

УДК 551.510.42

Первый комплексный эксперимент по определению элементов вертикального распределения метана в тропосфере Западной Сибири по солнечным спектрам с использованием Фурье-спектрометра FTS 125M и натурных измерений с борта самолета-лаборатории

М.В. Макарова¹, В.И. Сердюков², М.Ю. Аршинов², Б.Д. Белан²,
Б.А. Воронин², А.В. Никитин², А.П. Щербаков², Ю.В. Гриднев^{2*}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет
198504, г. Санкт-Петербург, Петергоф, ул. Ульяновская, 1

² Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 13.04.2020 г.

Представлены результаты комплексного эксперимента по определению вертикального распределения метана в тропосфере Западной Сибири по солнечным спектрам с использованием Фурье-спектрометра FTS 125M, натурных измерений с борта самолета-лаборатории и спутниковых данных. Проводится анализ и сравнение полученных результатов.

Ключевые слова: CH₄, измерения метана, самолет лаборатория; CH₄, methane measurements, aircraft laboratory.

Введение

В результате современного потепления климата биосферные стоки углерода, как океанические, так и наземные, могут стать насыщенными, что, в свою очередь, приведет к ускорению темпов роста в атмосфере углеродсодержащих парниковых газов, прежде всего CO₂ [1, 2]. Последние данные свидетельствуют о том, что среднегодовые значения глобального темпа роста CO₂ в 2015 и 2016 гг. были самыми высокими за весь период наблюдений начиная с 1959 г. [3]. В настоящее время уже подтвержден факт снижения уровня поглощения углерода в Амазонии [4].

Высокоширотные наземные экосистемы Северного полушария очень чувствительны к изменению климата [5]. Наиболее быстрое потепление наблюдается в Арктике [6], и это может привести к дестабилизации метангидратов арктического шельфа и континентальной многолетней мерзлоты и, следовательно, к дополнительному выбросу метана в атмосферу [7]. Несмотря на то, что сейчас концен-

трация CH₄ в атмосфере в 200 раз меньше, чем CO₂, радиационный (разогревающий) потенциал молекул CH₄ значительно сильнее, что в перспективе может вызвать эффект так называемой метановой бомбы замедленного действия [8, 9].

Концентрации метана и углекислого газа значительно выросли с начала индустриальной эпохи [1]. Возрастающий тренд концентрации CH₄ наблюдается на всех высотах в тропосфере как в Сибири, так и на глобальном уровне [10], за исключением периода стагнации с 2000 по 2006 г., причины которого обсуждаются в последние годы многими авторами [11–17]. Содержание метана в тропосфере определяется балансом эмиссии с поверхности Земли, атмосферного переноса и стока вследствие реакции с гидроксильным радикалом OH [18]. Антропогенные источники CH₄ – сельскохозяйственная деятельность, мусорные свалки, сжигание ископаемого топлива, а природные – болота, экосистемы других пресноводных водоемов, дикие животные, геологические разломы, Мировой океан и т.д. [17]. Горение биомассы можно отнести и к тем, и к другим. Период стагнации концентрации CH₄ (2000–2006 гг.), наблюдавшийся повсеместно, мог быть связан с временным изменением мощности первичных источников (болота, сельское хозяйство, свалки, сжигание топлива), поскольку роль процессов стока все еще остается малоисследованной из-за недостаточной количественной оценки межгодовых и междекадных изменений концентрации OH [15, 19].

* Мария Владимировна Макарова (zaits@troll.phys.spbu.ru); Виктор Иванович Сердюков (serd49@mail.ru); Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Борис Александрович Воронин (vba@iao.ru); Андрей Владимирович Никитин (avn@iao.ru); Анатолий Петрович Щербаков (molnija2@inbox.ru); Юрий Владимирович Гриднев (yugi@iao.ru).

В глобальном бюджете CH_4 существенна роль Сибири, так как значительную ее часть занимают болотные системы, а также многочисленные газодобывающие и перерабатывающие предприятия, выбросы от которых при добыче и транспортировке природного газа неизбежны. Несмотря на это, наблюдений за атмосферным метаном в данном регионе проводится все еще недостаточно.

1. Методы измерения

1.1. Самолет-лаборатория

Для исследования вертикального распределения состава климатически значимых компонентов тропосферы использовался аналитический комплекс аппаратуры (рис. 1), установленный на борту самолета-лаборатории Як-40 «Оптик». Полет выполнялся 16 мая 2019 г. над Караканским бором, расположенным на правом берегу Новосибирского водохранилища. По достижении максимальной высоты (7 км) над районом исследования самолет приступил к плавному снижению до высоты 500 м, поэтапно выполняя режим горизонтального полета (в течение 7 мин) на восьми уровнях: 7000, 5500, 4000, 3000, 2000, 1500, 1000 и 500 м. Схема полета самолета приведена на рис. 2.

