

А.А. Попов, О.В. Шефер

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОРИЕНТИРОВАННЫМИ ЛЕДЯНЫМИ ПЛАСТИНАМИ В ИК-ДИАПАЗОНЕ

На разных длинах волн в ИК-диапазоне проведено теоретическое исследование коэффициента поглощения α_{abs} и вероятности выживания кванта Λ для рассеивающего объема, состоящего из системы ориентированных ледяных пластинок. Получена аппроксимационная алгебраическая формула для α_{abs} . Показано, что поглощение является характеристикой не линейных размеров, а объемов кристаллов, причем величина α_{abs} в ИК-диапазоне повторяет все особенности тонкой структуры зависимости показателя поглощения льда от длины волны и достигает значений, сравнимых с коэффициентами рассеяния. Установлено, что Λ , которая в видимой части диапазона тождественно равна 1, в ИК-диапазоне длин волн может принимать значения из интервала (0,5; 0,8).

В [1] нами проведено исследование коэффициента ослабления для оптического излучения, прошедшего через систему ориентированных ледяных пластинок. Показано, что нейтральность хода коэффициента ослабления, свойственная для него в видимой части диапазона длин волн, нарушается в ИК-диапазоне. Нерегулярная часть коэффициента ослабления, значение которой зависит от длины волны, связана также с комплексным показателем преломления льда $\tilde{n} = n + ik$. В ИК-диапазоне величины $n - 1$ и k для льда сравнимы между собой [2], поэтому показатели преломления n и поглощения k льда в равной степени влияют на коэффициент ослабления [1]. Следовательно, значительная часть интенсивности, изъятой системой ледяных пластинок из падающего потока в ИК-диапазоне, уходит на поглощение. В настоящей статье предложена сравнительная оценка для рассеивающего объема, состоящего из системы ориентированных ледяных пластинок.

Анализ характеристик ослабления и поглощения проведем для случая, когда направление распространения волны совпадает с нормалью к плоскости ориентации пластинок. Подобное рассмотрение данной задачи рассеяния дает возможность наиболее просто выявить общие закономерности взаимодействия волны с системой ориентированных ледяных пластинок. С другой стороны, именно в этом случае удастся получить аппроксимационные алгебраические формулы для коэффициентов ослабления (α_{ext}) и поглощения (α_{abs}).

При нормальном падении плоской волны на основание пластинки формулы для сечений ослабления и поглощения, полученные в рамках метода физической оптики, имеют вид [3]:

$$\sigma_{\text{ext}} = 2\pi a^2(1 - \text{Re}(T)); \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{abs}} = \pi a^2(1 - |T|^2 - |R|^2), \quad (2)$$

где T и R – френелевские коэффициенты передачи и отражения для плоской волны, нормально падающей на полупрозрачный слой; a – радиус пластинки.

В [1] нами показано, что при определении коэффициента ослабления для системы ледяных пластинок в интервале длин волн (1÷15 мкм) достаточно учесть электромагнитные поля только тех рефракционных пучков, из которых каждый проходит через толщу пластинки один раз. Очевидно, что тот же вывод можно сделать и при анализе коэффициента поглощения. Поэтому в формулах (1) и (2) для сечения ослабления и поглощения можно заранее отбросить слагаемые, которые описывают многократные внутренние отражения электромагнитного поля между основаниями пластинки. В результате (1) и (2) преобразуются к виду

$$\sigma_{\text{ext}} = 2\pi a^2 \{1 - \text{Re}(t \exp[i k d(\tilde{n} - 1)])\}; \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{abs}} = \pi a^2 (1 - |r| - |t|^2 \exp(-2 k d \kappa)), \quad (4)$$

где d – толщина пластинки; $\kappa = 2\pi/\lambda$ – волновое число; t и r – комплексные величины, определяемые выражениями:

$$t = \frac{4\tilde{n}}{(\tilde{n} + 1)^2}; r = \left(\frac{\tilde{n} - 1}{\tilde{n} + 1}\right)^2. \quad (5)$$

