

Сравнения наземных и спутниковых измерений общего содержания CO₂ в Петергофе

А. А. Никитенко¹, Ю. М. Тимофеев¹, Я. А. Виролайнен¹, А. Н. Рублев²,
В. В. Голомолзин³, Ю. В. Киселева², А. Б. Успенский², Д. А. Козлов⁴

¹ Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург, 199034, Россия
E-mail: nikki_nic@mail.ru

² Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»
Москва, 123242, Россия
E-mail: alex.rublev@mail.ru

³ Сибирский центр НИЦ «Планета», Новосибирск, 630099, Россия
E-mail: vvg@rcpod.ru

⁴ Государственный научный центр Российской Федерации
«Исследовательский центр имени М. В. Келдыша», Москва, 125438, Россия
E-mail: dima_kozlov@mail.ru

Важной задачей в исследованиях современных изменений климата Земли и факторов, их определяющих, является регулярный мониторинг общего содержания углекислого газа. В настоящее время широко используются различные методы определения антропогенных эмиссий CO₂, которые основаны на спутниковых и наземных измерениях пространственно-временных вариаций общего содержания CO₂. При этом требования к погрешностям измерений общего содержания CO₂ (XCO₂) очень высокие (~0,5–1,0 млн⁻¹ или менее 0,25 %). В настоящей работе сопоставляются данные спутниковых измерений XCO₂ с помощью инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2, установленного на российском метеорологическом спутнике «Метеор-М» № 2 и измеряющего уходящее тепловое инфракрасное излучение, и данные наземных измерений XCO₂, полученные из спектров солнечного излучения в ближнем инфракрасном диапазоне в ходе измерений фурье-спектрометром Bruker IFS 125HR высокого спектрального разрешения, проведённых в Петергофе в Санкт-Петербургском государственном университете в период 2019–2022 гг. Перед сопоставлением со спутниковыми данными наземные измерения Bruker IFS 125HR ранее были откалиброваны с помощью вторичного международного эталона — мобильного фурье-спектрометра Bruker/SUN. Различия между величинами XCO₂, полученными по спутниковым данным ИКФС-2 и наземным данным Bruker IFS 125HR, находятся в пределах ~1 %.

Ключевые слова: содержание CO₂, мониторинг, вариации XCO₂, наземные спектроскопические измерения, спутниковые измерения, ИКФС-2, Bruker IFS 125HR, метод теплового излучения

Одобрена к печати: 22.07.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-275-283

Введение

Одна из причин современных изменений климата Земли — усиление парникового эффекта, вызванное ростом антропогенного содержания парниковых газов, в частности CO₂. Регулярный мониторинг общего содержания углекислого газа в атмосфере в наши дни становится актуальной задачей (Pachauri et al., 2014). В последние десятилетия всё более широко используются методы оценки антропогенных эмиссий CO₂, основанные на спутниковых и/или наземных измерениях пространственно-временных вариаций общего содержания CO₂, а также на численных моделях атмосферного переноса (A Guidebook..., 2018). При этом требования к погрешности измерений общего содержания CO₂ (XCO₂) очень высокие (~0,5–1,0 млн⁻¹ или менее 0,25 %), что обусловлено относительно малым вкладом антропогенного CO₂, например, мегаполисов, составляющим 1–5 млн⁻¹.

Современные спутниковые методы измерений пространственного распределения XCO₂ основаны на регистрации отражённого и рассеянного солнечного излучения (метод ОРСИ) в полосах поглощения CO₂ в ближней инфракрасной области спектра и спектров теплового излучения (метод ТИ) в средней инфракрасной (ИК) области (A guidebook..., 2018). Первые регулярные спутниковые измерения XCO₂ с помощью метода ОРСИ были начаты с использованием спектрометра Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography (SCIAMACHY), позднее приборами Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT), Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) и Orbiting Carbon Observatory-3 (OCO-3) (Noel et al., 2002; Peiro et al., 2022; Suto et al., 2021). Совершенствование аппаратуры, методик интерпретации, используемой априорной информации и многочисленных критериев качества позволило постепенно снизить погрешность определения XCO₂ с 2–3 до 1,0–0,5 млн⁻¹ (O'Dell et al., 2021), что соответствует современным требованиям к точности измерений содержания CO₂ (Zhou et al., 2016).

