

Сравнения измерений стратосферного содержания CO₂ наземным и спутниковым методами

А.А. Никитенко, Ю.М. Тимофеев, Я.А. Виролайнен,
Г.М. Неробелов, А.В. Поберовский*

Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

Поступила в редакцию 29.11.2021 г.

Проведено сопоставление измерений содержания CO₂ в нижней стратосфере (слой 12–18 км) по данным наземных измерений ИК Фурье-спектрометром Bruker 125HR и спутниковых измерений прибором ACE в период 2009–2019 гг. Анализ двух типов измерений показал, что между ними наблюдается хорошее согласие. В среднем данные наземных измерений CO₂ превышают спутниковые на 2,8 ppm (менее 1%), стандартные отклонения составляют ~5,0 ppm. Коэффициент корреляции между результатами измерений двумя методами – 0,77. Наземные и спутниковые данные демонстрируют слабые сезонные вариации, которые противоположны сезонным вариациям CO₂ в тропосфере: в нижней стратосфере максимальные значения содержания CO₂ наблюдаются летом, а минимальные – зимой.

Ключевые слова: метод измерения содержания CO₂ в стратосфере, мониторинг углекислого газа, наземные спектроскопические измерения, спутниковые измерения, Bruker 125HR, ACE-FTS; CO₂ measurements in the stratosphere, carbon dioxide monitoring, ground-based spectroscopic measurements, satellite measurements, Bruker 125HR, ACE-FTS.

Введение

В связи с современными изменениями климата Земли, обусловленными ростом содержания парниковых газов, и прежде всего углекислого газа [1], необходим постоянный мониторинг содержания CO₂ в атмосфере различными методами [2]. В настоящее время для мониторинга активно используются наземные локальные измерения приземных концентраций CO₂ и различные дистанционные измерения общего содержания CO₂. Среди дистанционных методов наиболее часто применяют измерения прозрачности атмосферы в разных спектральных областях, а также метод рассеяния. В последние годы все активнее используются различные спутниковые методы, также как методы прозрачности, отражения солнечного излучения в ближней инфракрасной области (БИК) и теплового инфракрасного (ИК) излучения, которые позволяют получать глобальные данные об общем содержании CO₂ и определенную информацию о вертикальном распределении CO₂ [3].

Наземные спектроскопические измерения спектров солнечного ИК-излучения с высоким разрешением позволяют получать определенную информацию о вертикальной структуре содержания CO₂ [4].

Так, в [5–7] анализируются возможности получения данных о содержании CO₂ в тропосфере и стратосфере. Важную роль в изучении вертикальной структуры содержания CO₂ и калибровке наземных спектроскопических измерений играют данные самолетных и аэростатных измерений (см., например, [8, 9]).

Измерения углекислого газа в стратосфере важны для изучения тропосферного и стратосферного обмена, определения времени жизни CO₂ в атмосфере и валидации численных моделей атмосферы. Валидация и взаимная калибровка различных методов и приборов позволяют создавать базы данных высокой точности различного пространственного и временного разрешения, используемых в климатологических исследованиях [10].

В настоящей работе проведено сопоставление содержания CO₂ в нижней стратосфере по данным наземных измерений спектров солнечного ИК-излучения Фурье-спектрометром Bruker 125HR с высоким разрешением и измерений спутниковым прибором ACE-FTS (Atmospheric Chemistry Experiment Fourier transform spectrometer).

Методы измерений содержания CO₂ в стратосфере

Наземные спектроскопические измерения общего содержания (OC) CO₂ используются на станциях международных сетей NDACC (в средней ИК-области спектра) и TCCON (в ближней ИК-области) уже давно.

* Анастасия Андреевна Никитенко (nikki_nic@mail.ru); Юрий Михайлович Тимофеев (y.timofeev@spbu.ru); Яна Акселевна Виролайнен (yana.virolainen@spbu.ru); Георгий Максимович Неробелов (akulishe95@mail.ru); Анатолий Васильевич Поберовский (avpob@troll.phys.spbu.ru).

Измерения содержания CO_2 были начаты в СПбГУ в 2009 г., а с 2016 г. измерительная станция в СПбГУ официально вошла в международную сеть NDACC [11].

