

## РАССЕЯНИЕ И ПЕРЕНОС ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ

УДК 535.33:34+551.521.3

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

### ПОГЛОЩЕНИЕ ВОДЯНЫМ ПАРОМ В БЛИЗКОЙ ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ И НЕКОТОРЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ

Оценки верхней границы коротковолнового континуума в спектре водяного пара свидетельствуют, что он значительно меньше эмпирического атмосферного континуума и явно недостаточен для интерпретации «избыточного поглощения» радиационных потоков в облаках.

1. В течение достаточно длительного времени в литературе обсуждается проблема аномального (избыточного) поглощения коротковолновой радиации в облаках (см., например, [1, 2] и ссылки в них). Существуют различные взгляды на природу и механизм этого явления. Так, в [2] наиболее вероятными причинами аномального поглощения предполагаются влияние многократного рассеяния коротковолновой радиации в облаках, обуславливающее рост длины свободного пробега фотонов и, следовательно, усиление поглощения, и загрязнение облаков поглощающими коротковолновую радиацию компонентами (особенно сажевым аэрозолем). Еще одной версией объяснения является влияние горизонтального переноса в стохастически неоднородном облаке [3]. Кроме того, в работе [1] избыточное поглощение облаками трактуется как результат континуального поглощения водяным паром, и для количественного его описания используется методика, предложенная ранее для области 3,3–4,2 мкм [4].

В данной статье мы оценим величину избыточного поглощения, опираясь на экспериментальные данные из [5], и попытаемся ответить на вопрос, может ли быть избыточное поглощение обусловлено поглощением крыльями линий водяного пара.

2. Наличие континуального поглощения водяным паром в спектральных интервалах, свободных от полос поглощения (окнах прозрачности атмосферы), достаточно хорошо известно. Следует отметить, что именно эти участки спектра в значительной степени определяют величину приходящего солнечного и уходящего теплового излучения Земли. Детальный обзор экспериментальных данных по континуальному поглощению и способов их описания для наиболее существенных окон прозрачности атмосферы приведен в работе [6].

Обширная литература посвящена длинноволновому окну прозрачности 8–12 мкм. Хорошо изучены основные эмпирические закономерности поглощения водяного пара – зависимость от температуры и давления как в случае самоуширения, так и при уширении посторонними газами. Хотя относительно природы этого поглощения довольно долго и активно велась дискуссия (предлагались гипотезы о поглощении кластерами, димерами, аэрозолями, крыльями спектральных линий), существенная роль далеких крыльев линий водяного пара в настоящее время может считаться неоспоримой.

Область 3–5 мкм менее изучена, однако имеющиеся результаты позволяют уверенно фиксировать наличие континуального поглощения и утверждать, что его величина значительно меньше, чем в области 8–12 мкм. Слабое поглощение в области 2–2,5 мкм экспериментально исследовано при высоких температурах. Если принять, что зависимость поглощения от температуры для этой области аналогична таковой для области 3–5 мкм, то при нормальных температурах континуальное поглощение в этих областях будет одного порядка.

Для видимой и ближней ИК-области имеются только отдельные измерения, свидетельствующие о существовании континуального поглощения и о весьма малой его величине. Так, в [6] приводится значение коэффициента поглощения для частоты  $\nu = 9466 \text{ см}^{-1}$  (в пределах окна 1 мкм водяного пара), равное  $6 \cdot 10^{-10} \text{ см}^{-1}$ , полученное при парциальном давлении водяного пара  $P_{\text{H}_2\text{O}} = 16,5 \text{ Торр}$ , давлении азота как уширяющего газа  $P_{\text{N}_2} = 1 \text{ атм}$  и при температуре

$T = 30^\circ\text{C}$ . Таким образом, поглощение в этой области приблизительно на два порядка меньше, чем для областей 4 или 2 мкм. О существовании слабого континуального поглощения водяным паром в условиях атмосферы для области 0,648–3,92 мкм сообщается в работе [5], где приводятся значения коэффициентов поглощения для отдельных узких спектральных интервалов из этой области. Эти значения получены специальной обработкой серии измерений ослабления солнечной радиации атмосферой и имеют точность  $\sim 25\%$ . Так как коэффициенты поглощения были пропорциональны первой степени давления водяного пара, можно считать их относящимися к случаю уширения азотом. Они были использованы нами для оценки величины континуального поглощения в видимой и близкой инфракрасной области спектра.