В последние годы метод ТИ был реализован на основе измерений спутниковых приборов Atmospheric Infrared Sounder (AIRS), Technology Experiment Satellite (TES), Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) и Cross-Track Infrared Sounder (CrIS), но его погрешность была заметно выше, чем у метода ОРСИ (Cortesi et al., 2010; Garcia et al., 2016). Преимущество этого метода заключается в возможности использовать его во время полных суток и в период полярных ночей.

Спутниковые измерения содержания CO₂ тщательно калибруются и валидируются с помощью наземных и самолётных измерений, например, в сравнениях с данными измерений международной системы наземных наблюдений Total Carbon Column Observing Network (TCCON) (Wunch et al., 2011), для последующего определения антропогенных эмиссий CO₂ с помощью решения обратной задачи атмосферного переноса.

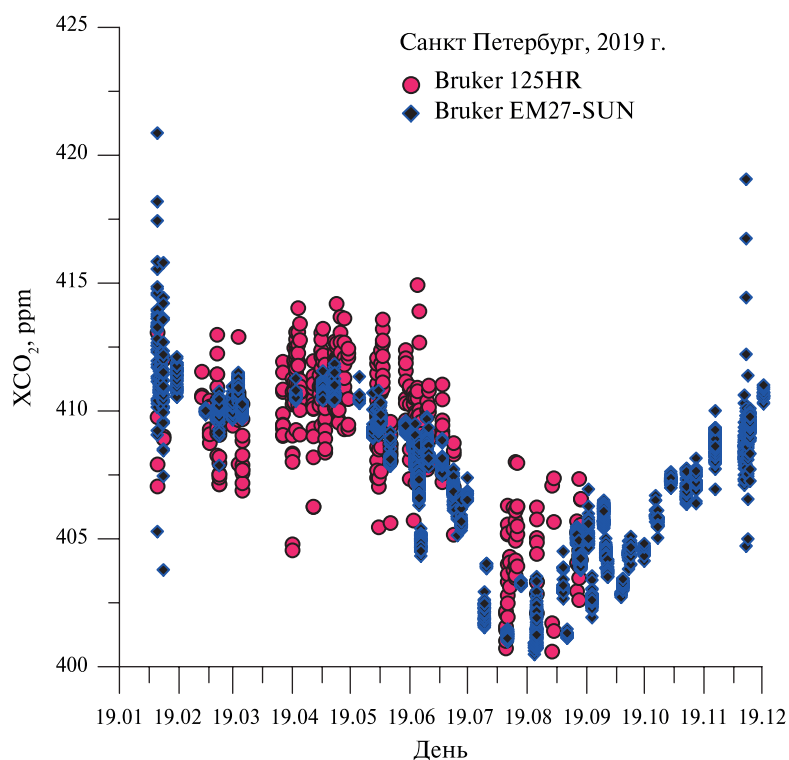


Рис. 1. Сравнение единичных измерений XCO₂ приборами Bruker/SUN и Bruker IFS 125 HR после коррекции стационарных измерений

В работах (Голомолзин и др., 2022; Uspensky et al., 2022) описан новый метод определения XCO₂ с помощью измерений уходящего теплового излучения российским прибором

ИКФС-2 (инфракрасный фурье-спектрометр) на спутнике «Метеор-М» № 2. Для независимой проверки в настоящей работе анализируются данные сравнения спутниковых измерений XCO₂ с помощью прибора ИКФС-2 и наземных измерений, осуществлённых в Петергофе в Санкт-Петербургском государственном университете в период 2019–2022 гг. с помощью измерений ИК-солнечного излучения с высоким спектральным разрешением (Timofeyev et al., 2016). Наземные измерения ранее были откалиброваны с помощью вторичного международного эталона (мобильный фурье-спектрометр Bruker/SUN) и использовались для исследований пространственных вариаций XCO₂ (Тимофеев и др., 2019) вблизи Санкт-Петербурга. На *рис. 1* (см. с. 276) приведён пример сравнения эталонных измерений XCO₂ прибором Bruker/SUN с данными измерений фурье-спектрометра Bruker IFS 125HR после калибровки. Отметим хорошее согласие между измерениями двух приборов за 2019 г.