В [7] предложена методика интерпретации измерений, позволяющая определять не только ОС CO_2 , но и его содержание в тропосфере и стратосфере. Задача по оптимизации определения среднего для сухой атмосферы отношения смеси углекислого газа (XCO_2) из спектральных измерений Фурье-спектрометра Bruker 125HR решалась с помощью программного обеспечения PROFFIT [12], используемого на ряде станций международной наблюдательной сети NDACC. За основу методики решения обратной задачи была взята спектральная схема определения CO_2 , предложенная в [13] для отбора качественных спектральных измерений на станциях сети NDACC. Методика решения обратной задачи была оптимизирована для определения ОС CO_2 на ст. St. Petersburg в [14, 15]. В настоящей работе эта методика была модифицирована для определения XCO_2 в двух слоях атмосферы: «условной тропосфере» (0–12 км) и «условной стратосфере» (12–55 км). В отличие от упомянутых выше работ по определению общего содержания углекислого газа, где обратная задача решалась с помощью масштабирования профиля, для получения XCO_2 в двух слоях мы использовали регуляризацию Тихонова–Филлипса.

Все измеренные Фурье-спектрометром Bruker 125HR спектры с 2009 по 2019 г. были проанализированы с помощью PROFFIT. Полученные результаты были отфильтрованы в соответствии со следующими критериями:

– остаточная невязка в спектральных каналах меньше 0,15, что примерно соответствует отношению сигнал/шум ~ 700 ;

– число степеней свободы для CO_2 в спектральных каналах измерений больше 2;

– различие отдельных измерений XCO_2 во всей толще атмосферы в течение одного дня не превышает 2% от усредненных за день измерений, что позволяет отфильтровать выбросы в результатах, обусловленные ростом погрешностей измерений.

Отметим, что средняя случайная погрешность измерений XCO_2 в стратосфере для всего ансамбля измерений составляет ~ 2 ppm ($0,41 \pm 0,06\%$), что заметно меньше естественных вариаций CO_2 . В [15] подробно рассмотрены учитываемые источники погрешности определения XCO_2 .

Первые спутниковые измерения газового состава атмосферы методом прозрачности были осуществлены еще в 1983 г. с помощью аппаратуры GRILLE-1. Этот метод неоднократно применялся в дальнейшем [4]. Такие измерения осуществляются на борту спутника ACE с помощью спектрометра ACE-FTS уже более 15 лет [16]. ACE-FTS измеряет спектры солнечного излучения в области 2,2–13,3 мкм ($750\text{--}4400\text{ см}^{-1}$) с разрешением $0,02\text{ см}^{-1}$. Специальные методики и алгоритмы обработки результатов измерений были разработаны для опре-

деления вертикальных профилей содержания CO_2 , в том числе в стратосфере и тропосфере [17]. Для настоящей работы мы взяли спутниковые данные ACE-FTS с сайта [18]; использовались данные версии 4.1/4.2 [19].

Для сравнения двух методов измерений были подобраны спутниковые (для слоя 12–18 км) и наземные данные, измеренные в один и тот же день в точках, пространственно-разнесенных не более чем на 500 км. Таких измерений за 2009–2019 гг. было всего 46. Это объясняется, прежде всего, относительно малым числом измерений ACE-FTS (~ 28 измерений в сутки) и отсутствием у прибора пространственного (горизонтального) сканирования, а также тем, что наземные измерения проходили только в безоблачных условиях. Погрешности измерений ACE-FTS в нижней стратосфере (слое 12–18 км) составляют ~ 4 ppm ($\sim 1,0\%$).

Результаты сопоставлений методов

Ниже представлены статистические характеристики сопоставления спутниковых измерений ACE-FTS (500 км) и наземных измерений Фурье-спектрометра Bruker 125HR содержанию CO_2 в слое атмосферы 12–18 км для 46 совпадающих дней: стандартное отклонение σ достигает 5,06 ppm, среднеквадратическое рассогласование $S - 5,72$ ppm, среднее рассогласование $M - 2,78$ ppm, причем данные наземных измерений превышают данные спутниковых. Коэффициент корреляции $R = 0,77 \pm \pm 0,10$, что говорит о хорошей взаимосвязи между сопоставляемыми величинами.

