

Фурье-спектрометр с 30-метровой многоходовой кюветой для исследования слабых спектров поглощения атмосферных газов

Ю.Н. Пономарев¹, Т.М. Петрова¹, А.М. Солодов¹,
А.А. Солодов¹, С.А. Сулакшин^{2*}

¹ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

² Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3

Поступила в редакцию 7.06.2011 г.

Представлены конструкция и технические характеристики измерительного комплекса на основе Фурье-спектрометра IFS-125 HR и 30-метровой многоходовой кюветы с оптической системой Уайта, обеспечивающей длину оптического пути свыше 600 м. Выполнены измерения спектра поглощения атмосферного воздуха с разрешением $2 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ и чувствительностью лучше, чем 10^{-8} см^{-1} . Показано, что аппаратура уверенно регистрирует спектры слабого поглощения, включая полосы поглощения изотопных модификаций атмосферных молекул.

Ключевые слова: Фурье-спектрометр, многоходовая кювета, спектр поглощения; Fourier-spectrometer, multipass cell, absorption spectra.

Чувствительность спектрометрических методов в молекулярной спектроскопии газовых сред определяется оптической толщиной поглощающего слоя $D = kL$, где k – коэффициент поглощения газа; L – длина пути оптического излучения в поглощающей среде.

При исследовании спектров слабого поглощения, таких как, например, спектры поглощения молекул атмосферных газов в ИК-, видимом и УФ-диапазонах, для повышения чувствительности аппаратуры в состав лазерных или Фурье-спектрометров включают многоходовые газовые кюветы (МГК), обеспечивающие длину оптического хода от нескольких сотен метров до нескольких километров [1–4].

Несмотря на технические сложности создания и эксплуатации таких кювет, они дают возможность измерения очень слабых спектров поглощения газовых сред при точном контроле температуры, давления и состава газовой смеси, что практически недоступно на природных трассах.

Ниже дано описание спектрофотометрического измерительного комплекса на базе Фурье-спектрометра IFS-125 HR и 30-метровой многоходовой кюветы с оптической системой Уайта, который позволяет получать длину оптического пути свыше 600 м. Схе-

ма Фурье-спектрометра с МГК и основных его узлов приведена на рис. 1.

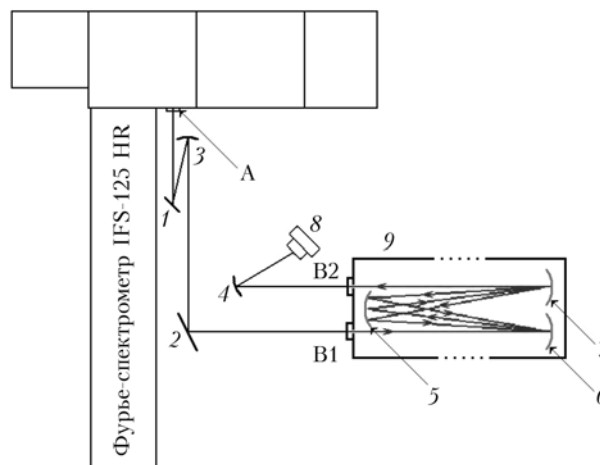


Рис. 1. Блок-схема оптического измерительного комплекса, включающего: 1, 2 – плоские зеркала; 3 – длиннофокусное зеркало; 4 – фокусирующее зеркало; 5–7 – кюветные сферические зеркала; 8 – фотоприемник; 9 – многоходовую кювету с базой 30 м; А – выходной порт спектрометра; В1, В2 – окна кюветы

Многоходовая газовая кювета выполнена в виде цилиндрической трубы из нержавеющей стали с внутренним диаметром 0,7 м и длиной 30 м. Откачка кюветы производится в 2 этапа: с помощью ротационного водокольцевого насоса РМК-4 до давления

* Юрий Николаевич Пономарев (yuron@iao.ru); Татьяна Михайловна Петрова (tanja@iao.ru); Александр Михайлович Солодов (solodov@asd.iao.ru); Александр Александрович Солодов (solodov@sibmail.com); Степан Александрович Сулакшин.

60 мм рт. ст. и тремя вакуумными насосами НВЗ-20 до давления $5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.

Для проведения исследований спектров поглощения в диапазоне температур от комнатной до 350 К на наружной поверхности кюветы расположены 3 секции: по трубам этих секций предусмотрена циркуляция горячей воды с температурой до 360 К.

