

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАЗЕМНОЙ ИК СПЕКТРАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ В ЗАДАЧАХ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРЫ

М. В. Макарова<sup>1\*</sup>, А. В. Поберовский<sup>1</sup>, Ф. Хазе<sup>2</sup>,  
Ю. М. Тимофеев<sup>1</sup>, Х. Х. Имхасин<sup>1</sup>

УДК 543.42.062:551.51

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,  
198504, Санкт-Петербург, ул. Ульяновская, 3, Россия; e-mail: zaits@troll.phys.spbu.ru

<sup>2</sup> Технологический институт Карлсруэ, Институт метеорологии и климатических исследований,  
Карлсруэ, Германия

(Поступила 15 января 2016)

Исследованы спектральные характеристики наземного спектрального комплекса, состоящего из разработанной в Санкт-Петербургском государственном университете оригинальной системы слежения за Солнцем и фурье-спектрометра Bruker IFS125HR. Важность учета реальной аппаратной функции спектрального комплекса при обработке наземных ИК спектров прямого солнечного излучения показана на примере определения общего содержания метана в атмосфере. Для спектров прямого солнечного излучения, зарегистрированных с кюветой с HBr, предложены спектральные интервалы, с помощью которых для каждого спектра атмосферы можно получать информацию о параметрах наземного спектрального комплекса, одновременно проверяя качество юстировки аппаратуры.

**Ключевые слова:** атмосферная ИК-фурье-спектрометрия, газовый состав атмосферы, ИК спектры прямого солнечного излучения, спектры пропускания кюветы с HBr, аппаратная функция фурье-спектрометра.

*The spectral characteristics of a ground-based instrumentation have been studied. The instrumentation consists of the solar tracking system designed at St. Petersburg University and a Fourier transform infrared spectrometer Bruker IFS125HR. The importance of taking into account the real instrumental line shape of the spectral device in processing the ground-based solar infrared spectra is demonstrated when determining total amount of methane in the atmosphere. For the spectra of direct solar radiation recorded using a cell with HBr, the spectral intervals are proposed which allow obtaining parameters of the ground-based instrumentation and controlling the instrument optical alignment for each atmospheric spectrum.*

**Keywords:** atmospheric Fourier transform IR spectrometry, atmosphere gas composition, IR spectra of direct solar radiation, transmission spectra of HBr cell, instrumental line shape of Fourier transform spectrometer.

**Введение.** Методы ИК спектроскопии активно используются для исследований в различных областях химии и физики [1]. В экспериментальных исследованиях газового состава атмосферы широкое применение находят фурье-спектрометры (ФС) среднего и высокого спектрального разрешения, например, для оснащения наземных [2, 3], спутниковых [4—6] и самолетных [7] измерительных систем. Целый ряд важнейших климатически и химически активных малых газовых составляющих атмосферы (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CO, O<sub>3</sub> и др.) имеют полосы поглощения в ИК диапазоне, что позволяет использовать спектры пропускания как источник информации о составе атмосферы. Более

## DETERMINING CHARACTERISTICS OF GROUND-BASED IR SPECTRAL INSTRUMENTATION FOR ENVIRONMENTAL MONITORING OF ATMOSPHERE

M. V. Makarova<sup>1\*</sup>, A. V. Poberovskii<sup>1</sup>, F. Hase<sup>2</sup>, Yu. M. Timofeyev<sup>1</sup>, and Kh. Kh. Imhasin<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup> St. Petersburg State University, 3 Ulyanovskaya Str., St. Petersburg, 198504, Russia; e-mail: zaits@troll.phys.spbu.ru; <sup>2</sup> Karlsruhe Institute of Technology, Institute of Meteorology and Climate Research, Karlsruhe, Germany)

20 лет существует международная сеть наблюдений за изменениями газового состава атмосферы NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change) [8]. Станции этой сети, входящие в группу IRWG (Infrared Working Group) [2], оборудованы ФС высокого спектрального разрешения. В 2004 г. начаты измерения на станциях фурье-мониторинга TCCON (Total Carbon Column Observing Network) [3]. В России аналогичные измерения осуществляются с 2009 г. на двух станциях: на станции атмосферного мониторинга “Петергоф” (СПбГУ) [2, 9—13] и на атмосферной фурье-станции Уральского федерального университета (УрФУ) [14, 15].

