

Б.В. Горячев, С.Б. Могильницкий

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В РАССЕИВАЮЩЕМ ОБЪЕМЕ С ПОГЛОЩЕНИЕМ

Рассмотрено прохождение коллимированного потока излучения в определенном спектральном интервале через пространственно ограниченную рассеивающую дисперсную среду.

Показано, что оптические размеры среды и индикатриса рассеяния излучения деформируют контур спектральной линии.

Проблема селективности в теории переноса излучения является весьма актуальной, особенно в связи с широким использованием ОКГ в системах, работающих через атмосферу и океан.

Известно [1], что контур линии поглощения испытывает уширение при увеличении толщины слоя среды, через которую проходит излучение. Менее исследованным является вопрос о влиянии поперечных оптических размеров среды на форму контура линии поглощения, поэтому в данной работе проведен анализ зависимости уширения контура линии поглощения от поперечных размеров среды. Расчет интенсивности излучения, прошедшего через дисперсную среду, проводился по методике [2], учитывающей зависимость интенсивности от поперечных размеров среды.

Коэффициент поглощения дисперсной среды $A(\nu)$ выразим через вероятность выживания Λ и коэффициент рассеяния σ , зависимостью которого от частоты в первом приближении можно пренебречь:

$$\kappa(\nu) = \sigma (1/\Lambda - 1). \quad (1)$$

Зададим для максимума спектральной линии определенное значение вероятности выживания Λ_0 , тогда коэффициент поглощения в максимуме

$$\kappa_0 = \sigma (1/\Lambda_0 - 1). \quad (2)$$

Пусть среда поглощает излучение в спектральной линии с лоренцевским контуром, тогда

$$\kappa(\nu) = \kappa_0 / (1 + x^2), \quad (3)$$

где $x = (\nu - \nu_0) / \gamma_L$ – безразмерная частота, выраженная в единицах полуширины линии γ_L [3]. Из (1), (2), (3) получаем связь между значением частоты в линии и вероятностью выживания кванта данной частоты:

$$x = \sqrt{\left(\frac{1}{\Lambda_0} - 1\right) / \left(\frac{1}{\Lambda} - 1\right) - 1}. \quad (4)$$

Рассмотрим среду с оптическими размерами $\tau_x, \tau_y = \tau_z$, на которую падает в направлении оси абсцисс поток излучения $I_0(\nu) = 1$. Профиль линии поглощения $r(x)$ определим как отношение вышедшей из среды интенсивности I в спектральной линии при частоте ν к вышедшей из среды интенсивности вне линии $I(\Lambda = 1)$ или (в логарифмическом масштабе) как $\lg(I/I(\Lambda = 1))$. На рис. 1, 2 приведены подсчитанные профили линий поглощения $r(x) = \lg(I/I(\Lambda = 1))$ при различных оптических размерах среды. Вероятность выживания кванта для центра данной линии поглощения

равна 0,94. Из данных, приведенных на рис. 1 и 2, видно, что интенсивность линии поглощения резко усиливается с ростом τ_x , так как большая оптическая толщина поглощает больший поток проходящего излучения. При постоянной оптической толщине τ_x увеличение поперечных размеров среды также приводит к усилению интенсивности линии поглощения. Этот рост интенсивности можно объяснить усилением роли многократного рассеяния при увеличении поперечных размеров. При этом квант излучения в среднем проходит больший путь, чем при меньших поперечных размерах, поэтому растет и вероятность поглощения данного кванта средой.

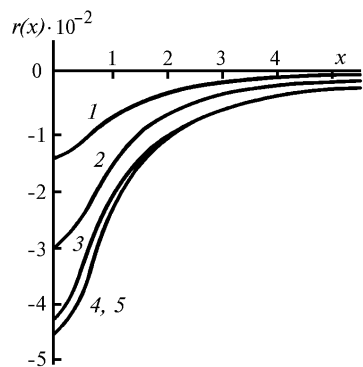


Рис. 1. Профили линий поглощения. Оптические размеры среды: $\tau_x = 1$; τ_y : кривая 1 – 1, 2 – 10, 3 – 10^2 , 4 – 10^3 , 5 – 10^4

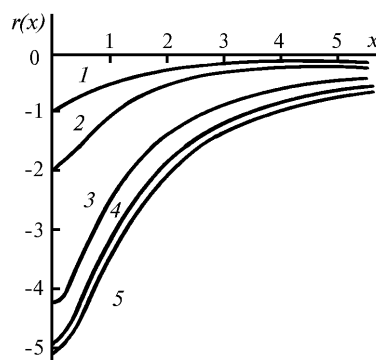


Рис. 2. Профили линий поглощения. Оптические размеры среды: $\tau_x = 50$; τ_y : кривая 1 – 1, 2 – 10, 3 – 10^2 , 4 – 10^3 , 5 – 10^4

Таким образом, в рассматриваемом случае эффективный коэффициент поглощения увеличивается за счет многократного рассеяния. Рассмотрим, как деформируется контур линии при увеличении поперечных оптических размеров $\tau_y = \tau_z$.

