

## Модернизация комплекса на основе Фурье-спектрометра и 30-метровой оптической кюветы для измерения слабого селективного и неселективного поглощений

А.М. Солодов<sup>1</sup>, А.А. Солодов<sup>1</sup>, В.М. Дейчули<sup>1,2</sup>, А.Н. Куряк<sup>1</sup>, К.Ю. Осипов<sup>1</sup>,  
Т.М. Петрова<sup>1</sup>, Ю.Н. Пономарев<sup>1</sup>, И.В. Пташник<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

<sup>2</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

Поступила в редакцию 22.03.2017 г.

Приведено краткое описание работ по модернизации экспериментального комплекса на основе Фурье-спектрометра Bruker IFS-125 и 30-метровой многоходовой кюветы. Модернизация включает в себя оснащение кюветы системой автоматической перестройки числа проходов луча без ее разгерметизации, а также обеспечивает работу кюветы при повышенных температурах.

*Ключевые слова:* Фурье-спектрометр, многоходовая кювета, спектр поглощения; Fourier spectrometer, multiple-pass cell, absorption spectrum.

### Введение

Спектры поглощения атмосферных газов включают как сильные полосы поглощения, состоящие из большого количества отдельных спектральных линий, так и расположенные между ними «окна прозрачности» с гораздо более слабым поглощением. Поглощение излучения в этих окнах обусловлено, главным образом, не спектральными линиями, а так называемым «континуальным поглощением» — слабозависящей от частоты составляющей поглощения. Особенно активно в последние годы исследуется континуальное поглощений водяного пара, которое оказывает большое влияние на радиационный баланс атмосферы и на дистанционное зондирование [1–3]. В настоящее время измерения слабых спектров селективного и континуального поглощений выполняются с помощью методов калориметрической интерферометрии (calorimetric interferometry) [4], Фурье-спектроскопии с многоходовыми кюветами [5, 6] и спектроскопии внутрирезонаторного затухания (cavity ring-down spectroscopy) [7, 8]. Каждый из этих методов имеет свой

специфический тип погрешности, и полученные с помощью этих методов результаты измерений величины континуального поглощения сильно различаются между собой [3, 9].

Проделанный нами анализ измерений методом Фурье-спектроскопии показывает, что существенный вклад в полный бюджет погрешностей измерения слабоселективного поглощения дает погрешность определения базовой линии (т.е. уровня нулевого «поглощения/ослабления») [1, 5]. В силу ряда причин базовая линия во время измерения в кювете с исследуемым газом может отличаться от таковой, полученной из измерений с пустой кюветой. Это может быть обусловлено в том числе изменениями интенсивности источника излучения и чувствительности приемника за время напуска водяного пара в кювету.

Для уменьшения погрешности определения базовой линии при измерении континуального поглощения методом Фурье-спектроскопии с многоходовыми кюветами возможно использовать подход, предложенный ранее в [10], где эффективная оптическая толщина водяного пара в кювете определялась из соотношения

$$\tau(\nu) = -\ln \left\{ \frac{I_{\max}(\nu) I_{\min}^*(\nu)}{I_{\min}(\nu) I_{\max}^*(\nu)} \right\} \quad (1)$$

сигналов, полученных при минимальном  $I_{\min}(\nu)$  и максимальном  $I_{\max}(\nu)$  числе проходов луча в многоходовой кювете с водяным паром и в пустой кювете (обозначено звездочкой). Если перестройка числа

\* Александр Михайлович Солодов (solodov@iao.ru); Александр Александрович Солодов (asolodov@iao.ru); Владимир Михайлович Дейчули (dvm91@yandex.ru); Алексей Николаевич Куряк (kurjak@iao.ru); Константин Юрьевич Осипов (osipov@iao.ru); Татьяна Михайловна Петрова (tanja@iao.ru); Юрий Николаевич Пономарев (yuron@iao.ru); Игорь Васильевич Пташник (priv@iao.ru).

