

ОБ ОБЛАСТИ ПРИМЕНИМОСТИ АСИМПТОТИЧЕСКИХ ПРИБЛИЖЕНИЙ ТЕОРИИ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ОБЛАКОВ С ПРИМЕСЯМИ И ДЫМОВЫХ ШЛЕЙФОВ

Т.А. Сушкевич, Е.В. Владимирова, А.К. Куликов, С.В. Максакова,
И.Н. Мельникова, С.А. Стрелков

*Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН,
125047 Москва, Миусская пл., д. 4
E-mail: tamaras@keldysh.ru*

Рассматривается задача переноса излучения в оптически толстых конечных плоских слоях, описывающих, в частности, облачность, аэрозольные выбросы, дымовые шлейфы, образующиеся под воздействием обширных пожаров (лесных, торфяных, степных, техногенных) и природных катастроф (вулканы и т.п.). Итерационным методом характеристик рассчитаны поля излучения внутри и вне слоя, на который падает внешний мононаправленный поток, для большого набора оптических моделей с разными толщинами слоев, индикатрисами рассеяния, альбедо акта однократного рассеяния, отвечающими консервативному рассеянию, слабому, среднему и сильному поглощению. Для тех же моделей проведены расчеты на основе асимптотических решений. Исследовано установление по толщине слоя асимптотического режима для восходящих и нисходящих потоков, а также угловых распределений и азимутальной симметрии. Проведен численный анализ области применимости приближенных аналитических асимптотических решений.

Введение

Рассматривается краевая задача переноса излучения в оптически толстых конечных плоских слоях, описывающих, в частности, облачность, аэрозольные выбросы, дымовые шлейфы, образующиеся под воздействием обширных пожаров (лесных, торфяных, степных, техногенных), или атмосферу с оптически толстыми слоями “примесей”. Для таких сред пространственные и угловые распределения излучения внутри слоя, а также отраженное и пропущенное излучение формируются в результате многократного рассеяния излучения при наличии поглощения.

Первые методические исследования, алгоритмы и программы расчета переноса излучения в конечных оптически толстых облачных слоях были реализованы Т.А. Сушкевич еще в 1965 году. В 60-е – 70-е годы активно развивались приемы ускорения сходимости последовательных приближений в итерационных численных методах решения краевой задачи теории переноса (Т.А. Гермогенова и Т.А. Сушкевич, Р.П. Федоренко, В.Я. Гольдин и др., Г.И. Марчук и В.И. Лебедев, Ш.С. Николайшвили, В.И. Журавлев, А.В. Волощенко). Широкое применение получили теоретические результаты по проблеме Милна и асимптотической теории переноса (М.В. Масленников и М.Г. Кузьмина, Т.А. Гермогенова и Н.В. Коновалов, Л.М. Романова, Г.А. Михайлов, Г.В. Розенберг, В.В. Соболев, В.В. Иванов, И.Н. Минин, Э.Г. Яновицкий, И.Н. Мельникова, I. Kuscer, M. King и другие).

Как известно из теории, в оптически толстом слое на достаточно большой оптической глубине вследствие многократного рассеяния устанавливается асимптотический, или диффузный, радиационный режим. Из физических соображений вытекает, что свойства диффузного режима заключаются в следующем: роль прямой радиации (прошедшей без рассеяния) пренебрежимо мала по сравнению с ролью рассеянной радиации; интенсивность радиации не зависит от азимута; относительное угловое распределение интенсивности не зависит от оптической глубины.

Для конечного рассеивающего слоя большой оптической толщины получаются аналитические решения, выражающиеся асимптотическими формулами теории переноса излучения. Авторы таких решений иногда прямо указывают, а иногда умалчивают, что погрешности аналитических решений превышают 10% – 20% и более для отраженного излучения и в слое, примыкающем к верхней границе, и возрастают с ростом поглощения.