Использование современных ФС позволяет регистрировать спектры солнечного излучения в широком диапазоне с высоким отношением сигнал/шум. Спектральное разрешение интерферометров типа Bruker IFS 125HR ( $\sim 0.002 \text{ см}^{-1}$ ), активно применяющихся при атмосферных измерениях, дает возможность разрешать контуры отдельных спектральных линий, что в свою очередь с учетом зависимости контура линии от давления позволяет получать информацию не только об общем содержании газа во всей толще атмосферы, но и об элементах вертикального распределения для некоторых газовых компонентов [13, 16—18]. Данные мониторинга атмосферы, получаемые на станциях NDACC и TCCON, активно используются для проведения кампаний по валидации спутниковых измерений газового состава, исследований временных вариаций содержаний малых газовых составляющих атмосферы и сравнений с результатами численного моделирования [12, 15, 19—22]. Требования к точности измерений количественных характеристик газового состава высоки, поэтому для корректного определения общего содержания или профиля газа в атмосфере необходим строгий контроль состояния измерительной аппаратуры и знание ее характеристик [23]. С этой целью на сетях NDACC и TCCON проводятся регулярные измерения спектров пропускания кювет, заполненных газом с высокой молекулярной массой при низком давлении [24—26]. Обработка этих измерений с помощью специализированной программы LINEFIT [27] позволяет определять аппаратную функцию, что дает информацию о качестве юстировки ФС [24, 25].

В настоящей работе представлены результаты исследований характеристик наземного спектрального комплекса (СК), состоящего из разработанной в СПбГУ оригинальной системы слежения за Солнцем [28] и ФС Bruker IFS 125HR, полученные на основе анализа спектров пропускания кюветы с HBr, зарегистрированных с использованием в качестве источника излучения как внутреннего осветителя ФС, так и Солнца. При этом в первом случае (внутренний осветитель) спектры кюветы с HBr несут информацию только о качестве юстировки самого интерферометра, во втором (солнечные измерения) — характеризуют качество юстировки всей оптической системы СК в целом, включая не только интерферометр, но и внешнюю систему слежения за Солнцем. Стандартные спектральные интервалы, используемые LINEFIT при обработке спектров кюветы с HBr для случая внутреннего источника излучения ФС, не применимы для солнечных измерений из-за наличия мешающих линий поглощения атмосферных газов. Нами предлагаются спектральные интервалы, дающие возможность для каждого атмосферного спектра, зарегистрированного совместно с кюветой с HBr, получать информацию об аппаратной функции (качестве юстировки) наземного СК.

**Методика измерений и обработки эксперимента.** При выборе газа для заполнения кюветы (используемой в дальнейшем для определения качества юстировки ФС) учитываются следующие факторы: спектральные линии газа должны быть у, же или сравнимы с разрешением ФС (обычно  $\sim 0.005\text{—}0.008 \text{ см}^{-1}$ ); в ИК диапазоне желательны изолированные линии газа, не перекрывающиеся с линиями других атмосферных газов; малые концентрации или отсутствие данного газа в атмосферном воздухе; не очень быстрое изменение концентрации газа в кювете со временем (за счет химических реакций). Наиболее часто кюветы заполняются следующими газами: HBr, N<sub>2</sub>O, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, HCl (где HCl и HBr — химически менее устойчивые компоненты) [24—26].

В наших экспериментах используется кювета #61, изготовленная для сети NDACC, длиной 2 см с сапфировыми клиновидными окнами, наполненная чистым HBr при низком давлении ( $\sim 2.3$  мбар). В этом случае доплеровское уширение определяет контур спектральных линий HBr и для волнового числа  $\sim 2500 \text{ см}^{-1}$  и  $T = 294 \text{ К}$  полуширина линий HBr  $\sim 0.0034 \text{ см}^{-1}$ . Регистрация спектров пропускания в полосе поглощения HBr (изотопы HBr<sup>79</sup> и HBr<sup>81</sup>) с центром  $\sim 2559 \text{ см}^{-1}$  обычно осуществляется не реже двух раз в год. Обработка спектров пропускания проводится с помощью программы LINEFIT v.14, которая основана на подгонке расчетного спектра к измеренному с использованием регуляризационных алгоритмов, применяемых при решении некорректных обратных задач атмосферной оптики [27]. При анализе спектров используется спектроскопическая информация базы дан-

ных HITRAN2008 [29]. Результаты, получаемые с помощью LINEFIT, показывают хорошее согласие с результатами работы других алгоритмов определения параметров ФС [25, 30].

Наиболее важная входная информация LINEFIT — спектр пропускания кюветы, данные об апертуре, оптической разности хода (света в интерферометре) и функции аподизации, при которых проводилась регистрация спектра, а также температура и давление газа в кювете. Основные выходные параметры — аппаратная функция ФС (АФ), эффективность модуляции (ЭМ), фазовая ошибка (ФО), содержание газа в кювете. Кроме того, есть возможность определять температуру и давление газа в кювете. Здесь под ЭМ подразумевается отношение нормированной амплитуды модуляции реальному ФС к нормированной амплитуде модуляции “идеального” ФС как функции оптической разности хода. Термин “нормированная” означает, что амплитуда модуляции при нулевой разности оптического пути равняется единице (это необходимо, чтобы сохранить для АФ необходимую нормировку по площади) [24, 25]. Отметим, что в модели “идеального” ФС (которая заложена в программе LINEFIT) учтены только конечность оптической разности хода и наличие эффекта самоаподизации [24]. Потери модуляции, характеризующиеся в нашем случае функцией ЭМ, приводят к уширению АФ, а наличие ФО (резких изменений функции ФО) — к асимметрии АФ [25]. Следует отметить, что ФС Bruker IFS 125HR характеризуется высокой стабильностью и речь идет только о небольших разь-юстировках его оптической системы.

