

Пределы применимости теории рассеяния при расчетах в облаке

И.Н. Мельникова

*Научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН
197110, Санкт-Петербург, ул. Корпусная, 18
E-mail: Irina.Melnikova@pobox.spbu.ru*

В последние 15 лет обнаружались экспериментальные факты, касающиеся радиационных характеристик облаков, противоречащие модельным результатам. А именно: увеличенное поглощение коротковолновой радиации в облаках по сравнению с безоблачной атмосферой Земли («аномальное поглощение»); существенное различие оптических параметров слоистой облачности, восстановленных из самолетных, наземных и спутниковых радиационных измерений, и величин, рассчитываемых с привлечением теории рассеяния; значительное искажение форм полос поглощения в облаках по сравнению с безоблачной атмосферой.

В статье проанализированы возможные физические причины обнаруженных разногласий между результатами расчетов и измерений.

Введение

Рассмотрим облако как рассеивающую мутную среду. В облаке находятся частицы, по меньшей мере, 3-х различных сортов: молекулы атмосферных газов (точнее флуктуации плотности молекулярной атмосферы), аэрозольные частицы и капли облака. Размеры частиц различного сорта и расстояния между частицами сильно отличаются, и поэтому не выполняется важное неравенство, необходимое для применения теории рассеяния. Расстояния между частицами можно оценить как: 0,5–1,0 мкм для флуктуаций плотности; 100–500 мкм для аэрозольных частиц; 10000 мкм для капель. Размер элементарного объема (который рассматривается как «частица» в теории рассеяния и в котором должен происходить один акт взаимодействия [1]) также различен для разных сортов частиц: для капель облака размером 10–20 мкм элементарный объем составляет 1000–8000 мкм³, для флуктуаций плотности воздуха размером 10⁻² мкм [2] элементарный объем – 10⁻⁶ мкм³, для аэрозольных частиц размером 0,1–1,0 мкм элементарный объем – 10⁻³–1 мкм³. Таким образом, размеры элементарных объемов соответствующие частицам разного сорта, различаются на 6–10 порядков!

В то же время, соотношения между размером частиц (элементарных объемов) и расстояниями между ними выражают те физические допущения, в которых строится теория рассеяния, а именно: отсутствие интерференции волн, излучаемых разными частицами (приближение независимых частиц) и освещение всех частиц (элементарных объемов) одинаковым первичным пучком света (т.е. принимается приближение однократного рассеяния).

Оценки параметров для трех компонентов облачной среды показывают, что необходимые неравенства для применения теории рассеяния в облачной среде не выполняются. А именно: расстояния между молекулами и аэрозолями меньше размеров капель. В таком случае сведение задачи к рассеянию на одной частице невозможно, и следует рассматривать многократное рассеяние в элементарном объеме.

Измерения коротковолновой солнечной радиации в земной атмосфере указывают на увеличенное поглощение коротковолновой радиации в облаках по сравнению с безоблачной атмосферой Земли. Анализ оптических параметров слоистой облачности, восстановленных из самолетных, наземных и спутниковых радиационных измерений, показал существенное отличие величины альbedo однократного рассеяния от модельных значений, рассчитываемых с привлечением теории рассеяния, и спектральную зависимость оптической толщины.

Теория рассеяния света в многокомпонентной мутной среде

При построении оптической модели облака и расчетах сечений взаимодействия в облаке обычно применяются правила сложения. Правила сложения коэффициентов (сечений) рассеяния

и поглощения и индикатрис рассеяния (сечений направленного рассеяния) для частиц различного сорта в рассеивающей среде, были получены в теории рассеяния в предположении о том, что частицы взаимодействуют с излучением независимо друг от друга и освещаются одинаковым световым потоком, не затеняя друг друга [1, 3]. С точки зрения волновой оптики, площади (сечения) не должны перекрывать друг друга внутри рассматриваемого элементарного объема, т.е. суммарная площадь их проекций на плоскость, перпендикулярную направлению распространения излучения должна быть равна сумме площадей всех частиц. Это будет с высокой точностью выполняться, если:

1. Расстояния между частицами много больше линейных размеров их сечений взаимодействия, т.е., огрубляя, много больше размеров частиц, что приводит к условию $n \ll 1/a^3$, где n – счетная концентрация частиц, a – размер частицы;

2. Второе условие независимости взаимодействия солнечного излучения с частицами среды вытекает из положений волновой оптики, согласно которому независимость взаимодействия осуществляется, если расстояния между частицами много больше длины волны излучения λ , что приводит к неравенству $n \ll 1/\lambda^3$.