Погрешности неучета азимутальной зависимости ранее корректно не исследовались. Учет азимутальной зависимости через короткие (3–6 членов) ряды Фурье – теоретически и практически некорректная вычислительная задача. Н.В. Коновалов подробно расписал, но не реализовал формулы для азимутальной задачи. И.Н. Мельникова в своем подходе учитывает по приближенным аппроксимационным аналитическим формулам несколько азимутальных гармоник для определения угловой структуры отраженного излучения от облачности: известно, что это излучение анизотропно и его описание через альбедо для задач аэрокосмического дистанционного зондирования является весьма грубым. Приближенный учет азимутальной зависимости отраженного излучения при слабом поглощении заложен в алгоритм обработки данных с космического аппарата MODIS (M. King, Kuo-Nan Liou и др.).

Наш подход к решению краевой задачи теории переноса излучения в конечных оптически толстых однородных и неоднородных слоях с тремя переменными (z - высота, μ – косинус зенитного угла и φ – азимут; $s = (\mu, \varphi)$) – это итерационный метод характеристик с процедурами ускорения сходимости итераций по кратности рассеяния и учета сильной анизотропии рассеяния (ИМХ). Это единственный детерминированный численный метод без предварительного разложения решения в ряд по азимутальным гармоникам, который позволяет на современных многопроцессорных вычислительных системах (суперкомпьютерах) с большими ресурсами оперативной и внешней памяти проводить эталонные расчеты и исследование угловых и пространственных распределений не только отраженного и пропущенного излучения, но и на любой глубине внутри неоднородного слоя при любом уровне поглощения.

Постановка задачи

Одномерные модели переноса солнечного излучения в конечных оптически толстых и нетолстых однородных и неоднородных слоях и двухсредних системах типа "атмосфера–облачность", "атмосфера–гидрометеоры", "атмосфера–облако газовой–аэрозольных выбросов", "атмосфера–дымовый шлейф" и т.п., т.е. в атмосфере со слоями примесей, разрабатываются нами на основе двух подходов.

В первой модели интенсивность излучения $\Phi(z, s)$ находится как решение задачи

$$\mu \frac{\partial \Phi(z, s)}{\partial z} + \sigma(z) \Phi(z, s) = \int_{\Omega} \Phi(z, s') \gamma(z, s, s') ds' ,$$

$$\Phi|_{z=0, s \in \Omega^+} = \pi S_{\lambda} \delta(s - s_0), \quad \Phi|_{z=H, s \in \Omega^-} = \int_{\Omega^+} q(s, s') \Phi(H, s') ds' .$$

Расчет осуществляется итерационным методом характеристик с процедурами ускорения сходимости итераций (ИМХ) для плоской системы с двумя подслоями по высоте: нижний слой – облачность или слой с примесями, верхний слой – свободная атмосфера.

Во второй модели решается краевая задача

$$\mu \frac{\partial \Phi(z, s)}{\partial z} + \sigma(z) \Phi(z, s) = \int_{\Omega} \Phi(z, s') \gamma(z, s, s') ds' ,$$

$$\Phi|_{z=0, s \in \Omega^+} = \pi S_{\lambda} \delta(s - s_0), \quad \Phi|_{z=H, s \in \Omega^-} = \int_{\Omega^+} q(s, s') \Phi(H, s') ds' ,$$

$$\Phi|_{z=h, s \in \Omega^-} = \hat{R}_1 \Phi + \hat{T}_2 \Phi, \quad \Phi|_{z=h, s \in \Omega^+} = \hat{R}_2 \Phi + \hat{T}_1 \Phi$$

с внутренней границей между двумя слоями (возможно, с разными радиационными режимами), на которой заданы условия "отражения" и "пропускания" излучения. Угловые и пространственные распределения излучения внутри и вне системы определяются с помощью матричного функционала – оптического передаточно-го оператора через функции влияния каждого из слоев (например, атмосферы и слоя с примесями). Отметим, что во второй модели нижний слой может рассматриваться как конечный или полубесконечный. Функции влияния находятся из краевых задач, аналогичных первой модели, отдельно для каждого подслоя.

