поглощение лучистой энергии в «непрерывном» спектре в облачном слое 29 мая 1976 г. было большим, чем 20 апреля 1985 г., и селективным: в максимуме у длины волны порядка 600 нм оно составляло около $14 \text{ мВт}/\text{ом}^2 \cdot \text{мкм}$. Увеличение поглощения в диапазоне длин волн 550–650 нм может быть вызвано поглощением озона в полосе Шапню. Для проверки этого предположения воспользуемся кривой лучистого притока энергии в слое свободной атмосферы, полученной 20 апреля 1985 г. над Ладожским озером. Если из сглаженных значений лучистого притока в «непрерывном»

спектре, полученных 29 мая 1976 г., вычсть приведенную к той же толщине слоя атмосферы в $\Delta p = 340$ мб указанную величину поглощения озоном в полосе Шапюи в свободной атмосфере, то полученная разность будет иметь спектральную зависимость в диапазоне длин волн 500–900 нм, близкую к линейной — прямая 2 на рис. 1. Эта прямая на рис. 1 падает с увеличением длины волны, однако при переходе к относительным притокам лучистой энергии (рис. 2) мы получаем зависимость, близкую к нейтральной, или, скорее, несколько возрастающую с длиной волны (аналогично тому, как это было в случае облаков, наблюдавшихся 20 апреля 1985 г.). Как уже было отмечено выше такую спектральную зависимость поглотительной способности могут иметь антропогенные аэрозоли либо аэрозоли органического происхождения (не до конца сгоревшая «органика» в дымах, пыльца растений или деревьев и т. п.).

Итак, резюмируя выполненный анализ полученных кривых, можно сформулировать следующие предположения о поглотительной способности аэрозольных частиц, присутствовавших в земной атмосфере в указанные даты наблюдений:

1) 20 апреля 1985 г. над Ладожским озером поглощение в атмосфере в «непрерывном» спектре в видимом диапазоне было обусловлено «синим» поглощающим аэрозолем и поглощением озоном в полосе Шапюи; в облачном слое на высотах ниже 1,7 км присутствовали, по-видимому, также и органические частицы, селективно поглощающие радиацию в районе полосы поглощения хлорофилла на длинах волн 550÷750 нм;

2) 29 мая 1976 г. над Карским морем поглощение в облачном слое коротковолновой радиации было обусловлено аэрозолем с поглотительной способностью, близкой к нейтральной (либо слегка «синей») и поглощением озоном в полосе Шапюи.

Достоверность сделанных выводов, естественно, полностью определяется погрешностью полученных экспериментальных данных, показанной на рис. 1.

Спектральные зависимости коэффициентов истинного поглощения в облачных слоях для рассматриваемых дат наблюдений показаны также на рис. 2 (кривая 2 для 29.05.1976 г. и кривая 4 для 20.04.1985 г.). Эти кривые лежат ниже соответствующих кривых относительного притока лучистой энергии, сохраняя в целом особенности последних. Спектральная зависимость для 29.05. 1976 г. стала более нейтральной, а для 20.04.1985 г. — менее «красной».

Таким образом, можно сделать вывод, что величина $1 - K$, в некотором смысле, характеризует вероятность Λ выживания кванта при взаимодействии потока излучения с облачным слоем. В случае облачной системы 20.05. 1976 г. $1 - K$ в непрерывном спектре было порядка 82–88%, 20.04.1985 г. — около 94–98%.

Отметим также, что в облачных слоях из-за того, что фотоны в них пробегают большие пути, чем в свободной атмосфере, усиливается и поглощение в молекулярных полосах. Это видно на рис. 1, где молекулярное поглощение в облачном слое с $\Delta p = 160$ мб такое же или чуть больше, чем в слое свободной атмосферы с $\Delta p = 240$ мб.

2. Спектральное распределение эффективных коэффициентов отражения и пропускания потока излучения облачными слоями по наблюдениям 20 мая 1976 г. и 20 апреля 1985 г.