В *табл. 1* указаны результаты сравнения усреднённых за день наземных измерений стационарного фурье-спектрометра Bruker IFS 125HR и мобильного фурье-спектрометра Bruker/SUN. Сопоставление данных двух наборов проводилось на основе расчётов следующих статистических характеристик: Δ — стандартное отклонение от среднего; σ — среднеквадратическое отклонение; M — среднее значение рассогласования; R — коэффициент корреляции; N — количество сопоставляемых пар усреднённых измерений.

Таблица 1. Статистические характеристики сопоставления усреднённых за день наземных измерений CO₂ стационарного фурье-спектрометра Bruker IFS 125HR и мобильного фурье-спектрометра Bruker/SUN

Сопоставляемые приборы	N	Δ	σ	M	R
Bruker IFS 125HR – Bruker EM27-SUN	29	1,64	1,73	0,62	0,8±0,2

Ниже приведены формулы, по которым были получены статистические характеристики рассогласования.

Стандартное отклонение от среднего:

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i - M)^2}.$$

Среднеквадратическое отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}.$$

Среднее рассогласование:

$$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i).$$

Согласно *табл. 1*, рассчитанные характеристики сравнений принимают значения: стандартное отклонение — 1,64 млн⁻¹, среднеквадратическое отклонение — 1,73 млн⁻¹, среднее рассогласование — 0,62 млн⁻¹, коэффициент корреляции — 0,8 млн⁻¹, что указывает на сильную взаимосвязь между двумя ансамблями измерений (Bruker IFS 125HR и Bruker/SUN).

Результаты сравнения

При сравнении спутниковых измерений XCO₂ прибором ИКФС-2 и наземных измерений фурье-спектрометром Bruker IFS 125HR за временной период 2019–2022 гг. было получено 67 совпадающих дней (отобранные дни измерений, совпадающие для двух приборов). Для анализа использовались усреднённые за день значения XCO₂ как по наземным, так и по

спутниковым измерениям. Спутниковые данные ИКФС-2 для сравнения с наземными данными Bruker IFS 125HR были подобраны в диапазоне координат 58–62° с.ш., 28–32° в.д. Пространственное (горизонтальное) разрешение спутниковых измерений составляет около 35 км. Горизонтальное разрешение наземных измерений зависит от солнечного зенитного угла и для дневных значений составляет около 10–30 км. Вертикальные усредняющие ядра двух методов измерений содержания углекислого газа заметно отличаются, и этот эффект может быть значителен при существенной вертикальной зависимости отношения смеси углекислого газа. Однако корректно его учесть не представляется возможным из-за отсутствия соответствующей информации.

На рис. 2 приведён временной ход значений XCO₂, полученный по данным наземных измерений фурье-спектрометра Bruker IFS 125HR и спутниковых измерений ИКФС-2 вблизи Санкт-Петербурга за 2019–2022 гг. Дополнительно на рис. 2 представлены межгодовой ход и аппроксимация измерений фурье-спектрометра TANSO-FTS (англ. Thermal and Near-Infrared Sensor for Carbon Observation Fourier transform Spectrometer) японского спутника GOSAT в районе финской геофизической обсерватории Соданкюля (фин. Sodankylä Geophysical Observatory), где расположен один из пунктов измерительной сети TCCON (англ. Total Carbon Column Observing Network). Зависимости получены по опубликованным данным работы (Taylor et al., 2022), подводящей итоги 11-летних измерений GOSAT.

Из рис. 2 видно, что спутниковые данные (при использовании первоначальной версии программы интерпретации измерений ИКФС-2) демонстрируют наличие традиционного сезонного хода XCO₂: максимальные значения наблюдаются зимой, а минимальные — летом. Но они показывают более сильные временные вариации и, в частности, более сильные сезонные вариации XCO₂, чем наземные данные.

В табл. 2 представлены рассчитанные статистические характеристики спутниковых и наземных измерений содержания CO₂ для 67 совпадающих дней. Сопоставления двух ансамблей проводились на основе расчётов статистических характеристик рассогласований.