По результатам обработки кюветных спектров, кроме АФ, ЭМ и ФО, осуществляется контроль содержания НВг в кювете ( $w_{\text{НВг}}$ ). Это необходимо, во-первых, с целью дополнительной оценки качества обработки спектров — не должно наблюдаться резких изменений  $w_{\text{НВг}}$  от измерения к измерению (обычно вариации содержания  $\leq 1\%$ ), во-вторых, для отслеживания скорости процессов разрушения НВг в кювете. При этом желательно иметь “реперное” значение  $w_{\text{НВг}}$ , определенное с высокой точностью из независимых измерений (обычно это делается сразу после заполнения кюветы газом). Для этого на аналогичной аппаратуре (ФС Bruker IFS125 HR) в Технологическом институте Карлсруэ (KIT) зарегистрированы спектры пропускания одновременно для двух кювет: НВг #61 и кюветы N<sub>2</sub>O (длина 0.4 м) с известным давлением (1.004 мбар). При обработке спектра сначала определялась АФ (ЭМ, ФО) ФС KIT по линиям поглощения N<sub>2</sub>O в интервале 2529.4—2550.5 см<sup>-1</sup>, затем при использовании уже известной АФ (N<sub>2</sub>O) находилось содержание НВг в кювете по линиям поглощения НВг (отдельно *P*- и *R*-ветвей полосы) с фиксированной АФ (N<sub>2</sub>O). При этом для каждой из ветвей полосы поглощения НВг использованы по 14 микроокон, содержащих линии поглощения НВг (см. табл. 1). С этими наборами микроокон определены АФ, ЭМ и ФО по всем кюветным измерениям, проведенным с помощью внутреннего искусственного осветителя ФС.

**Т а б л и ц а 1.** Спектральные интервалы для определения функций АФ, ЭМ и ФО по лабораторным спектрам пропускания кюветы с НВг и по солнечным спектрам

Микроокна <i>R</i> -ветви НВг, см <sup>-1</sup>	Микроокна <i>P</i> -ветви НВг, см <sup>-1</sup>	Микроокна <i>P</i> -ветви НВг (Солнце), см <sup>-1</sup>
2590.32—2590.72	2412.48—2412.88	2412.58—2412.88
2590.71—2591.11	2412.80—2413.20	2412.80—2413.10
2605.60—2606.00	2432.20—2432.60	2432.25—2432.46
2606.00—2606.40	2432.53—2432.93	2432.63—2432.83
2620.39—2620.79	2451.49—2451.89	2451.59—2451.75
2620.80—2621.20	2451.95—2452.15	2451.95—2452.15
2634.70—2635.10	2470.38—2470.78	2470.48—2470.68
2635.10—2635.50	2470.74—2471.14	2470.84—2471.00
2648.50—2648.90	2488.85—2489.25	—
2648.90—2649.30	2489.21—2489.61	2489.36—2489.51
2661.76—2662.16	2506.90—2507.30	2507.02—2507.20
2662.18—2662.58	2507.25—2507.65	—
2674.52—2674.92	2524.48—2524.88	2524.62—2524.78
2674.94—2675.34	2524.95—2525.15	2524.95—2525.15

Для солнечных спектров (когда одновременно регистрируется пропускание атмосферы и кюветы) обработка набора микроокон  $R$ -ветви НВг не проводилась. Это связано с тем, что в отличие от  $P$ -ветви линии  $R$ -ветви сильнее перекрываются линиями мешающих атмосферных газов. Поскольку алгоритм учета поглощения всей толщи атмосферы не включен в процедуру обработки спектров, реализованную в LINEFIT, наличие линий атмосферных газов приводит к невозможности корректного определения АФ, ЭМ и ФО. По этой причине для  $P$ -ветви набор и ширина микроокон изменены таким образом, чтобы исключить попадание центральных частей линий поглощения атмосферных газов в микроокна. Учет влияния крыльев линий атмосферных газов осуществлялся путем подбора полиномиальной аппроксимации. Модифицированный набор из 12 микроокон, предлагаемый для обработки одновременных измерений атмосферы и кюветы, приведен в последнем столбце табл. 1. Пример измеренного (17.02.2015, Солнце) и рассчитанного спектров в микроокне  $2470.48\text{—}2470.68\text{ см}^{-1}$ , а также рассогласование между ними представлены на рис. 1. Кроме того, показано положение мешающих линий атмосферного  $\text{N}_2\text{O}$ , исключенных из более широкого стандартного интервала  $2470.38\text{—}2470.78\text{ см}^{-1}$ , который используется при обработке лабораторных спектров кюветы с НВг.