Ускоряющие процедуры в ИМХ

- релаксационное ускорение (ускорение сходимости не более чем в два раза);
- за счет введения небольшого "поглощения", начиная с третьей итерации в методе последовательных приближений, через алгоритм учета сильной анизотропии рассеяния;
- не используется метод подобия, а для каждого неоднородного слоя применяется своя процедура выделения сильной анизотропии рассеяния;
- контроль нормировки интегралов столкновений для контроля точности расчетов и недопущения появления "ложного" поглощения или размножения при использовании квадратур в расчетах интегралов столкновений на единичной сфере (контроль за сохранением баланса и точности расчетов).

Оптически толстые слои

Проведено численное исследование установления асимптотического режима и области применимости асимптотического приближения. Итерационным методом характеристик рассчитаны поля излучения внутри и вне слоя, на который падает внешний мононаправленный поток, для большого набора оптических моделей (более 500 расчетных моделей), отличающихся

- направлениями солнечного потока (косинус зенитного угла μ_0 от 1.0 до 0.1),
- оптическими толщинами слоев (τ_0 от 1 до 20),
- индикатрисами рассеяния (изотропная, релеевская, Хенни-Гринштейна со значением параметра анизотропии g от 0.6 до 1),
- альбедо акта однократного рассеяния, отвечающими консервативному рассеянию, слабому, среднему и сильному поглощению (ω_0 от 1 до 0.3).

Для ряда моделей проведены расчеты на основе асимптотических решений (по формулам И.Н. Мельниковой, И.Н. Минина, Э.Г. Яновицкого, Н.В. Коновалова, М. King).

С помощью современных графических и визуальных средств исследовано установление по толщине слоя асимптотического режима для восходящих и нисходящих потоков, а также угловых распределений и азимутальной симметрии. По угловым распределениям внутри системы и на ее границах, полученным итерационным методом характеристик на разностной сетке большой размерности (100 зенитных углов, 91 азимут, 50-100 уровней по глубине), рассчитаны азимутальные гармоники.

Исследован вопрос о применимости и погрешности асимптотических решений уравнения переноса. Ниже приводятся только некоторые иллюстрации (см. Рис. 1 – 4) и некоторые важные выводы проведенного исследования.

1. О пространственных и угловых распределениях интенсивности излучения внутри и на границах оптически толстого слоя:

- имеет место зависимость углового распределения отраженного излучения от толщины слоя, индикатрисы рассеяния, степени поглощения, направления солнечного потока;
- наблюдается зависимость угловой структуры распределения излучения внутри слоя не только от индикатрисы рассеяния и альбедо акта рассеяния, но и от глубины;
- установлено размытие и смещение светового пятна (подтверждение теории);
- определена зависимость отраженного излучения от эффективной толщины слоя, оказывающей заметное влияние, при разных индикатрисах рассеяния, альбедо акта однократного рассеяния, направлениях солнечного потока, на основании которой можно проводить расчеты для слоев с уменьшенной оптической толщиной (для известных моделей облаков с оптической толщиной 64, оказывается достаточно в расчетах ограничить слой на уровне 10-20).

2. Об эффективности применения разложений решения в ряд по азимутальным гармоникам:

- практически все одномерные плоские задачи решаются численными и приближенными аналитическими методами для отдельных азимутальных гармоник с двумя переменными (толщина и зенитный угол);
- практически большинство аналитических и численных методов решения уравнения переноса и приемов ускорения сходимости итераций разработаны и применяются для азимутальных гармоник, т.е. для задач с двумя переменными (толщина и зенитный угол);
- отсутствуют работы по анализу угловых распределений внутри слоя и нет результатов сравнения угловых распределений, получаемых без использования и с использованием нелинейных приемов ускорений (большая часть известных результатов относится к интегральным по углам высотным профилям, например, потоков, плотности и т.п.);
- необходимо использовать известные алгоритмы регуляризации при суммировании ряда азимутальных гармоник, так как имеет место некорректность;
- по глубине слоя заметно меняется азимутальная зависимость интенсивности излучения, для описания которой требуется разное количество азимутальных гармоник на разных глубинах, сильно зависящее от индикатрисы рассеяния и уровня поглощения.