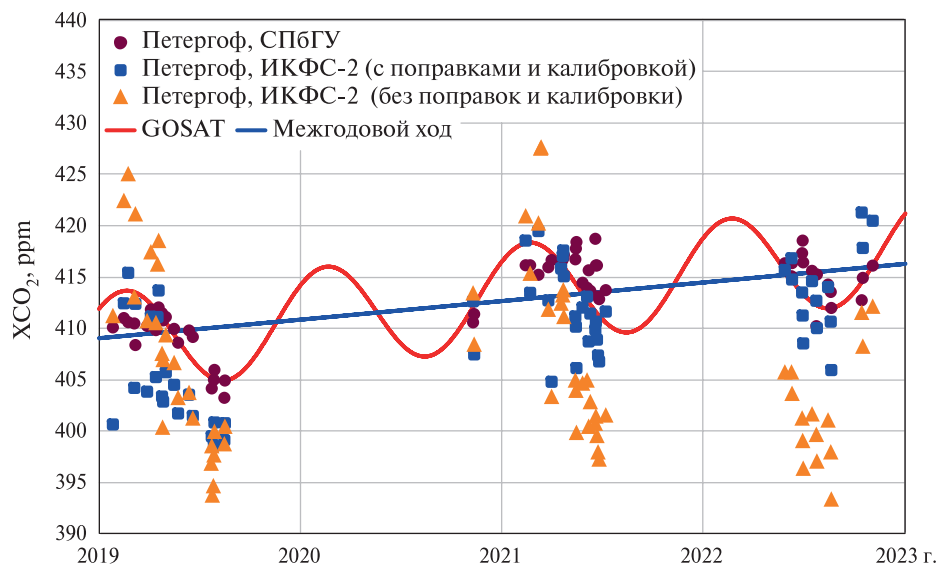


Рис. 2. Временной ход значений XCO₂, полученный по данным наземных и спутниковых измерений вблизи Санкт-Петербурга за 2019–2022 гг.

Таблица 2. Сравнение статистических характеристик рассогласования наземных и спутниковых измерений XCO₂

Версия алгоритма	M , млн ⁻¹	σ , млн ⁻¹	Δ , млн ⁻¹	R
Первая	-6,3	8,5	5,8	0,21
Вторая	-0,6	4,5	4,5	0,69

Из *табл. 2* следует, что стандартное отклонение для первой версии программы интерпретации — 5,8 млн⁻¹, среднеквадратическое рассогласование — 8,5 млн⁻¹, среднее рассогласования равно 6,3 млн⁻¹, а коэффициент корреляции между двумя сопоставляемыми типами измерений составил 0,21, что говорит о слабой взаимосвязи между наземными и спутниковыми измерениями.

Для повышения точности спутникового мониторинга содержания XCO₂ в методиках (Голомолзин и др., 2022; Uspensky et al., 2022) были уточнены особенности высотного хода концентрации CO₂ по данным самолётных измерений (Аршинов и др., 2012). Кроме того, была выполнена калибровка получаемых значений XCO₂ по результатам наземных измерений концентраций CO₂, выполненных в 2019–2022 гг. на Мауна-Лоа (погодная обсерватория National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA), о-в Гавайи). Это позволило существенно снизить систематическое рассогласование двух типов измерений (вторая версия алгоритма — *табл. 2*). Практически исчезло среднее значение отклонения (–0,6 млн⁻¹), значительно уменьшилось стандартное отклонение (4,5 млн⁻¹), а также среднеквадратическое отклонение (4,5 млн⁻¹). Существенно повысился коэффициент корреляции между двумя типами измерений (0,69).

Анализ результатов

Приведённое выше стандартное отклонение описывает случайную компоненту рассогласования двух сравниваемых типов измерений и обусловлено погрешностью обоих измерений. Если предположить случайную погрешность наземных измерений в 2 и 3 млн⁻¹ (Тимофеев и др., 2019; Timofeyev et al., 2016) или одинаковые значения в обоих методах измерений, то случайная погрешность спутниковых измерений для ансамбля сопоставлений в Петергофе будет находиться в диапазоне 3,2–4,0 млн⁻¹.

Анализ погрешностей измерений XCO₂ с помощью метода ТИ, а также сопоставление с различными независимыми измерениями (наземными локальными и дистанционными, самолётными и т.д.) были осуществлены для современных спутниковых приборов высокого спектрального разрешения, а именно: AIRS, TES, IASI, CrIS (Cortesi et al., 2009, 2014; Diao et al., 2017; Frankenberg et al., 2016; Kulawik et al., 2010; Maddy et al., 2008; Nalli et al., 2020; Yang et al., 2020). Так, сравнение измерений прибора AIRS с наблюдениями на сети Global Atmosphere Watch (GAW), а также с измерениями программы HIAPER Pole-to-Pole Observation (HIPPOs) (Frankenberg et al., 2016) дали отличия в XCO₂ в ~3 млн⁻¹. Сравнение с самолётными измерениями программы Earth System Research Laboratory/Global Monitoring Division (ESRL/GMD) — 496 сравнений — показали стандартное отклонение в 1,77 млн⁻¹ и систематическое отличие в 1,03 млн⁻¹ (Maddy et al., 2008).

