

## Наземные измерения ИК-спектров солнечного излучения с высоким спектральным разрешением

А.В. Поберовский\*

Санкт-Петербургский государственный университет  
г. Санкт-Петербург, Петергоф, ул. Ульяновская, 1

Поступила в редакцию 13.05.2009 г.

Описан новый наземный спектральный комплекс для измерений спектров солнечного излучения с высоким разрешением на базе Фурье-спектрометра Bruker IFS-125. Даны основные характеристики комплекса. Приведены примеры измеренных спектров солнечного излучения в различных областях ИК-спектра и примеры определения общего содержания  $\text{HF}$  в районе С.-Петербурга в январе 2009 г.

*Ключевые слова:* солнечные спектры, Фурье-спектроскопия, атмосферные газы; IR solar spectr, fourier spectroscopy, atmospheric gases.

### Введение

Измерения спектров солнечного излучения уже почти столетие используются для изучения характеристик газового состава атмосферы. Первые определения полного (общего) содержания водяного пара в атмосфере были осуществлены Fowle по измерениям прямой солнечной радиации в 1912 г. [1]. С конца 40-х гг. XX в. ученые Института астрофизики Льежского университета начали проводить систематические спектроскопические измерения состава атмосферы на высотной исследовательской станции Юнгфрау (Швейцария) [2–4]. Примерно в это же время начались измерения газового состава рассматриваемым методом в США (см., например, [5]). В России наземные спектроскопические измерения газового состава атмосферы были начаты в 70-х гг. XX в. В.И. Диановым-Клоковым в ИФА РАН [6, 7].

Проблемы современных изменений климата Земли, а также сохранения и восстановления ее озонового слоя стимулировали в последние десятилетия интенсивные исследования содержания различных малых газовых составляющих (МГС) атмосферы [8]. В настоящее время регулярные измерения характеристик газового состава атмосферы осуществляются на станциях международной сети NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change [9]), а также рядом научных коллективов (см., например, [9, 10]). Так, в СПбГУ измерения общего содержания (содержание в вертикальной толще атмосферы)  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}$  спектроскопическим методом с помощью аппаратуры среднего спектрального разрешения СИКС-2 ведутся с 1990 г. [11].

Станции NDACC оборудованы Фурье-спектрометрами (ФС), позволяющими измерять спектры солнечного излучения с высоким спектральным разрешением в широких спектральных областях и определять одновременно содержание большого количества атмосферных газов. В рамках национального проекта «Образование» физическим факультетом СПбГУ был приобретен ФС Bruker IFS-125. Это открыло новые возможности комплексных исследований вариаций газового состава атмосферы в СПбГУ. В данной работе приведены краткое описание созданного на базе ФС Bruker IFS-125 спектрального комплекса, примеры первых измерений спектров солнечного излучения с высоким разрешением и некоторых результатов их интерпретации.

### Спектральный комплекс для измерений спектров солнечного излучения

На базе ФС Bruker IFS-125 был создан ИК спектральный комплекс для измерений спектров солнечного излучения со спектральным разрешением до  $0,002 \text{ см}^{-1}$  в спектральной области 1–15 мкм. В процессе изготовления спектрального комплекса были разработаны и изготовлены: солнечная следящая система (ССС) и система автоматического управления режимом ее работы, система ввода солнечного потока в ФС, аналоговый канал контроля облачности во время регистрации интерферограммы. СССР была установлена на крыше лабораторного корпуса на расстоянии ~12 м от Фурье-спектрометра. Чтобы исключить влияние возможных деформаций несущих конструкций здания, фотоэлектрический датчик, контролирующий и управляющий работой СССР, разместили на опрае сферического зеркала системы ввода светового потока, жестко связанной с ФС. Точность наведения оси Фурье-спектрометра

\* Анатолий Васильевич Поберовский (pober@troll.phys.spbu.ru).

на центр диска Солнца не хуже 1 угл. мин. Измерения в максимуме интерферограммы показали, что в режиме слежения ССС изменения сигнала не превышают 0,01%.

В ФС в максимуме интерферограммы регистрируется сигнал всего исследуемого спектрального интервала, поэтому при измерениях спектров Солнца является актуальным выбор таких параметров аппаратуры (диаметра входной апертуры, выделяемого спектрального диапазона, коэффициентов усиления и т.д.), которые обеспечивают работу приемника излучения и системы регистрации сигнала в линейной области. С этой целью было проведено исследование динамического диапазона приемно-регистрирующей системы ФС. Для используемых приемников излучения МСТ и InSb при минимальном коэффициенте усиления приемно-регистрирующего тракта ФС линейный участок находится в диапазоне изменений сигнала от 0 до ~0,5 (для МСТ) и от 0 до ~0,8 (для InSb) от максимальной регистрируемой величины сигнала. Условия проведения измерений солнечных спектров определяются также допустимым изменением высоты Солнца (и, соответственно, воздушной массы) в течение времени регистрации интерферограммы и обеспечением необходимого отношения сигнал-шум в исследуемом участке спектра.

