

УДК 539.36

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ,
РАСSEЯННОГО СЛОЕМ ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ ЕГО ТОЛЩИНЫ

Войшвилло Н. А., Анохин Ю. А.

На основе численного решения уравнения переноса излучения для λ от 0.4 до 0.74 мкм рассчитаны спектры излучения, выходящего из слоя под отдельными углами. Для элементарного объема рассмотрены изотропная, релеевская и анизотропная индикатрисы и спектральная закономерность светорассеяния вида $1/\lambda$, $1/\lambda^4$ и $1/\lambda^8$. Показано, что при увеличении оптической толщины τ слоя рассеянное излучение обогащается длинноволновым излучением, и в его спектральной кривой возникает максимум при $\lambda = \lambda_{\text{инв}}$. Значение $\lambda_{\text{инв}}$ зависит от τ , угла рассеяния и характеристик элементарного объема. При больших τ в прошедшем потоке превалирует длинноволновое излучение в отличие от рассеянного элементарным объемом. Эта инверсия спектра наступает при τ , тем больших, чем сильнее вытянута индикатриса элементарного объема. При малых τ в отраженном излучении возможно усиление спектральной зависимости рассеяния.

Спектр излучения, рассеянного отдельной частицей, может быть рассчитан по опубликованным таблицам (например, [1, 2]), которые охватывают большой диапазон размеров частиц и их показатели преломления. В значительно меньшей степени в научной литературе содержатся сведения о спектрах излучения, рассеянного совокупностью частиц, — рассеивающим слоем, где реализуются процессы не только однократного, но уже и многократного рассеяния и где для определения спектра необходимо решать уравнение переноса излучения в большом диапазоне длин волн. Настоящая работа посвящена изучению именно этого вопроса. В [3] было показано, что по мере увеличения оптической толщины (ОТ) слоя спектральный состав рассеянного света изменяется и может существенно отличаться от спектра излучения, рассеянного одной частицей. В данной работе вопрос обсуждается более подробно, включая рассмотрение слоев с различными свойствами элементарных объемов.

Спектр рассеянного излучения рассчитывался в видимом участке спектра от 0.4 до 0.74 мкм на основе приближенного решения уравнения переноса излучения по методу, описанному в [4], который представляет собой развитие метода Чандрасекара. Результат расчета давал интенсивность излучения I_λ , выходящего из плоского слоя среды под фиксированным углом θ ,¹ который отсчитывался от направления распространения параллельного освещающего пучка «белого» света, т. е. равноэнергетического по спектру, падающего перпендикулярно к слою. Были использованы следующие характеристики элементарных объемов: три индикатрисы рассеяния — изотропная, релеевская и анизотропная, коэффициент асимметрии которой равнялся $\delta = 14.4$; при изотропной индикатрисе рассеяния расчет I_λ производился для трех закономерностей спектральной зависимости светорассеяния вида $1/\lambda$, $1/\lambda^4$ (релеевская спектральная закономерность) и $1/\lambda^8$. Вероятность выживания фотона была принята равной 0.999 независимо от λ . Расчеты проведены для серии слоев с разной ОТ — от 0.05 до 6.0 при $\lambda = 0.74$ мкм. ОТ $\tau(\lambda)$ каждого слоя растет по мере уменьшения λ в соответствии с закономерностью светорассеяния элементарного объема — при закономерностях вида $1/\lambda$, $1/\lambda^4$ и $1/\lambda^8$ отношение ОТ на краях видимого участка спектра $\tau(0.40)/\tau(0.74)$ равно 1.85, 11.7 и 137 соответственно. Для слоев с разной ОТ и разными индикатрисами элементарных объемов при

¹ Угол $\theta < 90^\circ$ соответствует прошедшему через слой излучению, а $\theta > 90^\circ$ — отраженному.

спектральной закономерности вида $1/\lambda^4$ результаты расчета спектрального распределения рассеянного излучения представлены на рис. 1—3 (в логарифмическом масштабе). Как видно, спектр рассеянного света зависит от инди-

