

И.В. Пташник¹, В.А. Капитанов¹, Ю.Н. Пономарев¹,
Н.П. Криволицкий¹, С.М. Кобцев², С.И. Каблуков³

Определение коэффициента континуального поглощения водяного пара в области 0,900 мкм

¹ Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

² Новосибирский госуниверситет,

³ Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск

Поступила в редакцию 18.05.2006 г.

На основе непрерывного лазера на титане с сапфиром впервые в микроокне прозрачности в области 0,900 мкм выполнены оптико-акустические измерения поглощения водяного пара в смеси с азотом при атмосферном давлении. Восстановленное значение сечения континуального поглощения составило $(2,9 \pm 0,8) \times 10^{-25} \text{ см}^2 \cdot \text{молек}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$, что соответственно на 15 и 75% превышает предсказание моделей континуума SKD-2.4 и MT_SKD.

Несмотря на более чем полувековые исследования, проблема континуального поглощения водяного пара по-прежнему привлекает большое внимание теоретиков и экспериментаторов. Под вопросом остаются как сама природа этого феномена, так и величина континуума в отдельных спектральных интервалах. Известно, что наиболее широко используемая сегодня в атмосферных приложениях полумпирическая модель континуума SKD [1], включая последние версии SKD-2.4 [2] и MT_SKD [3], получена на основе подгонки к данным эксперимента только в среднем и дальнем ИК-диапазонах и не имеет систематической верификации в ближней ИК- и видимой областях спектра. Более

того, отдельные имеющиеся в этой области эксперименты [4–6] свидетельствуют о значительном, в некоторых случаях, разногласии с моделью SKD, особенно в спектральных интервалах, где предполагается наличие существенного поглощения димерами воды [7, 8].

В данной статье сообщается о результатах определения континуального поглощения водяного пара в области 0,900 мкм (в интервале 11100–11118 см^{-1}) с помощью спектрометра на базе непрерывного одночастотного кольцевого Ti:Sapphire-лазера «TIS-SF-07» (<http://www.tekhnoscan.ru>) и оптико-акустической резонансной ячейки. Блок-схема спектрометра приведена на рис. 1.