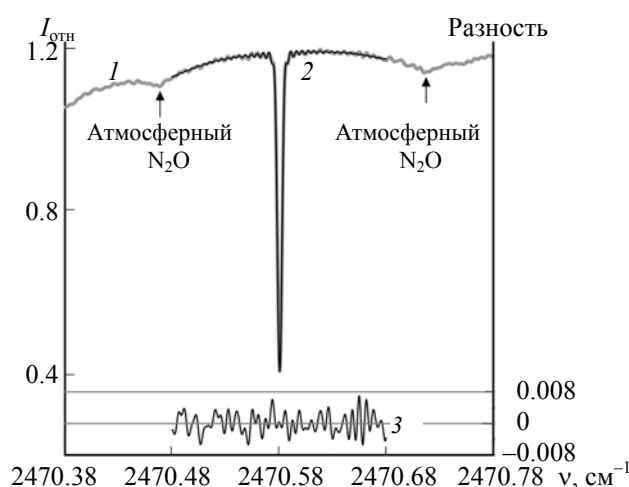


Рис. 1. Измеренный 17.02.2015, Солнце (1) и рассчитанный (2) спектры в микроокне  $2470.48\text{—}2470.68\text{ см}^{-1}$ , а также разница между ними (3)

**Результаты и их обсуждение.** В табл. 2 в хронологическом порядке приведены основные характеристики лабораторных и солнечных спектров кюветы НВг, а также значения  $w_{\text{НВг}}$ , полученные после обработки этих спектров программой LINEFIT (при измерениях с внутренним источником света для  $P$ - и  $R$ -ветвей). Видно, что для всех спектров, зарегистрированных с внутренним источником излучения, содержание НВг в кювете, получаемое при обработке микроокон в  $R$ -ветви, в среднем на  $\sim 1.5\%$  выше аналогичных значений для  $P$ -ветви. Наиболее вероятная причина — наличие систематических погрешностей спектроскопической информации для НВг в базе данных HITRAN2008. В связи с этим при долговременном анализе поведения АФ, ЭМ, ФО и содержания НВг в кювете желательно использовать измерения одной и той же ветви полосы НВг. В нашем случае оптимальной является  $P$ -ветвь полосы поглощения НВг, поскольку, как уже говорилось, для солнечных спектров возможна обработка микроокон именно этой ветви. На фоне флуктуаций значений  $w_{\text{НВг}}$ , имеющих место от измерения к измерению, скорость уменьшения  $w_{\text{НВг}}$ , связанного с протеканием химических процессов разрушения НВг в кювете, в период 2012—2015 гг. составила  $\sim 0.4\%$ /год (табл. 2).

Для спектров пропускания кюветы НВг с внутренним осветителем, измеренных в период 2012—2014 гг., на рис. 2 и 3 представлены соответствующие функции АФ, ЭМ и ФО для ФС Bruker IFS125HR (СПбГУ). Различия в аппаратных функциях ФС, зарегистрированных для разных дат, невелики, поэтому на рис. 3 все АФ практически совпадают (по этой причине чаще используются более наглядные функции ЭМ и ФО).

**Т а б л и ц а 2. Основные характеристики лабораторных (Л) и солнечных спектров (С), измерявшихся с кюветой HBr; содержание HBr, полученное для P- и R-ветвей полосы поглощения HBr**

Дата (место *) регистрации	Тип спектра **	Апертура, мм	Количество сканов	S/N	$W_{HBr, P},$ $10^{21} \text{ м}^{-2}$	$W_{HBr, R},$ $10^{21} \text{ м}^{-2}$
10.04.2012	Л	1.15	25	~900	$1.123 \pm 0.003$	$1.130 \pm 0.003$
09.07.2012	Л	1.15	100	~1700	$1.123 \pm 0.003$	$1.138 \pm 0.001$
20.05.2013	Л	1.15	100	~1400	$1.128 \pm 0.003$	$1.158 \pm 0.003$
02.05.2014 (КИТ)	Л	0.8	20	~2000	$1.112 \pm 0.005$	$1.134 \pm 0.001$
03.10.2014	Л	1.15	50	~1000	$1.113 \pm 0.003$	$1.118 \pm 0.003$
Серия (16—17).02.2015	С, $SZA = 72—73^\circ$	1.15	10—30	~500	$1.107 \pm 0.005$	—
17.02.2015	Л	1.15	50	~1700	$1.105 \pm 0.003$	$1.120 \pm 0.002$
04.09.2015	Л	1.15	100	~1900	$1.110 \pm 0.002$	$1.125 \pm 0.001$
Серия 11.09.2015	С, $SZA = 56—57^\circ$	1.15	10	~500	$1.113 \pm 0.002$	—

\*Место регистрации спектров по умолчанию — СПбГУ (если не указано другое).