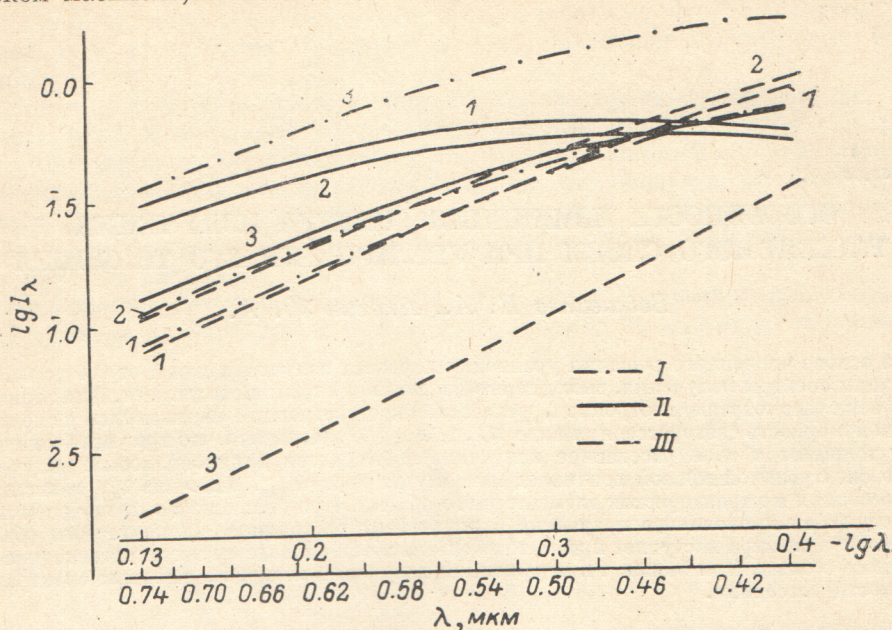


Рис. 1. Спектральная зависимость интенсивности излучения, рассеянного тремя слоями с разными индикатрисами рассеяния элементарных объемов.

1 — изотропная, 2 — релеевская, 3 — анизотропная с коэффициентом асимметрии $\delta=14.4$. Элементарные объемы имеют релеевскую спектральную закономерность светорассеяния ($\sim 1/\lambda^4$). Оптическая толщина $\tau(0.74)=0.15$ для всех слоев. θ , град.: I (угол рассеяния) — 16, II — 79, III — 164.

катрисы элементарного объема, угла рассеяния и толщины слоя. Только при наименьшей из рассмотренных ОТ спектральное распределение представляет собой в этих координатах прямую (рис. 3, прямая 3), а при больших ОТ зави-

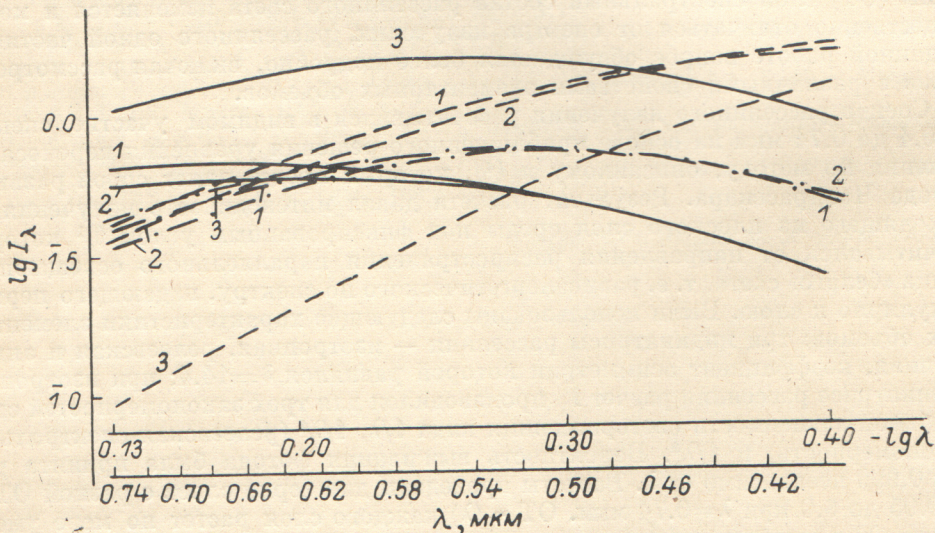


Рис. 2. То же для слоев с оптической толщиной $\tau(0.74)=0.6$.

симость $\lg I_\lambda = f(-\lg \lambda)$ описывается кривыми. Для сравнения спектров излучения, рассеянного слоями с разными параметрами, удобно воспользоваться выражением (применяемым при исследовании однократного рассеяния) для интенсивности $I_\lambda = c/\lambda^m$, где c — константа в узком спектральном интервале.