Известная эмпирическая взаимосвязь между толщинами d и диаметрами $2a$ пластинчатых кристаллов [4] $d = B(2a)^\alpha$ ($B = 2,020$; $\alpha = 0,449$) позволяет представить интегральные характеристики рассеивающего объема в виде однократных интегралов. В частности, для коэффициентов ослабления и поглощения имеем

$$\alpha_{\text{ext}} = N \int_0^\infty f(a) \sigma_{\text{ext}} da; \quad (6)$$

$$\alpha_{\text{abs}} = N \int_0^\infty f(a) \sigma_{\text{abs}} da, \quad (7)$$

где N – концентрация пластинок в рассеивающем объеме; $f(a)$ – функция плотности распределения пластинок по радиусам. Если $f(a)$ задана в виде гамма-распределения, то каждое из интегральных выражений (6) и (7) допускает преобразование к алгебраической форме. В [5] нами получена алгебраическая формула для коэффициента ослабления α_{ext} . Здесь представим ее в виде

$$\alpha_{\text{ext}} = 2 C \left(1 - \text{Re} \left(\frac{t}{(1 + k x_2 - i(n-1) k x_2)^{x_1+1}} \right)\right), \quad (8)$$

где $C = N \frac{\mu + 2}{\mu + 1} \pi a^2$.

Средний радиус пластинок \bar{a} связан с параметрами гамма-распределения a_m и μ формулой $\bar{a} = a_m(\mu + 1)/\mu$. Параметры x_1 и x_2 однозначно связаны с μ и \bar{a} и определяются путем минимизации функционала, образованного разностью новой и старой функций плотности распределения пластинок по размерам [5]. Ряд значений x_1 и x_2 , соответствующих некоторым реальным средним размерам \bar{a} ледяных пластинок и степени локализации μ их размеров около среднего, приведены в нашей статье [1].

Для коэффициента поглощения с помощью методики, изложенной в [5], нетрудно получить совпадающее с (8) по структуре алгебраическое выражение. В результате несложных преобразований имеем

$$\alpha_{\text{abs}} = C \left(1 - |r| - |t|^2 \frac{1}{(1 + 2 \kappa k x_2)^{x_1+1}}\right). \quad (9)$$

С коэффициентами ослабления и поглощения можно связать такую важную характеристику рассеивающего объема, как вероятность выживания кванта (Λ). Она имеет вид

$$\Lambda = (\alpha_{\text{ext}} - \alpha_{\text{abs}}) / \alpha_{\text{ext}}. \quad (10)$$

Проведем численное исследование двух характеристик рассеивающего объема: коэффициента поглощения и вероятности выживания кванта, учитывая, что коэффициент ослабления подробно нами рассмотрен в [1].

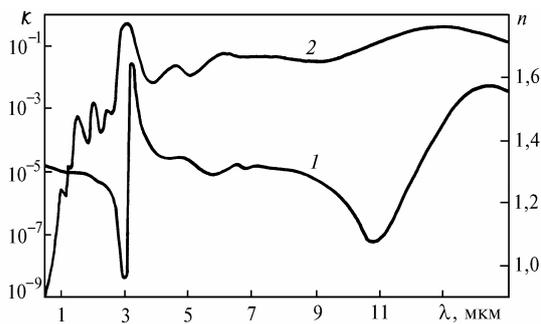


Рис. 1. Зависимости показателя преломления и показателя поглощения льда от длины волны: кривая 1 – $n = n(\lambda)$; 2 – $\kappa = \kappa(\lambda)$