На рис. 3 приведены профили линий поглощения $r_0(x)$, нормированные на 1, по которым можно судить об относительном росте интенсивности в разных точках контура при увеличении размеров среды. Расчеты показывают, что контур линии поглощения уширяется не только при увеличении оптической толщины среды, но и при увеличении ее поперечных размеров. Однако при малой толщине среды ($\tau_x \approx 1$) увеличение поперечных размеров почти не приводит к усилению интенсивности поглощения в линии и к расширению контура. Это можно объяснить тем, что при малой толщине среды увеличение поперечных размеров не может значительно повысить степень многократного рассеяния квантов и увеличить средний путь кванта в среде. Соответственно при малых поперечных размерах среды ($\tau_y = \tau_z \approx 1$) увеличение толщины среды τ_x приводит к небольшому усилению поглощения в линии и к незначительному расширению контура линии поглощения.

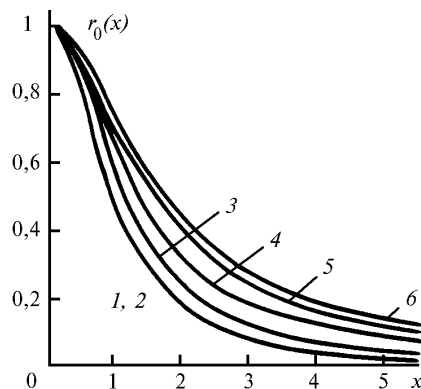


Рис. 3. Профили линий поглощения, нормированные на 1. Оптические размеры среды: $\tau_x = 10^2$; τ_y : кривая 2 – 1, 3 – 10, 4 – 10^2 , 5 – 10^3 , 6 – 10^4 . Кривая 1 – профиль коэффициента поглощения

Таким образом, расчеты показывают, что поперечные размеры среды существенно влияют на форму контура линии поглощения при $\tau_{x,y,z} > 1$. Неучет этой зависимости может приводить к ошибкам при решении задач по переносу излучения в спектральной линии.

Рассмотрим далее деформацию профиля спектральной линии, вызванную изменением индикатрисы рассеяния излучения частиц с длиной волны, при прохождении излучения через чисто рассеивающую среду. Пусть излучение в спектральной линии с интенсивностью $I_0(\nu) = I_0(\nu_0)\alpha(\nu)$ проходит через дисперсную среду. Здесь $I_0(\nu_0)$ – интенсивность излучения в максимуме линии; ν_0 – частота, соответствующая максимуму линии; $\alpha(\nu)$ – лоренцевский профиль линии, приведенный к 1. Относительная величина интенсивности прошедшего среду излучения частоты ν не зависит от интенсивности падающего излучения, поэтому если бы частицы рассеивали излучение с разными частотами одинаково, то профиль вышедшей из среды линии имел бы меньшую интенсивность, но по форме совпадал бы с профилем падающей линии. Однако форма индикатрисы рассеяния частиц зависит от частоты излучения. Коэффициент рассеяния дисперсной среды также имеет сложную зависимость от длины волны, но в данной работе мы ее не рассматриваем, т.е. считаем, что оптические размеры среды одинаковы для всех частот в пределах линии.

Рассеивающие свойства частиц определяются параметром рассеяния $\rho = 2\pi a/\lambda$, где a – размер частицы; λ – длина волны излучения, падающего на частицу. Параметр ρ для данного распределения частиц увеличивается при уменьшении длины волны. Поэтому при неизменных оптических размерах среды интенсивность прошедшего среду излучения должна увеличиваться с уменьшением длины волны. Профиль прошедшей среду спектральной линии будет при этом деформироваться. Деформация профиля будет более резко выражена при прохождении широких линий через дисперсную среду.

Расчеты показывают, что относительное изменение прошедшей среду интенсивности излучения $\Delta I/I_0$ на единице длины волны (здесь I_0 – интенсивность прошедшего среду излучения в максимуме линии) увеличивается с ростом оптической толщины τ_x и уменьшением оптических поперечных размеров τ_y и τ_z . Для расчета была выбрана линия атомарного кислорода, имеющая полуширину $\nu_0 \approx 0,1 \text{ см}^{-1}$, положение максимума линии $\lambda = 5577 \text{ \AA}$. Оптические размеры среды были выбраны следующими: $\tau_y = \tau_z = 1$, $\tau_x = 100$. Параметр рассеяния частиц среды ρ для центра линии равен 3,7. За счет «индикатрисного эффекта» при увеличении частоты интенсивность прошедшего среду излучения увеличивается. При данных оптических размерах среды изменение относительной интенсивности на единице частоты $\Delta I/I_0 \Delta \nu$ было равно примерно 472 см^{-1} . На расстоянии $\Delta \nu = \nu - \nu_0$ от центра линии в сторону больших частот интенсивность прошедшего среду излучения повышалась на $\Delta I' \approx \Delta I(\nu - \nu_0)/\Delta \nu = \Delta I \Delta \nu_0 x/\Delta \nu$, и на такую же величину интенсивность излучения уменьшалась в направлении меньших частот по отношению к центру линии. Здесь I_0 – интенсивность прошедшего излучения в центре линии; $\Delta \nu_0$ – полуширина линии. Профиль прошедшей среду спектральной линии $I = (I_0 + \Delta I \Delta \nu_0 x/\Delta \nu)\alpha$, где α – профиль спектральной линии падающего на среду излучения, нормированный на 1. Приведенный к 1 профиль прошедшей среду линии запишем в виде

