

СРАВНЕНИЯ СПУТНИКОВЫХ (GOSAT) И НАЗЕМНЫХ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ МЕТАНА ВБЛИЗИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

© 2013 г. М. В. Макарова, Н. М. Гаврилов*, Ю. М. Тимофеев, А. В. Поберовский

Санкт-Петербургский государственный университет

**E-mail: gavrilov@inbox.spbu.ru*

Поступила в редакцию 06.05.2013 г.

Проведено сравнение средних по столбу атмосферы отношений смеси метана, измеренных гиперспектральными методами наземной Фурье-спектроскопии на физическом факультете Санкт-Петербургского государственного университета (59.9° с.ш., 29.8° в.д.) в 2009–2012 гг. с аналогичными данными, полученными японским спутником GOSAT. Средние значения отношения смеси метана X_{CH_4} по спутниковым данным версии V01.xx на 17–21 млрд⁻¹ меньше, чем соответствующие значения, полученные из наземных измерений при дисперсии ~13 млрд⁻¹. Для версии данных GOSAT V02.xx занижение в среднем составляет 2 млрд⁻¹, а дисперсия ~18 млрд⁻¹. Это соответствует расхождению X_{CH_4} , измеренным спутником GOSAT с данными международных сетей фурье-спектроскопических наблюдений TCCON и NDACC.

Ключевые слова: атмосферный метан, общее содержание, наземные измерения, фурье-спектроскопия, спутник GOSAT, сравнение, валидация

DOI: 10.7868/S0205961413060055

ВВЕДЕНИЕ

Метан является вторым по важности антропогенным парниковым газом. Несмотря на его низкую концентрацию в атмосфере Земли, его вклад в антропогенный парниковый эффект составляет ~15%. Для локального мониторинга метана обычно используется метод забора и лабораторного анализа проб воздуха для определения отношения смеси CH_4 вблизи земной поверхности или в тропосфере с использованием самолетов (Conway et al., 2003). Оптические спектрометрические методы измерений, основанные на регистрации ИК-спектров поглощения солнечной радиации, применяются для определения общего содержания CH_4 во всей толще атмосферы, среднего по столбу атмосферы отношения смеси метана X_{CH_4} или элементов вертикального распределения метана.

Данные наземных оптических измерений CH_4 могут быть полезны для валидации спутниковых измерений, которые также дают информацию об общем содержании CH_4 в столбе атмосферы. В этих исследованиях все большее распространение находят так называемая гиперспектральная аппаратура. Для проверки спутниковых наблюдений парниковых газов создана специальная международная сеть наземного мониторинга общего

содержания углерода в столбе атмосферы TCCON (The Total Carbon Column Observing Network), которая использует гиперспектральные фурье-спектроскопические (ФС) измерения прямого ИК-солнечного излучения для определения общего содержания CO_2 , CH_4 и других климатообразующих газов (Wunch et al., 2011). Подобные ФС измерения проводятся также на международной наземной сети мониторинга изменений состава атмосферы NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change, см. <http://www.ndsc.ncep.noaa.gov/>).

В Санкт-Петербургском государственном университете (СПбГУ) спектроскопические измерения общего содержания метана были начаты в 1991 г. (Mironenkov et al., 1996; Макарова et al., 2009). Эти измерения до 2009 г. осуществлялись с использованием солнечного ИК-спектрометра с разрешением 0.4–0.6 см⁻¹. С января 2009 г. на кафедре физики атмосферы проводятся гиперспектральные наземные ФС-измерения с помощью интерферометра Bruker IFS 125 HR, имеющего высокое спектральное разрешение. Результаты измерений атмосферных малых газовых составляющих описаны в работах (Поберовский и др., 2010; Виролайнен и др., 2011; Поляков и др., 2011; Яговкина и др., 2011).

Первые глобальные спутниковые данные о содержании полного содержания метана в столбе атмосферы были получены с использованием прибора IMG/ADEOS, который измерял уходящее тепловое излучение с высоким спектральным разрешением (Kobayashi et al., 1999). Дальнейшие исследования были проведены приборами SCIAMACHY, AIRS, IASI, TES (Sussmann et al., 2005; Razavi et al., 2009; Xiong et al., 2010; Wecht et al., 2012). Несмотря на обширные программы наблюдений, географическое распределение метана и его источники остаются недостаточно выясненными (Solomon et al., 2007). Регулярные глобальные спутниковые измерения CH_4 могут приблизить нас к решению этих проблем.

