

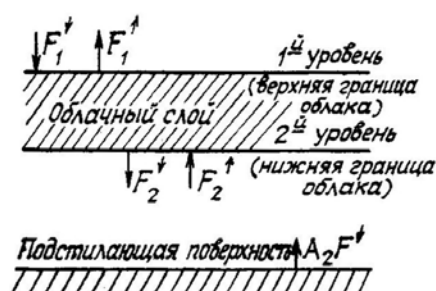
О.Б. Васильев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАЧНЫХ СЛОЕВ

Приводятся различные способы получения выражений для расчёта характеристик пропускания, отражения и поглощения радиации облачными слоями с учётом подсветки снизу (от подстилающей поверхности).

Исследованию оптических характеристик облачных слоев на основе теоретических расчетов и экспериментальных данных было посвящено в последние годы большое количество работ. Довольно подробное их обобщение сделано, например, в монографиях [1–3], там же дана и обширная библиография по этому вопросу. Однако проблему исследования оптических свойств облаков рано считать окончательно решенной, так как новые экспериментальные данные позволяют раскрыть новые особенности этого сложного и далеко еще до конца не познанного явления.

Во время выполнения программ «ПОЛЭКС-76» и «ГАРЭКС» [4] с самолетов-лабораторий ИЛ-18 и ИЛ-14 определялись спектральные потоки коротковолнового излучения над и под слоистообразными облаками, расположенными над поверхностью льда, покрытого снегом. Наблюдения облачных слоев, находящихся в условиях освещения не только сверху, но и в заметной степени снизу, ставят определенные проблемы в их интерпретации и анализе. Рассмотрению этих вопросов и посвящена настоящая статья.



Радиационные потоки в атмосфере: F_1^\downarrow — падающий на облако; F_1^\uparrow — отраженный от облака; F_2^\downarrow — прошедший сквозь облако; F_2^\uparrow — освещающий облако снизу; $A_2 F_2^\downarrow$ — отраженный поверхностью, равный F_2^\uparrow

Во всех ранее выполнявшихся экспериментальных исследованиях (см., например, [1]) определялись величины спектральных нисходящих (F_1^\downarrow и F_2^\downarrow) и восходящих (F_1^\uparrow и F_2^\uparrow) потоков коротковолнового излучения над (уровень 1) и под облаками (уровень 2) — см. рисунок. Далее вычислялись спектральные альбедо «системы» (A_1) и поверхности (A_2).

$$A_1 = F_1^\uparrow / F_1^\downarrow \text{ и } A_2 = F_2^\uparrow / F_2^\downarrow. \quad (1)$$

Спектральные балансы на верхнем и нижнем уровнях

$$B_1 = F_1^\downarrow - F_1^\uparrow \text{ и } B_2 = F_2^\downarrow - F_2^\uparrow. \quad (2)$$

по которым далее находились абсолютные (b_{12}) и относительные (β_{12}) спектральные притоки лучистой энергии в облачных слоях:

$$b_{12} = B_1 - B_2 \text{ и } \beta_{12} = b_{12} / F_1^\downarrow. \quad (3)$$

Спектральное альбедо системы A_1 рассматривалось как характеристика спектральной отражательной способности облаков, а абсолютные b_{12} и относительные β_{12} притоки — как характеристика их спектрального поглощения. Иногда рассчитывалось также и спектральное «пропускание» облаков.

$$T = F_2^\downarrow / F_1^\downarrow. \quad (4)$$

Приведенные величины действительно отражают указанные характеристики облачных слоев, если наблюдаемые облачные образования не освещаются (или практически не освещаются) снизу. Но,

например, экспериментальные данные, приведенные в [4], были получены над поверхностями со средним коротковолновым альбедо порядка 40% (29 мая 1976 г.) и 60% (20 апреля 1985 г.), что, очевидно, означает, что облака имели заметную подсветку снизу.

Для учета влияния такой подсветки мы можем воспользоваться различными подходами, однако в конечном итоге мы должны прийти к одним и тем же результатам. Представляется интересным привести примеры разных способов решения рассматриваемой проблемы.