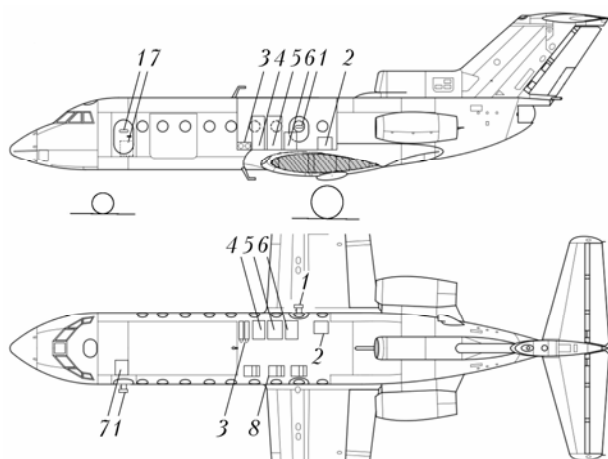


Рис. 1. Размещение научного оборудования на борту самолета-лаборатории Як-40 «Оптик»: 1 – воздухозаборники; 2 – блок питания бортовой аппаратуры; 3 – баллоны с поверочными газовыми смесями; 4 – приборная стойка газоанализаторов: CO_2 (Li-COR LI-6262), $\text{CO}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2\text{O}$ (Picarro G2301-m) и портала отбора проб воздуха в колбы; 5 – приборная стойка газоанализаторов: O_3 (Thermo Model 49C), CO (Thermo Model 48C), $\text{NO}/\text{NO}_2/\text{NO}_x$ (Thermo Model 42i-TL); 6 – стойка центрального бортового компьютера; 7 – стойка фильтрааспирационной установки и устройство отбора проб на фильтры для анализа органического компонента аэрозоля; 8 – кресла бортоператоров

Вертикальное распределение основных парниковых газов исследовалось с помощью прецизионного газоанализатора Picarro G2301-m, специально разработанного для использования на борту самолетов и позволяющего одновременно измерять concentra-

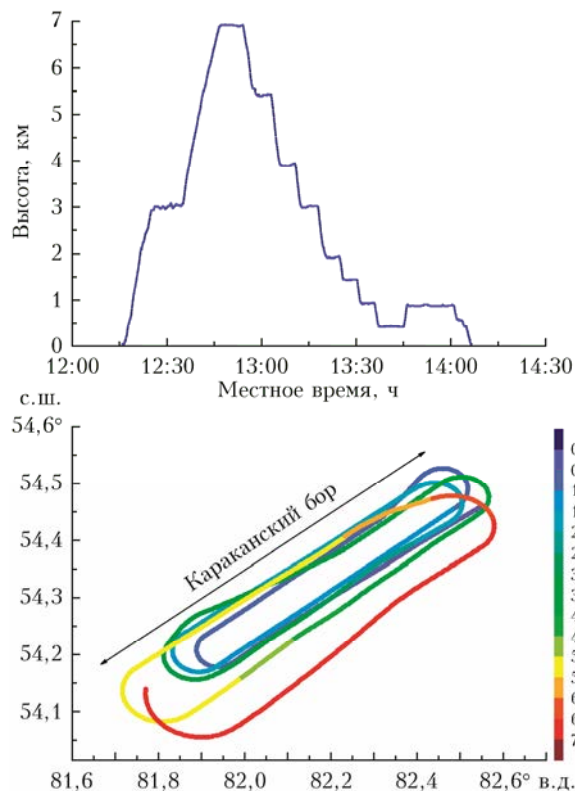


Рис. 2. Схема полета 16 мая 2019 г., см. цветной рисунок на сайте iao.ru/ru/content/vol.33-2020/iss.09

цию углекислого газа, метана и водяного пара с частотой 1 Гц [20]. Принцип действия анализатора основан на методе спектроскопии внутрирезонаторного ослабления сигнала во времени, позволяющем определять спектральные характеристики газовых молекул в оптическом резонаторе. В настоящее время этот прибор является одним из лучших, так как точность измерений концентрации CO_2 , CH_4 и H_2O составляет < 200 млрд $^{-1}$, $< 1,5$ млрд $^{-1}$ и < 150 млн $^{-1}$ соответственно.

1.2. Спутниковые наблюдения MetOP(IASI) 16, 29 мая и 6 июня 2019 г.

Зондирование малых газовых составляющих из космоса проводилось с помощью гиперспектрального зондирующего атмосферной IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) со спутников (MetOP, ESA) в диапазоне $645\text{--}2760$ cm^{-1} со спектральным разрешением $0,35\text{--}0,5$ cm^{-1} . Использовались данные с сайта NOAA [21].

В файлах со спутниковой информацией представлены данные на высотах от ~ 100 до ~ 80000 м о давлении (P , мбар), температуре воздуха (T_{air} , К), влажностном содержании (H_2O , г/кг) и концентрациях озона (O_3 , ppb), угарного газа (CO , ppb), метана (CH_4 , ppb), углекислого газа (CO_2 , ppm), оксида азота (N_2O , ppb), диоксида серы (SO_2 , ppb) и азотной кислоты (HNO_3 , ppb). В настоящем исследовании нас интересовали данные по температуре и давлению воздуха и концентрации метана.

Восстановление профилей производилось на основе стандартных методик EUMETSAT и NASA [22]. Данные IASI получены для соответствующих дней наблюдений 50-километровой окрестности пункта проведения наземных измерений Bruker FTS 125M (ИОА СО РАН). С учетом этого было отобрано восемь измерений, для которых среднее расстояние до станции наземного FTIR-мониторинга составило 23 км. Минимальное (3,5 км) и максимальное (47 км) расстояния были 16 мая 2019 г.