В январе 2009 г. был запущен спутник GOSAT (Global Greenhouse Gas Observation by Satellite), который является совместным проектом Японского агентства аэрокосмических исследований и Национального института исследований окружающей среды в Цукубе, Япония (Kuze et al., 2009). Спутник предназначен для космического мониторинга глобальных распределений общих содержаний CO_2 и CH_4 в столбе атмосферы и использует гиперспектральную аппаратуру. Средние по столбу отношения смеси двуокиси углерода X_{CO_2} и метана X_{CH_4} восстанавливаются из данных теплового датчика для наблюдения углерода фурье-спектрометром в близкой инфракрасной области TANSO-FTS (Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observations – Fourier Transform Spectrometer), который установлен для измерений парниковых газов на борту спутника GOSAT (Yoshida et al., 2011).

Morino et al. (2011) выполнили предварительный анализ X_{CO_2} и X_{CH_4} , полученных спутником GOSAT, сравнив их с измерениями на наземной сети фурье-спектроскопии TCCON (см. выше). Они обнаружили значительное занижение спутниковых значений по сравнению с наземными наблюдениями. Позже сопоставления X_{CO_2} и X_{CH_4} , полученных другими алгоритмами восстановления X_{CO_2} и X_{CH_4} из данных GOSAT и TCCON, дали лучшее согласие между спутниковыми и наземными измерениями (Notholt et al., 2012; Cogan et al., 2012). Поскольку эти сравнения были выполнены для широт ниже 55° с.ш., то представляет интерес совместный анализ спутниковых (GOSAT) и наземных наблюдений на более высоких широтах и использующих различные алгоритмы восстановления.

В статье Гаврилова и Тимофеева (2013) проведено сравнение гиперспектральных измерений X_{CO_2} со спутника GOSAT с наземными ФС наблюдениями. В настоящей работе мы сравниваем аналогичные данные о X_{CH_4} , полученные в 2009–2012 гг. в

окрестностях Санкт-Петербурга на широте около 60° с.ш.

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Измерения спектров солнечного излучения проводятся в Старом Петергофе (59.88° с.ш., 29.82° в.д., 20 м над уровнем моря), примерно в 35 км к юго-западу от центра Санкт-Петербурга. Регистрация интерферограмм проводится в условиях безоблачного неба или при наличии достаточных для проведения регистрации спектров разрывов в облачности. Обычно измерения ведутся при разности оптического пути 180 см, что соответствует спектральному разрешению 0.005 см^{-1} . Время накопления и усреднения десяти интерферограмм, использующихся для получения одного спектра, составляет около 12 мин.

Интерпретация (определение общего содержания газов в атмосфере) высокоразрешенных спектров прямого солнечного излучения, измеренных Bruker IFS125 HR, проводилась на основе стандартного международного программного обеспечения SFIT2 v 3.92 (Pougatchev et al., 1995; Rinsland et al., 1998; Hase et al., 2004), разработанного для сети NDACC. Алгоритм SFIT2 при определении содержания газов в атмосфере использует метод статистической регуляризации с использованием итерационного метода Ньютона. В качестве источника информации о параметрах тонкой структуры линий молекулярного поглощения используется спектроскопическая база данных HITRAN-2004 (Rothman et al., 2005).

Основными входными параметрами SFIT2 являются: измеренный спектр солнечного излучения, величины разности оптического хода и апертуры прибора, зенитный угол Солнца, отношение сигнал/шум, метеорологические данные (профили температуры и давления в день измерения), априорная информация о профилях отношения смеси газов. Метеорологическая информация (давление, профиль температуры), необходимая при обработке спектров, поступает со станции радиозондирования ГГО (пос. Воейково) (см., например, Weather Web, 2013), которая находится в 50 км от Петергофа. В качестве априорных профилей концентраций газов в атмосфере были использованы профили, рассчитанные при помощи климатической модели WACCM (Whole Atmosphere Community Climate Model) (Garcia et al., 2007) непосредственно для измерительной станции в Петергофе (соответствующие широта, долгота и высота над уровнем моря).

Для восстановления общего содержания CH_4 в столбе атмосферы используются обычные для сети NDACC спектральные интервалы в ИК-области (см., например, Sepulveda et al., 2012): 2613.7–2615.4, 2650.6–2651.3, 2835.5–2835.8 и 2903.6–

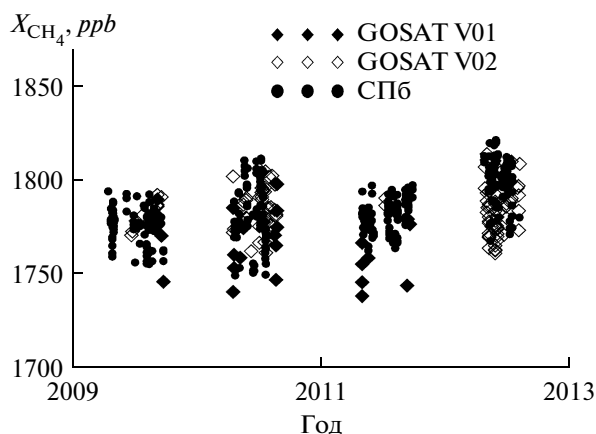


Рис. 1. Средние по столбу атмосферы отношения смеси метана (в млрд⁻¹), измеренные со спутника GOSAT (данные версий V01.xx и V02.xx) и с земной поверхности вблизи Санкт-Петербурга.