3. Коэффициент поглощения  $k$  в общем случае может быть представлен как сумма двух слагаемых, одно из которых,  $k_{\text{sel}}$ , обусловлено поглощением линий, расположенных в пределах рассматриваемого узкого спектрального интервала или достаточно близко от него ( $\Delta\nu \sim 20\text{--}25\text{ см}^{-1}$ ), а другое,  $k_{\text{cont}}$ , определяется поглощением крыльями более удаленных линий:

$$k = k_{\text{sel}} + k_{\text{cont}} .$$

Поскольку измерения, представленные в [5], не являются монохроматическими (выполнены с разрешением  $\sim 3\text{--}5\text{ см}^{-1}$ ), нужно работать с функцией пропускания  $T$ :

$$T = T_{\text{sel}} T_{\text{cont}} ,$$

$$T_{\text{sel}} = \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\nu_1}^{\nu_2} e^{-k_{\text{sel}}(\nu)w} d\nu = \frac{1}{\Delta\nu} \sum_j e^{-k_{\text{sel}}(\nu_j)w} d\nu_j , \quad T_{\text{cont}} = \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\nu_1}^{\nu_2} e^{-k_{\text{cont}} w} d\nu \cong e^{-k_{\text{cont}} w} ,$$

где  $w$  – поглощающая масса. Коэффициент континуального поглощения  $k_{\text{cont}}$  может быть тогда определен из соотношений

$$T_{\text{cont}} = T/T_{\text{sel}} ; k_{\text{cont}} = -\frac{\ln(T/T_{\text{sel}})}{w} = -\frac{\ln T_{\text{cont}}}{w} .$$

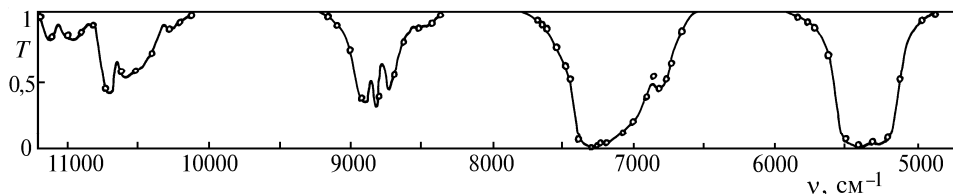


Рис. 1. Функции пропускания для смеси  $\text{H}_2\text{O}\text{--}\text{N}_2$  при общем давлении  $P = 1$  атм,  $T = 296$  К и поглощающей массе  $w = 0,845$  г/см<sup>2</sup>. Кривые – экспериментальные результаты [8], точки – наш расчет с лорентцевским контуром, оборванным на расстоянии  $\Delta\nu = 20\text{ см}^{-1}$  от центра линии

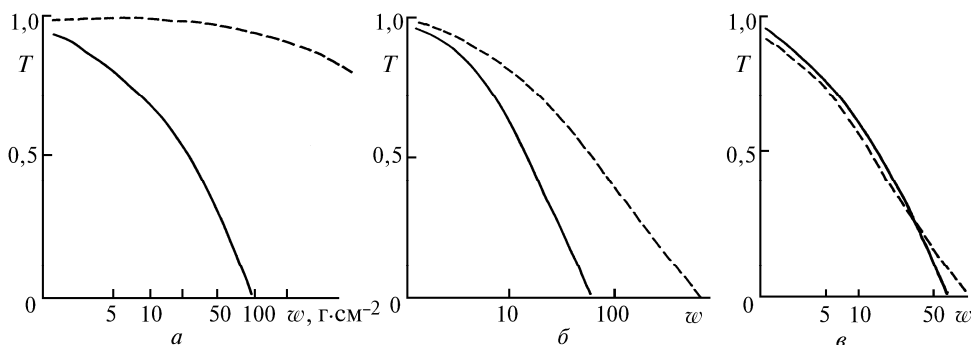


Рис. 2. Функции пропускания:  $T_{\text{exp}}$ , рассчитанная с экспериментальными значениями  $k_{\text{exp}}$  [5] (—), и  $T_{\text{sel}}$  (---) как функции поглощающей массы  $w$  для частотных интервалов:  $a - 13243,3 \div 13246,8\text{ см}^{-1}$  ( $\lambda = 0,755$  мкм);  $b - 12344 \div 12347\text{ см}^{-1}$  ( $\lambda = 0,81$  мкм);  $v - 10988 \div 10990\text{ см}^{-1}$  ( $\lambda = 0,91$  мкм)