3. О применимости и точности асимптотических приближений для конечных неоднородных оптически толстых слоев:

- все известные подходы к решению задач для неоднородных оптически толстых слоев используют прием сложения однородных слоев через коэффициенты отражения R и пропускания T отдельных однородных слоев, которые рассчитываются по приближенным асимптотическим формулам без азимутальной зависимости; эти подходы имеют низкую точность;
- работающих эффективных методик асимптотических решений задач для неоднородных слоев нет; если бы такие методики были реализованы и исследованы на точность, то был бы получен негативный результат, поскольку погрешность асимптотических приближений для конечных слоев большая, особенно для отраженного излучения и вблизи границы с источником.

4. О новом подходе к моделированию радиационных полей в оптически толстых конечных и полубесконечных слоях на базе модели переноса излучения в двухсредних системах с оптическим передаточным оператором и методом функций влияния

Главное – это разбиение толстого слоя на подслои, для которых можно использовать известные методы, а затем получить суммарное решение. Вводится внутренняя граница, разделяющая слой на две облас-

ти с разным радиационным режимом. В одной области функция влияния рассчитывается, например, как полное решение задачи, а в другой – как асимптотическое решение, или как решение азимутально-симметричной задачи, или как полное решение кинетического уравнения. Суммарное излучение внутри слоя и за его пределами находится с помощью матричного функционала – оптического передаточного оператора, ядрами которого являются функции влияния каждой из областей. В роли коэффициентов отражения и пропускания внутренней границы используются индикатрисы рассеяния.

Этот новый оригинальный подход, сформулированный в рамках универсального линейно-системного подхода, особенно перспективен для изучения процессов трансформации солнечного излучения в двухсредной системе, обмена коротковолновым излучением между атмосферой и слоем с примесями, а также светового режима в слое с примесями, в свободной атмосфере, на границе раздела "свободная атмосфера–слой с примесями". Такой подход особенно эффективен тогда, когда две среды настолько различны, что для моделирования переноса излучения в них приходится использовать разные методы или разные приближения решения кинетического уравнения. Этот же подход эффективен для моделирования угловых и пространственных распределений излучения в оптически толстых слоях (облака, дымы и т.п.), которые можно представить как два подслоя с разными радиационными режимами.

О возможностях нового подхода:

- оптически толстый слой может быть однородным и неоднородным по высоте;
- внутри однородного слоя возможны разные радиационные режимы, которые могут описываться азимутально зависимыми и азимутально независимыми решениями уравнения переноса, неасимптотическими и асимптотическими приближениями и т.п.;
- неоднородный слой (например, атмосфера со слоистым облаком и т.п.) может содержать оптически тонкий слой (свободная атмосфера) и оптически толстый слой (облако, выбросы, дым и т.п.), т.е. слои с различными оптическими параметрами, когда известные методы сложения слоев не применимы;
- суммарное излучение системы находится с учетом наиболее реалистичных оптических характеристик и угловых профилей излучения вблизи границ и на границах слоев;
- можно рассчитывать угловые и пространственные распределения излучения на границах и внутри слоев;
- вводятся функции влияния – инвариантные характеристики подслоев, не зависящие от конкретных структур угловых распределений излучения на границах подслоев;
- в подслоях можно рассчитывать функции влияния разными методами в разных приближениях;
- в подслоях могут быть разностные угловые сетки разной размерности, а переход осуществляется через интегралы столкновения.

Наш подход принципиально отличается от известного метода сложения слоев.

В методе сложения слоев:

- реализуются алгоритмы расчета только для плоских моделей с двумя переменными;
- требуется выполнение принципа инвариантности и факторизации (В.А. Амбарцумян, С. Чандрасекар, В.В. Соболев, Н.Б. Енгибарян и другие);
- R и T – это коэффициенты отражения и пропускания однородных слоев, рассчитываемые чаще всего в приближении однократного рассеяния;
- используется симметрия R и T – одинаковые для нисходящего и восходящего излучения ;
- предварительно снижается размерность задачи до двух переменных (толщина слоя, зенитный угол) путем разложения решения по азимуту в ряд Фурье;
- решение рассчитывается только на внешних границах.