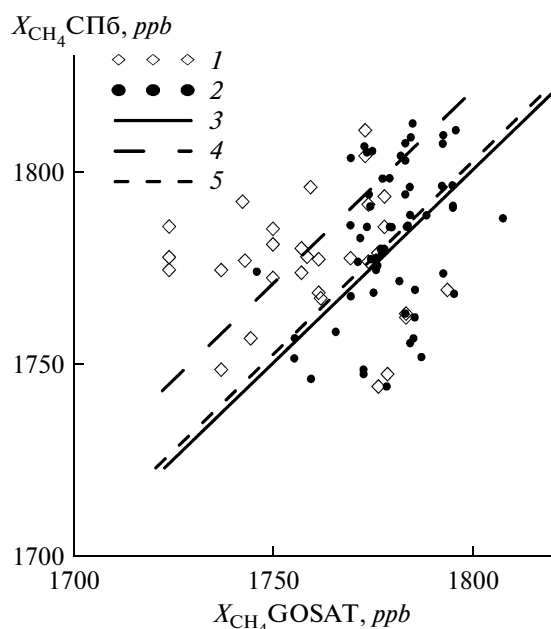


Рис. 2. Сравнение пар значений X_{CH_4} (в млрд⁻¹), измеренных вблизи Санкт-Петербурга и со спутника GOSAT версии данных V01.xx – (1) и V02.xx – (2), для которых различия между датами измерений не превышают двух дней. Линия 3 соответствует $X_{\text{CH}_4\text{-SPб}} = X_{\text{CH}_4\text{-GOSAT}}$, а линии 4 и 5 сдвинуты от линии 3 в соответствии со средними значениями δX_{CH_4} из таблицы для данных GOSAT версий V01.xx и V02.xx соответственно.

2904.03 см⁻¹. Среднее значение отношения сигнал/шум в указанных спектральных диапазонах после процедуры отбраковки спектров составляет ~800.

Случайные относительные погрешности единичного измерения X_{CH_4} не превышают 0.5% (по

оценкам с помощью расчетов матрицы ошибок в рамках метода статистической регуляризации, реализованного в программе SFIT2). В условиях стабильной работы аппаратуры и стабильного состояния атмосферы вариации X_{CH_4} в сериях спектров, измеренных в течение дня, обычно не превышают 1%.

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЙ

Для сравнения X_{CH_4} , измеряемых вблизи Санкт-Петербурга с поверхности Земли и с борта спутника GOSAT, были выбраны интервалы одновременных измерений в 2009–2012 гг. Для этих временных интервалов из базы данных Национального института экологических исследований в Цукубе, Японии (NIES, 2012) были отобраны значения X_{CH_4} , измеренные спутником GOSAT в окрестности $\pm 3^\circ$ по широте и долготе от пункта наземных наблюдений. Наземные значения X_{CH_4} , использованные для сравнения, были измерены при наименьших зенитных углах Солнца (обычно в пределах ± 3 ч от местного полудня). При этом использовались значения, попадающие в 95% доверительный интервал около среднего значения для соответствующего периода наблюдений. Так как спутниковые значения X_{CH_4} получены для сухой атмосферы (без учета водяного пара), наземные X_{CH_4} были также скорректированы для сухой атмосферы, с использованием данных реанализа метеорологической информации европейского центра ECMWF (Dee et al., 2011).