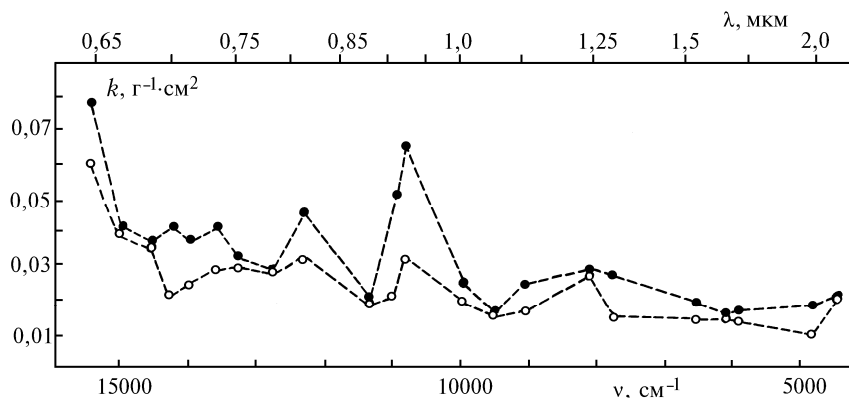


Рис. 3. Коэффициенты поглощения:  $k_{\text{exp}} [5]$  (•) и  $k_{\text{cont}} = -(\ln(T_{\text{exp}}/T_{\text{sel}}))/w$  (°)

Значения  $T_{\text{sel}}$  рассчитывались с лорентцевским контуром, обрываемым при  $\Delta\nu = 20 \text{ см}^{-1}$ , с применением базы данных [7]. Качество расчета  $T_{\text{sel}}$  контролировалось сопоставлением с экспериментальными данными [8] для нескольких полос поглощения, см. рис. 1. Рис. 2 иллюстрирует расчет  $T_{\text{sel}}$  и  $T$  как функции  $w$  с приведенными в [5] коэффициентами для нескольких характерных частот. Полученные таким образом коэффициенты непрерывного поглощения приведены на рис. 3 и в таблице.

Рассчитанные коэффициенты непрерывного поглощения в сравнении с экспериментальными,  $\text{г}^{-1}\cdot\text{см}^2$

$\lambda$ , МКМ	$k_{\text{exp}} [5]$	$k_{\text{cont}}$	$k_{\text{cont Lor}}(\Delta\nu = 500 \text{ см}^{-1})$
2,27	0,021	0,02	0,001
2,12	0,018	$8 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
0,91	0,052	0,026	$7,7 \cdot 10^{-4}$
0,81	0,046	0,03	$10^{-4}$
0,755	0,032	0,03	$10^{-6}$

4. Рассмотрим возможность объяснения непрерывного поглощения поглощением далеких крыльев водяного пара.

Можно считать надежно установленным, что контур колебательно-вращательных линий вдали от их центра является нелорентцевским. Известны основные закономерности поведения поглощения на периферии контура: близкие крылья могут быть несколько выше, чем лорентцевские, а на больших расстояниях появляется экспоненциальный спад. Такое поведение контура следует из анализа обширной совокупности экспериментальных данных для молекул  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и др.

Теоретические исследования также приводят к выводу об экспоненциальном спаде коэффициента поглощения в далеких крыльях. Причина этого лежит в характере межмолекулярного взаимодействия на малых межмолекулярных расстояниях и в определяющей роли этого взаимодействия для формирования контура линии [4, 9, 10]. Детальные расчеты формы контура линий водяного пара для полос, расположенных в видимой и ближней ИК-области спектра, являются достаточно трудоемкими, поэтому имеет смысл сделать некоторые предварительные оценки.

Мы рассчитали коэффициент поглощения водяного пара в случае уширения азотом с лорентцевским контуром  $k_{\text{Lor}}$ , обрезанным на расстоянии  $\Delta\nu \cong 500 \text{ см}^{-1}$ . Так как отклонения контура от лорентцевского в сторону экспоненциального спада отмечены для более близких, чем  $500 \text{ см}^{-1}$ , смещенных частот (см., например, [4, рис. 4] и [10, рис. 1]), рассчитанные значения можно рассматривать как верхнюю границу коэффициента поглощения.

Приведенные в таблице и на рис. 4 значения  $k_{\text{Lor}}$  с очевидностью свидетельствуют о том, что расчет даже с лорентцевскими крыльями приводит к значительно меньшему, чем экспериментальный, коэффициенту поглощения. Отсюда следует вывод о необходимости искать другие причины непрерывного ослабления в рассматриваемой области спектра, нежели поглощение далекими крыльями линий водяного пара в видимой и близкой ИК-области спектра.