В этом выражении показатель степени m можно рассматривать как параметр, который дает компактное описание спектральной зависимости излучения независимо от кратности рассеяния. Если $m=0$, то спектр излучения нейтрален: при $m > 0$ в нем преобладает коротковолновое излучение, а при $m < 0$, напротив, длинноволновое. Показатель m легко определяется из графического построения зависимости $\lg I_\lambda = f(-\lg \lambda)$ как тангенс угла наклона касательной к этой кривой. При однократном рассеянии света частицами, много меньшими λ , показатель степени $m=4$ (релеевское рассеяние) и одинаков для всех углов рассеяния. Как следует из рис. 1—3, только при наименьшей толщине слоя $m=4$ во всем диапазоне видимого участка спектра и ТО спектр излучения, рассеянного этим слоем, аналогичен спектру излучения, рассеянного элементарным объемом. При больших толщинах показатель m не постоянен для разных участков видимой области спектра. В связи с этим в дальнейшем

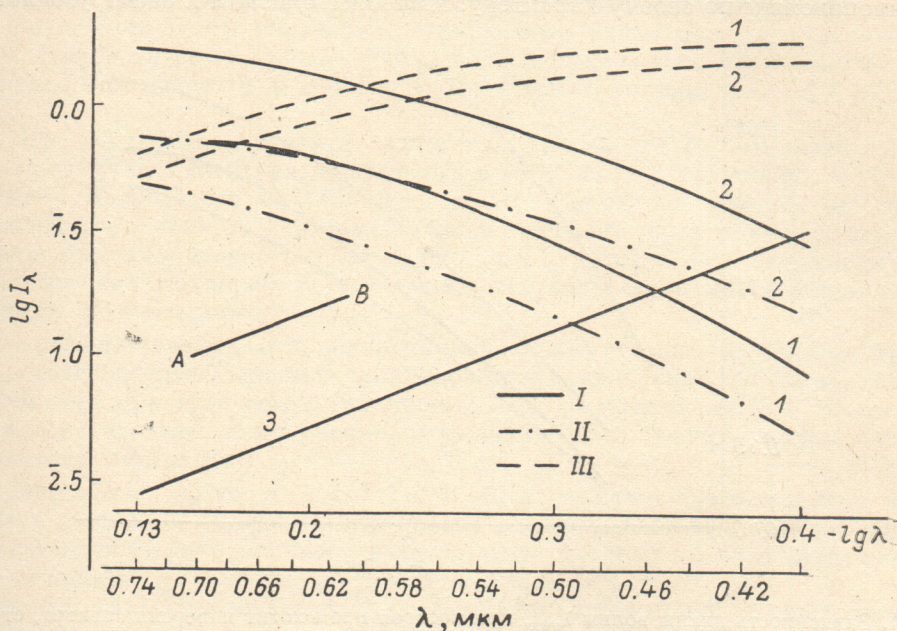


Рис. 3. То же для слоев с оптической толщиной τ (0.74)=2.5.

I — изотропная индикатриса рассеяния элементарного объема; 2, 3 — анизотропная с $\delta=14.4^\circ$, θ , град.:
I — 16, II — 79, III — 164.

будем характеризовать спектральную кривую I_λ двумя значениями показателя степени m_1 и m_2 , первый из которых определяется для наиболее коротковолнового ($\lambda < 0.5$ мкм) участка спектра, а m_2 — для длинноволнового ($\lambda > 0.65$ мкм). За исключением случая с наименьшей толщиной для всех спектральных кривых характерно уменьшение показателя степени при перемещении в сторону коротких длин волн, т. е. $m_1 < m_2$, а при больших ОТ и $\theta < 90^\circ$ он приобретает даже отрицательные значения. В кривой $I_\lambda = f(\lambda)$ появляется точка (точка инверсии), начиная с которой спектры в разных направлениях изменения длины волны (или в сторону уменьшения λ , или в сторону увеличения λ) имеют разный характер, т. е. соответствующие показатели m_1 и m_2 имеют разный знак. Обозначим длину волны, соответствующую этой точке на кривой $I_\lambda = f(\lambda)$, через $\lambda_{\text{инв}}$. Тогда при $\lambda > \lambda_{\text{инв}}$ в спектре рассеянного излучения преобладает коротковолновое излучение (как и при рассеянии элементарным объемом), а при $\lambda < \lambda_{\text{инв}}$, напротив, длинноволновое. Анализ результатов показывает, что $\lambda_{\text{инв}}$ для слоев с разной ОТ имеет разные значения, и ее положение монотонно смещается в сторону больших длин волн по мере увеличения ОТ (рис. 4). При этом скорость смещения различна для разных углов рассеяния. Более всего чувствителен к изменению толщины слоя спектр рассеянного прошедшего излучения в направлениях, наиболее касательных к плоской выходной граничной поверхности слоя, и инверсия наступает тем раньше,