На рис. 1 представлены индивидуальные значения X_{CH_4} по наземным и спутниковым измерениям. Во многих случаях даты проведения измерений с помощью этих методов не совпадают. Однако рис. 1 показывает систематически меньшие значения X_{CH_4} для версии данных GOSAT, V01.xx по сравнению с наземными измерениями вблизи Санкт-Петербурга. Для более детального анализа были отобраны пары индивидуальных наземных и спутниковых значений $X_{\text{CH}_4\text{-SPб}}$ и $X_{\text{CH}_4\text{-GOSAT}}$, для которых различия в датах их измерений не превышают двух дней. Рисунок 2 показывает соответствующие пары $X_{\text{CH}_4\text{-SPб}}$ и $X_{\text{CH}_4\text{-GOSAT}}$ для обеих версий спутниковых данных GOSAT. Сплошная линия на рис. 2 соответствует $X_{\text{CH}_4\text{-SPб}} = X_{\text{CH}_4\text{-GOSAT}}$. Видно, что почти все значения X_{CH_4} для данных GOSAT версии V01.xx лежат выше сплошной линии на рис. 2, т.е. $X_{\text{CH}_4\text{-SPб}} > X_{\text{CH}_4\text{-GOSAT}}$. Значения X_{CH_4} для данных GOSAT V02.xx на рис. 2 распределены более симметрично относительно сплошной линии. Коэффициенты корреляции между $X_{\text{CH}_4\text{-SPб}}$ и $X_{\text{CH}_4\text{-GOSAT}}$ на рис. 2 равны 0.65 и 0.71 для данных GOSAT версий V01.xx и V02.xx соответ-

Средние характеристики (в млрд⁻¹) для данных, показанных на рис. 2

| Данные | Величина | $X_{\text{CH}_4_SPB}$ | $X_{\text{CH}_4_GOS}$ | δX_{CH_4} |
|--------|-----------|------------------------|------------------------|--------------------------|
| V01.xx | Среднее | 1780.2 | 1759.6 | -20.6 |
| | Медиана | 1777.8 | 1759.6 | -17.2 |
| | Дисперсия | 14.0 | 13.4 | 13.3 |
| V02.xx | Среднее | 1782.1 | 1779.9 | -2.2 |
| | Медиана | 1785.5 | 1779.5 | -1.8 |
| | Дисперсия | 18.9 | 10.9 | 18.1 |

ственно. В таблице приведены средние значения и дисперсии для наземных и спутниковых данных, представленных на рис. 2. Длинные и короткие штриховые линии на рис. 2 смещены по отношению к сплошной линии в соответствии с $\delta X_{\text{CH}_4} = X_{\text{CH}_4_GOS} - X_{\text{CH}_4_SPB}$ из таблицы для данных GOSAT версий V01.xx и V02.xx соответственно.

Для данных GOSAT версии V01.xx разности δX_{CH_4} в большинстве случаев отрицательны (до -59 млрд⁻¹, или ~3.3%). Соответствующие среднее и медианное $\delta X_{\text{CH}_4} \sim -(17-21)$ млрд⁻¹, а дисперсия ~13 млрд⁻¹ в таблице, т.е. значения X_{CH_4} по данным GOSAT версии V01.xx примерно на 1-1.3% ниже, чем наземные ФС-значения.

Для данных GOSAT версии V02.xx отклонения δX_{CH_4} значений GOSAT от наземных измерений имеют разные знаки в различные дни и варьируются от -26 млрд⁻¹ (1.5%) до 24 млрд⁻¹ (1.4%), что примерно в 2 раза меньше соответствующих отклонений для данных версии V01.xx (см. выше). В большинстве случаев относительные отклонения менее 1% для данных GOSAT версии V02.xx. Соответствующие средняя и медианная разности в таблице составляют $\delta X_{\text{CH}_4} = -(2.2-1.8)$ млрд⁻¹ (или около 0.1%), а дисперсия ~18 млрд⁻¹, или около 1%. При этом изменчивость (дисперсия) отношения смеси метана в таблице существенно меньше (~11 млрд⁻¹), чем для наземных измерений (~19 млрд⁻¹) для данных GOSAT версии V02.xx.

Анализ гистограммы разностей δX_{CH_4} между парами наземных и спутниковых измерений, показал, что для данных GOSAT версии V02.xx эти разности распределены почти симметрично относительно нуля, в то время как по данным GOSAT версии V01.xx они демонстрируют систематическую недооценку X_{CH_4} по сравнению с наземными ФС-измерениями.

ОБСУЖДЕНИЕ

Morino et al. (2011) провели сравнение данных GOSAT версии V01.xx и ФС-измерений X_{CH_4} в 2009-2010 гг. на девяти станциях наземной сети TCCON на широтах от 45° ю.ш. до 53° с.ш. Они обнаружили наличие систематического занижения значений X_{CH_4} спутником, которое составляет $\delta X_{\text{CH}_4} \approx -20 \pm 19$ млрд⁻¹ ($-1.2 \pm 1.1\%$). Близкие результаты были получены при исследовании отклонений между данными GOSAT версии V01.xx и самолетными измерениями в тропосфере, значения δX_{CH_4} при этом составили от -8 ± 10 млрд⁻¹ (Saitoh et al., 2012) до -39 ± 11 млрд⁻¹ (Tanaka et al., 2012). Отметим, что полученные в таблице средние и медианные значения $\delta X_{\text{CH}_4} \approx -(17-21)$ млрд⁻¹ для данных GOSAT версии V01.xx попадают в указанные диапазоны. Это может быть косвенным свидетельством того, что наземные ФС-измерения X_{CH_4} вблизи Санкт-Петербурга согласуются с измерениями отношений смеси метана в столбе атмосферы на сети TCCON.