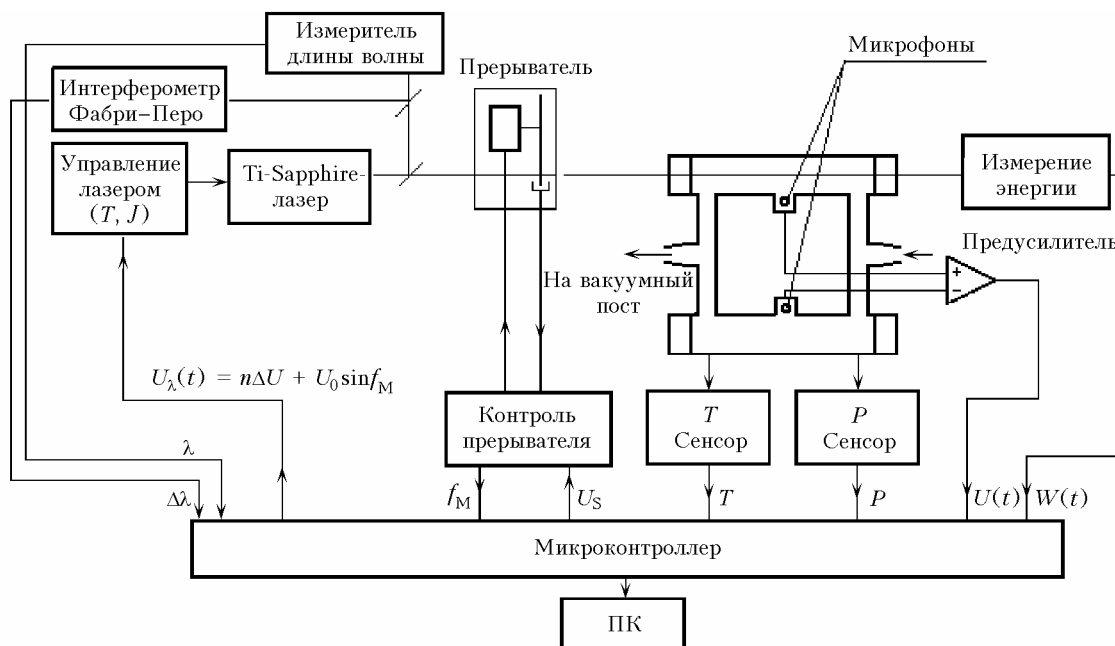


Рис. 1. Блок-схема спектрометра с резонансной оптико-акустической ячейкой на базе непрерывного перестраиваемого лазера на титане с сапфиром

Мощность излучения лазера в спектральном диапазоне 0,75–0,95 мкм варьирует от 0,5 до 1 Вт в зависимости от длины волны генерации. Ширина линии излучения – менее 5 МГц ($0,0002 \text{ см}^{-1}$), т.е. много меньше характерной полуширины спектральных линий поглощения в воздухе при давлениях, близких к атмосферному. Диапазон плавной, управляемой микроконтроллером перестройки частоты излучения лазера составляет 10 ГГц ($0,33 \text{ см}^{-1}$). Настройка начальной частоты излучения лазера во всем диапазоне осуществлялась вручную. Контроль частоты излучения лазера проводился измерителем длины волны WS/5 (http://www.toptica.com/page/wavelength_meter_angstrom.php) с погрешностью $\Delta\nu/\nu = 10^{-7}$.

Оптико-акустическая резонансная ячейка представляет собой модификацию резонатора Гельмгольца и состоит из двух идентичных цилиндрических ячеек (длина 0,15 м, диаметр 0,006 м), соединенных на концах двумя капиллярами [9]. В середину каждой из ячеек вмонтирован микрофон Knowles-3027 чувствительностью $10 \text{ мВ} \cdot \text{Па}^{-1}$. При мощности излучения лазера 1 Вт пороговая чувствительность спектрометра по коэффициенту поглощения составила $(4 \pm 2) \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-1}$. Методика измерений детально описана, например, в [9].

Пример спектра поглощения, полученного для смеси водяного пара при давлении 20 мбар и азота 1000 мбар, приведен на рис. 2.

Слишком малый диапазон плавной перестройки лазера, а также нестабильная генерация, обусловленная высоким содержанием паров воды в резонаторе лазера во время эксперимента (эксперимент проводился в летнее время), не позволили обеспечить достаточную точность измерений при других давлениях водяного пара.

Калибровка спектрометра производилась по максимуму линии поглощения H_2O $11116,7 \text{ см}^{-1}$ и участку спектра между двумя линиями в области

$11107,3 \text{ см}^{-1}$, т.е. все измеренные значения поглощения умножались на масштабирующий фактор, приводящий в соответствие расчет и эксперимент в указанных спектральных участках. Расчет проводился на основе базы данных HITRAN-2004 [10]. Учитывая, что интенсивности и коэффициенты уширения соответствующих сильных линий ($11107,160$; 11107 ; 7097 и $11116,66 \text{ см}^{-1}$) вблизи исследуемого интервала известны с погрешностью не более 2–5 и 2% (согласно индексу погрешности в HITRAN-2004), есть основания считать, что погрешность калибровки не превышала 5–7%.

Поскольку в качестве буферного газа использовался чистый азот, а коэффициенты уширения в HITRAN приведены для воздуха, они были скорректированы в данной работе. Ранее [11, 12] было показано, что отношение коэффициента уширения линий водяного пара в воздухе и в азоте примерно равно 0,9 для данного спектрального диапазона. Таким образом, для расчетов использовались коэффициенты уширения воздухом из HITRAN-2004, увеличенные на 10%.