чем больше угол рассеяния. Обрыв кривых на рис. 4 означает отсутствие инверсии спектра при оптических толщинах, находящихся за их пределами. Причем при ТО, меньших оптической толщины, соответствующей левой точке ординат кривых, спектр рассеянного излучения во всем видимом диапазоне характеризуется преобладанием коротковолнового излучения (при данном угле рассеяния). Напротив, при оптических толщинах слоя, лежащих правее от крайних правых точек кривых, в спектре превалирует длинноволновое излучение.

Из графиков следует, что показатель степени m в общем случае неодинаков для разных углов рассеяния. Наиболее резко показатель m меняется с углом рассеяния при сравнительно небольших толщинах слоя. Здесь для некоторых толщин показатель степени m может иметь разные знаки при разных углах θ , т. е. спектры излучения, рассеянного одним слоем в разных направлениях, противоположны по своему характеру. Наиболее близким к спектру однократ-

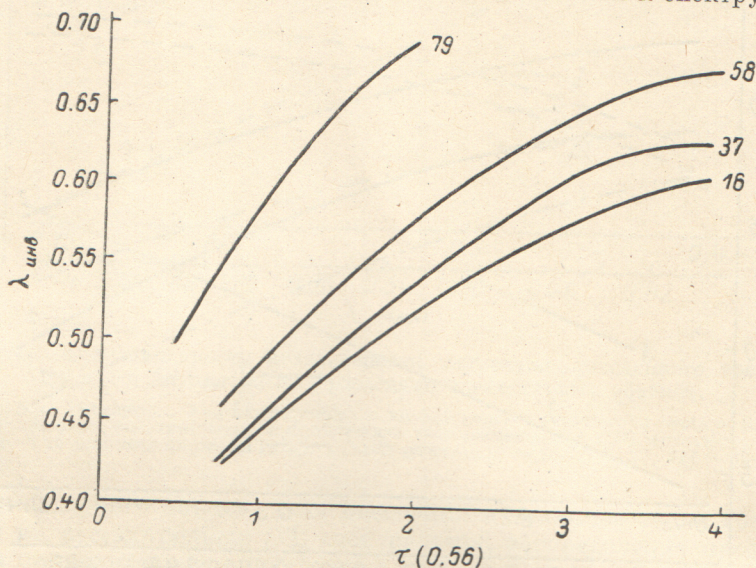


Рис. 4. Зависимость длины волны $\lambda_{\text{инв}}$, при которой происходит инверсия спектра, от оптической толщины слоя τ (0.56).

Цифры у кривых означают угол рассеяния.

ного рассеяния остается спектр излучения, рассеянного в обратном направлении ($\theta \rightarrow 180^\circ$). По мере увеличения толщины слоя зависимость показателя m от угла рассеяния становится менее выраженной, и это сглаживание угловой зависимости наступает раньше в коротковолновой области спектра.

Из сравнения кривых на рис. 1—3, относящихся к разным индикатрисам рассеяния, следует, что наибольшие различия в спектрах наблюдаются для сред с анизотропной ($\delta = 14.4$) и изотропной индикатрисами рассеяния. Однако при больших ОТ это различие сглаживается (рис. 1 и 3). При этом при одинаковой толщине слоя показатель степени m тем выше (т. е. тем ближе спектр, соответствующий слою, к спектру элементарного объема), чем более вытянута индикатриса рассеяния последнего.

Анализ результатов расчета m показывает, что имеется существенное различие спектров излучения, рассеянного слоями с разным видом спектральной зависимости светорассеяния элементарного объема (интенсивность рассеянного излучения пропорциональна $1/\lambda$, $1/\lambda^4$ и $1/\lambda^8$). Так, если взять три таких слоя с одинаковой в средней части видимого участка спектра небольшой оптической толщиной ($\tau(0.59) = 0.62$ у каждого из слоев), то в излучении, рассеянном слоем, который обладает наиболее резкой спектральной зависимостью светорассеяния элементарного объема, наблюдается инверсия в спектре I_λ . В то же время наиболее нейтральна спектральная кривая $I_\lambda = f(\lambda)$ слоя, которому соответствует наименьшая селективность спектра элементарного объема.

Анализ представленных выше на всех рисунках результатов позволяет выявить следующие основные характерные особенности процесса изменения спектра рассеянного излучения, вызываемого увеличением толщины рассеивающего слоя.