Данные X_{CH_4} GOSAT, полученные с помощью нескольких алгоритмов восстановления в различных публикациях, были сопоставлены с наземными ФС-наблюдениями. Parker et al. (2011) провели сравнение значений X_{CH_4} , измеренных спутником GOSAT с данными наземной сети TCCON и с результатами численного моделирования. Было получено, что относительные различия индивидуальных спутниковых и наземных измерений изменяются в пределах 0.1-0.9% в зависимости от широты. Notholt et al. (2012) проанализировав различные алгоритмы восстановления метана, получили дисперсии разностей между GOSAT и наземными значениями в диапазоне от 0.8-4%. Schepers et al. (2012), при изучении влияния рассеяния света и перистых облаков на результаты ФС, получили средние различия между GOSAT и наземными X_{CH_4} в пределах от -0.3 до -0.4%. В работе Butz et al. (2011) также показано наличие систематических ошибок ~-0.3%. К сожалению, авторы упомянутых исследований не использовали

данные GOSAT версий V01.xx и V02.xx. Поэтому, трудно сделать прямое сравнение результатов нашей работы с перечисленными исследованиями.

Наш анализ отношения смеси метана по данным GOSAT версии V02.xx (см. таблицу и рис. 2) показал, что разности между спутниковыми и наземными значениями лежат в пределах 0.01–1.6% при среднем отклонении $\sim -0.1 \pm 0.9\%$. Хотя эти средние разности имеют значительные дисперсии (из-за ограниченного числа измерений), однако порядки их величин показывают, что ФС-наблюдения вблизи Санкт-Петербурга достаточно хорошо согласуются с данными спутника GOSAT. Дисперсии вариаций δX_{CH_4} , приведенные в таблице, составляют $\sim 13\text{--}18$ ppm, или $\sim 0.7\text{--}1\%$ и сравнимы с суммарными ошибками обоих типов измерений.

Отметим, что дисперсия наземных значений X_{CH_4} достаточно велика и составляет $\sim 14\text{--}19$ млрд⁻¹ (см. таблицу). Следует принять во внимание, что наши измерения проводятся в непосредственной близости от большого мегаполиса Санкт-Петербург, поэтому общая изменчивость метана там может быть выше, чем для фоновых измерений. Макарова и др. (2006) оценили, что антропогенные выбросы Санкт-Петербурга могут давать вклад до 2% в полное содержание CH_4 в столбе атмосферы.

Проведенное в данной работе сравнение наземных и спутниковых ФС-измерений отношения смеси метана X_{CH_4} не учитывает некоторые характеристики, которые могут влиять на результаты измерений и обработку данных, например, различия в усредняющих ядрах применяемых методов дистанционного зондирования (Parker et al., 2011), или неопределенности в параметрах тонкой структуры спектральных линий (Chesnokova et al., 2011). Кроме того, относительно небольшое количество солнечных дней для ФС-измерений вблизи Санкт-Петербурга требует дальнейшего накопления данных для проведения более надежных сравнений спутниковых и наземных измерений атмосферного метана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании анализируются данные, полученные с помощью спутниковой и наземной гиперспектральной аппаратуры. Выполнены сравнения средних по столбу атмосферы отношений смеси метана X_{CH_4} , измеряемых с помощью фурье-спектрометра с борта японского спутника GOSAT (версии данных V01.xx и V02.xx) и с земной поверхности на физическом факультете Санкт-Петербургского государственного университета (59.9° с.ш., 29.8° в.д.) в 2009–2012 гг. Средние и медианные различия между данными GOSAT версии V01.xx и наземными ФС измерениями $\delta X_{\text{CH}_4} \approx -(17\text{--}21)$ млрд⁻¹, а их дисперсии ~ 13 млрд⁻¹, что

согласуется с литературными данными по сравнениям этой версии данных GOSAT с сетью наземных ИФС-станций TCCON и с результатами анализа самолетных проб тропосферного воздуха. Средние различия для данных GOSAT версии V02.xx меньше ($\delta X_{\text{CH}_4}/X_{\text{CH}_4} \approx 0.1\%$) и свидетельствуют, что ФС-наблюдения вблизи Санкт-Петербурга могут дать приемлемое согласие с уточненными спутниковыми данными. Дисперсии значений $\delta X_{\text{CH}_4} \sim 13\text{--}18$ млрд⁻¹ ($\sim 0.7\text{--}1\%$) соответствуют суммарным ошибкам наземных и спутниковых измерений. Для проведения более надежных сравнений наземных и спутниковых измерений необходимо дальнейшее накопление данных ФС-измерений.