\*\*Для всех измерений оптическая разность хода 180 см (для ФС Bruker IFS125HR соответствует спектральному разрешению  $0.005 \text{ см}^{-1}$ ), функция аподизации — Вохсаг.

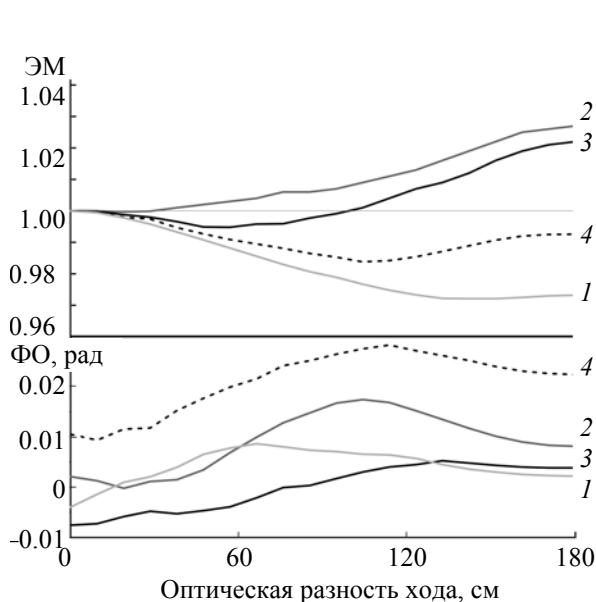


Рис. 2. Функции ЭМ и ФО для ФС Bruker IFS125HR (СПбГУ), полученные по измерениям спектров пропускания кюветы HBr с внутренним осветителем, проводившимся 10.04.12 (1), 09.07.12 (2), 20.05.13 (3) и 3.10.14 (4)

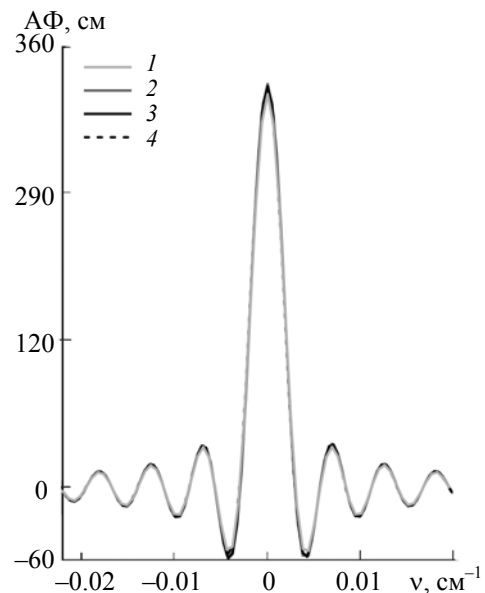


Рис. 3. Аппаратные функции ФС Bruker IFS125HR (СПбГУ), полученные по измерениям лабораторных спектров пропускания кюветы HBr, проводившимся 10.04.12 (1), 09.07.12 (2), 20.05.13 (3) и 3.10.14 (4)

При обработке солнечных спектров (кювета с HBr и атмосфера) изменения пропускания атмосферы (это явление присутствует всегда за счет изменения положения Солнца, нестабильности самой атмосферы) в течение регистрации интерферограммы интерпретируются как вариации ЭМ, что приводит к соответствующим изменениям АФ. Оптические пути света от внутреннего осветителя и от Солнца одинаковы внутри интерферометра (как части ФС), однако поток солнечного излучения вводится в интерферометр солнечной следящей системой, качество работы которой также оказывает влияние на получаемые значения АФ, ЭМ, ФО. Несмотря на то что интервалы для обработки солнечных спектров подбирались таким образом, чтобы исключить присутствие центров линий поглощения атмосферных газов, полностью исключить влияние атмосферных линий не удастся. Их влияние может вызывать скачки функции ФО, не связанные с реальной работой следящей системы и интерфе-

рометра; увеличение погрешностей определения ЭМ и ФО, которые по оценкам [25]  $\sim 1\text{--}2\%$ . Все эти факторы могут приводить к различиям в АФ, ЭМ и ФО, полученных только для ФС (при измерениях с внутренним осветителем) и для всего СК в целом (солнечные измерения) [25].