На рис. 1 приведено содержание стратосферного CO_2 по данным наземных и спутниковых измерений в течение рассматриваемого периода для 46 выбранных дней. Коэффициент детерминации R^2 по данным наземных измерений Bruker 125HR

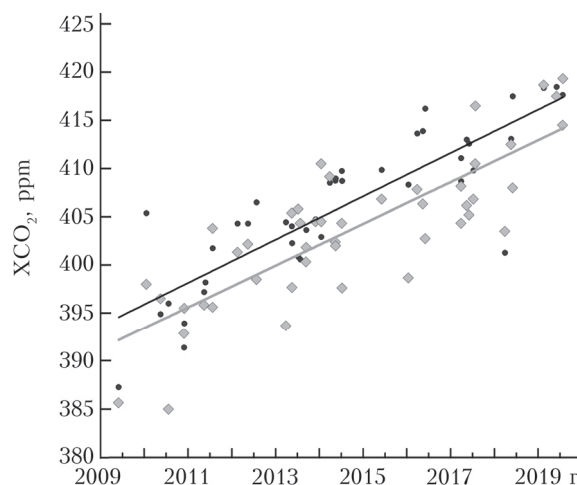


Рис. 1. Вариации XCO_2 в стратосфере (> 12 км), полученные по данным наземных измерений Фурье-спектрометра Bruker 125HR (точки) и спутниковых измерений ACE-FTS (ромбы) за 2009–2019 гг. в радиусе 500 км от ст. St.Petersburg; прямые – линейное приближение для каждого набора данных

принимает значение 0,74, а по измерениям ACE-FTS – 0,67. Видно, что линия тренда для наземных данных выше, чем для спутниковых, следовательно, наземные данные показывают более сильный устойчивый рост CO₂.

Отметим, что спутниковые и наземные измерения демонстрируют слабые сезонные вариации содержания CO₂ в стратосфере, отличающиеся от сезонных вариаций общего и тропосферного содержания CO₂. В нижней стратосфере максимальные значения наблюдаются летом, а минимальные – зимой. Подобные, противоположные тропосферным, сезонные вариации в нижней стратосфере были зафиксированы в [7, 20].

На рис. 2 показаны гистограммы распределения измеренных величин CO₂ в нижней стратосфере наземным спектрометром Bruker 125HR и спутниковым прибором ACE-FTS. Видно, что максимальное число спутниковых измерений CO₂ приходится на диапазон величин от 395 до 405 ppm, а наземных измерений – на 405–415 ppm.

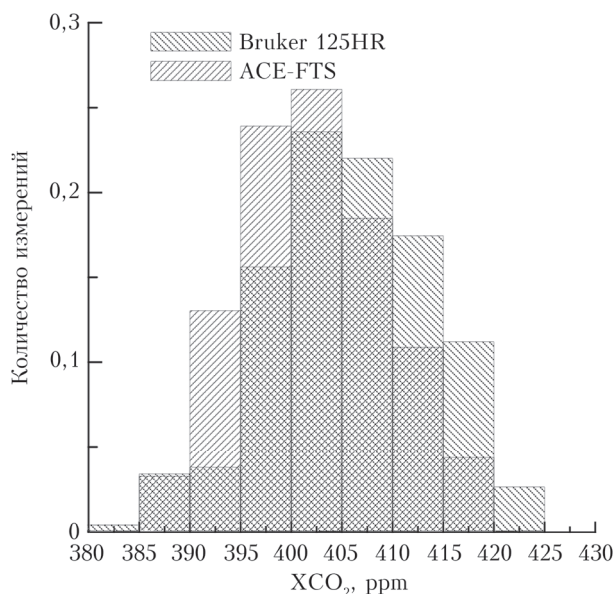


Рис. 2. Сравнение распределения стратосферного содержания CO₂ по данным наземных (Bruker 125HR) и спутниковых (ACE-FTS) измерений

Таким образом, значения содержания CO₂ по наземным измерениям Bruker 125HR превышают данные измерений ACE-FTS. Однако, несмотря на указанные отличия, форма распределения числа измерений в зависимости от диапазона величин CO₂ у обоих методов схожа, т.е. можно сделать вывод, что результаты измерений содержания CO₂ в нижней атмосфере двумя методами близки между собой.

Заключение

Сопоставлены данные спутниковых (Фурье-спектрометр ACE-FTS) и наземных (Фурье-спектрометр Bruker 125HR) измерений содержания CO₂ в нижней стратосфере (слой 12–18 км), проведенных в один и тот же день и пространственно-разде-

ленных не более чем на 500 км (46 измерений за 2009–2019 гг.). Наблюдается хорошее согласие между двумя типами измерений. В среднем наземные измерения превышают спутниковые на 2,8 ppm (менее 1%), стандартные отклонения составляют ~ 5,0 ppm. Коэффициент корреляции между двумя измерениями – 0,77. Данные двух типов измерений показали слабые сезонные вариации содержания CO₂ в стратосфере.

