

С.Д. Творогов, Л.И. Несмелова, О.Б. Родимова

МОДЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПОГЛОЩЕНИЯ H₂O В ОКНЕ ПРОЗРАЧНОСТИ 8–14 МКМ

Исследована температурная зависимость поглощения излучения водяным паром в области 8–14 мкм на основе модельных расчетов, использующих приближение одной линии для оценки континуального поглощения вращательной полосой и средний коэффициент селективного поглощения. Показано, что при низких температурах основную роль играет поглощение крыльями линий, а при высоких – селективное поглощение. Таким образом, инверсия температурной зависимости поглощения в данном спектральном интервале обусловлена изменением относительной роли селективного и континуального поглощения.

Знание коэффициента поглощения водяного пара в спектральных областях, соответствующих окнам прозрачности атмосферы, необходимо для климатических моделей, для расчета теплового баланса атмосферы, для решения проблемы восстановления температуры атмосферы и подстилающей поверхности по измерениям уходящего излучения на спутниках Земли и т.д. При этом весьма важным оказывается правильное предсказание температурной зависимости коэффициента и функции поглощения для достаточно широкого интервала изменения температуры. В настоящее время атмосферное пропускание, как правило, моделируется на основе экспериментальных данных и, прежде всего, основополагающих работ Берча с сотрудниками, показывающих сильную отрицательную температурную зависимость. Однако в [2, 3] констатировано существенное уточнение – при температуре выше 400 К начинается рост коэффициента поглощения. Различные температурные зависимости появляются при измерениях спектрального коэффициента поглощения с лазером в качестве источника. Обзор этих результатов дан в [4]. В [5], посвященной определению температуры поверхности моря по измерениям со спутников, утверждается, что температурная зависимость коэффициента поглощения при низких температурах должна быть более сильной, нежели предсказывается в [1], и подчеркивается, что без надежного знания коэффициента поглощения в области окон прозрачности, и прежде всего в окне прозрачности 8–12 мкм, возможности использования спутниковых измерений оказываются ограниченными.

В данной статье поглощение излучения водяным паром в области 8–20 мкм рассматривается в рамках теории крыльев спектральных линий. Континуальное поглощение трактуется как результат поглощения крыльями вращательной и колебательно-вращательной полос водяного пара. При относительно низких температурах существенную роль в формировании континуального поглощения как функции температуры играет влияние ее на форму контура, а при высоких – на интенсивности линий. При повышении температуры возрастает вклад селективного поглощения, что может привести к смене характера температурной зависимости, наблюдаемой в [2, 3].

Это предположение иллюстрируют модельные расчеты, выполненные в приближении одной линии при оценке континуального поглощения, обусловленного вращательной полосой водяного пара, и со средним коэффициентом селективного поглощения. Хотя эти расчеты претендуют только на качественное описание, однако позволяют глубже понять физическую картину.

Итак, полагаем, что имеем одну линию с центром $\nu_0 = 250 \text{ см}^{-1}$ и с интенсивностью, равной интегральной интенсивности полосы [6]

$$\kappa_{\text{cont}} = (Sd) F(\Delta\nu) \Phi(\Delta\nu) f(\nu, \nu_i);$$
$$f(\nu, \nu_i) = \frac{\nu(1 - \exp(-\hbar\nu/kT))}{\nu_i(1 - \exp(-\hbar\nu_i/kT))} \left((\nu - \nu_i)^{-1,6} + \frac{\exp(-\hbar\nu_i/kT)}{(\nu + \nu_i)^{1,6}} \right).$$

Функция $F(R)$ определяется потенциалом межмолекулярного взаимодействия для молекул водяного пара, и вид ее для разных температур приведен на рис. 1. Появление функции Φ обусловлено необходимостью учета пространственной дисперсии, возникающей при тех малых межмолекулярных расстояниях, при которых происходит существенно нерезонансное поглощение света. Вид F и Φ детально обсуждался в [6].