При определении названных параметров облачных слоев предположим также и существование «свойств обратимости» указанных величин, т. е. будем предполагать, что параметры, определенные для облачного слоя сверху, будут равны аналогичным параметрам, определяемым для облачного слоя снизу.

Это будет действительно так в случае отсутствия резкой вертикальной неоднородности облачного слоя (существенное уплотнение облачного слоя сверху или снизу). Очевидно, что в процессе развития и переноса в атмосфере облачной массы возникающие неоднородности будут сглаживаться и наличие резких вертикальных неоднородностей в слоистых облаках (а именно этот случай и имеется в виду) мало вероятно. Кроме того, будем предполагать, что ввиду относительно большой, оптической толщины облачных слоев ($\tau \gg 1$) рассматриваемые параметры облаков не зависят от пространственного распределения интенсивности в освещающем их потоке излучения, т. е. их оптические параметры одинаковы сверху и снизу, несмотря на то, что сверху облака освещаются обычно направленным излучением Солнца (под разными углами к поверхности облаков), снизу же в основном диффузным излучением, отраженным подстилающей поверхностью. Это будет иметь место в случае, если в процессе переноса излучения в облачном слое происходит полное его перераспределение по направлениям. В облаках с $\tau \geq 10$, как показывают сделанные по методу Монте-Карло оценки, это явление действительно наблюдается.

1. Метод последовательного разделения и последующего сложения отраженных, прошедших и поглощенных потоков коротковолнового излучения

Будем последовательно рассматривать все этапы «переноса» потока излучения в облачном слое хорошо известным специалистам методом (аналогично тому, как это было впервые осуществлено Стоксом в 1862 г. при расчете пропускания набора молочных стекол [5, 6]).

а) Падающий поток излучения делится на отраженную, поглощенную и пропущенную части (в коротковолновой области спектра в земной атмосфере нет источников излучения):

$$F_1^\downarrow = A F_1^\downarrow + K F_1^\downarrow + T F_1^\downarrow. \quad (5)$$

Здесь введены обозначения: A — альбедо (эффективный коэффициент отражения потока излучения) облачного слоя; T — эффективный коэффициент пропускания потока излучения облаками и K — эффективный коэффициент (истинного) поглощения потока излучения облаками. Между этими величинами в силу закона сохранения энергии существует очевидное соотношение

$$A + T + K \equiv 1. \quad (6)$$

Учитывая выражение (3), для коэффициента K может быть написано очевидное соотношение:

$$K = \frac{b_{12}^\downarrow}{F_1^\downarrow + F_2^\uparrow} = \frac{B_1 - B_2^\uparrow}{F_1^\downarrow + F_2^\uparrow}. \quad (7)$$

б) Прошедшая часть падающего потока (подчеркнута в (5)) делится на поглощенную и отраженную поверхность части

$$T F_1^\downarrow = (1 - A_2) T F_1^\downarrow + A_2 T F_1^\downarrow. \quad (8)$$

в) Отраженная поверхностью часть (подчеркнуто в (8)) делится на пропущенную, поглощенную и отраженную от облаков части:

$$A_2 T F_1^\downarrow = A_2 T^2 F_1^\downarrow + K A_2 T F_1^\downarrow + A A_2 T F_1^\downarrow \quad (9)$$

и так далее. В результате отраженного от облачного слоя потока (F_1^\uparrow) и потоков, поглощенных облаками (F_n) и поверхностью (F_{nn}), получим

$$F_1^\uparrow = A F_1^\downarrow + A_2 T^2 F_1^\downarrow + A A_2^2 T^2 F_1^\downarrow + A^2 A_2^3 T^2 F_1^\downarrow + \dots = A F_1^\downarrow + A_2 T^2 F_1^\downarrow \sum_{n=0}^{\infty} (A A_2)^n = A F_1^\downarrow + (A_2 T^2 F_1^\downarrow) / (1 - A A_2); \quad (10)$$