В исследованиях пространственно-временной изменчивости содержания CO₂ в атмосфере важную роль играет валидация и взаимная калибровка различных методов и приборов, используемых для измерений. Полученная в ходе сопоставления информация, в том числе по погрешностям измерений различными приборами, позволяет анализировать вариации содержания CO₂, изучать интенсивность антропогенных выбросов CO₂, а также создавать базы данных высокой точности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 20-05-00627). Экспериментальные данные получены на оборудовании ресурсного центра СПбГУ «Геомодель». Спутниковые измерения прибора ACE финансируются Космическим агентством Канады.

1. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
2. Ciais P., Dolman A.J., Bombelli A., Duren R., Peregon A., Rayner P.J., Miller C., Gobron N., Kinderman G., Marland G., Gruber N., Chevallier F., Andres R.J., Balsamo G., Bopp L., Bréon F.-M., Broquet G., Dargaville R., Battin T.J., Borges A., Bovenmann H., Buchwitz M., Butler J., Canadell J.G., Cook R.B., DeFries R., Engelen R., Gurney K.R., Heinze C., Heimann M., Held A., Henry M., Law B., Luysaert S., Miller J., Moriyama T., Moulin C., Myeni R.B., Nussli C., Obersteiner M., Ojima D., Pan Y., Paris J.-D., Piao S.L., Poulter B., Plummer S., Quegan S., Raymond P., Reichstein M., Rivier L., Sabine C., Schimel D., Tarasova O., Valentini R., Wang R., van der Werf G., Wickland D., Williams M., Zehner C. Current systematic carbon-cycle observations and the need for implementing a policy-relevant carbon observing system // Biogeosci. 2014. V. 11. P. 3547–3602. DOI: 10.5194/bg-11-3547-2014.
3. A Guidebook on the Use of Satellite Greenhouse Gases Observation Data to Evaluate and Improve Greenhouse Gas Emission Inventories, 1-st / Matsunaga T., Maksyutov S. (eds.). Japan: Satellite Observation Center, National Institute for Environmental Studies, 2018. 129 p.
4. Тимофеев Ю.М. Исследования атмосферы Земли методом прозрачности. СПб.: Наука, 2016. 367 с.
5. Kuai L., Wunch D., Shia R.-L., Connor B., Miller C., Yung Y. Vertically constrained CO₂ retrievals from TCCON measurements // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2012. V. 113, iss. 14. P. 1753–1761.
6. Connor B.J., Sherlock V., Toon G., Wunch D., Wenzel P.O. GFIT2: An experimental algorithm for vertical profile retrieval from near-IR spectra // Atmos. Meas. Tech. 2016. V. 9. P. 3513–3525. DOI: 10.5194/amt-9-3513-2016.
7. Тимофеев Ю.М., Неробелов Г.М., Поберовский А.В., Филиппов Н.Н. Определение содержания CO₂