В итоге континуальное поглощение в области $11112,6 \text{ см}^{-1}$ определялось как разница между измеренным и рассчитанным поглощением. При этом согласно формализму СКД модели континуума [1] в расчет включался только локальный вклад линий (т.е. рассчитанный в пределах 25 см^{-1} от центра каждой линии и уменьшенный на величину поглощения на краю данного интервала). Полученные результаты позволяют оценить коэффициент континуального поглощения в области спектра $0,900 \text{ мкм}$ на уровне $(1,4 \pm 0,4) \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-1}$ при давлении водяного пара 20 мбар, давлении азота 1000 мбар и температуре 300 К (сечение поглощения $(2,9 \pm 0,8) \cdot 10^{-25} \text{ см}^2 \cdot \text{молек}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$). Основной вклад в указанную погрешность при этом обусловлен неточным знанием параметров спектральных линий в HITRAN-2004 (вклад в итоговую погрешность

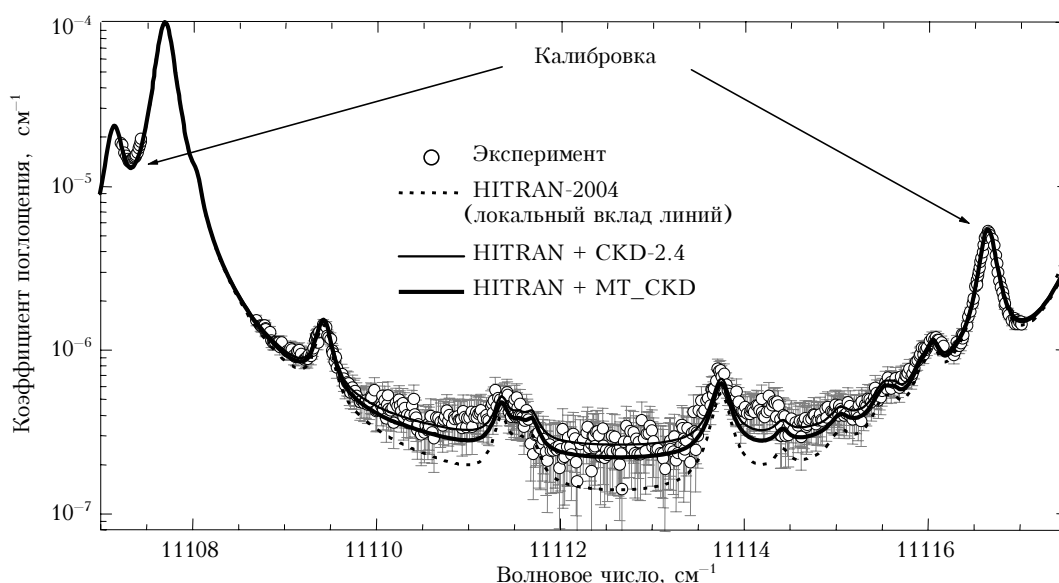


Рис. 2. Измеренный и расчетный спектры коэффициента поглощения водяного пара для смеси 20 мбар H_2O + 1000 мбар N_2 при температуре 300 К

$\sim 0,2 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-1}$), а также погрешностью определения давления водяного пара в ячейке (~ 1 мбар) (итоговый вклад $\sim 0,07 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-1}$) и случайными погрешностями измерений.

Из рис. 2 видно, что в отличие от результата, полученного, например, для области 0,694 мкм [6], восстановленное значение континуального поглощения в данном случае гораздо лучше соответствует модели континуума СКД-2.4, чем последней версии — MT_CKD (соответственно $1,24 \cdot 10^{-7}$ и $0,80 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-1}$ для условий эксперимента), превышая предсказания этих моделей соответственно на 15 и 75%.

Дальнейший интерес в данном спектральном диапазоне может представлять проведение измерений в чистом водяном паре ввиду возможного наличия заметного вклада димеров воды в континуум самоуширения.

Авторы выражают благодарность А.М. Шалагину и С.А. Бабину за помощь в организации измерений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 04-05-64569-а) и комплексного интеграционного проекта СО РАН № 3.13.