Данное исследование выполнено при частичной финансовой поддержке научно-исследовательских грантов 11.31.547.2010 и 11.37.28.2011 Санкт-Петербургского государственного университета, а также гранта 12-05-00596 Российского фонда фундаментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Ионов Д.В., Поберовский А.В., Шаламянский А.М.* Наземные измерения общего содержания озона ИК-методом // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 4. С. 521–532.
- Гаврилов Н.М., Тимофеев Ю.М.* Сравнения спутниковых (GOSAT) и наземных спектроскопических измерений содержания CO_2 вблизи Санкт-Петербурга // Исслед. Земли из космоса. 2013 (в печати).
- Макарова М.В., Поберовский А.В., Яговкина А.В., Кароль И.Л., Лагун В.Е., Парамонова Н.Н., Решетников А.И., Привалов В.И.* Исследование процессов формирования поля метана в атмосфере северо-западного региона российской федерации // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 2. С. 237–249.
- Макарова М.В., Поберовский А.В., Вишератин К.Н., Поляков А.В.* Временная изменчивость общего содержания метана в атмосфере вблизи Санкт-Петербурга // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 6. С. 774–781.
- Мироненков А.В., Поберовский А.В., Тимофеев Ю.М.* Спектроскопические измерения полного содержания метана в атмосфере вблизи Санкт-Петербурга // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1996. Т. 32. № 4. С. 433–439.
- Поберовский А.В., Макарова М.В., Ракитин А.В., Ионов Д.В., Тимофеев Ю.М.* Изменчивость общих содержаний климатически активных газов по наземным спектроскопическим измерениям с высоким разрешением // Докл. РАН. 2010. Т. 432. № 2. С. 257–259.
- Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Яговкина И.С.* Сезонные вариации общего содержания фтористого водорода в атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 6. С. 823–828.
- Яговкина И.С., Поляков А.В., Поберовский А.В., Тимофеев Ю.М.* Спектроскопические измерения общего со-

держания фреона cfc-11 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 2. С. 204–207.

Butz A., Guerlet S., Hasekamp O., Schepers D., Galli A., Aben I., Frankenberg C., Hartmann J.-M., Tran H., Kuze A., Keppel-Aleks G., Toon G., Wunch D., Wennberg P., Deutscher N., Griffith D., Macatangay R., Messerschmidt J., Notholt J., Warneke T. Toward accurate CO₂ and CH₄ observations from GOSAT // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. № 14. doi: 10.1029/2011GL047888.

Chesnokova T.Yu., Boudon V., Gabard T., Griбанov K.G., Firsov K., Zakharov V.I. Near-infrared radiative transfer modelling with different CH₄ spectroscopic databases to retrieve atmospheric methane total amount // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2011. V. 112. P. 2676–2682.

Cogan A.J., Boesch H., Parker R.J., Feng L., Palmer P.I., Blavier J.-F.L., Deutscher N.M., Macatangay R., Notholt J., Roehl C., Warneke T., Wunch D. Atmospheric carbon dioxide retrieved from the Greenhouse Gases Observing SATellite (GOSAT): Comparison with ground-based TCCON observations and GEOS-Chem model calculations // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. № D21301. doi: 10.1029/2012JD018087.

Conway T.J., Andrews A.E., Bruhwiler L., Crotwell A., Dlugokencky E.J., Hahn M. P., Hirsch A.I., Kitzis D.R., Lang P.M., Masarie K.A., Michalak A.M., Miller J.B., Novelli P.C., Peters W., Tans P.P., Thoning K.W., Vaughn I.B.H., Zhao C. Carbon cycle greenhouse gases // CMDL Report. 2003. V. 27. P. 32–57. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/publications/annrpt27>.

Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Holm E.V., Isaksen L., Kallberg P., Kohler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B. M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thepaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2011. V. 137. P. 553–597. doi: 10.1002/qj.828. <http://data-portal.ecmwf.int>.

Deutscher N.M., Griffith D.W.T., Bryant G.W., Wennberg P.O., Toon G.C., Washenfelder R.A., Keppel-Aleks G., Wunch D., Yavin Y., Allen N.T., Blavier J.-F., Jimenez R., Daube B.C., Bright A.V., Matross D.M., Wofsy S.C., Park S. Total column CO₂ measurements at Darwin, Australia – site description and calibration against in situ aircraft profiles // Atmos. Meas. Tech. 2010. V. 3. P. 947–958.