1.3. Регистрация спектров с помощью Фурье спектрометра FTS 125M

Регистрация спектров поглощения солнечного излучения, прошедшего через всю толщу атмосферы Земли, проводилась на Фурье-спектрометре IFS 125M (ИОА СО РАН, г. Томск, 56,475° с.ш., 85,046° в.д., 106 м над ур. м.) 13, 16, 29 мая и 6 июня 2019 г. в диапазоне 1200–3900 см⁻¹ с разрешением 0,005 см⁻¹ с функцией аподизации Вохсаг в течение 12 мин на детекторе InSb с использованием делителя CaF₂. Температура в помещении, где располагался Фурье-спектрометр, поддерживалась постоянной 25 ± 1 °С.

Спектры в указанные дни регистрировались ближе к полудню. Однако во время эксперимента солнечное излучение часто перекрывалось облаками. Поэтому качество спектров в разные моменты времени отличалось. При полном перекрытии Солнца облаками запись прекращалась: следящая система не позволяла проводить измерения. Общая схема установки описана в [23].

2. Обработка измерений солнечных спектров

С использованием методики определения общего содержания (ОС) метана, разработанной для станций сети IRWG-NDACC [24], была проведена обработка FTIR-спектров, зарегистрированных 16, 29 мая и 6 июня 2019 г. (измерения 13 июня 2019 г. не со-

держат соответствующих спектральных микроокон для определения ОС CH₄ [24]).

При обработке применялось ПО SFIT4 V.9.4.4.; в качестве априорных профилей газов в атмосфере были использованы профили модели WACCM V6, рассчитанные непосредственно для измерительной станции ИОА СО РАН (стандартная априорная информация для сети IRWG-NDACC). Метеорологическая информация (профили давления и температуры) для дней измерений была получена с использованием ресурса [25] – данные GDAS1V1 (1deg, 3hourly, Global) для соответствующих географических координат ИОА СО РАН (указанных выше). Выше уровня 20 мбар (~27 км), где заканчиваются данные GDAS, профили давления и температуры были продолжены соответствующими модельными профилями WACCM V6 (стандартный подход при обработке IRWG-NDACC) до высот 120 км. Для всего набора спектров значение отношения сигнал-шум SNR = 200. Спектроскопическая информация использовалась в соответствии с [24].

Отметим, что анализ спектров, зарегистрированных 16, 29 мая и 6 июня 2019 г., выявил наличие синусоидальной помехи (так называемой channeling) для 6 июня в интервале частот, соответствующих первому микроокну 2613,70–2615,40 см⁻¹. Поэтому при обработке спектров, измеренных 6 июня 2019 г., для микроокна 2613,70–2615,40 см⁻¹ определялись параметры синусоидальной помехи. Это позволило существенно уменьшить значения среднеквадратического отклонения между измеренными и расчетными спектрами RMS.

Результаты интерпретации спектров приведены в табл. 1, где даны восстановленные значения ОС CH₄ и XCH₄, а также величины, характеризующие качество решения обратной задачи: RMS, характеризующая качество подгонки рассчитанного спектра к измеренному; DOFS (количество степеней свободы для определяемого газа, по смыслу – количество слоев в атмосфере, которые можно определить для изучаемого газа); погрешности определения ОС CH₄ – случайная, систематическая и погрешность

Таблица 1
Результаты определения ОС CH₄ по спектрам, записанным в ИОА СО РАН в мае – июне 2019 г.

Дата, время (UTC)	P _{изм} , мбар	P _{GDAS} , мбар	ОС CH ₄ · 10 ¹⁹ , мол./см ⁻²	XCH ₄ , ppmv	RMS, %	DOFS	Погрешность определения ОС CH ₄ , %		
							сглаж.	случ.	сист.
16.05.2019, 04:11	997,67	1005	3,825	1,813	0,17	1,96	0,8	0,9	3,6
16.05.2019, 04:39	997,67	1005	3,861	1,830	0,22	1,94	0,9	0,9	3,6
16.05.2019, 05:07	997,67	1005	3,749	1,777	0,23	1,94	0,9	0,9	3,7
16.05.2019, 05:35	997,67	1005	3,864	1,832	0,29	1,90	0,9	0,9	3,6
16.05.2019, 06:31	997,67	1005	3,832	1,815	0,24	1,91	0,9	0,9	3,6
16.05.2019, 06:59	997,67	1005	3,816	1,807	0,30	1,91	0,9	0,9	3,6
29.05.2019, 08:15	993,01	997	3,894	1,856	0,17	1,93	0,8	0,9	3,6
06.06.2019, 05:20	983,68	989	3,858	1,857	0,29	1,85	1,0	0,8	3,7
06.06.2019, 05:35	983,68	989	3,919	1,887	0,48	1,84	0,9	0,9	3,7
06.06.2019, 07:01	983,68	989	3,814	1,836	0,40	1,85	0,9	0,9	3,7
06.06.2019, 07:16	983,68	989	3,769	1,815	0,37	1,86	1,0	0,9	3,7
06.06.2019, 07:30	983,68	989	3,809	1,833	0,38	1,86	1,0	0,9	3,7
06.06.2019, 08:16	983,68	989	3,834	1,847	0,28	1,89	1,0	0,9	3,7
06.06.2019, 08:31	983,68	989	3,777	1,819	0,31	1,90	0,9	0,9	3,7

сглаживания. X_{CH_4} было рассчитано с использованием значения атмосферного давления $P_{изм}$, измеренного в точке проведения Фурье-спектрометрических наблюдений (это давление отличается от давления GDAS1V1). Оба давления (в мбар) также приведены в табл. 1.