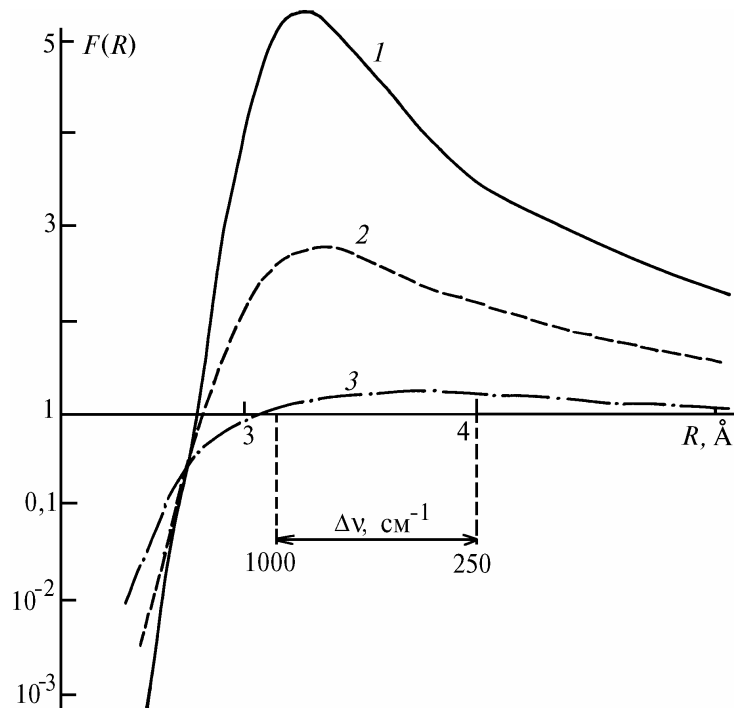


Рис. 1. Функция $F(R)$ для различных температур: 1 – 200, 2 – 285, 3 – 633 К. Стрелками обозначена область расстояний между взаимодействующими молекулами, соответствующих смещенным частотам от 250 до 100 см^{-1}

Результаты расчета континуального коэффициента поглощения по описанной схеме для различных температур приведены на рис. 2. Отметим адекватность характера полученной температурной зависимости той, что наблюдается экспериментально. На этом же рисунке показаны значения среднего селективного коэффициента поглощения. Можно видеть, что действительно при низких температурах все определяется поглощением в крыльях линий, а при высоких – селективным поглощением. Очевидно, что при промежуточных температурах ситуация может быть самая разная.

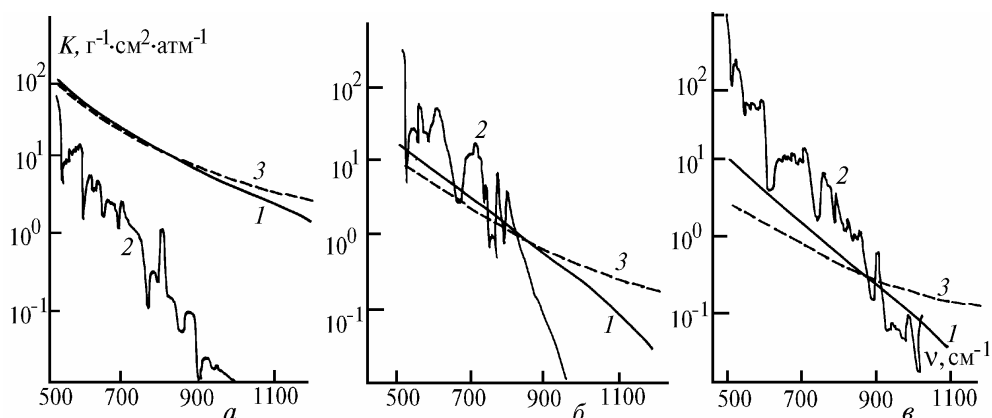


Рис. 2. Значения коэффициента поглощения водяного пара при различных температурах: а – 300, б – 500, в – 700 К. Кривые 1 соответствуют модельному расчету континуального поглощения, 2 – среднему коэффициенту селективного поглощения, 3 рассчитаны по эмпирической формуле, предложенной в [1]