1. Clough S.A., Kneizys F.X., Davies R.W. Line shape and water vapor continuum // *Atmos. Res.* 1989. V. 23. P. 229–241.
2. Mlawer E.J., Clough S.A., Brown P.D., Tobin D.C. Recent developments in the water vapor continuum // Ninth ARM Science Team Meeting Proc. March 22–26. 1999. P. 1–6. San Antonio, TX.
3. Mlawer E.J., Tobin D.C., Clough S.A. A Revised Perspective on the Water Vapor Continuum: The MT_CKD Model // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* (in preparation).
4. Fulghum S.F., Tilleman M.M. Interferometric calibrator for the measurement of water-vapor absorption // *J. Opt. Soc. Amer. B.* 1991. V. 8. N 12. P. 2401–2413.

5. Sierk B., Solomon S., Daniel J.S., Portmann R.W., Gutman S.I., Langford A.O., Eubank C.S., Dutton E.G., Holub K.H. Field measurements of water vapor continuum absorption in the visible and near-infrared // *J. Geophys. Res. D.* 2004. V. 109. N 8. P. D08307.
6. Тухомиров А.Б., Пташник И.В., Тухомиров Б.А. Измерение коэффициента континуального поглощения водяного пара в области 14400 см^{-1} // *Оптика и спектроскопия.* 2006. Т. 101. N 1. С. 86–96.
7. Ptashnik I.V., Smith K.M., Shine K.P., Newnham D.A. Laboratory measurements of water vapour continuum absorption in spectral region $5000\text{--}5600 \text{ см}^{-1}$: Evidence for water dimers // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2004. V. 130. N 602. P. 2391–2408.
8. Пташник И.В. Димеры воды: «неизвестный» эксперимент // *Оптика атмосфер. и океана.* 2005. Т. 18. № 4. С. 359–362.
9. Song K., Cha H.K., Kapitanov V.A., Ponomarev Yu.N., Rostov A.P., Zeninary V., Parvite B., Courtois D. Differential Helmholtz resonant photoacoustic cell for Spectroscopy and gas analysis with room-temperature diode lasers // *Appl. Phys. B.* 2002. V. 75. N 2–3. P. 215–227.
10. Rothman L.S., Jacquemart D., Barbe A., D. Chris Benner, Birk M., Brown L.R., Carleer M.R., Chackerian C., Jr., Chance K., Dana V., Devi V.M., Flaud J.-M., Gamache R.R., Goldman A., Hartmann J.-M., Jucks K.W., Maki A.G., Mandin J.-Y., Massie S.T., Orphal J., Perrin A., Rinsland C.P., Smith M.A.H., Tennyson J., Tolchenov R.N., Toth R.A., Vander J. Auwera, Varanasi P., Wagner G. The HITRAN 2004 Molecular Spectroscopic Database // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* 2005. V. 96. N 2. P. 139–204.
11. Grossmann B.E., Browell E.V. Water-vapor line broadening and shifting by air, nitrogen, oxygen, and argon in the 720-nm wavelength region // *J. Mol. Spectrosc.* 1989. V. 138. N 2. P. 562–595.
12. Mandin J.Y., Chevillard J.P., Flaud J.M., Camy-Peyret C. N₂ broadening coefficients of H₂¹⁶O lines between 9500 and 11500 см^{-1} // *J. Mol. Spectrosc.* 1989. V. 138. N 1. P. 272–281.

I.V. Ptashnik, V.A. Kapitanov, Yu.N. Ponomarev, N.P. Krivolutsky, S.M. Kobtsev, S.I. Kablukov. **Determination of the water vapor continuum absorption coefficient in 0.900 μm spectral region.**

Photo-acoustic measurements of the water vapour absorption in mixture with nitrogen are performed for the first time in transparency micro-windows near 0.900 μm on the basis of Ti: Sapphire CW laser. Retrieved value of the water continuum absorption — $(2.9 \pm 0.8) \cdot 10^{-25} \text{ cm}^2 \cdot \text{molec}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1}$ exceeds the predictions of CKD-2.4 и MT_CKD continuum models respectively by 15 and 75%.