ходов луча в кювете выполняется достаточно быстро, без ее разгерметизации, то соотношение (1) позволяет определять величину поглощения, обусловленную только газом в кювете. При этом минимизируются погрешности определения базовой линии, обусловленные вариациями интенсивности источника излучения и чувствительности приемника, а также спектральной зависимостью коэффициента отражения зеркал, если таковая имеет место.

Для технической реализации этого метода и проведения измерений при повышенных температурах мы существенно модернизировали 30-метровую кювету (описание приводится ниже).

Кювета является составной частью спектроскопического комплекса на основе Фурье-спектрометра Bruker IFS-125 [11, 12] и выполнена в виде цилиндрической трубы из нержавеющей стали с внутренним диаметром 0,9 м и базовой длиной 30 м. Для измерения спектров поглощения при повышенных температурах на наружной поверхности кюветы расположены трубы, по которым циркулирует горячая вода температурой до 350 К. По периметру кюветы имеется большое количество технологических отверстий разного диаметра (от 5 до 50 см), закрытых фланцами, и вакуумопроводы большого диаметра для соединения кюветы с насосами. Кроме

того в конструкции кюветы предусмотрена механическая развязка держателей зеркал от стальной трубы кюветы. Все эти места на кювете являются потенциальными точками конденсации паров воды во время измерений при высоких температурах. Чтобы исключить конденсацию в этих местах, предусмотрен их дополнительный подогрев с возможностью контроля и регуляции температуры.

Внутри кюветы установлена модифицированная оптическая система Уайта, которая состоит из трех сферических зеркал с одинаковыми радиусами кривизны (рис. 1). Диаметры двух задних зеркальных объективов (2 и 3) равняются 30 см, входное переднее зеркало (1) имеет размеры 50×30 см. Центр кривизны объективов лежит на поверхности переднего зеркала, центр кривизны которого находится между объективами. Зеркала в массивных оправах установлены на опорах, которые механически развязаны от тела кюветы с помощью сильфонов.

Большая длина пути луча в кювете достигается за счет многократного отражения света от зеркал, расположенных внутри кюветы в ее крайних точках. Перед измерениями спектров оптическая система настраивается на определенное число ходов луча и откачивается до предельного давления. Во время откачки, а также во время нагревания кюветы