Значения эффективных спектральных коэффициентов отражения и пропускания потока излучения в рассматриваемые даты наблюдений, рассчитанные по формулам п. 1, представлены в таблице и на рис. 3. Облака, наблюдавшиеся 29 мая 1976 г., были относительно тонкими и содержали, как это было отмечено выше, сильно поглощающие частицы. В результате альbedo системы (кривая 2) оказалось весьма близким к альbedo подстилающей поверхности (кривая 3), оба они были равны приблизительно 35–40%. Но, как видно из данных таблицы и рис. 3, а, значения эффективного спектрального коэффициента отражения потока излучения облаками (кривая 1) были примерно в два раза ниже величин спектрального альbedo системы и равнялись приблизительно 20%. Спектральное распределение этого коэффициента — практически нейтральное. Также нейтральным в видимом участке спектра оказывается и распределение эффективного спектрального коэффициента пропускания потока излучения облаками (кривая 4, рис. 3, а), которое в указанном диапазоне спектра примерно равно 65%.

Наблюдения облачного слоя и вышележащей над ним атмосферы 20 апреля 1985 г. позволяет выполнить более подробный анализ экспериментальных данных. Облачная система в этот день была более мощной, чем та, которая наблюдалась в 1976 г.: значения ее эффективных коэффициентов отражения потока излучения (кривая 1 на рис. 3, б) лежат в пределах 60–75%, имеют явно «синее» спектральное распределение, они также оказываются между значениями спектрального альbedo системы (кривая 2) и подстилающей поверхности (кривая 3). Подстилающая поверхность имеет значения спектрального альbedo, уменьшающиеся с ростом, длины волны; такое же распределение и у спектрального альbedo системы.

Кривая эффективного спектрального коэффициента пропускания потока излучения облаками расположена в пределах 25–35% и возрастает с ростом длины волны (следствие обратной зависимости коэффициента отражения).

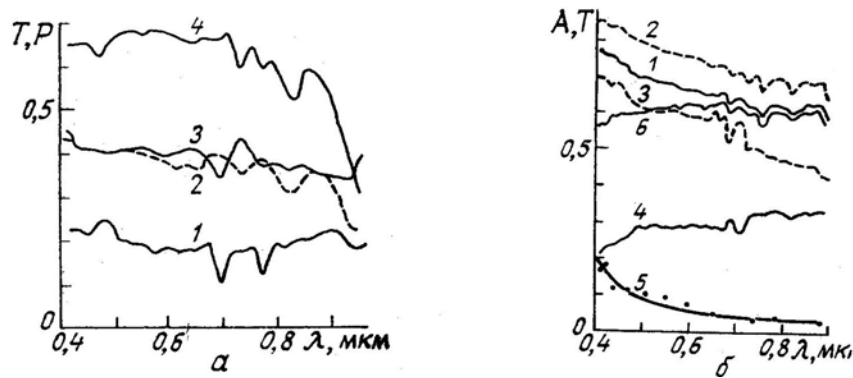


Рис. 3. Эффективные спектральные коэффициенты пропускания T и отражения для системы «атмосфера—облако» A , облаков $A_{\text{обл}}$, атмосферы $A_{\text{атм}}$ и поверхности a : (а) наблюдения 29.04.76 г. (кривая 1— $A_{\text{обл}}$; 2— A ; 3— a ; и 4— T); (б) наблюдения 20.04.85 г. (1— $A_{\text{обл}}$; 2— A ; 3— a ; 4— T ; 5— $A_{\text{атм}}$; 6— $\tilde{A} = A_{\text{обл}} - A_{\text{атм}}$)

Слой атмосферы между уровнями наблюдений 0,2 и 1,7 км, очевидно, содержит, не только облачные частицы, но и атмосферные газы, которые в «непрерывном» спектре рассеивают излучение. Это рассеянное атмосферой излучение, естественно, не складывается просто с излучением, рассеянным облачными частицами, так как в облаках достаточно высока кратность рассеяния ($\tau \gg 1$). Однако для грубой оценки этого эффекта предположим, что $A \approx A_{\text{обл}} + A_{\text{атм}}$, где $A_{\text{обл}}$ — часть коэффициента отражения, обусловленная рассеянием на облачных частицах, $A_{\text{атм}}$ — часть коэффициента отражения, обусловленная рассеянием атмосферными газами. Эту последнюю долю можно оценить по эффективному спектральному коэффициенту отражения потока излучения слоем атмосферы, расположенному выше облаков между уровнями 1,7 и 4,5 км (точки, рис. 3, б). Его спектральный ход, очевидно, может быть сглажен зависимостью $A_{\text{атм}} = \alpha + \beta \cdot \lambda^{-4}$ (кривая 5 на рис. 3, б). Второе слагаемое здесь описывает рэлеевское рассеяние. С учетом разницы толщин слоев и показанного в п. 1 удвоения поглощательной способности наблюдававшихся облаков по сравнению со свободной атмосферой, оценка по методу наименьших квадратов дает величину $\beta \approx 0,6$ (при λ , выраженной в мкм). После введения этой поправки в полученные значения A , для $A_{\text{обл}}$ получаются значения, показанные кривой 6 на рис. 3, б. Эта кривая, как это, по-видимому, и должно быть в случае слабо поглощающих капель, имеет практически нейтральный ход по спектру.