На рис. 4 представлено сравнение результатов определения ЭМ и ФО по спектрам внутреннего осветителя ФС и Солнца, измеренным в течение двух серий измерений в феврале и сентябре 2015 г. В первом случае измерения проводились в течение двух дней подряд (16.02 и 17.02), во втором — с разницей в неделю (4.09 и 11.09). Значения зенитных углов Солнца ( $SZA$ ), при которых проводились измерения атмосферы совместно с кюветой НВг, указаны в табл. 2 (вторая колонка). Обычно длительность измерения одного солнечного спектра  $\sim 12$  мин (10 интерферограмм), однако в февральской серии один спектр (17.02) получен по 30 интерферограммам ( $\sim 37$  мин). Видно, что для февральской серии совпадение функций ЭМ для лабораторных и солнечных измерений хорошее. Такого совпадения не получено для сентября, что можно объяснить, во-первых, недельной разницей между измерениями с Солнцем и внутренним осветителем, во-вторых, работой системы слежения за Солнцем. Необходимо отметить, что и для сентября разница между значениями функций ЭМ, полученными по Солнцу и из лабораторных спектров, невелика ( $< 2\%$ ).

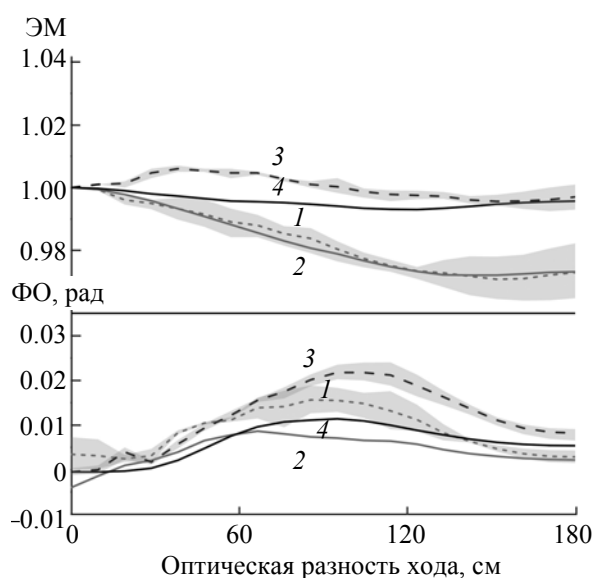


Рис. 4. Функции ЭМ и ФО, полученные по спектрам внутреннего осветителя ФС (2, 4) и Солнца (1, 3) в феврале (1, 2) и сентябре (3, 4) 2015 г.; серая область вокруг штриховых линий — диапазон изменений функций ЭМ и ФО для солнечных измерений

Все функции ФО на рис. 4 имеют схожий вид, но для солнечных измерений они лежат систематически выше соответствующих функций, полученных при лабораторных измерениях. Основные причины полученных расхождений между ФО — влияние атмосферы и наличие дополнительных оптических элементов (оптических фильтров, используемых для выделения необходимых спектральных интервалов при проведении измерений прямого солнечного излучения; системы слежения за Солнцем), которые обычно отсутствуют при лабораторных измерениях с внутренним осветителем. Наши эксперименты подтверждают, что при лабораторных измерениях кюветы с НВг с оптическими фильтрами, используемыми для солнечных измерений, и без них наблюдаются систематические сдвиги функций ФО относительно друг друга при сохранении вида функций. Результаты определения АФ не приведены, поскольку даже для сентябрьской серии АФ, полученные по лабораторным и солнечным измерениям, практически не различимы.

Основная ценность одновременных измерений кюветы и атмосферы — возможность определения АФ, ЭМ, ФО для конкретного солнечного спектра, зарегистрированного с помощью СК. Использование этих функций при дальнейшей обработке атмосферной части спектра позволяет достичь более высокой точности при определении общего содержания и профилей искомых атмосферных газов. Проиллюстрируем это для атмосферного метана на примере трех солнечных спектров (атмосфера

совместно с кюветой с HBr) из сентябрьской серии 11.09.2015. В табл. 3 приведено общее содержание (ОС) метана во всей толще атмосферы, полученное при обработке этих спектров с использованием различных аппаратных функций:  $ОС_{и}$  — с АФ “идеального” ФС (т. е. функции ЭМ и ФО на всей длине оптической разности хода равны единице и нулю);  $ОС_{р}$  — с АФ, учитывающей реальные особенности АФ СК (использованы функции ЭМ и ФО, полученные по Солнцу для 11.09.2015 и представленные на рис. 4 штриховыми линиями). Также в табл. 3 приведено среднеквадратическое рассогласование между измеренным и рассчитанным спектрами (RMS, %) в стандартных микроокнах 2613.7—2615.4, 2835.5—2835.8 и 2921.0—2921.6  $см^{-1}$  [23], используемых в сети NDAСС для определения общего содержания  $CH_4$  в атмосфере. Видно, что качество подгонки расчетного спектра к измеренному (что является объективным критерием качества решения обратной задачи атмосферной оптики) наилучшее для реальной АФ СК. При этом среднее значение разницы между общим содержанием во второй и третьей колонках  $\sim 1.3\%$ , что выше современных требований к точности определения общего содержания  $CH_4$  в атмосфере  $\sim 0.3\%$  [23].