- в тропосфере и стратосфере наземным ИК методом // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2021. Т. 57, № 3. С. 322–333. DOI: 10.31857/S0002351521020115.
8. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Креков Г.М., Фофанов А.В., Бабченко С.В., Иноуе Г., Machida T., Maksutov Sh., Sasakawa M., Shimoyama K. Динамика вертикального распределения парниковых газов в атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1051–1061.
 9. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Nédélec P., Paris J.-D., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Вертикальное распределение газовых и аэрозольных примесей воздуха над Российским сектором Арктики // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 12. С. 1043–1052; Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Nédélec P., Paris J.-D., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadnaya T.K., Tolmachev G.N., Fofonov A.V. Vertical distributions of gaseous and aerosol admixtures in air over the Russian Arctic // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 3. P. 300–310.
 10. Reuter M., Buchwitz M., Schneising O., Noël S., Bovensmann H., Burrows J.P., Boesch H., Di Noia A., Anand J., Parker R.J., Somkuti P., Wu L., Hasekamp O.P., Aben I., Kuze A., Suto H., Shiomi K., Yoshida Yu., Morino I., Crisp D., O'Dell C.W., Notholt J., Petri C., Warneke T., Velasco V.A., Deutscher N.M., Griffith D.W.T., Kivi R., Pollard D.F., Hase F., Sussmann R., Té Y.V., Strong K., Roche S., Sha M.K., De Maziure M., Feist D.G., Iraci L.T., Roehl C.M., Retscher C., Schepers D. Ensemble-based satellite-derived carbon dioxide and methane column-averaged dry-air mole fraction data sets (2003–2018) for carbon and climate applications // Atmos. Meas. Tech. 2020. V. 13. P. 789–819. DOI: 10.5194/amt-13-789-2020.
 11. Timofeyev Yu., Virolainen Y., Makarova M., Poberovskiy A., Polyakov A., Ionov D., Osipov S., Imhassin H. Ground-based spectroscopic measurements of atmospheric gas composition near Saint Petersburg (Russia) // J. Mol. Spectrosc. 2016. V. 323. P. 2–14. DOI: 10.1016/j.jms.2015.12.007.
 12. Hase F., Hannigan J.W., Coffey M.T., Goldman A., Höpfner M., Jones N.B., Rinsland C.P., Wood S.W. Intercomparison of retrieval codes used for the analysis of high-resolution, ground-based FTIR measurements // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2004. V. 87. P. 25–52.
 13. Barthlott S., Schneider M., Hase F., Wiegeler A., Christner E., González Y., Blumenstock T., Dohe S., Garcia O.E., Sepúlveda E., Strong K., Mendonca J., Weaver D., Palm M., Deutscher N.M., Warneke T., Notholt J., Lejeune B., Mahieu E., Jones N., Griffith D.W.T., Velasco V.A., Smale D., Robinson J., Kivi R., Heikkinen P., Raffalski U. Using XCO₂ retrievals for assessing the long-term consistency of NDACC/FTIR data sets // Atmos. Meas. Tech. 2015. V. 8. P. 1555–1573. DOI:10.5194/amt-8-1555-2015.
 14. Virolainen Y.A., Nikitenko A.A., Timofeyev Y.M. Intercalibration of satellite and ground-based measurements of CO₂ content at the NDACC St. Petersburg station // J. Appl. Spectrosc. 2020. V. 87, iss. 5. P. 888–892. DOI: 10.1007/s10812-020-01085-0.
 15. Virolainen Ya.A. Methodical aspects of the determination of carbon dioxide in atmosphere using FTIR spectroscopy // J. Appl. Spectrosc. 2018. V. 85, iss. 3. P. 462–469. DOI: 10.1007/s10812-018-0673-x.
 16. Bernath P.F. The Atmospheric Chemistry Experiment (ACE) // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2016. V. 186. P. 3–16. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2016.04.006.
 17. Bernath P., Boone C., Fernando A., Jones S. Low altitude CO₂ from the Atmospheric Chemistry Experiment (ACE) satellite // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2019. V. 238. P. 106528.
 18. URL: <https://database.scisat.ca/level2>. (last access: 9.10.2021).
 19. Boone C.D., Bernath P.F., Cok D., Jones S.C., Steffen J. Version 4 retrievals for the Atmospheric Chemistry Experiment Fourier Transform Spectrometer (ACE-FTS) and Imagers // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2020. V. 247. P. 106939. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2020.106939.
 20. Diallo M., Legras B., Ray E., Engel A., Acel J.A. Global distribution of CO₂ in the upper troposphere and stratosphere // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17. P. 3861–3878. DOI:10.5194/acp-17-3861-2017.

A.A. Nikitenko, Yu.M. Timofeev, Ya.A. Virolainen, G.M. Nerobelov, A.V. Poberovskii. Comparison of CO₂ measurements in stratosphere by ground-based and satellite methods.

Modern changes in the Earth's climate due to increase in greenhouse gas concentrations, primarily carbon dioxide, stimulate the monitoring of its content by various methods. In the study, we compared CO₂ content in the lower stratosphere (12–18 km altitude layer) from ground-based Bruker 125HR spectrometer and satellite ACE instrument measurements in 2009–2019. The analysis of two measurement types shows a good agreement between them. Ground-based CO₂ measurements, on average, exceed satellite data by 2.8 ppm (less than 1%), standard deviations of the differences are ~5.0 ppm. The correlation coefficient between two datasets is 0.77. Ground-based (Bruker 125HR) and satellite (ACE) CO₂ measurements show weak seasonal variations, opposite to the variations in tropospheric CO₂. The CO₂ content in the lower stratosphere is maximal in summer and minimal in winter.