Garcia R.R., Marsh D.R., Kinnison D.E., Boville B.A., Sassi F. Simulation of secular trends in the middle atmosphere, 1950–2003 // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. № D09301. doi: 10.1029/2006JD007485.

Hase F., Hannigan J.W., Coffey M.T., Goldman A., Hopfner M., Jones N.B., Rinsland C.P., Wood S.W. Intercomparison of retrieval codes used for the analysis of high-resolution groundbased FTIR measurements // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2004. V. 87. P. 25–52.

Kobayashi H., Shimota A., Kondo K., Okumura E., Kameda Y., Shimoda H., Ogawa, T. Development and evaluation of the interferometric monitor for greenhouse gases: a high-throughput Fourier-transform infrared radiometer for nadir Earth observation // Appl. Optics. 1999. V. 38. P. 6801–6807.

Kuze A., Suto H., Nakajima M., Hamazaki T. Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring // Appl. Optics. 2009. V. 48. P. 6716–6733.

Meier A. et al. Spectroscopic atlas of atmospheric micro-windows in the middle Infra-Red. (2nd revised edition). IRF Technical Report 048. Kiruna: Sweden IRF Institutet for Rymdfysik (Swedish Institute of Space Physics), 2004.

Morino I., Uchino O., Inoue M., Yoshida Y., Yokota T., Wennberg P.O., Toon G.C., Wunch D., Roehl C.M., Notholt J., Warneke T., Messerschmidt J., Griffith D.W.T., Deutscher N.M., Sherlock V., Connor B., Robinson J., Sussmann R., Rettinger M. Preliminary validation of column-averaged volume mixing ratios of carbon dioxide and methane retrieved from GOSAT short-wavelength infrared spectra // Atmos. Meas. Tech. 2011. V. 4. P. 1061–1076. doi: 10.5194/amt-4-1061-2011.

NIES. Database of the GOSAT project. Courtesy JAXA/NIES/MOE. 2012. <https://data.gosat.nies.go.jp>.

Notholt J., Blumenstock T., Brunner D., Buchmann B., Dils B., De Mazière M., Popp Ch., Sussmann R. Product validation and algorithm selection report (PVASR) // ESA Climate Change Initiative (CCI). Final report. 22 August. 2012. <http://www.esa-ghg-cci.org/?q=node/95>.

Parker P., Boesch H., Cogan A., Fraser F., Feng L., Palmer P.I., Deutscher N., Griffith D.W.T., Notholt J., Wennberg P.O., Wunch D. Methane observations from the Greenhouse Gases Observing SATellite: Comparison to ground-based TCCON data and model calculations // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. № L15807. doi: 10.1029/2011GL047871.

Pougatchev N.S., Connor B.J., Rinsland C.P. Infrared measurements of the ozone vertical distribution above Kitt Peak // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. P. 16689–16697.

Razavi A., Clerbaux C., Wespes C., Clarisse L., Hurtmans D., Payan S., Camy-Peyret C., Coheur P.F. Characterization of methane retrievals from the IASI space-borne sounder // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9. P. 7889–7899.

Rinsland C.P., Jones N.B., Connor B.J., Logan J.A., Pougatchev N.S., Goldman A., Murcray F.J., Stephen T.M., Pine A.S., Zander R., Mahieu E., Demoulin P. Northern and southern hemisphere ground-based infrared spectroscopic measurements of tropospheric carbon monoxide and ethane // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 28197–28217.

Rothman L.S., Jacquemarta D., Barbe A., Chris Benner D., Birk M., Brown L.R., Carleer M.R., Chackerian Jr.C., Chance K., Coudert L.H., Danaï V., Devic V.M., Flaud J.-M., Gamache R.R., Goldman A., Hartmann J.-M., Jucks K.W., Makim A.G., Mandin J.-Y., Massie S.T., Orphal J., Perrin A., Rinsland C.P., Smith M.A.H., Tennyson J., Tolchenov R.N., Toth R.A., Vander Auwera J., Varanas P., Wagner G. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2005. V. 96. P. 139–204. <http://www.cfa.harvard.edu/hitran/>.

Saitoh N., Touno M., Hayashida S., Imasu R., Shiomi K., Yokota T., Yoshida Y., Machida T., Matsueda H., Sawa Y. Comparisons between XCH₄ from GOSAT shortwave and thermal infrared spectra and aircraft CH₄ measurements over Guam // Sci. Online Lett. Atmos. 2012. V. 8. P. 145–149. doi: 10.2151/sola.2012-036.