**Т а б л и ц а 3. Результаты обработки солнечных спектров с различными видами АФ**

Дата, время	$ОС_{и} CH_4, 10^{19} см^{-2}$ (RMS, %)	$ОС_{р} CH_4 10^{19} см^{-2}$ (RMS, %)	Относительная раз- ница $ОС_{р}$ и $ОС_{и}$ , %
11.09.2015, 13:32	3.992 (0.22)	4.048 (0.20)	1.4
11.09.2015, 13:45	3.989 (0.22)	4.044 (0.20)	1.4
11.09.2015, 13:57	4.002 (0.22)	4.053 (0.20)	1.3

**Заключение.** Предложены спектральные интервалы, позволяющие использовать одновременные измерения спектров пропускания атмосферы и кюветы с HBr (источник излучения — Солнце) для определения аппаратной функции, эффективности модуляции и фазовой ошибки спектрального комплекса высокого спектрального разрешения. Результаты, полученные по лабораторным и солнечным спектрам кюветы с HBr, показали хорошее ( $\pm 2\%$ ) согласие функций эффективности модуляции. Фазовые ошибки для солнечных и лабораторных спектров систематически различаются, что обусловлено влиянием линий мешающих атмосферных газов, а также дополнительными оптическими элементами спектрального комплекса (оптическими фильтрами, системой слежения за Солнцем), которые в отличие от лабораторных измерений присутствуют при проведении солнечных измерений. Согласно результатам обработки солнечных спектров для серии 11.09.2015, когда проводились измерения атмосферы одновременно с кюветой с HBr, при использовании аппаратных функций идеального фурье-спектрометра и реального спектрального комплекса различия в общем содержании  $CH_4$  во всей толще атмосферы могут составлять  $>1\%$ . Анализ спектров пропускания кюветы с HBr показал, что в период 2012—2015 гг. для фурье-спектрометра Bruker IFS125HR (СПБГУ) потеря амплитуды модуляции  $\leq 5\%$ . Вариаций фазовых ошибок, способных приводить к значительной асимметрии аппаратной функции фурье-спектрометра, не наблюдалось. Это позволяет сделать вывод об удовлетворительном состоянии юстировки фурье-спектрометра в 2012—2015 гг. Оценка скорости падения содержания HBr в кювете (#61 NDAСС), обусловленного процессами разрушения HBr, в период 2012—2015 гг. составила  $\sim 0.4\%/год$ .

Экспериментальные исследования выполнены при частичной поддержке гранта СПБГУ (11.42.1430.2015, Программа 6). Обработка и анализ данных осуществлялись при финансировании Российского научного фонда (№14-17-00096). Измерения проведены на оборудовании РЦ СПБГУ “Геомодель”.

- [1] P. R. Griffiths, J. A. de Haseth. Fourier Transform Infrared Spectrometry, Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc. (2007) 1—3  
 [2] Наблюдательная сеть IRWG/NDAСС: <https://www2.acom.ucar.edu/irwg>  
 [3] Наблюдательная сеть TCCON: <https://tcccon-wiki.caltech.edu/>  
 [4] Спутниковый эксперимент GOSAT: <http://www.gosat.nies.go.jp/en/>  
 [5] Спутниковый эксперимент IASI: <http://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/CurrentSatellites/Metop/MetopDesign/IASI/index.html>  
 [6] Космический аппарат “Метеор-М” № 2: <http://planet.iitp.ru/index1.html>