$$r = \frac{I}{I_0} = \left(1 + \frac{\Delta I \Delta \nu_0}{I_0 \Delta \nu} x\right)\alpha. \quad (5)$$

В таблице приведены значения профиля прошедшей через дисперсную среду спектральной линии. Из таблицы видно, что деформация контура линии за счет «индикатрисного эффекта» приводит к его асимметрии.

Деформация контура линии, прошедшей через среду, за счет «индикатрисного эффекта».
 $\tau_x = 100$; $\tau_y = 1$; $\lambda_0 = 5577 \text{ \AA}$; $\nu_0 = 0,1 \text{ см}^{-1}$; $\Delta I/I_0 \Delta \nu = 472 \text{ см}^{-1}$

x	r	x	r
0,46	0,82574	-0,46	0,82526
0,73	0,65330	-0,73	0,65270
1,46	0,32030	-1,46	0,31970
2,3	0,15823	-2,3	0,15777
3,42	0,07887	-3,42	0,07853
5,55	0,03151	-5,55	0,03129
7,92	0,01576	-7,92	0,01560

На рис. 4 для большей наглядности представлена деформация профиля широкой линии комбинационного рассеяния четыреххлористого углерода [4] с полушириной $\Delta\nu_0 = 12 \text{ см}^{-1}$ при прохождении через дисперсную среду с оптическими размерами $\tau_x = 50$, $\tau_y = \tau_z = 1$. Полуширина линии 2 в 3 раза меньше, чем полуширина линии 3. Профили нормированы на 1.

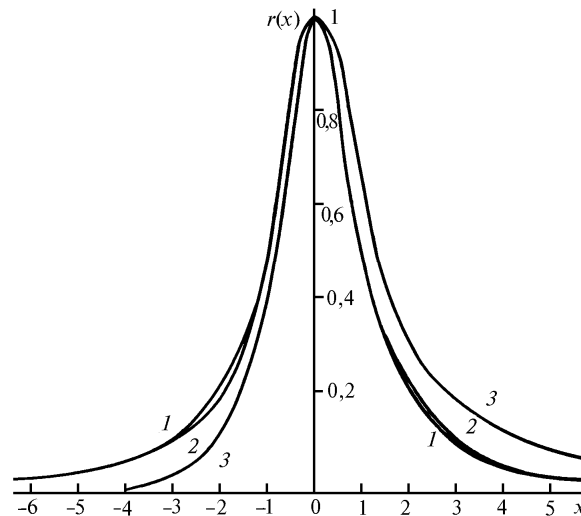


Рис. 4. Влияние индикатрисы на деформацию профиля линии. Оптические размеры среды: $\tau_x = 50$; $\tau_y = \tau_z = 1$; кривая 1 – профиль линии проходящего через среду излучения ($\alpha(\nu)$); 2 – максимум линии $\nu_0 = 3062 \text{ см}^{-1}$, полуширина $\Delta\nu_0 \cong 3,5 \text{ см}^{-1}$; 3 – максимум линии $\nu_0 = 790 \text{ см}^{-1}$, полуширина $\Delta\nu_0 \cong 12 \text{ см}^{-1}$

Из этого рисунка видно, что при прохождении через рассеивающую среду «центр тяжести» линии будет смещаться в сторону больших частот. Интенсивность в крыле линии, соответствующем удалению от центра линии в сторону больших частот, будет увеличиваться, а интенсивность в другом крыле, соответственно, уменьшаться.

1. Иванов В. В. Перенос излучения и спектры небесных тел. М.: Наука, 1969. 504 с.
2. Горячев Б. В., Кабанов М. В., Могильницкий С. Б. и др. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. № 8. С. 827–829.
3. Соболев В. В. Перенос лучистой энергии в атмосферах звезд и планет. М.: ГИИТЛ, 1956. 391 с.
4. Практикум по спектроскопии/ Под ред. Л. В. Левшина. М.: Изд-во МГУ, 1976. 310 с.

Томский политехнический университет

Поступила в редакцию
15 июля 1996 г.

B. V. Goryachev, S. B. Mogil'nitskii. Some Peculiarities of Radiation Transfer through Scattering Medium with Absorption.

The transfer of collimated flow of definite spectral range through spatially limited scattering disperse medium is treated in the paper.

It is shown, that the optical size of the medium and the radiation dispersion index distort the spectral line contour.