Анализ измерений спутникового прибора TES (Kulawik et al., 2010) показал рассогласование отдельных измерений до 10 млн⁻¹ и 1,3–2,3 млн⁻¹ для среднемесячного значения при горизонтальном разрешении 20×30 км. Сравнение со среднемесячными значениями в период 2005–2008 гг. данных самолётных и наземных измерений на станции Мауна Лоа продемонстрировало стандартное отклонение в 1,3 млн⁻¹, систематическое отклонение в 2 % и показало коэффициент корреляции R равным 0,92 над океаном. Над сушей значение стандартного отклонения составило 2,3 млн⁻¹ и $R = 0,67$.

Сравнение измерений XCO₂ при помощи прибора IASI с независимыми измерениями (локальными и дистанционными на сети TCCON) показали, что для единичных измерений значения рассогласования меняются в широком диапазоне от 2 до 20 млн⁻¹. Анализ программы интерпретации Kyoto protocol Informed Management of the Adaptation (KLIMA) показал возможности определения XCO₂ для единичного измерения в 1 % (4 млн⁻¹). Погрешности в 0,3 % (~1 млн⁻¹) можно достичь при использовании усреднения 25 измерений IASI (Cortesi et al., 2009, 2014; Diao et al., 2017).

Обширная валидация данных измерений XCO₂ прибором CrIS, функционировавшим на спутниках Suomi National Polar-Orbiting Partnership (SNPP) и NOAA-20, на основе сопо-

ставления с независимыми измерениями (локальными, сети TCCON и самолётными), показала наличие систематического отклонения в пределах 0,1–0,7 % (0,4–2,8 млн⁻¹), стандартного отклонения в 0,3–0,4 % (1,2–1,6 млн⁻¹), среднеквадратического — в 0,3–0,8 % (1,2–3,2 млн⁻¹). Коэффициент корреляции спутниковых измерений с независимыми измерениями различных типов принимал значения в диапазоне 0,78–0,84 (Nalli et al., 2020). Относительно малые отличия спутниковых измерений прибора CrIS от независимых измерений объясняются высокой точностью измерений спектров уходящего теплового излучения прибором, в частности за счёт более низкого спектрального разрешения.

Приведённые примеры демонстрируют широкий диапазон рассогласования спутниковых оценок общего содержания XCO₂ с помощью метода ТИ от различных независимых измерений, достигающего 1 % (и выше) и зависящего от многих факторов, в частности от состояния облачности, температурной неоднородности атмосферы, содержания водяного пара и т. д.

Заключение

В настоящей работе для независимой проверки определения XCO₂ с помощью метода теплового излучения (ТИ) был проведён сравнительный анализ спутниковых измерений XCO₂ прибором ИКФС-2, установленным на борту метеорологического спутника «Метеор-М» № 2, и наземных измерений, осуществлённых в Петергофе в Санкт-Петербургском государственном университете фурье-спектрометром Bruker IFS 125HR высокого спектрального разрешения в течение 2019–2022 гг. На основе проведённого анализа можно сделать вывод, что соответствующая калибровка и введение разнообразных критериев качества при использовании метода теплового излучения позволяют существенно повысить точность определения содержания CO₂. Сравнение спутниковых измерений XCO₂ с наземными измерениями показали, что после дополнительной калибровки метода практически исчезло среднее отклонение (–0,6 млн⁻¹), значительно уменьшились стандартное и среднеквадратическое отклонение (4,5 млн⁻¹), а также существенно повысился коэффициент корреляции между двумя типами измерений — до 0,69.

Важное преимущество метода ТИ — возможность измерения в условиях полярной ночи — делает актуальным дальнейшее развитие метода на основе использования наземных эталонов.

Работа по сравнению наземных и спутниковых измерений общего содержания CO₂ в Петергофе выполнена в лаборатории «Исследование озонового слоя и верхней атмосферы» СПбГУ при финансовой поддержке СПбГУ (проект № 116234986).