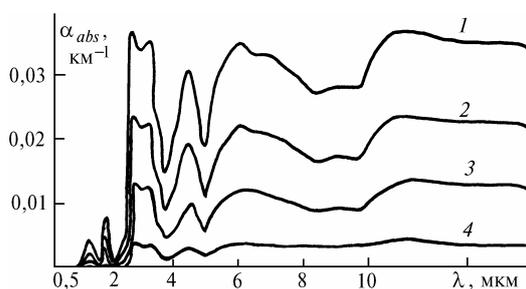


Рис. 2. Коэффициенты поглощения при разных средних радиусах пластинок в зависимости от длины волны: $N = 1 \text{ l}^{-1}$; $\mu = 5$; кривая 1 – $\bar{a} = 100$; 2 – 90; 3 – 60; 4 – 40 мкм

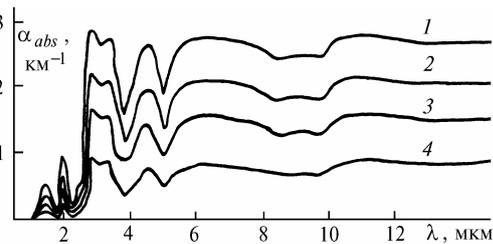


Рис. 3. Коэффициенты поглощения при разных средних радиусах пластинок в зависимости от длины волны: $\mu = 5$; кривая 1 – $N = 12,5 \text{ l}^{-1}$, $\bar{a} = 250$ мкм; 2 – 15 l^{-1} , 200 мкм; 3 – 20 l^{-1} , 150 мкм; 4 – 25 l^{-1} , 100 мкм

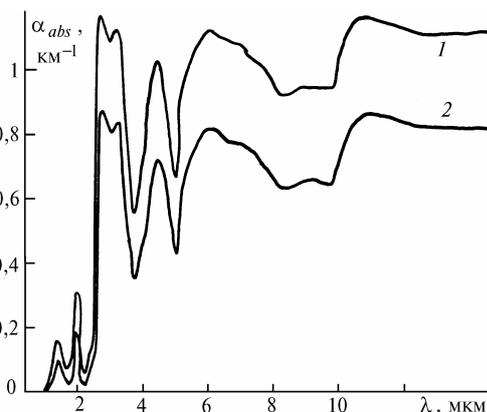


Рис. 4. Коэффициенты поглощения при разных параметрах μ в зависимости от длины волны: $N = 25 \text{ l}^{-1}$, $\bar{a} = 100$ мкм; кривая 1 – $\mu = 1$; 2 – $\mu = 8$

На рис. 1 приведены кривые $n = n(\lambda)$ и $\kappa = \kappa(\lambda)$ для показателей преломления и поглощения льда, построенные по результатам обзорной статьи [2]. При переходе из видимой части в ИК-диапазон величина κ возрастает на несколько порядков. Следует заметить, что значения κ в ИК-диапазоне остаются относительно невысокими, чтобы повлиять на проницаемость границы раздела «воздух – лед». Но на больших оптических толщах, которые, как правило, характерны для атмосферных кристаллов, значение величины κ в окрестности 10^{-1} оказывается достаточным, чтобы обеспечить сильное поглощение оптического излучения. В этом нетрудно убедиться, анализируя представленные на рис. 2–4 зависимости коэффициента поглощения κ от длины волны λ при различных параметрах дисперсной среды. Спектральный ход кривой $\alpha_{\text{abs}} = \alpha_{\text{abs}}(\lambda)$ зависит в основном от характера изменения показателя поглощения κ и слабо связан с показателем преломления n . Действительно, из сравнительного анализа кривых $\kappa = \kappa(\lambda)$ и $\alpha_{\text{abs}} = \alpha_{\text{abs}}(\lambda)$ следует, что их локальные максимумы на спектральной оси практически совпадают. Причем в спектральном ходе каждой кривой для коэффициента поглощения не только отражается, но и усиливается тонкая структура зависимости $\kappa = \kappa(\lambda)$. С другой стороны, даже резонансное изменение показателя преломления льда вблизи $\lambda = 3$ мкм незначительно влияет на коэффициент поглощения. В частности, резонанс показателя преломления приводит лишь к образованию на каждой кривой $\alpha_{\text{abs}} = \alpha_{\text{abs}}(\lambda)$ двух близко расположенных максимумов вместо одного.