На рис. 3 представлены графики, иллюстрирующие измеренный и расчетный спектры в микроокнах, используемых для определения ОС CH_4 , а также разницу между ними.

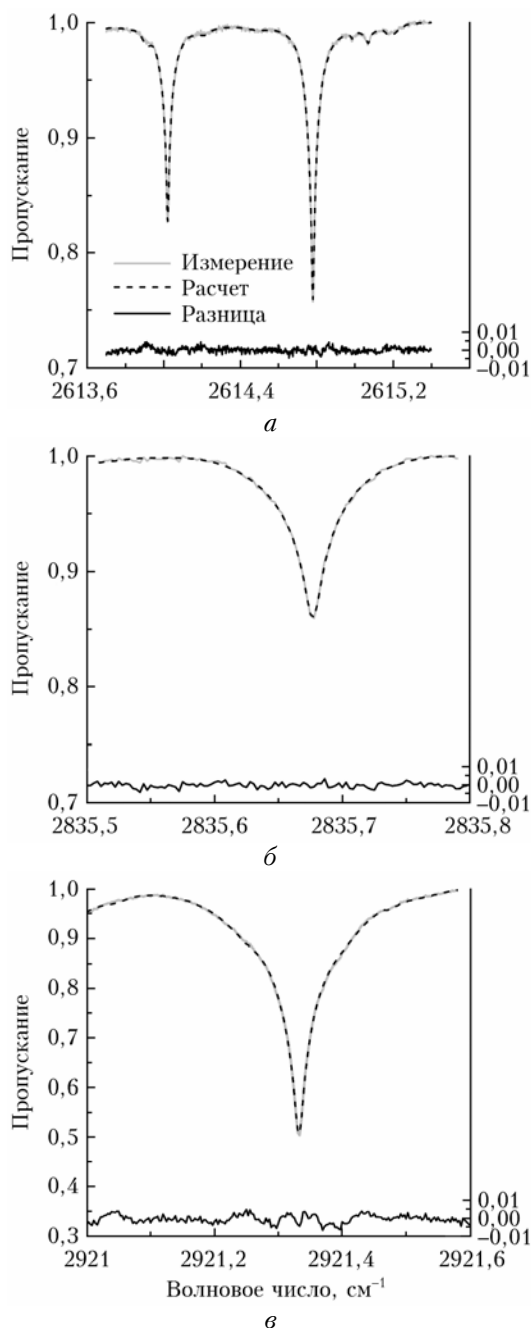


Рис. 3. Результаты подгонки рассчитанного спектра к измеренному 29 мая 2019 г. 08:15:45 UTC для трех микроокон, использующихся при определении ОС CH_4 : а – 2613,70–2615,40 cm^{-1} ; б – 2835,50–2835,80 cm^{-1} ; в – 2921,00–2921,60 cm^{-1}

3. Сравнение результатов наземных, самолетных и спутниковых измерений

Самолетные измерения высотных профилей (от поверхности земли до высот ~ 6700 м) отношения смеси CH_4 в районе Караканского бора (менее 300 км от Томска) осуществлялись 16 мая 2019 г. с $\sim 12:00$ до 14:00 по местному времени. Проводившиеся в то же время Фурье-спектрометрические измерения общего содержания CH_4 позволяют сравнить результаты этих независимых экспериментов. Для этого по данным самолетных измерений было рассчитано содержание CH_4 в слое от поверхности земли до высоты ~ 6390 м (ОС₆₃₉₀); выбор слоя обусловлен высотной сеткой, используемой для Томска в программе обработки SFIT4. В табл. 2 представлены полученные результаты.

Таблица 2

Сравнения наземных и самолетных измерений
16 мая 2019 г.

Фурье-спектрометрические измерения		Самолетные измерения	
Время регистрации (местное)	ОС ₆₃₉₀ · 10 ¹⁹ , см ⁻²	Время регистрации (местное)	ОС ₆₃₉₀ · 10 ¹⁹ , см ⁻²
11:11:25	2,333 (RMS = 0,17)	12:15–12:45 (измерения при наборе высоты)	2,379 ± 0,006
11:39:27	2,368 (RMS = 0,22)	12:55–14:10 (измерения при снижении)	2,372 ± 0,008

Значения ОС₆₃₉₀ рассчитывались с помощью ансамблей профилей, сформированных из исходных самолетных измерений (различное высотное осреднение), что позволило оценить возможный коридор разброса значений ОС₆₃₉₀ для обоих самолетных профилей отношения смеси CH_4 (4-я колонка табл. 2).

Видно, что FTIR-спектр, зарегистрированный в 11:39:27 16 мая 2019 г., хорошо согласуется с данными самолетных измерений, в то же время наземные измерения в 11:39:25 на $\sim 2\%$ ниже данных прямых самолетных измерений. Однако с учетом всех типов погрешностей, указанных в табл. 1, такое согласие лежит в пределах суммарной погрешности Фурье-спектрометрических измерений.