Фурье-спектрометр IFS-125 является универсальным прибором, дающим возможность изменения большого количества параметров – спектрального разрешения, диаметра входной диафрагмы, скорости сканирования интерферограммы, количества суммируемых интерферограмм и т.д. Это делает необходимым определение оптимальных входных (выставляемых) параметров ФС в зависимости от возможной длительности измерений, исследуемой спектральной области и спектрального разрешения, необходимого отношения сигнал-шум.

Анализ измеренных спектров солнечного излучения при разных входных диафрагмах, скоростях сканирования, коэффициентах усиления, спектральных разрешениях и количествах накапливаемых и осредняемых интерферограмм позволил сформировать набор оптимальных входных параметров ФС, обеспечивающих отношение сигнал-шум не менее 150. В таблице приведены параметры ФС, которые используются при проведении измерений одного спектра в течение ~12 мин при спектральном разрешении 0,005 и 0,02 см<sup>-1</sup> для трех спектральных диапазонов, выделяемых интерференционными фильтрами.

Спектральный диапазон, см <sup>-1</sup>	Спектральное разрешение, см <sup>-1</sup>	Диаметр входной диафрагмы, мм	Время сканирования интерферограммы, с	Количество суммируемых интерферограмм	Приемник излучения
650–1350	0,005	2,5	~70	10	МСТ
	0,02	5,0	~18	40	
1700–3400	0,005	0,5–0,8	~70	10	InSB
	0,02	0,5–0,8	~18	40	
2600–5400	0,005	0,5–0,8	~70	10	InSb
	0,02	0,5–0,8	~18	40	

#### Наземные измерения ИК-спектров солнечного излучения с высоким спектральным разрешением

Регулярные измерения солнечных спектров, в основном со спектральным разрешением 0,005 см<sup>-1</sup>, начали проводиться с января 2009 г. в Старом Петергофе (59,88° с.ш., 29,82° в.д.) в течение дневного времени при отсутствии (или частичной) облачности. Для определения общего содержания таких атмосферных газов, как СО, СН<sub>4</sub>, НF и др., используются спектры, рассчитанные из измеренных интерферограмм с функцией аподизации Norton-Beer middle.

### Примеры зарегистрированных спектров солнечного излучения

Примеры отдельных участков измеренных спектров солнечного излучения со спектральным разрешением ~0,008 см<sup>-1</sup> приведены на рис. 1.

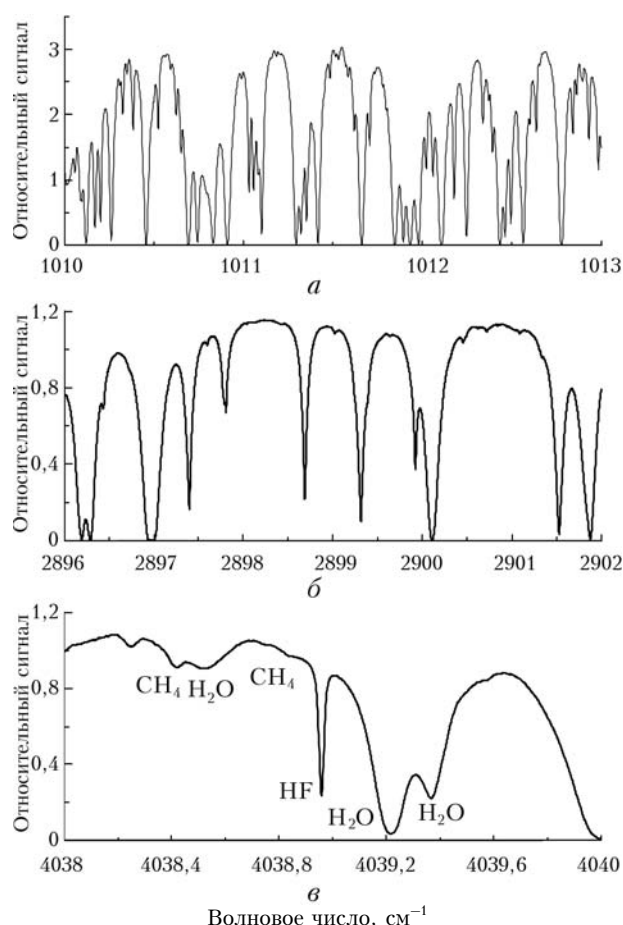


Рис. 1. Спектр солнечного излучения в различных спектральных областях

Здесь представлены участки спектра, в которых основное поглощение обусловлено отдельными спектральными линиями озона (а), метана и водяного пара (б), водяного пара и НF (в). На рис. 1, в указаны положения спектральных линий поглощения атмосферных газов, видно, что ширина спектральной линии НF существенно меньше ширины линий поглощения водяного пара и метана, что обусловлено различным высотным распределением этих газов.