Большому радиусу пластинки соответствует большая толщина, а следовательно, и более сильное поглощение. Однако даже для крупных пластинок ($\bar{a} = 250$ мкм) не происходит полного поглощения оптического излучения, прошедшего внутрь пластинки. Поэтому каждая кривая $\alpha_{\text{abs}} = \alpha_{\text{abs}}(\lambda)$ сохраняет тонкую структуру, повторяя все особенности зависимости $\kappa = \kappa(\lambda)$.

Кривые $\alpha_{\text{abs}} = \alpha_{\text{abs}}(\lambda)$ при разных \bar{a} и μ в основном повторяют друг друга, но отличаются масштабом. Это означает, что поглощение оптического излучения необходимо соотносить с объемами кристаллов, а не с линейными размерами. Иными словами, на поглощение не должна влиять форма кристаллов. Поэтому аналогичные зависимости $\alpha_{\text{abs}} = \alpha_{\text{abs}}(\lambda)$ следует ожидать для любых других форм ледяных кристаллов тех же объемов.

На рис. 5–7 приведены значения вероятности выживания кванта Λ в зависимости от длины волны λ при разных параметрах дисперсной среды. При $\lambda \approx 3$ мкм каждая кривая имеет устойчивый минимум, который соответствует наибольшему значению показателя поглощения льда κ в исследуемом диапазоне длин волн. На длине волны $\lambda \approx 3$ мкм значение κ оказывается таким, что обеспечивает полный переход в Джоулево тепло оптического излучения, прошедшего внутрь любого атмосферного кристалла. На остальных длинах волн значения κ не являются настолько высокими. Поэтому спектральный ход кривых $\Lambda = \Lambda(\lambda)$ в целом заметно зависит от величины оптической толщи кристаллов. В частности, более мелким пластинкам соответствуют более высокие значения вероятности выживания кванта Λ . Следует заметить, что, как и в коэффициентах поглощения α_{abs} , в основных экстремумах кривых $\Lambda = \Lambda(\lambda)$ отображается тонкая структура зависимости $\kappa = \kappa(\lambda)$.

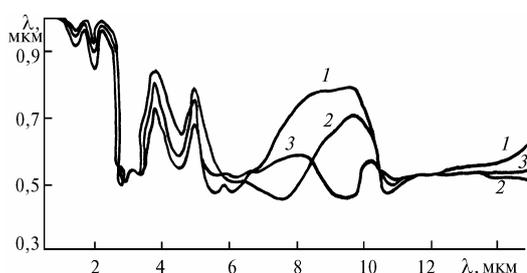


Рис. 5. Вероятности выживания кванта при разных средних радиусах \bar{a} пластинок в зависимости от длины волны: $\mu = 5$; кривая 1 – $\bar{a} = 50$ мкм; 2 – 100; 3 – 250

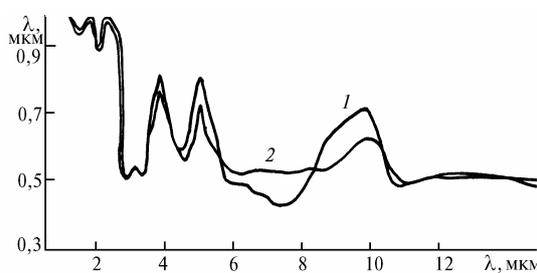


Рис. 6. Вероятности выживания кванта при различных параметрах в зависимости от длины волны: $\bar{a} = 100$ мкм; кривая 1 – $\mu = 8$; 2 – $\mu = 1$