Необходимо отметить, что FTIR-измерения, согласно значению DOFS $\leq 2,0$, позволяют получать только общее содержание CH_4 . Кроме того, для выбранной схемы восстановления CH_4 (стандартная схема восстановления IRWG NDACC) чувствительность к содержанию CH_4 в нижних слоях тропосферы ниже, чем чувствительность в средней и верхней тропосфере, что также может влиять на значения ОС₆₃₉₀, получаемые по FTIR-спектрам.

Результаты определения ОС CH_4 по FTIR-спектрам прямого солнечного излучения, измеренным в г. Томске в мае–июне 2019 г., результаты

спутниковых измерений аппаратурой IASI и данные наземных FTIR-измерений на ст. St. Petersburg за тот же период приведены на рис. 4.

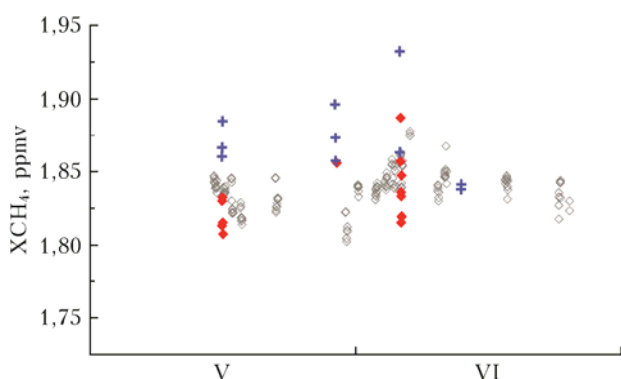


Рис. 4. Значения XCH_4 , полученные по результатам FTIR-измерений в ИОА СО РАН, г. Томск (ромбы) в мае – июне 2019 г. в сравнении с результатами спутниковых измерений аппаратурой IASI (крестики) и данными наземных FTIR-измерений на ст. St. Petersburg (пустые ромбы)

Для всех трех дней значения XCH_4 , полученные по результатам измерений IASI, лежат выше результатов наземных измерений в г. Томске. Среднее значение систематической разницы между средненежными значениями XCH_4 по наземным ($1,820 \pm 0,011$; $1,856$; $1,839 \pm 0,024$ ppmv) и спутниковым измерениям ($1,870 \pm 0,013$; $1,875 \pm 0,020$; $1,897 \pm 0,049$ ppmv), рассчитанное по трем дням (16, 29 мая и 6 июня), составляет $0,043 \pm 0,020$ ppmv ($2,3 \pm 1,1\%$). Если для сравнения взять наиболее близкие во времени наземные и спутниковые измерения, то по пяти таким парам XCH_4 (три для 16 мая, по одной для 29 мая и 6 июня) значение систематической разницы уменьшится и составит $0,029 \pm 0,023$ ppmv ($1,6 \pm 1,3\%$). Отметим, что ограниченная серия наземных измерений, полученная в течение трех дней, не позволяет сделать статистически обоснованные выводы о реально наблюдающемся систематическом различии между результатами спутниковых и наземных измерений.

Сравнить результаты определения XCH_4 по спектрам, измеренным в г. Томске в мае – июне 2019 г. и на ст. St. Petersburg за тот же период, можно на рис. 4. Однако сравнение временных тенденций для данных XCH_4 , полученных на двух наблюдательных станциях, расстояние между которыми составляет более чем 3000 км, не представляется необходимым.

Заключение

Проведено сравнение наземных Фурье-спектрометрических измерений общего содержания метана с результатами независимых самолетных наблюдений профиля CH_4 в районе Томска 16 мая 2019 г., а также со спутниковыми данными об общем содержании CH_4 . Показано, что результаты FTIR-измерений 16 мая 2019 г. на $\sim 2\%$ ниже данных прямых самолетных измерений. Значения XCH_4 , измерен-

ные IASI, выше наземных данных в г. Томске на $(1,6 \pm 1,3)\%$ для всех трех дней наземных Фурье-спектрометрических измерений. С учетом всех типов погрешностей такое согласие лежит в пределах суммарной погрешности Фурье-спектрометрических измерений.

Необходимо подчеркнуть, что для получения надежных результатов нужны длинные ряды наблюдений различных параметров. Например, в 2012 г. в ИОА СО РАН проходил комплексный эксперимент [26] и самолет-лаборатория пролетел прямо над г. Томском.

Также нужно поддерживать регулярные обновления международных баз данных HITRAN [27] и GEISA [28], так как одним из основных источников погрешности определения газов в атмосфере являются неточности спектроскопической информации.

Авторы выражают благодарность профессорам Л.Н. Синице и В.В. Белову, а также инженеру Ю.А. Матульяну за помощь в работе. Работа выполнена в рамках Госзадания ИОА СО РАН (№ АААА-А17-117021310150-0) при частичной поддержке РФФИ (грант № 19-03-00389). Обработка Фурье-спектрометрических измерений и сравнение с независимыми измерениями выполнено в СПбГУ при поддержке РФФИ (грант № 18-05-00011).

1. WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 12. 24 October 2016. WMO, 2016. P. 1–8.
2. Canadell J.G., Pataki D.E., Gifford R., Houghton R.A., Luo Y., Raupach M.R., Smith P., Steffen W. Saturation of the terrestrial carbon sink, in *Terrestrial Ecosystems in a Changing World* / J.G. Canadell, D.E. Pataki, L.F. Pitelka (eds). Springer: Berlin, 2007. P. 59–78. DOI: 10.1007/978-3-540-32730-1_6.
3. Ed Dlugokencky and Pieter Tans. 2017: NOAA/ESRL URL: www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/ (last access: 13.03.2020).
4. Brienen R.J.W., Phillips O.L., Feldpausch T.R., Gloor E., Baker T.R., Lloyd J., Lopez-Gonzalez G., Monteagudo-Mendoza A., Malhi Y., Lewis S.L., Martinez R.V., Alexiades M., Darvila E.A., Alvarez-Loyza P., Andrade A., Aragao L.E.O.C., Araujo-Murakami A., Arets E.J.M.M., Arroyo L., Aymard G.A., Banki O.S., Baraloto C., Barroso J., Bonal D., Boot R.G.A., Camargo J.L.C., Castilho C.V., Chama V., Chao K.J., Chave J., Comiskey J.A., Valverde F.C., da Costa L., de Oliveira E.A., Di Fiore A., Erwin T.L., Fauset S., Forsthofer M., Galbraith D.R., Grahame E.S., Groot N., Herrault B., Higuchi N., Honorio Coronado E.N., Keeling H., Killeen T.J., Laurance W.F., Laurance S., Licona J., Magnussen W.E., Marimon B.S., Marimon-Junior B.H., Mendoza C., Neill D.A., Nogueira E.M., Nunez P., Pallqui Camacho N.C., Parada A., Pardo-Molina G., Peacock J., Pen a-Claros M., Pickavance G.C., Pitman N.C.A., Poorter L., Prieto A., Quesada C.A., Ramirez F., Ramirez-Angulo H., Restrepo Z., Roopsind A., Rudas A., Salomao R.P., Schwarz M., Silva N., Silva-Espejo J.E., Silveira M., Stropp J., Talbot J., ter Steege H., Teran-Aguilar J., Terborgh J., Thomas-Caesar R., Toledo M., Torello-Raventos M., Umetsu R.K., van der Heijden G.M.F., van der Hout P., Guimarães Vieira I.C., Vieira S.A., Vilanova E., Vos V.A., Zagt R.J. Long-term decline of the Amazon carbon sink // *Nature*. 2015. V. 519, N 7543. P. 344–348.