3. Принимается также приближение однократного рассеяния так, чтобы все частицы освещались одинаковым первичным пучком света, т.е. малый объем среды выбирается так, чтобы в нем происходил *один* акт рассеяния.

При реальных счетных концентрациях молекул воздуха и аэрозольных частиц в атмосфере Земли условие $n \ll 1/a^3$ всегда выполняется, а вот условие $n \ll 1/\lambda^3$, справедливое в коротковолновой области спектра для аэрозольных частиц, для молекул атмосферных газов оказывается нарушенным. Однако полагают что, поскольку реально свет рассеивается не на молекулах, а на флуктуациях плотности воздуха этим нарушением можно пренебречь [2].

Однако происходит нарушение указанных условий в случае присутствия в воздухе крупных частиц (например, облачных капель). Действительно, учитывая большие размеры капли (десятки и даже сотни мкм), очевидно, что вблизи капли находится значительное количество молекул атмосферных газов (флуктуаций плотности) и мелких аэрозольных частиц, для которых нарушены оба условия. Именно поэтому в облачной атмосфере вопрос о точности применимости “правил сложения” нуждается в дальнейшем исследовании.

Определяющим размером, с которым сравниваются все прочие, является длина волны падающего излучения. В видимой области примем для оценок $\lambda = 0,5 \mu\text{м}$. В монографии [3] рассматриваются следующие характерные размеры в среде:

1) расстояние между молекулами d внутри флуктуации плотности в молекулярной атмосфере (или между молекулами внутри капли) удовлетворяет условию $d \ll \lambda$;

2) размеры рассеивающих частиц: флуктуации плотности молекулярной атмосферы $a \sim 10^{-2} - 10^{-1}$ мкм; аэрозольной частицы $a \sim 0,1 - 1,0$ мкм и капли облака $a \sim 10 - 20$ мкм;

3) расстояние между частицами l (флуктуациями плотности, аэрозольными частицами и каплями облака);

4) размер макро объема среды (в нашем случае размер облака) $Z \sim 5,0 \cdot 10^8$ мкм $\gg \lambda$. Далее в [3] вводятся четыре безразмерных параметра:

$x_1 = d/\lambda$ – описывает внутреннюю структуру частицы (флуктуации плотности, аэрозольной частицы или капли);

$x_2 = a/\lambda$ – описывает рассеивающие свойства частицы;

$x_3 = l/\lambda$ – описывает структуру мутной среды;

$x_4 = Z/\lambda$ – описывает рассеивающие свойства всего объема среды.

При выводе соотношений теории рассеяния для среды, состоящей из частиц одного сорта, предполагается выполнение следующих неравенств:

$$x_1 < x_2 < x_3 < x_4, \text{ а также: } x_1 \ll 1; x_4 \gg 1. \quad (1)$$

Безразмерный параметр x_2 принимает следующие значения для флуктуации плотности, аэрозольной частицы или капли: $x_2 \sim 0,02, 0,2 - 2,0$ и $20 - 200$ соответственно для каждого компонента.

Расстояния между частицами можно оценить следующим образом: 0,5–1,0 мкм для флуктуаций плотности, 100–500 мкм для аэрозольных частиц [4] и 10000 мкм для капель, что приводит к величинам параметра $x_3 \sim 1,0-10$; 200–1000 и 20000 соответственно.

Отсюда очевидно, что если принять характерные размеры $x_3 \sim 1,0$ для флуктуаций плотности и $x_2 \sim 20-200$ для капель, то соотношения (1) не выполняются в облачной среде: x_2 для капель много больше x_3 для флуктуаций плотности молекулярной атмосферы и одного порядка с величиной x_3 для аэрозольных частиц. Как указано в [3], **сведение задачи к рассеянию на одной частице невозможно в случае $x_2 \approx x_3$, и тогда следует рассматривать многократное рассеяние**, причем в окончательные соотношения должен войти характерный размер всей среды Z .

В монографии [3] приводится также соотношение для оптической толщины среды, выраженной через характерные размеры:

$$\tau \approx \frac{a^2 Z}{l^3} = \frac{x_2^2 x_4}{x_3^3}, \quad (2)$$

из которого, принимая приведенные выше оценки для характерных размеров, получаем значение оптической толщины $\tau \sim 20-50$, которое оказывается весьма типичным для облачных слоев [4, 5], что свидетельствует о нашем корректном выборе характерных размеров частиц.