В методе функций влияния и оптического передаточного оператора

- можно проводить исследования и анализ, а не простой расчет многослойной системы;
- осуществляется расщепление исходной краевой задачи на отдельные краевые задачи для каждого однородного или неоднородного подслоя со своими граничными условиями;
- суммарное решение строится путем факторизации и декомпозиции;
- R и T свойства отражения и пропускания границ;
- расчет функций влияния, учитывающих многократное рассеяние в подслоях, можно проводить разными методами в разных приближениях;
- можно использовать разные начальные приближения и разные итерационные процессы;
- расчет "сценариев" распределения излучения на внутренних и внешних границах;
- расчет угловых и пространственных распределений излучения в любой точке системы;
- возможно обобщение на задачи с учетом поляризации и без учета поляризации;
- обобщение на задачи для плоских слоев и сферических оболочек;
- обобщение на гетерогенные многослойные системы с отражающими границами.

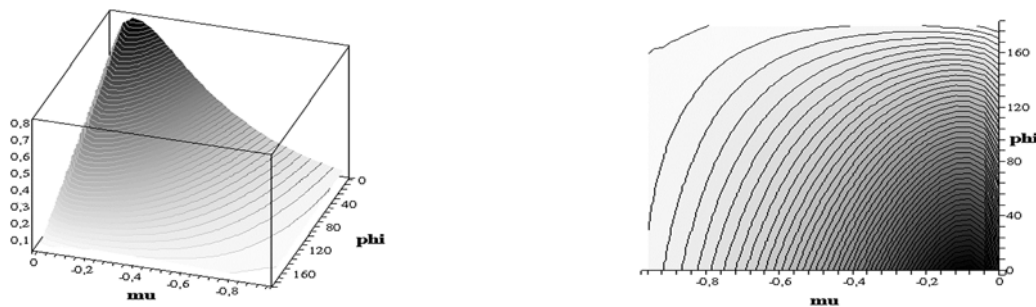
Метод функций влияния обладает важным преимуществом: имея набор функций влияния отдельных слоев, можно по-разному структурировать поля излучения в системе и детально исследовать механизмы его формирования.

Такой подход позволяет моделировать поля излучения в широком диапазоне вариаций оптических характеристик слоев, анализировать механизмы формирования радиационных характеристик внутри и вне слоев, а также оценивать вклад каждой из областей.

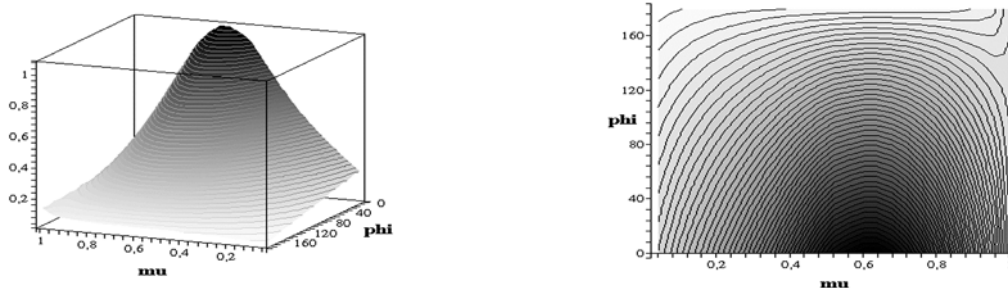
При этом значительно точнее рассчитываются отраженное излучение и распределения радиационных характеристик внутри слоя вблизи границы, на которую падает внешний поток, что важно для верификации и усовершенствования методов дистанционного зондирования облаков и всевозможных выбросов примесей, а также методов оперативного экспресс-анализа космических данных, в том числе в регионах с чрезвычайными экологическими ситуациями и последствиями масштабных пожаров и опасных явлений.