1. При очень малых оптических толщинах ($\tau(0.74) < 0.05$) спектр излучения, рассеянного слоем, мало зависит от вида индикатрисы рассеяния элементарного объема и угла рассеяния и при этом близок к спектру излучения, рассеянного элементарным объемом.

2. С ростом толщины слоя (уже при $\tau(0.74) = 0.15$) возникает дифференциация спектра: он становится функцией и угла рассеяния, и индикатрисы элементарного объема. Общая направленность процесса (при всех индикатрисах рассеяния элементарного объема) заключается в уменьшении для всех углов рассеяния спектральной селективности рассеянного излучения — показатель степени при длине волны уменьшается. Менее всего на возрастание толщины слоя реагирует спектр излучения, отраженного слоем навстречу падающему пучку. Наиболее резкая зависимость спектра рассеянного излучения от угла рассеяния наблюдается в диапазоне оптических толщин $0.05 < \tau(0.74) < 2.5$.

3. При больших оптических толщинах ($\tau(0.74) > 2.5$) возникает существенное различие в спектрах прошедшего и отраженного излучений.

Спектр прошедшего излучения становится противоположным по своему характеру тому спектру, которым обладает элементарный объем: в нем преобладает длинноволновое излучение ($m < 0$). Эта инверсия спектра наступает при оптических толщинах, тем больших, чем сильнее вытянута индикатриса рассеяния элементарного объема.

В отраженном излучении, несмотря на усиление его спектральной нейтральности, явление преобладания длинноволнового излучения не наступает (по крайней мере при оптических толщинах $\tau(0.74)$, не превосходящих 6.0). Спектральное распределение излучения, отраженного оптически толстыми слоями, практически нейтрально.

4. При малых ОТ слоя ($\tau(0.74) \leq 0.05$) и особенно при вытянутых индикатрисах рассеяния элементарного объема в длинноволновом участке спектра выявляется аномально высокая селективность светорассеяния в задней полусфере — показатель степени при длине волны $m > 4$.

Выводы, сформулированные в п. 1—4, относятся к слабо поглощающей рассеивающей среде, элементарный объем которой обладает релеевской спектральной закономерностью светорассеяния ($\sim 1/\lambda^4$). Однако они могут быть распространены и на среды с иной спектральной закономерностью светорассеяния элементарных объемов. При этом, чем селективнее спектральная зависимость светорассеяния элементарного объема, тем более резко выражены явления, указанные в п. 1—4. В общем изменения в спектре излучения, рассеянного слоем, наступают тем скорее (при нарастании толщины слоя), чем более резкой спектральной зависимостью светорассеяния обладает элементарный объем и чем более диффузна его индикатриса рассеяния.

Физически это явление объясняется взаимодействием ряда факторов: самой спектральной закономерностью светорассеяния элементарного объема; изменением с глубиной слоя спектрального состава прямого пучка — по мере проникновения в толщу слоя он все более и более обогащается длинноволновым излучением; изменением с глубиной и толщиной всего слоя спектрального состава многократно рассеянного излучения — той «подсветкой», которой наряду с прямым пучком освещается каждый элементарный объем. Именно действием последней можно объяснить усиление спектральной зависимости в отраженном свете (п. 4): отраженное излучение формируется слоями, прилегающими к входной границе слоя, где вследствие малой глубины «подсветка» образуется главным образом однократно рассеянным светом, в котором преобладает коротковолновое излучение (в силу еще незначительного его ослабления в прямом пучке). Сочетание почти нейтрального по спектру (при небольшой глубине проникновения в слой) освещения прямым пучком с такой «подсветкой» и приводит к тому, что отраженное излучение имеет спектр, более богатый коротко-

волновым излучением по сравнению со спектром излучения, рассеянного элементарным объемом при его освещении белым (т. е. равноэнергетическим по спектру) светом.

Литература

- [1] В а г у Е. — Optik, 1952, v. 9, p. 319—325.
- [2] H e l l e r W., B h a t n a g a r H. L., N a k a g a k i M. — J. Chem. Phys., 1962, v. 36, p. 1163—1170.
- [3] В о й ш в и л л о Н. А., А н о х и н Ю. А. — Опт. и спектр., 1984, т. 56, в. 2, с. 367—370.
- [4] Б а р к о в В. И. — Журн. вычисл. математики и мат. физики, 1973, т. 13, № 4, с. 1068—1073.

Поступило в Редакцию 24 мая 1985 г.