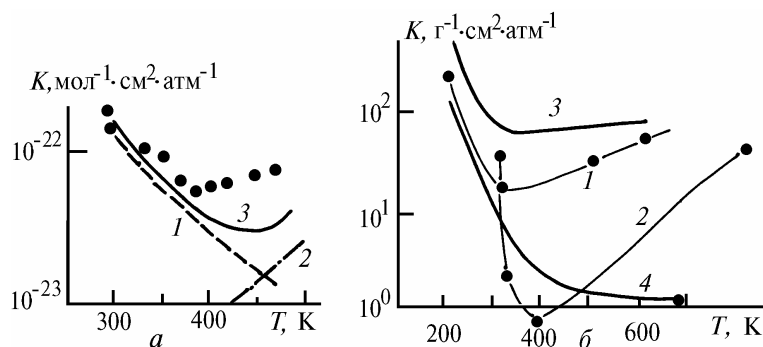


Рис. 3. Сопоставление результатов измерений температурной зависимости коэффициента поглощения водяного пара и результатов модельного расчета для различных частот: $a - \nu = 1203 \text{ см}^{-1}$, 1 – расчет согласно теории крыльев линий [6], 2 – селективная составляющая, 3 – суммарный коэффициент поглощения, точки – экспериментальные данные [2]; b – экспериментальные результаты [3] ($1 - \nu = 815 \text{ см}^{-1}$, $2 - \nu = 954 \text{ см}^{-1}$, результаты модельного расчета: $3 - \nu = 655 \text{ см}^{-1}$, $4 - \nu = 925 \text{ см}^{-1}$)

На рис. 3 результаты измерений температурной зависимости коэффициента поглощения для отдельных частот сравниваются с нашими оценками. Это сопоставление подтверждает основной вывод данной работы: изменение температурной зависимости коэффициента поглощения в области окна прозрачности 8–12 мкм обусловлено изменением относительной роли селективного и континуального поглощения. Отметим, что аналогичная ситуация наблюдается для коэффициента поглощения углекислого газа, см. [7].

1. Roberts R.E., Selby J.E. and Biberman L.M. // Appl. Opt. 1976. V. 15. P. 2085.
2. Montgomery G.P. // Appl. Opt. 1978. V. 17. P. 2299.
3. Москаленко Н.И. // 5-й Всесоюз. Симп. по молекулярной спектроскопии высокого и сверхвысокого разрешения. (Тезисы докл.) Томск, ИОА СО АН СССР. 1980. С. 167–170.
4. Grant W.B. // Appl. Opt. 1990. V. 29. P. 451.
5. Bartin J.J. // Appl. Opt. 1991. V. 30. P. 2929.
6. Несмелова Л.И., Родимова О.Б., Творогов С.Д. Контур спектральной линии и межмолекулярное взаимодействие, Новосибирск: Наука, 1986. 215 с.
7. Несмелова Л.И., Родимова О.Б., Творогов С.Д. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. №9. С. 939.

Институт оптики атмосферы
СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию
15 июля 1994 г.

S.D. Tvorogov, L.I. Nesmelova, O.B. Rodimova. **Model Description of Temperature Dependence of the H₂O Absorption in the Transparency of Window of 8–14 μm.**

The temperature dependence of the water vapor absorption in the spectral region 8–14 μm is investigated on the basis of the model calculations using the approximation of the individual line to evaluate the absorption due to the H₂O rotational band and the averaged selective absorption. It is shown that at low temperatures the line wing absorption plays a leading part and at the higher temperatures the selective absorption does it. Thus, the inversion of the temperature dependence of the absorption in this spectral region is determined by the change of the relative role of the selective and continual absorption.