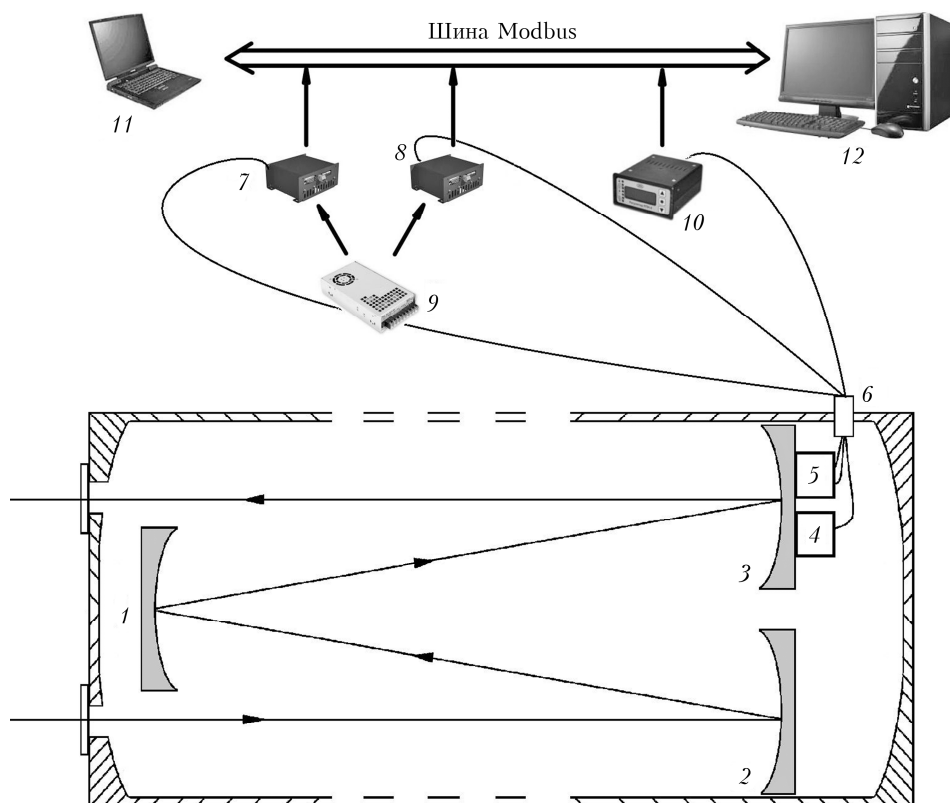


Рис. 1. Блок-схема 30-метровой кюветы с системой управления поворотом зеркала: 1–3 – сферические зеркала кюветы; 4 – два шаговых двигателя для поворота зеркала по горизонтали и вертикали; 5 – 2-канальный датчик перемещения; 6 – электрический вакуумный ввод сигналов управления шаговыми двигателями и вывод сигналов с 2-канального датчика перемещения; 7 и 8 – контроллеры шаговых двигателей; 9 – блок питания контроллеров; 10 – контроллер датчик перемещения; 11 – ноутбук; 12 – персональный компьютер

происходит ее деформация, что является причиной разъюстировки зеркал, несмотря на наличие механической развязки между кюветой и держателями зеркал. Нами был разработан и изготовлен оптико-механический узел, с помощью которого можно наклонять зеркало (3) в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, это позволяет подстраивать зеркала оптической системы и производить перестройку числа ходов луча в кювете без ее разгерметизации.

Электрическая часть системы управления поворотом зеркала состоит из следующих элементов:

- два шаговых двигателя (4) с контроллерами и блоком питания (7–9);
- 2-канальный датчик перемещения (5);
- электрический вакуумный ввод сигналов управления шаговыми двигателями и вывод сигналов с 2-канального датчика перемещения (6).

В системе управления использованы шаговые двигатели FL86STH80 с контроллерами OSM-88RA фирмы «Онитекс». Контроллер позволяет дробить шаг двигателя с коэффициентом 1/16, а также изменять в широких пределах ток двигателя, что необходимо в разных режимах работы системы. Поворот зеркала и его наклон на заданный угол контролируется 2-канальным датчиком перемещения ИП-2К фирмы «ИТМ», с разрешением 1 мкм в каждом канале. Для управления поворотным зеркалом и слежением за его положением было разработано программное обеспечение в среде LabView. Преимуществом предложенной системы является то, что все три контроллера (два для шаговых двигателей и один для датчика перемещения) находятся на одной линии связи и подключены к компьютеру

с помощью одной витой пары проводов по интерфейсу RS-485. Скорость приема-передачи данных составляет 38400 кбит/с. Управление контроллерами Onitex шаговых двигателей происходит с помощью набора несложных команд по протоколу Modbus (коммуникационный протокол, основанный на клиент-серверной архитектуре; позволяет легко интегрировать устройства, поддерживающие данный протокол, в единую сеть). С помощью системы управления можно изменять угловое положение зеркала в двух плоскостях, задавая шаг, скорость и величину смещения. Одновременно с движением зеркала по индикатору датчика перемещения отслеживается его текущее положение.

В настоящий момент разработанная система позволяет получить перестройку оптического пути от 166,9 до 1057 м. Отметим, что для достижения максимального числа проходов луча в кювете была использована возможность управления двигателем с 1/16 долей шага. Для дальнейшего увеличения числа ходов необходимы другие типы шаговых двигателей и контроллеров. Ранее подобная схема дистанционного управления положения зеркал с помощью шаговых двигателей применялась в лазерном спектрометре [13], однако она позволяла реализовать только целое число шагов двигателя.