3. Вертикальный профиль потоков радиации в облаках

Вертикальные зондировки в облаках позволяют получать и вертикальные профили различных радиационных характеристик. На рис. 4 в качестве примера приведены вертикальные профили нисходящих F_{λ}^{\downarrow} и восходящих F_{λ}^{\uparrow} монохроматических потоков излучения на $\lambda = 650$ нм (между этими кривыми, сдвинутыми по оси абсцисс на $20 \text{ мВт/см}^2 \cdot \text{мкм}$, проведена сглаженная кривая их среднего хода).

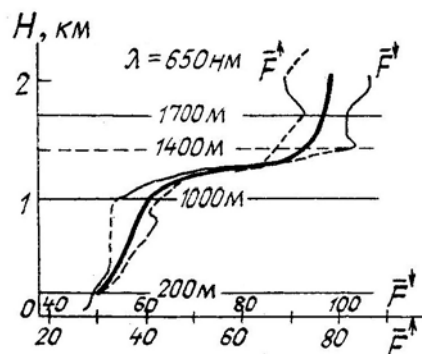


Рис. 4. Вертикальные профили нисходящего F_{λ}^{\downarrow} и восходящего F_{λ}^{\uparrow} монохроматических потоков излучения ($\lambda = 650$ нм) по наблюдениям 26.04.85 г.

Из рис. 4 видно, что на вертикальном профиле F_{λ}^{\downarrow} и F_{λ}^{\uparrow} можно выделить следующие участки. Верхний участок толщиной около $100 \div 200$ м ($1400 \div 1600$ м), где происходит не излом, а постепенное изменение характера зависимости F_{λ}^{\downarrow} и F_{λ}^{\uparrow} от высоты в атмосфере. По-видимому, появление такого слоя связано с нечеткой верхней границей облаков, которая в разных точках зондировок оказывается различной. Далее идет оптически наиболее активный слой облаков, простирающийся примерно на

$1/4 \div 1/3$ высоты всей облачной системы, где потоки уменьшаются почти в два раза, тогда как во всей остальной массе облаков лишь примерно на 25÷30%. В полосах молекулярного поглощения вертикальные профили потоков излучения и др. радиационных характеристик будут более крутыми, чем в «непрерывном» спектре.

Автор приносит искреннюю благодарность к.ф.-м. н. В.С. Гришечкину и д.ф.-м.н. И.Н. Минину за полезные обсуждения настоящей статьи.

1. Васильев О. Б. Определение спектральных оптических характеристик облачных слоев. // Оптика атмосферы. 1992. Т. 5. № 1. С. 77–82.
2. Гришечкин В. С., Мельникова И. Н. // Рациональное использование природных ресурсов и охрана окружающей среды. Вып. 32. Л.: Политехн. ин-т, 1989. С. 60–67.
3. Васильев О. Б., Гришечкин В. С., Коваленко А. П. и др. // Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987. С. 226–238.
4. Радиационные характеристики атмосферы и земной поверхности / Под ред. К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеондат, 1969. 564 с.

Ленинградский госуниверситет

Поступила в редакцию
15 сентября 1991 г.

O. B. Vasil'ev. Spectral Behaviours of the Optical Characteristics of Cloud Layers Observed during POLEX and GAREX

Transmission, reflection and absorption characteristics of stratiformis are calculated in this paper using the data of observations during POLEX (May 29, 1976) and GAREX (April 20, 1985). The calculations take into account the irradiation of clouds by light reflected from the underlying surface. Vertical profile of the monochromatic radiation fluxes (at $\lambda = 650$ nm) in clouds has also been estimated in the paper.