$$F_{\text{н}} = KF_1^{\downarrow} + KA_2TF_1^{\downarrow} + KAA_2^2TF_1^{\downarrow} + KA^2A_2^3TF_1^{\downarrow} + \dots = KF_1^{\downarrow} + KA_2TF_1^{\downarrow} \sum_{n=0}^{\infty} (AA_2)^n = KF_1^{\downarrow} + \frac{KA_2TF_1^{\downarrow}}{1-AA_2}; \quad (11)$$

$$F_{\text{м}} = (1-A_2)TF_1^{\downarrow} + (1-A_2)AA_2TF_1^{\downarrow} + (1-A_2)A^2A_2^2TF_1^{\downarrow} + \dots = (1-A_2)TF_1^{\downarrow} \sum_{n=0}^{\infty} (AA_2)^n = \frac{(1-A_2)TF_1^{\downarrow}}{1-AA_2}. \quad (12)$$

Очевидно, в силу закона сохранения энергии должно быть

$$F_1^{\downarrow} \equiv F_1^{\uparrow} + F_{\text{н}} + F_{\text{м}}, \quad (13)$$

или, используя (10), (11) и (12):

$$F_1^{\downarrow} = AF_1^{\downarrow} + \frac{A_2T^2F_1^{\downarrow}}{1-AA_2} + KF_1^{\downarrow} + \frac{KA_2TF_1^{\downarrow}}{1-AA_2} + \frac{(1-A_2)TF_1^{\downarrow}}{1-AA_2}. \quad (14)$$

Это утверждение легко доказывается также при использовании формулы (5).

Преобразуем вначале уравнение (11), для него воспользуемся формулой (12). Учитывая, что $F_{\text{м}} = (1-A_2)F_2^{\downarrow}$, и сравнивая правые части этого выражения и (12), получим

$$F_2^{\downarrow} = \frac{TF_1^{\downarrow}}{1-AA_2}. \quad (15)$$

Подставляя (1-5) в (11), найдем

$$F_{\text{н}} = b_{12} = B_1 - B_2 = KF_1^{\downarrow} + KA_2F_2^{\downarrow}, \quad (16)$$

но, используя выражение (1) для альбедо A_2 , получим

$$b_{12} = B_1 - B_2 = KF_1^{\downarrow} + KF_2^{\uparrow} = K(F_1^{\downarrow} + F_2^{\uparrow}). \quad (17)$$

Выражение (17) есть не что иное, как уже написанное нами выражение (7). Далее, выражение (15) перепишем с учетом (1) в виде

$$F_2^{\downarrow} = T F_1^{\downarrow} + AF_2^{\uparrow}. \quad (18)$$

И наконец, умножая уравнение (15) на TA_2 и вычитая его из выражения (10), получим $F_1^{\uparrow} = AF_1^{\downarrow} + TA_2F_2^{\downarrow}$; учитывая опять (1), имеем

$$F_1^{\uparrow} = A F_1^{\downarrow} + TF_2^{\uparrow}. \quad (19)$$

Итак, мы получили уравнение (17), совпадающее с выражением (7) для вычисления коэффициента K , и два уравнения (18) и (19) для нахождения коэффициентов A и T .

2. Точный расчет переноса излучения в плоской модели атмосферы

Прежде чем записывать решение указанной выше системы уравнений, покажем, что они могут быть получены и из точной теории. Фактически, искомые нами коэффициенты A и T совпадают с соответствующими параметрами при решении уравнений переноса излучения в плоской модели атмосферы при «черном дне», т. е. при отсутствии подсветки снизу (или, что то же самое, при $A_2 = 0$). В случае $A \neq 0$ запишем

$$F_1^{\uparrow} = \tilde{A} F_1^{\downarrow} \text{ и } F_2^{\downarrow} = \tilde{T} F_1^{\downarrow}. \quad (20)$$