Таким образом, очевидно, что в облачной среде нарушены базовые соотношения между характерными размерами рассеивающих частиц разного сорта, которые поставлены в основу создания теории рассеяния света. Поэтому использование напрямую результатов расчетов оптических параметров согласно теории рассеяния и, особенно, суммирование оптических параметров разных компонентов для построения модели облачности, по меньшей мере, некорректно.

Перенос излучения в многокомпонентной среде

Рассмотрим теперь эту задачу с точки зрения переноса излучения в многокомпонентной среде. Известно, что вследствие многократного рассеяния в оптически толстом облаке среднее количество столкновений фотона, проходящего слой большой оптической толщины, при консервативном рассеянии пропорционально τ_0^2 [6, 7] (для отраженных фотонов среднее число рассеяний пропорционально τ_0 [7]). Таким образом, путь фотона в облаке сильно возрастает по сравнению с безоблачной атмосферой, и количество столкновений с молекулами воздуха и аэрозольными частицами увеличивается, что усиливает вклад молекулярного и аэрозольного рассеяния и поглощения. Поглощение радиации изымает часть фотонов из этого процесса и частично ослабляет эффект воздействия многократного рассеяния. Таким образом, следует учитывать, что облачный слой не просто накладывается на молекулярную атмосферу, а воздействует на процесс рассеяния и поглощения на молекулах и аэрозольных частицах, усиливая его. Увеличение молекулярного поглощения, вызванное удлинением пути фотонов в облаке из-за многократного рассеяния, рассмотрено в работах [8–12]. Те же соображения справедливы для рассеяния и поглощения радиации атмосферными аэрозолями, частицы которых находятся между каплями облака. Понятно, что теория многократного рассеяния радиации и уравнение переноса излучения правильно учитывают все процессы рассеяния и поглощения только в том случае, если они корректно приняты во внимание в модели среды, рассеивающей и поглощающей радиацию. Обычно, в качестве модели выбираются средние значения исходных параметров для элементарного объема рассеивающей среды, и далее производится решение уравнения переноса тем или иным методом теории переноса излучения (например, [6, 13]). Но во многих физических задачах на начальном этапе решения нельзя проводить усреднение параметров для элементарного объема среды, тем более что масштабы элементарного объема существенно различны для каждого из компонентов среды. Наличие в уравнении переноса излучения интегральной части, учитывающей вклад в рассматриваемом направлении рассеяния излучения, приходящего с других направлений, предполагает сплошность рассеивающей среды (элементарного объема, рассматриваемого при феноменологическом выводе

уравнения переноса). В противном случае подынтегральная функция в уравнении имеет разрывы и возникает вопрос о существовании этой интегральной части. Так как малый объем существенно различен для частиц разного размера, рассеивающая свет многокомпонентная среда оказывается не непрерывной.

Таким образом, необходимо рассматривать задачу корректного описания процесса рассеяния в среде из частиц (элементарных объемов) и расчета оптических параметров среды, включая учет многократного рассеяния радиации в элементарном объеме многокомпонентной среды. Очевидно, что феноменологическое уравнение переноса излучения для однокомпонентной среды неадекватно процессам переноса радиации в реальных облаках. Поэтому ниже предложим эмпирический способ перехода от значений оптических параметров α и k , которые рассчитываются из теории рассеяния без учета нарушения соотношений между характерными размерами в среде и многократного рассеяния, к полученным из наблюдений "эффективным" значениям $\tilde{\alpha}$ и \tilde{k} .

Результаты, полученные из данных наблюдений

В работах [14-18] представлены спектральные зависимости оптических параметров облачных слоев в земной атмосфере (оптической толщины, альbedo однократного рассеяния и объемных коэффициентов рассеяния и поглощения), полученные для слоистой облачности из результатов самолетных и наземных спектральных измерений коротковолновой солнечной радиации (спектральный диапазон $\Delta\lambda=0,33-0,95$ мкм), а также из обработки спутниковых изображений в трех узких спектральных интервалах с центрами на длинах волн 443, 670 и 865 нм. Описания условий экспериментов приводились неоднократно (например, таблицы 3.2-3.4 в книге [19]). Оптические параметры слоистой облачности, восстановленные из данных измерений солнечной радиации с борта самолета, приведены на рис. 1а и б в терминах объемных коэффициентов рассеяния α и поглощения k .