Кювета укомплектована трехзеркальной оптической системой Уайта, состоящей из прямоугольного зеркала (размером 300×150 мм) и двух круглых зеркал объективов диаметром 150 мм каждое.

При оптическом согласовании Фурье-спектрометра и многоходовой газовой кюветы необходимо, чтобы излучение, выходящее из спектрометра, фокусировалось зеркалом 3 в плоскости зеркала 5 на входе МГК и засвечивало первый из объективов системы 6 примерно на 90% его площади. Математически это условие можно записать в виде простой формулы

$$d/f = d'/R,$$

где d и d' — диаметр выходного пучка света Фурье-спектрометра и диаметр светового пятна на зеркалах 6, 7 МГК, равные 60 и 140 мм соответственно; f — фокусное расстояние зеркала 3; R — радиус кривиз-

ны зеркал МГК, равный 27830 мм. Как следует из формулы, при указанных значениях d , d' и R значение f равно 11927 мм. Такую длину пути свет должен пройти, прежде чем он сфокусируется в плоскости зеркала 5. Для уменьшения этого расстояния нами был рассчитан двухкомпонентный объектив (зеркала 2 и 3 на рис. 1), который позволил значительно уменьшить это расстояние.

С помощью разработанной системы согласования Фурье-спектрометра с МГК нам удалось осуществить 22 прохода луча внутри МГК, что при базовом расстоянии между зеркалами 27,83 м приводит к длине пути луча в кювете, равной 612,26 м. Эта длина пути была получена при использовании в Фурье-спектрометре в качестве источника света 50-ваттной галогеновой лампы и диафрагмы, равной 0,8 мм.

Пример записи спектра поглощения атмосферного воздуха с разрешением $0,02 \text{ см}^{-1}$ в области от 4000 до 12000 см^{-1} , полученного с использованием многоходовой кюветы с базой 30 м (длина пути луча в кювете 612,26 м), приведен на рис. 2, б.

Данный спектр был получен путем стыковки двух спектральных участков, зарегистрированных с помощью Si- и InSB-детекторов. Для сравнения на рис. 2, а приведен спектр поглощения атмосферы