5. *Hayes D.J., McGuire A.D., Kicklighter D.W., Gurney K.R., Burnside T.J., Melillo J.M.* Is the northern high-latitude land-based CO₂ sink weakening? // *Global Biogeochem. Cycles*. 2011. V. 25, N. GB3018. P. 1–14. DOI: 10.1029/2010GB003813.
6. *Lind S., Ingvaldsen R.B., Furevik T.* Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import // *Nature Clim. Change*. 2018. V. 8, N 7. P. 634–639. DOI: 10.1038/s41558-018-0205-y.
7. *Christensen T.R., Arora V.K., Gauss M., Huglund-Isaksson L., Parmentier F.-J.W.* Tracing the climate signal: mitigation of anthropogenic methane emissions can outweigh a large Arctic natural emission increase // *Nature Sci. Rep.* 2019. V. 9, N 1146. P. 1–8. DOI: 10.1038/s41598-018-37719-9.
8. *Mascarelli A.* A sleeping giant? // *Nature Clim. Change*. 2009. V. 1, N 904. P. 46–49. DOI: 10.1038/climate.2009.24.
9. *Glikson A.* The methane time bomb // *Energy Proc.* V. 146. P. 23–29. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.07.004.
10. *Sasakawa M., Machida T., Ishijima K., Arshinov M., Patra P.K., Ito A., Aoki S., Petrov V.* Temporal characteristics of CH₄ vertical profiles observed in the West Siberian Lowland over Surgut from 1993 to 2015 and Novosibirsk from 1997 to 2015 // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2017. V. 122, N 20. P. 11261–11273. DOI: 10.1002/2017JD026836.
11. *Dlugokencky E.J., Houweling S., Bruhwiler L., Masiarie K.A., Lang P.M., Miller J.B., Tans P.P.* Atmospheric methane levels off: Temporary pause or a new steady-state? // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30, iss. 19. 1992. P. ASC5-1–ASC5-4. DOI: 10.1029/2003GL018126.
12. *Rigby M., Prinn R.G., Fraser P.J., Simmonds P.G., Langenfelds R.L., Huang J., Cunnold D.M., Steele L.P., Krummel P.B., Weiss R.F., O'Doherty S., Salameh P.K., Wang H.J., Harth C.M., Muehle J., Porter L.W.* Renewed growth of atmospheric methane // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35, iss. 22. DOI: 10.1029/2008GL036037.
13. *Kirschke S., Bousquet P., Ciais P., Saunois M., Canadell J.G., Dlugokencky E.J., Bergamaschi P., Bergmann D., Blake D.R., Bruhwiler L., Cameron-Smith P., Castaldi S., Chevallier F., Feng L., Fraser A., Heimann M., Hodson E.L., Houweling S., Josse B., Fraser P.J., Krummel P.B., Lamarque J.-F., Langenfelds R.L., Le Queré C., Naik V., O'Doherty S., Palmer P.I., Pison I., Plummer D., Poulter B., Prinn R.G., Rigby M., Ringeval B., Santini M., Schmidt M., Shindell D.T., Simpson I.J., Spahni R., Steele L.P., Strode S.A., Sudo K., Szopa S., van der Werf G.R., Voulgarakis A., van Weele M., Weiss R.F., Williams J.E., Zeng G.* Three decades of global methane sources and sinks // *Nat. Geosci.* 2013. V. 6, iss. 10. P. 813–823. DOI: 10.1038/ngeo1955.
14. *Patra P.K., Saeki T., Dlugokencky E.J., Ishijima K., Umezawa T., Ito A., Aoki S., Morimoto S., Kort E.A., Crotwell A.* Regional methane emission estimation based on observed atmospheric concentrations (2002–2012) // *J. Meteor. Soc. Japan*. 2016. V. 94, N 1. P. 31–113. DOI: 10.2151/jmsj.2016-006.
15. *McNorton J., Chipperfield M.P., Gloor M., Wilson C., Feng W., Hayman G.D., Rigby M., Krummel P.B., O'Doherty S., Prinn R.G., Weiss R.F., Young D., Dlugokencky E., Montzka S.A.* Role of OH variability in the stalling of the global atmospheric CH₄ growth rate from 1999 to 2006 // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, iss. 12. P. 7943–7956. DOI: 10.5194/acp-16-7943-2016.
16. *McNorton J., Gloor E., Wilson C., Hayman G.D., Gedney N., Comyn-Platt E., Marthews T., Parker R.J., Boesch H., Chipperfield M.P.* Role of regional wetland emissions in atmospheric methane variability // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43, iss. 21. P. 1433–1444. DOI: 10.1002/2016GL070649.
17. *Saunois M., Bousquet P., Poulter B., Pregon A., Ciais P., Canadell J.G., Dlugokencky E.J., Etiope G., Bastviken D., Houweling S., Janssens-Maenhout G., Tubiello F.N., Castaldi S., Jackson R.B., Alexe M., Arora V.K., Beerling D.J., Bergamaschi P., Blake D.R., Brailsford G., Brovkin V., Bruhwiler L., Crevoisier C., Crill P., Covey K., Curry C., Frankenberg C., Gedney N., Hoeglund-Isaksson L., Ishizawa M., Ito A., Joos F., Kim H.-S., Kleinen T., Krummel P., Lamarque J.-F., Langenfelds R., Locatelli R., Machida T., Maksyutov S., McDonald K.C., Marshall J., Melton J.R., Morino I., Naik V., O'Doherty S., Parmentier F.-J.W., Patra P.K., Peng C., Peng S., Peters G.P., Pison I., Prigent C., Prinn R., Ramonet M., Riley W.J., Saito M., Santini M., Schroeder R., Simpson I.J., Spahni R., Steele P., Takizawa A., Thornton B.F., Tian H., Tohjima Y., Viovy N., Voulgarakis A., van Weele M., van der Werf G.R., Weiss R., Wiedinmyer C., Wilton D.J., Wiltshire A., Worthy D., Wunch D., Xu X., Yoshida Y., Zhang B., Zhang Z., Zhu Q.* The global methane budget 2000–2012 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2016. V. 8, iss. 2. P. 697–751. DOI: 10.5194/essd-8-697-2016.
18. *Patra P.K., Houweling S., Krol M., Bousquet P., Belikov D., Bergmann D., Bian H., Cameron-Smith P., Chipperfield M.P., Corbin K., Fortems-Cheiney A., Fraser A., Gloor E., Hess P., Ito A., Kawo S.R., Law R.M., Loh Z., Maksyutov S., Meng L., Palmer P.I., Prinn R.G., Rigby M., Saito R., Wilson C.* TransCom model simulations of CH₄ and related species: Linking transport, surface flux and chemical loss with CH₄ variability in the troposphere and lower stratosphere // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11, iss. 24. P. 12813–12837. DOI: 10.5194/acp-11-12813-2011.
19. *Naik V., Voulgarakis A., Fiore A.M., Horowitz L.W., Lamarque J.-F., Lin M., Prather M.J., Young P.J., Bergmann D., Cameron-Smith P.J., Cionni I., Collins W.J., Dalsøren S.B., Doherty R., Eyring V., Faluvegi G., Folberth G.A., Josse B., Lee Y.H., MacKenzie I.A., Nagashima T., van Noije T.P.C., Plummer D.A., Righi M., Rumbold S.T., Skeie R., Shindell D.T., Stevenson D.S., Strode S., Sudo K., Szopa S., Zeng G.* Preindustrial to present-day changes in tropospheric hydroxyl radical and methane lifetime from the Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP) // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13, iss. 10. P. 5277–5298. DOI: 10.5194/acp-13-5277-2013.
20. *Hamill P., Iraci L.T., Yates E.L., Gore W., Bui T.P., Tanaka T., Loewenstein M.* A New instrumented airborne platform for atmospheric research // *Bull. Am. Meteor. Soc.* V. 97, N 3. P. 397–404. DOI: 10.1175/BAMS-D-14-00241.1.
21. *NOAA's Comprehensive Large Array-data Stewardship System.* URL: <https://www.bou.class.noaa.gov/saa/products> (last access: 13.03.2020).
22. *August T., Klaes D., Schlüssel P., Hultberg T., Crapeau M., Arriaga A., O'Carroll A., Coppens D., Munro R., Calbet X.* IASI on Metop-A: Operational Level 2 retrievals after five years in orbit // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2012. V. 113, iss. 11. P. 1340–1371.