Измеренные спектры солнечного излучения с высоким спектральным разрешением используются для определения общих содержаний более чем 10 атмосферных газов. Так, общее содержание HF по измерениям в январе 2009 г. находилось в диапазоне  $(1,40-1,98) \cdot 10^{15}$  мол.  $\cdot$  см<sup>-2</sup>. Эти значения хорошо согласуются с данными измерений для января на станциях NDACC, расположенных на близких широтах, и результатами численного моделирования вариаций газового состава атмосферы [12].

### Заключение

Приведено краткое описание и характеристики нового наземного ИК спектрального комплекса для измерений солнечного излучения с высоким спектральным разрешением. Представлены примеры измеренных спектров солнечного излучения для различных спектральных областей и интерпретации измерений спектров солнечного излучения в области спектральной линии поглощения HF. Измерения с помощью созданного комплекса позволят определять общее содержание многих атмосферных газов и элементы вертикального распределения некоторых из них.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке в рамках выполнения гранта РФФИ № 08-05-00857, а также проектов Рособразования № 101138 и 393846.

1. *Fowle F.E.* The spectroscopic determination of aqueous vapor // *Astrophys. J.* 1912. V. 35. N 1. P. 149–162.
2. *Zander R., Mahieu E., Demoulin P., Duchatelet P., Roland G., Servais C., Maziere M. De., Reimann S., Risland C.P.* Our changing atmosphere: Evidence based

- on long-term infrared solar observations at the Jungfraujoch since 1950 // *Sci. Total Environ.* 2008. V. 391. N 2–3. P. 184–195.
3. *Migeotte M.V.* The fundamental band of carbon monoxide at 4.7  $\mu$ m in the solar spectrum // *Phys. Rev.* 1949. V. 75. N 5. P. 1108–1109.
4. *Demoulin P., Servais C., Melen F., Zander R.* The Laboratory of Atmospheric and Solar Physics of the University of Liege at Jungfraujoch, International Foundation HFSJG // *Activity Report 1999/2000.* 2001. P. 16.
5. *Shaw J.H.* A Determination of the Abundance of N<sub>2</sub>O, CO, and CH<sub>4</sub> in Ground Level Air at Several Locations Near Columbus // *Ohio Sci.* 1959. Report No. 1. Contract AF19(604)-2259, AFCRL.
6. *Дианов-Клоков В.И.* Спектроскопические исследования фонового содержания газовых примесей в атмосфере // *Вестн. АН СССР.* 1980. Т. 4. N 1. С. 33–41.
7. *Дианов-Клоков В.И., Yurganov L.N., Grechko Ye.I., Dzhola A.V.* Spectroscopic measurements of atmospheric carbon dioxide and methane, 1: Latitudinal distribution // *J. Atmos. Chem.* 1989. V. 8. N 2. С. 139–151.
8. *WMO, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006* // *Global Ozone Research and Monitoring Project-Report.* 2007. № 50. С. 572. Geneva, Switzerland.
9. <http://www.ndsc.ncep.noaa.gov>
10. *Арефьев В.Н., Каменоградский Н.Е., Кашин Ф.В.* Систематические измерения концентрации углекислого газа в атмосфере // *Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана.* 1990. Т. 26. № 6. С. 584–593.
11. *Мироненков А.В., Поберовский А.В., Тимофеев Ю.М.* Спектроскопические измерения общего содержания метана в атмосфере вблизи Санкт-Петербурга // *Изв. АН. Физ. атмосф. и океана.* 1996. Т. 32. № 4. С. 471–478.
12. *Поберовский А.В., Поляков А.В., Тимофеев Ю.М.* Измерения общего содержания HF в районе С.-Петербурга // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана (в печати).*

#### *A.V. Poberovsky. Ground-based direct solar IR radiation measurements with a high spectral resolution.*

New ground-based complex for high spectral direct solar radiation measurements on the base of Bruker IFS125 interferometer was described. The examples of measured solar spectra for different spectral intervals and retrieval column amount HF were given.