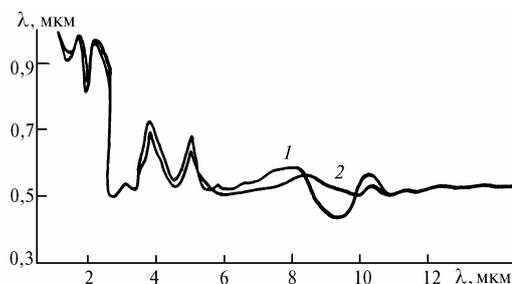


Рис. 7. Вероятности выживания кванта при разных параметрах μ в зависимости от длины волны: $\bar{a} = 250$ мкм; кривая 1 – $\mu = 8$; 2 – $\mu = 1$

Из анализа представленных на рис. 5–7 зависимостей следует, что в ИК-диапазоне рассеивающие объемы, содержащие атмосферные кристаллы, должны накапливать интенсивность оптического излучения в виде тепловой энергии. Причем в этом случае речь не может идти о каком-то общем уровне поглощенной интенсивности, так как величина последней в значительной степени зависит и от длины волны, и от среднего объема кристаллов.

В статье проведен сравнительный анализ значений коэффициента поглощения α_{abs} , полученных с помощью трех формул – аппроксимационной формулы (9) и интегрального представления (7), в котором использовались две формы сечения поглощения (2) и (4). Напомним,

что в (4) не учитываются высшие кратности внутренних отражений и данная форма сечения поглощения лежит в основе аппроксимационной формулы (9) для коэффициента поглощения.

Установлено, что вычисленные по разным формулам значения коэффициента α_{abs} , соответствующие одной и той же длине волны, отличаются не более чем на 1%. Причем наибольшие отклонения в значениях α_{abs} приходятся на спектральную область с малым показателем поглощения льда k ($\lambda \lesssim 2$ мкм), т.е. на ту область длин волн, где необходимо учитывать внутренние отражения более высокой кратности. Иными словами, неучет внутренних отражений приводит к большей погрешности, чем аппроксимация интегрального выражения α_{abs} алгебраической формулой.

Малая погрешность, которую дает аппроксимационная формула (9), обусловлена тем, что в отличие от аналогичного соотношения (8) для коэффициента ослабления α_{ext} она при прочих равных условиях не содержит осциллирующих слагаемых. Коэффициент поглощения не несет информацию о форме кристаллов, а связан с их объемами. Поэтому аппроксимационная формула (9), которая получена для частного случая рассеивающего объема, состоящего из ориентированных ледяных пластинок, имеет более широкую область применения, т.е. она может использоваться для оценки интенсивности оптического излучения, поглощенной атмосферными кристаллами любых других форм.

Подводя итог, можно сделать вывод, что сильное поглощение оптического излучения ледяными кристаллами в ИК-диапазоне не позволяет ими пренебречь, по-видимому, даже в простейших интерпретационных схемах, описывающих радиационный баланс атмосферы.

1. Боровой А.Г., Попов А.А., Шефер О.В. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4 № 9. С. 899–906.
2. Warren S.G. // J. Appl. Opt. 1984. V. 23. № 8. P. 1206–1225.
3. Попов А.А., Шефер О.В. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6 С. 899–904.
4. Auer A., Veal D. // J. Atm. Sci. 1970. V. 27. №N 6. P. 919–926.
5. Попов А.А., Шефер О.В. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 5. С. 532–536.

Институт оптики атмосферы
СО РАН г. Томск

Поступила в редакцию
11 июня 1993 г.

A. A. Popov, O. V. Shefer. **Theoretical Investigation of Light Absorption by Oriented Ice Plates in the IR region.**

A theoretical study of the absorption coefficient (α_{abs}) and the photon survival probability (Λ) in the IR region of spectrum for a scattering volume containing an ensemble of oriented ice plates is presented in this paper. As a result of this study an approximate formula for α_{abs} is derived. It is also shown that its spectral behavior in the IR region follows all features of the fine structure of the spectrum of refractive index of ice and it can reach the values comparable with those of scattering coefficient. It has been also revealed in this study that the value Λ in the IR region can take values from the interval 0,5 to 0,8 while being identically equal to unit in the visible region.