23. Васильченко С.С., Сердюков В.И., Синица Л.Н. Спектральная система измерений газовых атмосферных компонентов с оптоволоконной следящей системой и некоторые результаты анализа атмосферных спектров // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 10. С. 920–925; Vasil'chenko S.S., Serdyukov V.I., Sinitsa L.N. Spectral system for measuring gaseous atmospheric components with a fiber-optic tracking system, and certain analysis results of atmospheric spectra // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 3. P. 227–232.
24. Sussmann R., Forster F., Rettinger M., Jones N. Strategy for high-accuracy-and-precision retrieval of atmospheric methane from the mid-infrared FTIR network // Atmos. Meas. Tech. 2011. V. 4, iss. 9. P. 1943–1964. DOI: 10.5194/amt-4-1943-2011.
25. Archived Meteorology. URL: <https://ready.arl.noaa.gov/READYamet.php> (last access: 13.03.2020).
26. Matvienko G.G., Belan B.D., Panchenko M.V., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Turchinovich S.A., Turchinovich Yu.S., Eremina T.A., Kozlov V.S., Terpugova S.A., Pol'kin V.V., Yausheva E.P., Chernov D.G., Odintsov S.L., Burlakov V.D., Arshinov M.Yu., Ivlev G.A., Savkin D.E., Fofonov A.V., Gladkikh V.A., Kamardin A.P., Belan D.B., Grishaev M.V., Belov V.V., Afonin S.V., Balin Yu.S., Kokhanenko G.P., Penner I.E., Samoiloa S.V., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Davydov D.K., Kozlov A.V., Pestunov D.A., Rasskazchikova T.M., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Belan S.B., Shmargunov V.P., Voronin B.A., Serdyukov V.I., Polovtseva E.R., Vasil'chenko S.S., Tikhomirova O.V., Ponomarev Yu.N., Romanovskii O.A., Sinitsa L.N., Marichev V.N., Makarova M.V., Safatov A.S., Kozlov A.S., Malyshev S.B., Maksimova T.A. Instrumentation complex for comprehensive study of atmospheric parameters // Int. J. Remote Sens. 2014. V. 35, N 15. P. 5651–5676.
27. Rothman L.S., Gordon I.E., Babikov Y., Barbe A., Benner D.C., Bernath P.F., Birk M., Bizzoichi L., Boudon V., Brown L.R., Campargue A., Chance K., Coudert L., Devi V.M., Drouin B.J., Fayt A., Flaud J.-M., Gamache R.R., Harrison J., Hartmann J.-M., Hill C., Hodges J.T., Jacquemart D., Jolly A., Lamouroux J., LeRoy R.J., Li G., Longo D., Mackie C.J., Massie S.T., Mikhailenko S., Muller H.S.P., Naumenko O.V., Nikitin A.V., Orphal J., Perevalov V., Perrin A., Polovtseva E.R., Richard C., Smith M.A.H., Starikova E., Sung K., Tashkun S., Tennyson J., Toon G.C., Tyuterev V.I.G., Vander Auwera J., Wagner G. The HITRAN2012 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. November 2013. V. 130. P. 4–50.
28. Jacquinet-Husson N., Armante R., Scott N.A., Chédin A., Crépeau L., Boutammine C., Bouhdaoui A., Crevoisier C., Capelle V., Boone C., Poulet-Crovisier N., Barbe A., Chris Benner D., Boudon V., Brown L.R., Buldyreva J., Campargue A., Coudert L.H., Devi V.M., Dönn M.J., Drouin B.J., Fayt A., Fittschen C., Flaud J.-M., Gamache R.R., Harrison J.J., Hill C., Hodnebrog Ø., Hu S.-M., Jacquemart D., Jolly A., Jiménez E., Lavrentieva N.N., Liu A.-W., Lodi L., Lyulin O.M., Massie S.T., Mikhailenko S., Müller H.S.P., Naumenko O.V., Nikitin A., Nielsen C.J., Orphal J., Perevalov V.I., Perrin A., Polovtseva E., Predoi-Cross A., Rotger M., Ruth A.A., Yu S.S., Sung K., Tashkun S.A., Tennyson J., Tyuterev V.I.G., Vander Auwera J., Voronin B.A., Makie A. 2015 edition of the GEISA spectroscopic database // J. Mol. Spectrosc. 2016. V. 327. P. 31–7287.

M.V. Makarova, V.I. Serdyukov, M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, B.A. Voronin, A.V. Nikitin, A.P. Shcherbakov, Yu.V. Gridnev. The first comprehensive experiment for determining parameters of the vertical distribution of methane in the troposphere over Western Siberia from solar spectra recorded with an IFS-125M FTIR spectrometer and in situ aircraft measurements.

The results of a comprehensive experiment carried out to derive the vertical distribution of methane in the troposphere over Western Siberia from solar spectra recorded with an IFS-125M Fourier transform spectrometer, *in situ* aircraft measurements, and satellite observations are described, analyzed, and compared.