Рис. 1. Модель, типичная для облаков, - почти консервативное рассеяние

При сильной анизотропии индикатрисы: $\mu_0 = 0.5$, $\tau_0 = 8.0$, $\omega_0 = 0.98$, $g = 0.95$

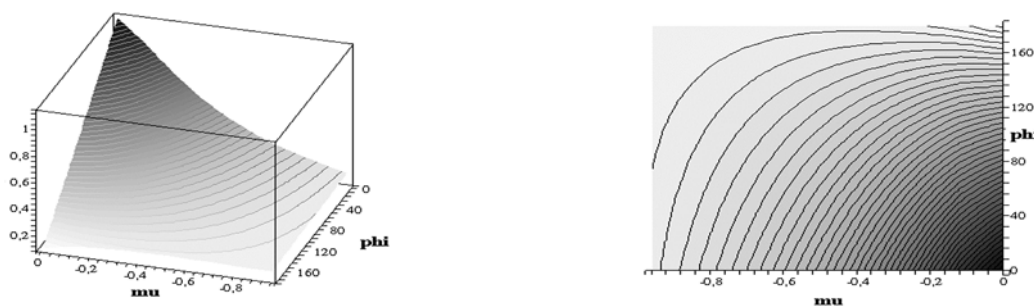


Отраженное излучение - сильная анизотропия по зенитным углам (μ) и азимутам (ϕ)

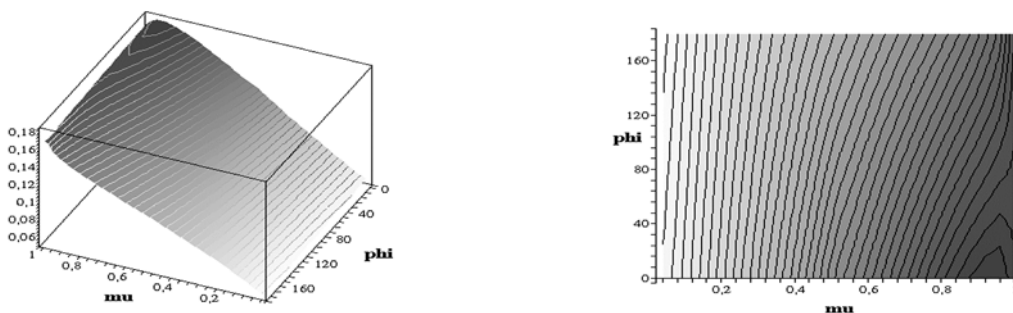


Пропущенное излучение - сильная анизотропия по зенитным углам и азимутам, асимптотический режим не установлен

Рис. 2. Модель, типичная для морских облаков, - почти консервативное рассеяние при анизотропии индикатрисы: $\mu_0 = 0.5$, $\tau_0 = 8.0$, $\omega_0 = 0.98$, $g = 0.8$

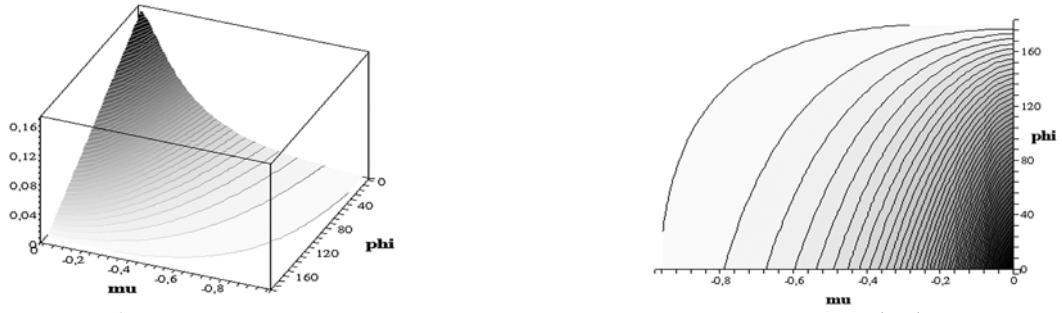


Отраженное излучение - сильная анизотропия по зенитным углам (μ) и азимутам (ϕ)