- [7] Remote sensing using aircraft and balloons: <https://www.imk-asf.kit.edu/english/ffb.php>
- [8] Наблюдательная сеть NDACC: <http://www.ndsc.ncep.noaa.gov/>
- [9] РЦ Геомодель: <http://geomodel.spbu.ru/>
- [10] **М. В. Макарова, О. Кирнер, Ю. М. Тимофеев, А. В. Поберовский, Х. Х. Имхасин, В. И. Осипов, Б. К. Макаров.** Изв. РАН. Физика атм. и океана, **51**, № 2 (2015) 201—209
- [11] **Я. А. Виролайнен, Ю. М. Тимофеев, А. В. Поберовский, М. Еременко, Г. Дюфор.** Изв. РАН. Физика атм. и океана, **51**, № 2 (2015) 191—200
- [12] **А. В. Поляков, Ю. М. Тимофеев, А. В. Поберовский, Я. А. Виролайнен.** Опт. атм. и океана, **28**, № 2 (2015) 153—158
- [13] **М. В. Макарова, О. Кирнер, Ю. М. Тимофеев, А. В. Поберовский, Х. Х. Имхасин, В. И. Осипов, Б. К. Макаров.** Изв. РАН. Физ. атм. и океана, **51**, № 2 (2015) 493—501
- [14] Атмосферная фурье-станция УрФУ:  
[http://wsibiso.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=68&Itemid=60&lang=ru](http://wsibiso.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=68&Itemid=60&lang=ru)
- [15] **Н. В. Рокотян, Р. Имасу, В. И. Захаров, К. Г. Грибанов, М. Ю. Хаматнурова.** Опт. атм. и океана, **27**, № 9 (2014) 819—825
- [16] **E. Sepúlveda, M. Schneider, F. Hase, O. E. García, A. Gomez-Pelaez, S. Dohe, T. Blumenstock, J. C. Guerra.** *Atm. Measur. Tech.*, **5** (2012) 1425—1441
- [17] **O. E. García, M. Schneider, A. Redondas, Y. González, F. Hase, T. Blumenstock, E. Sepúlveda.** *Atm. Measur. Tech.*, **5** (2012) 2917—2931
- [18] **M. Schneider, E. Sepúlveda, O. García, F. Hase, T. Blumenstock.** *Atm. Measur. Tech.*, **3** (2010) 1785—1795
- [19] **N. M. Gavrilov, M. V. Makarova, A. V. Poberovskii, Yu. M. Timofeyev.** *Atm. Measur. Tech.*, **7** (2014) 1003—1010
- [20] **T. Kerzenmacher, B. Dils, N. Kumps, T. Blumenstock, C. Clerbaux, P.-F. Coheur, P. Demoulin, O. García, M. George, D. W. T. Griffith, F. Hase, J. Hadji-Lazaro, D. Hurtmans, N. Jones, E. Mahieu, J. Notholt, C. Paton-Walsh, U. Raffalski, T. Ridder, M. Schneider, C. Servais, M. De Mazière.** *Atm. Measur. Tech.*, **5** (2012) 2751—2761
- [21] **S. Takele Kenea, G. Mengistu Tsidu, T. Blumenstock, F. Hase, T. von Clarmann, G. P. Stiller.** *Atm. Measur. Tech.*, **6** (2013) 495—509
- [22] **Ya. Virolainen, Yu. Timofeyev, A. Polyakov, D. Ionov, A. Poberovsky.** *Int. J. Remote Sens.*, **35**, N 15 (2014) 5677—5697
- [23] **R. Sussmann, F. Forster, M. Rettinger, N. Jones.** *Atm. Measur. Tech.*, **4** (2011) 1943—1964
- [24] **F. Hase.** *Atm. Measur. Tech.*, **5** (2012) 603—610
- [25] **F. Hase, T. Blumenstock, C. Paton-Walsh.** *Appl. Opt.*, **38** (1999) 3417—3422
- [26] **A. Goldman, M. T. Coffey, J. W. Hannigan, W. G. Mankin, K. V. Chance, C. P. Rinsland.** *J. Quant. Spectrosc. RA*, **82** (2003) 313—317
- [27] Программа LINEFIT: <https://www.imk-asf.kit.edu/downloads/bod/linefit.pdf>
- [28] **А. В. Поберовский.** Опт. атм. и океана, **23**, № 1 (2010) 56—58
- [29] **L. S. Rothman, I. E. Gordon, A. Barbe, D. Chris Benner, P. F. Bernath, M. Birk, V. Boudon, L. R. Brown, A. Campargue, J.-P. Champion, K. Chance, L. H. Coudert, V. Dana, V. M. Devi, S. Fally, J.-M. Flaud, R. R. Gamache, A. Goldman, D. Jacquemart, I. Kleiner, N. Lacome, W. J. Lafferty, J.-Y. Mandin, S. T. Massie, S. N. Mikhailenko, C. E. Miller, N. Moazzen-Ahmadi, O. V. Naumenko, A. V. Nikitin, J. Orphal, V. I. Perevalov, A. Perrin, A. Predoi-Cross, C. P. Rinsland, M. Rotger, M. Simeckova, M. A. H. Smith, K. Sung, S. A. Tashkun, J. Tennyson, R. A. Toth, A. C. Vandaele, J. Vander Auwera.** *J. Quant. Spectrosc. RA*, **110** (2009) 533—572
- [30] **C. Bernardo, D. W. T. Griffith.** *J. Quant. Spectrosc. RA*, **95** (2005) 141—150