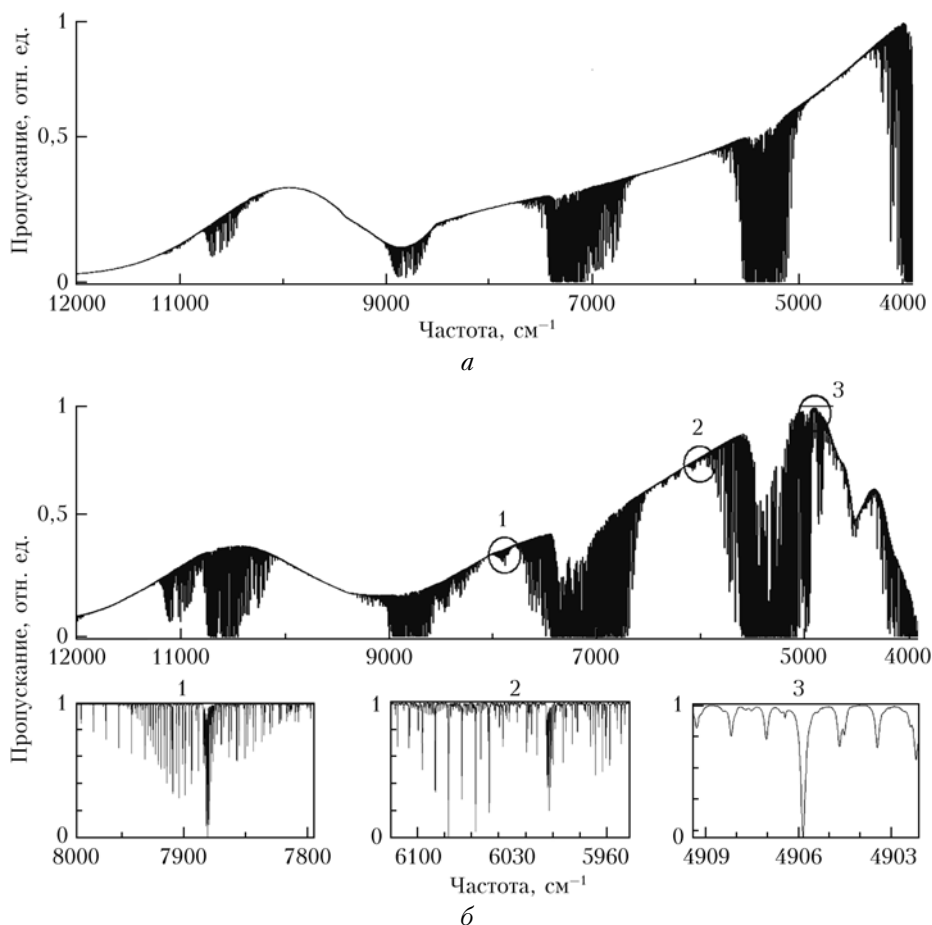


Рис. 2. Спектр поглощения атмосферного воздуха в области от 12000 до 4000 см^{-1} , зарегистрированный при длине пути луча, равной 10 (а) и 612,26 м (б)

при длине пути света в кювете 10 м. Сравнение зарегистрированного нами спектра с данными HITRAN [5] показало, что сильные полосы поглощения принадлежат водяному пару. В области 7800–8000 cm^{-1} уверенно регистрируется полоса поглощения кислорода (см. рис. 2, б, фрагмент 1). В области 5900–6200 cm^{-1} расположен спектр поглощения метана (см. рис. 2, б, фрагмент 2). Используя известные в [5] значения интенсивностей линий поглощения метана и длину пути луча, мы определили концентрацию метана, которая составила 2 ppm. Большая длина трассы позволила зарегистрировать в области около 4900 cm^{-1} спектр поглощения $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ (см. рис. 2, б, фрагмент 3), его концентрация по отношению к основному изотопу составляет приблизительно 1%. Полученные результаты говорят о высокой чувствительности измерительного комплекса.

Приведение экспериментов частично поддержано грантом РФФИ, проект № 10-05-92603-КО и Программой ОФН РАН, проект III.9.4.

1. Пономарев Ю.Н., Тырышкин И.С. Спектрофотометрический комплекс для измерения поглощения лазерного излучения ИК-, видимого и УФ-диапазонов молекулярными газами // Оптика атмосфер. и океана. 1993. Т. 6, № 4. С. 360–368.

2. Пономарев Ю.Н., Тырышкин И.С. Увеличение чувствительности и отношения сигнал-шум в лазерном спектрофотометре с 30-метровой поглощающей кюветой // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16, № 11. С. 1021–1024.
3. Régalia L., Oudot C., Thomas X., Von der Heyden P., Decatoire D. FTS improvements and connection with a long White cell. Application: H_2^{16}O intensity measurements around 1200 cm^{-1} // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 2010. V. 111, N 6. С. 826–842.
4. Ptashnik I.V., Smith K.M. Water vapour line intensities and self-broadening coefficients in the 5000–5600 cm^{-1} spectral region // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 2010. V. 111, N 10. P. 1317–1327.
5. Rothman L.S., Gordon I.E., Barbe A., Benner C.D., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Brown L.R., Campargue A., Champion J.P., Chance K., Coudert L.H., Dana V., Devi V.M., Fally S., Flaud J.-M., Gamache R.R., Goldman A., Jacquemart D., Kleiner I., Lacome N., Lafferty W.J., Mandin J.-Y., Massie S.T., Mikhailenko S.N., Miller C.E., Moazzen-Ahmadi N., Naumenko O.V., Nikitin A.V., Orphal J., Perevalov V.I., Perrin A., Predoi-Cross A., Rinsland C.P., Rotger M., Šimečkova M., Smith M.A.H., Sung K., Tashkun S.A., Tennyson J., Toth R.A., Vandaele A.C., Vander Auwera J. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 2009. V. 110, N 9–10. P. 533–572.

Yu.N. Ponomarev, T.M. Petrova, A.M. Solodov, A.A. Solodov, S.A. Sulakshin. **Fourier-spectrometer with 30-meter base length multipass cell for study of weak absorption spectra of atmospheric gases.**

The design and specifications of experimental set-up, consisting of Fourier-spectrometer IFS-125 HR and 30-meter base length multipass cell with a White optical system, are described. The optical path length of more than 600 meters is obtained. The results of the measurements of atmospheric air spectra with a spectral resolution of $2 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ and a sensitivity of less than 10^{-8} cm^{-1} are presented. It is shown that very weak absorption spectra of atmospheric molecules including their isotopic modifications could be detected certainly.