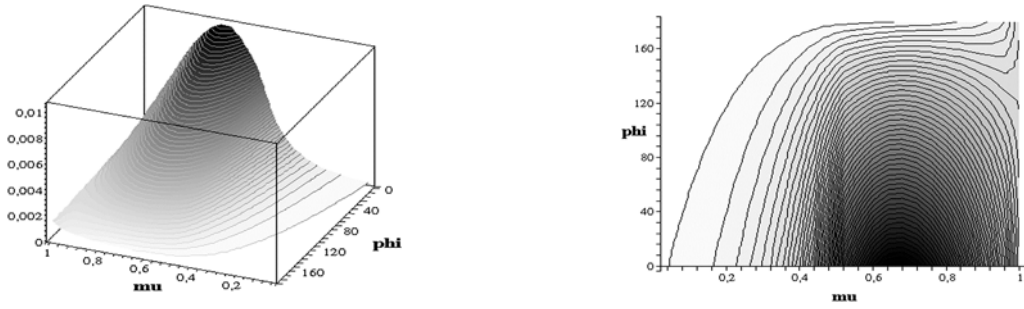


Пропущенное излучение – размытие светового пятна, почти асимптотический режим

Рис. 3. Модель, типичная для выбросов примесей, - среднее поглощение при сильной анизотропии индикатрисы: $\mu_0 = 0.5$, $\tau_0 = 8.0$, $\omega_0 = 0.6$, $g = 0.95$

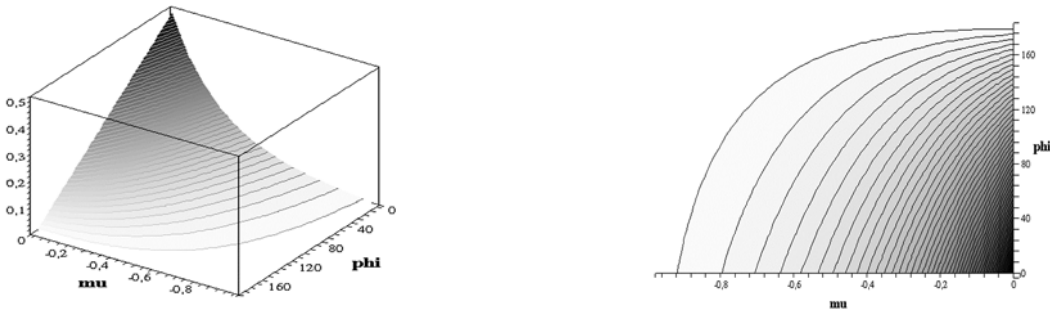


Отраженное излучение – сильная анизотропия по зенитным углам (μ) и азимутам (ϕ)

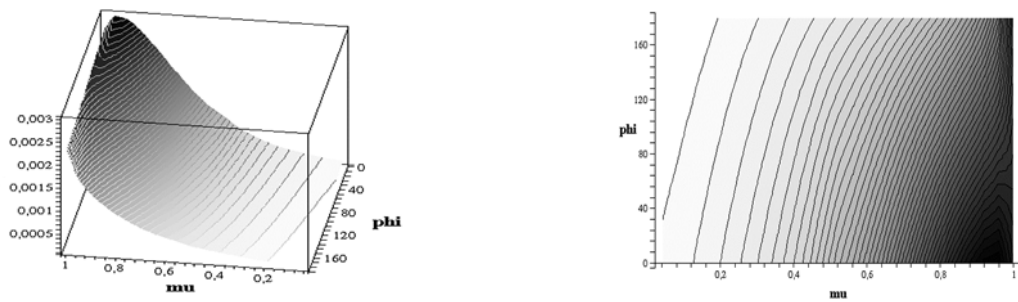


Пропущенное излучение - смещение светового пятна, нет асимптотического режима

Рис. 4. Модель, типичная для дымовых шлейфов, - среднее поглощение при анизотропии индикатрисы: $\mu_0 = 0.5$, $\tau_0 = 8.0$, $\omega_0 = 0.6$, $g = 0.8$



Отраженное излучение - анизотропия по зенитным углам (μ) и азимутам (ϕ)



Пропущенное излучение – смещение светового пятна, нет асимптотического режима