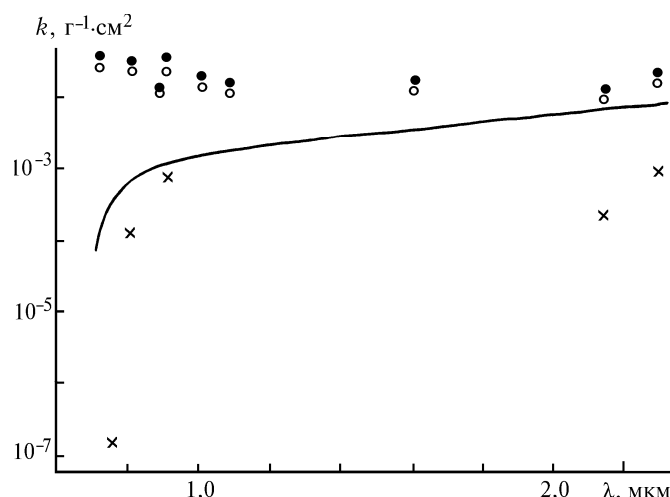


Рис. 4. Коэффициенты поглощения:  $k_{\text{exp}}$  [5] ( $\circ$ ),  $k_{\text{cont}} = -(\ln(T_{\text{exp}}/T_{\text{sel}}))/W$  ( $\circ$ ),  $k_{\text{cont Lor}}(\Delta\nu = 500 \text{ cm}^{-1})$  ( $\times$ ) и коэффициент непрерывного поглощения согласно [1] (—)

Конечно, некоторые уточнения цифр несомненно появятся при расчете с реальным контуром линии, учитывающим также и специфику коротковолнового спектрального интервала, но вряд ли это решающим образом повлияет на общий вывод.

5. Итоги проделанных оценок иллюстрируют давно дискутируемый вопрос о существовании «атмосферного континуума», а обусловленный молекулярным поглощением континуум можно назвать «спектроскопическим». Сейчас имеется в виду безоблачная атмосфера, и часто атмосферный континуум приписывается субмикронному поглощающему аэрозолю (поэтому соответствующий коэффициент ослабления пропорционален абсолютной влажности, а не относительной, как у грубодисперсного аэрозоля). Факт превосходства, и весьма значительного, атмосферного континуума над спектроскопическим следует из приведенных рисунков. Речь, разумеется, идет о микроокнах прозрачности – участках, свободных от достаточно сильных линий поглощения.

Можно еще говорить об «облачном континууме» – факторе, призванном формально разъяснить «радиационный парадокс», заключающийся в том, что сумма коэффициентов отражения и пропускания радиации облачным слоем меньше единицы. Хотя оценки [1] облачного континуума оказываются ниже атмосферного (и это интересно само по себе), все равно он превосходит верхнюю границу континуума спектроскопического.

1. Stephens G.L. and Si-Chee Tsay // Quant. J. Roy. Meteorol. Soc. 1990. V. 116. P. 671–704.
2. Кондратьев К.Я., Биненко В.И., Мельникова И.Н. // Метеорология и гидрология. 1996. N 2. С. 14–23.
3. Титов Г.А. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. N 10. С. 1295–1318.
4. Clough S.A., Kneizys F.X., Davies R.W. // Atmospheric Research. 1989. V. 23. P. 229–241.
5. Tomasi C., Guzzi R. and Vittori O. // J. Atmos. Sci. 1974. V. 31. P. 255–260.
6. Thomas M.E. and Delays C.J. // Proc. of the 14th Annual Review Conference on Atmospheric Transmission Models. 1991. 11–12 June. P. 342–349.
7. Rothman L.S., Gamache R.R., Tipping R.H. et al. // JQSRT. 1992. V. 48. P. 469.
8. Jamanouchi J., Tanaka M. // JQSRT. 1985. V. 34. P. 463.
9. Несмелова Л.И., Родимова О.Б., Творогов С.Д. Контур спектральной линии и межмолекулярное взаимодействие. Новосибирск: Наука, 1986. 216 с.
10. Ma Q., Tipping R.H. // J. Chem. Phys. 1992. V. 97. N 2. P. 818.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
11 октября 1996 г.

L.I. Nesmelova, O.B. Rodimova and S.D. Tvorogov. **Water Vapor Absorption in near Infrared and Some Geophysical Impact.**

Estimates of the upper boundary of the shortwave continuum in the water vapor spectrum show that it is much less than the empirical atmospheric continuum and is clearly inadequate for interpretation of the «excessive absorption» of radiation in clouds.