Известно (например, см. 7), что \tilde{A} и \tilde{T} связаны с A и T соотношениями

$$\tilde{A} = A + \frac{A_2T^2}{1-A_2A} \text{ и } \tilde{T} = \frac{T}{1-A_2A}. \quad (21)$$

В таком случае, используя (20) и (21), получим

$$\left. \begin{aligned} F_2^\downarrow &= T F_1^\downarrow / (1 - A_2 A) \\ F_1^\uparrow &= A F_1^\downarrow + \frac{A_2 T^2}{1 - A_2 A} F_1^\downarrow \end{aligned} \right\}. \quad (22)$$

Используя первое уравнение (22) и учитывая определение альbedo поверхности A_2 (1), напишем

$$F_2^\uparrow = A F_2^\downarrow = \frac{A_2 T}{1 - A_2 A} F_1^\downarrow. \quad (23)$$

Подставляя, наконец, (23) в (22), получим:

$$\left. \begin{aligned} F_2^\downarrow &= T F_1^\downarrow + A F_2^\uparrow \\ F_1^\uparrow &= A F_1^\downarrow + T F_2^\uparrow \end{aligned} \right\},$$

т.е. уравнения, полностью совпадающие с (18) и (19).

3. Использование закона сохранения энергии

Система уравнений (18) и (19) может быть написана без выполнения каких-либо расчетов на основе закона сохранения энергии. Действительно, по определению коэффициентов A и T и с учетом выполнения условий закона сохранения энергии могут быть написаны выражения

$$\left. \begin{aligned} F_2^\downarrow &= T F_1^\downarrow + A F_2^\uparrow \\ F_1^\uparrow &= A F_1^\downarrow + T F_2^\uparrow \end{aligned} \right\}, \quad (24)$$

которые совпадают с полученными выше уравнениями (18) и (19).

Итак, резюмируя приведенные выше три способа вывода системы уравнений (24), следует отметить, что:

а) метод последовательного разделения и последующего сложения компонент потоков излучения позволяет проиллюстрировать физические процессы, происходящие при рассматриваемом переносе коротковолнового излучения в облачном слое, а также сформулировать те предположения о свойствах слоя, которые при этом приходится вводить, но этот метод оказывается наиболее громоздким;

б) мы воспользовались в п. 2 лишь окончательными результатами (см. (21) в п. 2) точного расчета переноса коротковолнового излучения в плоской модели атмосферы, для получения которых должны быть выполнены определенные преобразования; следует также отметить, что соотношения (21) были получены при решении задачи, не совпадающей полностью с поставленной в настоящей работе (см. [7]), поэтому применимость их для решения рассматриваемой задачи становится очевидной ввиду полного совпадения окончательных выражений;

в) соотношения (24) пишутся сразу, без каких-либо выводов, как следствие закона сохранения энергии; специалисты по теории переноса излучения часто относятся с явным пренебрежением к двухпоточковому рассмотрению, называя его «двухпоточковым приближением» и считая его во всех случаях приближенным методом; выше убедительно показано, что это является заблуждением.

4. Выражения для коэффициентов A , T и K

Разрешая написанную систему уравнений относительно A и T , получим

$$A = \frac{F_1^\downarrow F_1^\uparrow - F_2^\downarrow F_2^\uparrow}{(F_1^\downarrow)^2 - (F_2^\downarrow)^2}, \quad (25)$$

$$T = \frac{F_1^\downarrow F_2^\downarrow - F_1^\uparrow F_2^\uparrow}{(F_1^\downarrow)^2 - (F_2^\downarrow)^2}. \quad (26)$$

Укажем на возможную другую форму выражений для A и T . Рассмотрим вначале консервативный перенос излучения ($K = 0$). В этом случае $T_0 = 1 - A_0$ и из (24) получим

$$\begin{aligned}\Delta F^{\uparrow} &= F_1^{\uparrow} - F_2^{\uparrow} = A_0 (F_1^{\downarrow} - F_2^{\uparrow}), \\ \Delta F^{\downarrow} &= F_1^{\downarrow} - F_2^{\downarrow} = A_0 (F_1^{\downarrow} - F_2^{\uparrow}).\end{aligned}\quad (27)$$

Здесь у A и T написан индекс «0» для указания того, что соответствующая величина относится к случаю консервативного переноса излучения. Разность написанных равенств (27) дает тривиальное для рассматриваемого случая тождество $\Delta F^{\uparrow} - \Delta F^{\downarrow} = B_1 - B_2 \equiv 0$.