Schepers D., Guerlet S., Butz A., Landgraf J., Frankenberg C., Hasekamp O., Blavier J.-F., Deutscher N.M.,

- Griffith D.W.T., Hase F., Kyro E., Morino I., Sherlock V., Sussmann R., Abenet I. Methane retrievals from Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT) shortwave infrared measurements: Performance comparison of proxy and physics retrieval algorithms // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. № D10307. doi: 10.1029/2012JD017549.
- Sepulveda E., Schneider M., Hase F., Garcia O.E., Gomez-Pelaez A., Dohe S., Blumenstock T., Guerra J.C. Long-term validation of tropospheric column-averaged CH₄ mole fractions obtained by mid-infrared ground-based FTIR spectrometry // *Atmos. Meas. Tech.* 2012. V. 5. P. 1425–1441.
- Solomon S. et al. The physical science basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // Cambridge: Cambridge Univ. Press., 2007.
- Sussmann R., Stremme W., Buchwitz M., de Beek R. Validation of ENVISAT/SCIAMACHY columnar methane by solar FTIR spectrometry at the Ground-Truthing Station Zugspitze // *Atmos. Chem. Phys.* 2005. V. 5. P. 2419–2429.
- 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. P. 1943–1964.
- Tanaka T., Miyamoto Y., Morino I., Machida T., Nagahama T., Sawa Y., Matsueda H., Wunch D., Kawakami S., Uchino O. Aircraft measurements of carbon dioxide and methane for the calibration of ground-based high-resolution Fourier Transform Spectrometers and a comparison to GOSAT data measured over Tsukuba and Moshiri // *Atmos. Meas. Tech.* 2012. V. 5. P. 2003–2012.
- Weather Web.* University of Wyoming, College of Engineering and Applied Science. 2013. <http://weather.uwyo.edu>.
- Wecht K.J., Jacob D.J., Wofsy S.C., Kort E.A., Worden J.R., Kulawik S.S., Henze D.K., Kopacz M., Payne V.H. Validation of TES methane with HIPPO aircraft observations: implications for inverse modeling of methane sources // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12. P. 1823–1832.
- Wunch D., Toon G., Blavier J.-F.L., Washenfelder R.A., Notholt J., Connor B.J., Griffith D.W.T., Sherlock V., Wennberg P.O. The Total Carbon Column Observing Network (TCCON) // *Philos. Trans. R. Soc.* 2011. V. A369. № 1943. P. 2087–2112.
- Xiong X., Barnett C.D., Zhuang Q., Machida T., Sweeney C., Patra P.K. Mid-upper tropospheric methane in the high Northern Hemisphere: Spaceborne observations by AIRS, aircraft measurements, and model simulations // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. № D19309. doi:10.1029/2009JD013796.
- Yang Z., Toon G.C., Margolis J.S., Wennberg P.O. Atmospheric CO₂ retrieved from ground-based near IR solar spectra // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. № 9. doi: 10.1029/2001GL014537.
- Yoshida Y., Ota Y., Eguchi N., Kikuchi N., Nobuta K., Tran H., Morino I., Yokot T. Retrieval algorithm for CO₂ and CH₄ column abundances from short-wavelength infrared spectra observations by the Greenhouse gases observing satellite // *Atmos. Meas. Tech.* 2011. V. 4. P. 717–734. doi: 10.5194/amt-4-717-2011.

Comparisons of Satellite (GOSAT) and Ground-Based Fourier Spectroscopic Measurements of Methane Content near Saint-Petersburg

M. V. Makarova, N. M. Gavrilov, Yu. M. Timofeev, A. V. Poberovskii

Saint-Petersburg State University

We made comparisons of atmospheric column mean mole fractions of methane measured with hyper-spectral methods of ground-based Fourier-transform spectroscopy at the Physical Department of Saint-Petersburg State University (59.9° N, 29.8° E) in years 2009–2012 with similar data obtained with the Japanese GOSAT satellite. The average methane mole fractions X_{CH_4} from GOSAT data version V01.xx are by 17–21 ppb less than the corresponding values obtained from ground-based measurements and their standard deviation are ~13 ppb. For the GOSAT data version V02.xx these average differences are ~2 ppb and the standard deviations are ~18 ppb. This corresponds to the differences between X_{CH_4} measured with GOSAT satellite and ground based networks of Fourier spectroscopic observations TCCON and NDACC.

Keywords: CH₄, atmospheric methane, total content, ground-based measurements, FTIR spectroscopy, GOSAT satellite, comparison, validation