На рис. 2 показаны спектры поглощения атмосферного воздуха в области 2000–12000 см<sup>-1</sup>, зарегистрированные со спектральным разрешением 0,03 см<sup>-1</sup> при длине пути луча в кювете 166,9 и 1057 м. Данные спектры были получены с использованием разработанной системы – изменение длины пути производилось без разгерметизации кюветы.

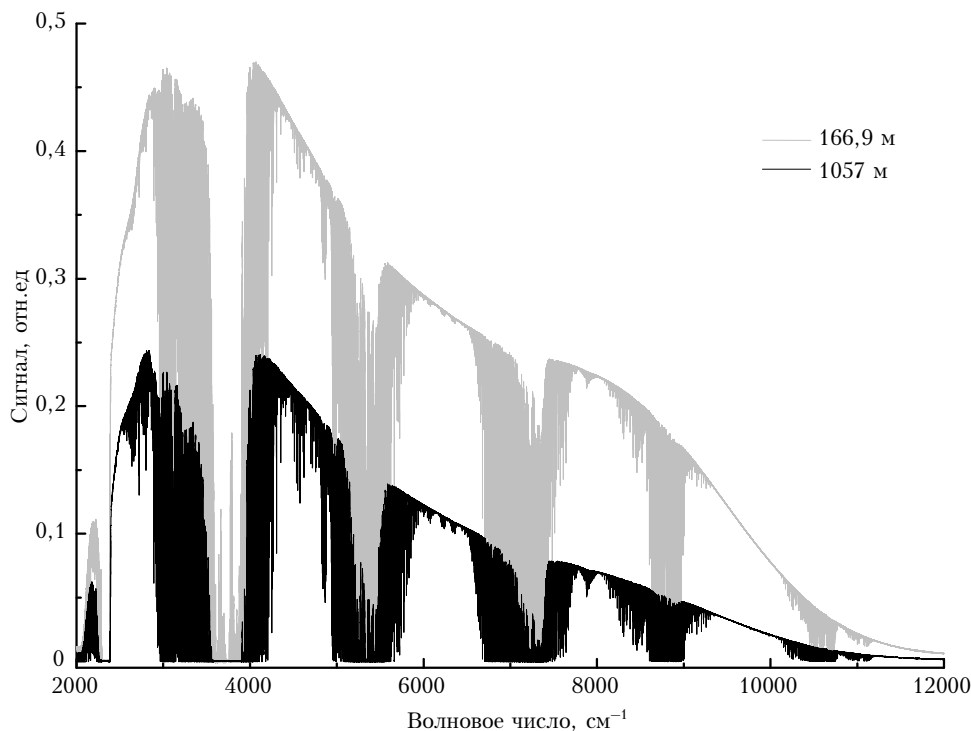


Рис. 2. Спектр поглощения атмосферного воздуха при разной длине пути луча 166,9 и 1057 м

Разный уровень сигнала в различных диапазонах при увеличении длины оптического пути обусловлен спектральной зависимостью коэффициента отражения зеркал, что можно учесть с помощью формулы (1).

Таким образом, проведенная модернизация измерительного комплекса на основе Фурье-спектрометра и кюветы с базой 30 м повышает возможности исследования как селективного, так и неселективного поглощения газовых сред. Перестройка длины оптического пути без разгерметизации кюветы делает возможным регистрацию большего числа спектральных линий за один цикл измерений, позволяя регистрировать как сильный, так и слабый спектр при идентичной величине отношения сигнал-шум, а также увеличивает точность определения континуального поглощения.

Кроме этого, выполнено оснащение холодных участков кюветы (зеркал, фланцев, подводных элементов вакуумной системы) нагревательным кабелем. Это обеспечивает регистрацию спектров поглощения водяного пара при повышенных давлениях, что важно для выяснения природы континуума водяного пара.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (проект № 16-17-10096).