Результаты, полученные из самолетных экспериментов, показывают значительное поглощение: коэффициент поглощения $k \sim 0,05-0,15 \text{ км}^{-1}$ и альbedo однократного рассеяния $\omega_0 \sim 0,985-0,999$ [14-17]. Значения альbedo однократного рассеяния, полученные из спутниковых данных, для большинства пикселей оказались близки к значениям, полученным из самолетных и наземных измерений. Из всех рассмотренных спутниковых изображений только для нескольких десятков пикселей значения альbedo однократного рассеяния оказались равными единице. С другой стороны, модельные расчеты с привлечением теории рассеяния дают значения $\omega_0=0,999999$ [20-22], соответствующие значительно более слабому поглощению по сравнению со значениями $\omega_0 \sim 0,985-0,999$.

Оптическая толщина τ_0 и коэффициент рассеяния $\alpha(\lambda)$, полученные из самолетных радиационных измерений, демонстрируют явно выраженную спектральную зависимость. Результат обработки 7 спутниковых изображений, содержащих по 500-600 пикселей, также показал явную спектральную зависимость оптической толщины [18]. Однако, из теории рассеяния света следует, что объемный коэффициент рассеяния (и связанная с ним величина оптической толщины τ_0) для капель облака (частиц размером $\sim 5-10$ мкм) не должен зависеть от длины волны в рассматриваемом спектральном интервале [1, 3].

В дополнение к рассмотренным выше результатам, восстановленным из радиационных измерений, напомним данные, полученные японскими исследователями [23]: оптическая толщина в ближней ИК-области спектра оказалась в два раза меньше, чем в видимой области. В работе [24] из измерений УФ радиации в условиях обычной протяженной облачности восстанавливалась оптическая толщина методом подбора значений. Были получены весьма большие значения оптической толщины в УФ диапазоне – около 300-500, что согласуется с нашими результатами для видимых длин волн и увеличением коэффициента рассеяния при уменьшении длины волны. С точки зрения теории рассеяния электромагнитной радиации в мутной среде, состоящей из крупных частиц (как капли облака) коэффициент рассеяния и оптическая толщина не зависят от длины волны.

В работах [8-10] измерялась солнечная радиация с высоким спектральным разрешением в условиях облачной атмосферы, и исследовались полосы поглощения кислорода у длины волны 0,762 мкм. Из анализа результатов измерений было выявлено значительное искажение форм полос поглощения в облаках по сравнению с безоблачной атмосферой.

Заключение

В последнюю декаду прошлого столетия появилось множество публикаций, касающихся увеличения поглощения солнечной радиации в облачной атмосфере по сравнению с безоблачной, основанные на совокупной обработке данных измерений интегральной солнечной радиации с поверхности земли и со спутников. Обнаруженный эффект получил название «аномального поглощения коротковолнового излучения в облаке», потому что противоречил модельным представлениям о процессах взаимодействия солнечной радиации и капель облака. Однако, во многих случаях в облаке присутствуют частицы атмосферных аэрозолей, причем как обводняющихся и включенных в капли, так и не смачиваемых и находящихся между каплями.

Экспериментальные исследования (спутниковые, самолетные и наземные) показали более значительное, чем предполагалось ранее, содержание углеродной и минеральной составляющей в атмосферных аэрозолях и их большой вклад в формирование радиационного режима облачной атмосферы. Роль атмосферных аэрозолей, поглощающих солнечную радиацию и находящихся вне капель облака, до сих пор недооценивалась при исследовании взаимодействия солнечной радиации и облачности из-за некорректного учета взаимодействия различных компонентов в облачной атмосфере с солнечной радиацией и не учета влияния многократного рассеяния радиации каплями облака. Можно полагать, что основной причиной аномального коротковолнового поглощения радиации в облаках, которое указывает на расхождение теоретических и экспериментальных данных, является некорректное применения теории рассеяния к расчету оптической модели облачной среды, и многократное рассеяние радиации в облачной среде при наличии поглощающих свет аэрозольных частиц между каплями облака. При построении оптической модели облака необходимо корректно учитывать объемные коэффициенты поглощения и рассеяния не только капель, но и других компонентов облачного слоя (молекул и аэрозольных частиц), учитывая нарушение в облачной среде соотношений между характерными размерами теории рассеяния.

Эффект аномального поглощения значительно меняет сложившиеся представления о тепловом балансе атмосферы. В этой связи представляется необходимым учитывать весьма существенное нагревание атмосферы коротковолновой солнечной радиацией в облачной атмосфере при проведении климатических расчетов и при построении прогнозов изменений климата.