Для нахождения A_0 может быть использовано любое из написанных уравнений, так как они тождественны ($\Delta F^{\downarrow} \equiv \Delta F^{\downarrow}$ в случае консервативного переноса излучения); однако с целью уменьшения случайной погрешности вычислений A_0 (считается, что измерения всех четырех потоков независимы) лучше ее находить, предварительно просуммировав написанные выражения

$$A_0 = \frac{1}{2} \frac{\Delta F^{\downarrow} + \Delta F^{\uparrow}}{F_1^{\downarrow} - F_2^{\uparrow}}. \quad (28)$$

В общем случае ($K \neq 0$), подставляя в уравнения (20) равенство (6), получим также после элементарных преобразований

$$\begin{aligned}\Delta F^{\uparrow} &= A (F_1^{\downarrow} - F_2^{\uparrow}) - K F_2^{\uparrow}; \\ \Delta F^{\downarrow} &= A (F_1^{\downarrow} - F_2^{\uparrow}) + K F_1^{\downarrow}.\end{aligned}\quad (29)$$

Вычитая эти уравнения одно из другого, получим уже известное нам выражение (7). Складывая их (как это делалось выше), найдем

$$A = \frac{1}{2} \frac{\Delta F^{\downarrow} + \Delta F^{\uparrow} - K(F_1^{\downarrow} - F_2^{\uparrow})}{F_1^{\downarrow} - F_2^{\uparrow}} = A_0 - \frac{K}{2}. \quad (30)$$

Полученное соотношение (30) физически может быть легко понято.

Для практических вычислений K , A и T (без применения ЭВМ) удобнее пользоваться последними формулами в следующем порядке: а) находим K по формуле (7); б) находим A по формулам (28) и (30); в) находим $T = 1 - K - A$. Применение выведенных соотношений для интерпретации и анализа конкретных экспериментальных данных описано на стр. 83–91 этого же номера журнала.

Автор приносит искреннюю благодарность доктору физ.-мат. наук А.К. Колесову за весьма полезные обсуждения настоящей статьи.

1. Биненко В.И., Васильев О.Б., Гришечкин В.С. и др. Полный радиационный эксперимент. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 240 с.
2. Кондратьев К.Я., Биненко В.И. Влияние облачности на радиацию и климат. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 240 с.
3. Фейгельсон Е.М., Краснокутская Л.Д. Потоки солнечного излучения и облака. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 158 с.
4. Гришечкин В.С., Мельникова И.Н. // Радиационное использование природных ресурсов и охрана окружающей среды. Вып. 12, Л.: Изд. Политех, ин-та, 1989. С. 60–67.
5. Stokes G. G. // Proc. Roy. Soc. 11. 1862. P. 545. Mathem. and Phys. Papers of sir G. Stokes. Vol. 4. Cambridge. Univ. Press. London, 1904. P. 145.
6. Пикичян О.В. Принцип инвариантности в задачах сложения слоев произвольных свойств // Сообщ. Бюроканской obs. Вып. V. 1984. С. 5–16.
7. Соболев В.В. Рассеяние света в атмосферах планет. М.: Наука, 1972. 335 с.

Ленинградский госуниверситет

Поступила в редакцию
15 сентября 1991 г.

O. V. Vasil'ev. **Determination of Spectral Behaviours or the Optical Characteristics of Cloud Layers.**

This paper deals with the analysis of different techniques for deriving expressions to calculate spectral behaviours of the cloud layers' transmission, reflectivity, and absorption of optical radiation taking into account the contribution of radiation reflected from the underlying surface to the clouds illuminated.