1. Clough S.A., Iacono M.J., Moncet J.-L. Line-by-line calculations of atmospheric fluxes and cooling rates: Application to water vapor // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97, N 14. P. 15761–15785.
2. Shine K.P., Ptashnik I.V., Radel G. The water vapour continuum: Brief history and recent developments // *Surv. Geophys.* 2012. V. 33, N 3–4. P. 535–555.
3. Пташник И.В. Континуальное поглощение водяного пара – краткая предыстория и современное состояние проблемы // *Оптика атмосфер. и океана.* 2015. Т. 28, № 5. С. 443–459.
4. Bicknell W.E., Cecca S.D., Griffin M.K., Swartz S.D., Flusberg A. Search for low-absorption regions in the 1.6- and 2.1- $\mu\text{m}$  atmospheric windows // *J. Dir. Energy.* 2006. V. 2, N 2. P. 151–161.
5. Ptashnik I.V., McPheat R.A., Shine K.P., Smith K.M., Williams R.G. Water vapor self-continuum absorption in near-infrared windows derived from laboratory measurements. // *J. Geophys. Res. D.* 2011. V. 116. P. 16305-1–16305-16.
6. Ptashnik I.V., Petrova T.M., Ponomarev Yu.N., Shine K.P., Solodov A.A., Solodov A.M. Near-infrared water vapour self-continuum at close to room temperature // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2013. V. 120. P. 23–35.
7. Mondelain D., Aradj A., Kassi S., Campargue A. The water vapour self-continuum by CRDS at room temperature in the 1.6  $\mu\text{m}$  transparency window // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2013. V. 130. P. 381–391.
8. Mondelain D., Vasilchenko S., Cermak P., Kassi S., and Campargue A. The self- and foreign-absorption continua of water vapor by cavity ring-down spectroscopy near 2.35  $\mu\text{m}$  // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2015. V. 17. P. 17762–17770.
9. Shine K.P., Campargue A., Mondelain D., McPheat R.A., Ptashnik I.V., Weidmann D. The water vapour continuum in near-infrared windows-current understanding and prospects for its inclusion in spectroscopic databases // *J. Mol. Spectrosc.* 2016. V. 327. P. 193–208.
10. Burch D., Alt R. Continuum absorption by H<sub>2</sub>O in the 700–1200 and 2400–2800  $\text{cm}^{-1}$  windows // Report AFGL-TR-84-0128 by Ford Aerospace and Communications Corporation, Aeronutronic Division to AFGL. (1984). 31 p.
11. Петрова Т.М., Пономарев Ю.Н., Солодов А.А., Солодов А.М., Болдырев Н.Ю. Спектрометрический комплекс для исследования спектров селективного и неселективного поглощения газов в широком спектральном диапазоне // *Оптика атмосфер. и океана.* 2015. Т. 28, № 5. С. 430–435; Petrova T.M., Ponomarev Yu.N., Solodov A.A., Solodov A.M., Boldyrev N.Yu. Spectrometric complex for investigation of spectra of selective and nonselective gas absorption in a wide spectral range // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 5. P. 400–405.
12. Ponomarev Yu.N., Solodov A.A., Solodov A.M., Petrova T.M., Naumenko O.V. FTIR spectrometer with 30 m optical cell and its applications to the sensitive measurements of selective and nonselective absorption spectra // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2016. V. 177. P. 253–260.
13. 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

A.M. Solodov, A.A. Solodov, V.M. Deichuli, A.N. Kuryak, K.Yu. Osipov, T.M. Petrova, Yu.N. Ponomarev, I.V. Ptashnik. **Modification of the experimental setup of FTIR spectrometer and 30-meter optical cell for measurements of weak selective and nonselective absorption.**

The description of the improvement of the experimental setup based on Fourier spectrometer Bruker IFS-125 and 30-meter multipath optical cell is given in the paper. The improvement includes the cell equipment with a system of automatic adjustment of the number of beam passes without its depressurization and ensures the cell work at high temperatures.