Литература

1. *Ван де Хюлст*. Рассеяние света малыми частицами // М.: Иностр. лит., 1961. 536 с.
2. *Эйнштейн А.* К теории броуновского движения. Теория опалесценции в однородных жидкостях и жидких смесях вблизи критического состояния. В кн.: Альберт Эйнштейн. Собрание сочинений Т. 3 // М.: Наука, 1966 (оригинальные работы опубликованы 1908, 1910).
3. *Шифрин К.С.* Рассеяние света в мутной среде // М.: Госиздат технико-теоретической лит., 1951. 288 с.
4. *Облака и облачная атмосфера.* Справочник под ред. И.П. Мазина и А.Х. Хргиана // Л.: Гидрометеиздат, 1989. 648 с.
5. *Радиационные характеристики атмосферы и земной поверхности,* под ред. К.Я. Кондратьева // Л.: Гидрометеиздат, 1969. 564 с.
6. *Минин И.Н.* Ленинградская школа теории переноса излучения // *Астрофизика.* АН Арм. ССР, 1981. Т. 17. Вып. 3. С. 585-618.

7. Яновицкий Э.Г. Рассеяние света в неоднородных атмосферах // Киев: Наукова думка, 1995. 400 с.
8. Дианов-Клоков Б.Г., Гречко Е.И., Малков Г.П. Самолетные измерения эффективной длины пробега фотонов по отраженной и пропущенной облаками радиации в полосе O_2 0,76мкм // Изв. АН. СССР, 1973. Физика атмосферы и океана. Т. 9. № 5. С. 524-537.
9. Pfeilsticker, K., F. Erle, O. Funk, L. Marquard, T. Wagner, U. Platt. Optical path modification due to tropospheric clouds: Implications for zenith sky measurements of stratospheric gases. // Journal of Geophysical Research, V. 103, No. D19, 1998, P. 35323-25335.
10. Pfeilsticker, K. First geometrical path length probability density function derivation of the skylight from high-resolution oxygen A-band spectroscopy. 2. Derivation of the Levy index for the skylight transmitted by midlatitude clouds // Journal of Geophysical Research, V. 104, No. D43, 1999, P. 4101-4116.
11. Wagner, T., F. Erle, L. Marquard, C. Otten, K. Pfeilsticker, T. Senne, J. Stutz, U. Platt. Cloudy sky optical paths as derived from differential optical absorption spectroscopy observations // Journal of Geophysical Research, V. 103, No. D19, 1998, P. 25307-25321.
12. Melnikova I. Aerosols and molecules within cloudy atmosphere // IRS'2004. Proceedings. Current problems in Atmospheric Radiation. Proceedings of the International Radiation Symposium, 2005, P. 107-110.
13. Минин И.Н. Теория переноса излучения в атмосферах планет // М.: Наука, 1988. 264 с.
14. Мельникова И.Н. Поглощение света в облачных слоях // Сб. "Проблемы физики атмосферы". Л.: ЛГУ, 1989. Вып. 20. С. 18-25.
15. Мельникова И.Н. Спектральные оптические параметры облачных слоев. Приложение к экспериментальным данным. Часть II // Оптика атмосферы, 1992. № 4. С. 178-185.
16. Kondratyev K.Ya., Binenko V.I., Melnikova I.N. Absorption of solar radiation by clouds and aerosols in the visible wavelength region // Meteorology and Atmospheric Physics V. 0/319, P. 1-10.
17. Melnikova I.N., Mikhailov V.V. Spectral scattering and absorption coefficients in strati derived from aircraft measurements. // Journal of the Atmospheric Sciences, 1994. V. 51. P. 925-931.
18. Мельникова И.Н., Накаджима Т. Альbedo однократного рассеяния и оптическая толщина слоистых облаков, полученных из измерений отраженной солнечной радиации прибором «ПОЛДЕР» // Исследования Земли из космоса, 2000. №3. С. 1-16.
19. Melnikova I., A. Vasilyev, Short-wave solar radiation in the Earth atmosphere. Calculation. Observation. Interpretation. // Heidelberg, Springer-Verlag GmbH&Co.KG, 2004, 310 p.
20. Grassl H. Albedo reduction and radiative heating of clouds by absorption aerosol particles // Beitrage zur Physik der Atmosphaere, V. 48, 1975, P. 199-209.
21. Stephens G.L. Optical properties of eight water cloud types. Technical Paper of CSIRO // Aspendale, Australia, Atmosph. Phys. Division. 1979, No. 36, P. 1-35.
22. King M. D., Si-Chee Tsay, S. Platnick. In situ observations of the indirect effects of aerosols on clouds // in book "Aerosol forcing of climate" ed. by R.J. Charlson and J. Heitzenberg. 1995, J.Wiley & Sons Ltd, P. 227-248.