Литература

1. 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 атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 12. С. 1051–1061.
2. Голомолзин В. В., Рублев А. Н., Киселева Ю. В., Козлов Д. А., Прокушкин А. С., Панов А. В. Определение общего содержания диоксида углерода над территорией России по данным отечественного космического аппарата «Метеор-М» № 2 // Метеорология и гидрология. 2022. № 4. С. 79–95.
3. Тимофеев Ю. М., Березин И. А., Виротайнен Я. А. и др. Пространственно-временные вариации содержания CO₂ по данным спутниковых и наземных измерений вблизи Санкт-Петербурга // Изв. РАН: Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 65–72. DOI: 10.31857/S0002-351555165-72.
4. A guidebook on the use of satellite greenhouse gases observation data to evaluate and improve greenhouse gas emission inventories. 1st ed. / eds. Matsunaga T., Maksyutov S.; Satellite Observation Center. National Inst. for Environmental Studies. Japan, 2018. 129 p.
5. Cortesi U. et al. KLIMA-IASI sensitivity assessment report, final report for phase 1 of the project sensitivity analysis and application of KLIMA algorithms to GOSAT and OCO validation. 2009. ESA-ESRIN contract N. 21612/08/I-OL.

6. Cortesi U., Del Bianco S., Gai M., Carli B. Carbon dioxide retrieval from IASI measurements using the KLIMA inversion algorithm // Proc. ESA Living Planet Symp. 2010. V. ESA SP-686. Article 468. <https://www.researchgate.net/publication/229012858>.
7. Cortesi U., Bianco S. D., Gai M., Laurenza L. M., Ceccherini S., Carli B., Barbara F., Buchwitz M. KLIMA-IASI final report of project: Sensitivity analysis and application of KLIMA algorithms to GOSAT and OCO validation // Technical, Scientific and Research Reports. 2014. V. 6. ESA-ESRIN/Contract n. 21612/08/I-OL. 154 p.
8. Diao A., Shu J., Song C., Gao W. Global consistency check of AIRS and IASI total CO₂ column concentrations using WDCGG ground-based measurements // Frontiers in Earth Science. 2017. V. 11. P. 1–10. <https://doi.org/10.1007/s11707-016-0573-4>.
9. Frankenberg C., Kulawik S. S., Wofsy S. C. et al. Using airborne HIAPER Pole-to-Pole Observations (HIPPO) to evaluate model and remote sensing estimates of atmospheric carbon dioxide // Atmospheric Chemistry and Physics. 2016. V. 16. No. 12. P. 7867–7878. DOI: 10.5194/acp-16-7867-2016.
10. García O. E., Sepúlveda E., Schneider M. et al. Consistency and quality assessment of the MetOp-A/IASI and MetOp-B/IASI operational trace gas products (O₃, CO, N₂O, CH₄, and CO₂) in the subtropical North Atlantic // Atmospheric Measurement Techniques. 2016. V. 9. No. 5. P. 2315–2333. <https://doi.org/10.5194/amt-9-2315-2016>.
11. Kulawik S. S., Jones D. B. A., Nassar R. et al. Characterization of Tropospheric Emission Spectrometer (TES) CO₂ for carbon cycle science // Atmospheric Chemistry and Physics. 2010. V. 10. No. 12. P. 5601–5623. DOI: 10.5194/acp-10-5601-2010.
12. Maddy E. S., Barnett C. D., Goldberg M., et al. CO₂ retrievals from the atmospheric infrared sounder: methodology and validation // J. Geophysical Research. 2008. V. 113. Iss. D11. DOI: 10.1029/2007JD009402.
13. Nalli N. R., Tan C., Warner Ju. et al. Validation of carbon trace gas profile retrievals from the NOAA-unique combined atmospheric processing system for the cross-track infrared sounder // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 19. Article 3245. DOI: 10.3390/rs12193245.
14. Noel S., Bovensmann H., Wuttke M. W. et al. Nadir, limb, and occultation measurements with SCIAMACHY // Advances in Space Research. 2002. V. 29. No. 11. P. 1819–1824. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00102-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00102-3).
15. O'Dell C., Eldering A., Gunson M. et al. Improvements in XCO₂ accuracy from OCO-2 with the latest ACOS v10 product // vEGU21, 23rd EGU General Assembly. 2021. Article EGU21-10484. DOI: 10.5194/egusphere-egu21-10484.
16. Pachauri R. K., Allen M. R., Barros V. R. Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the Fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change / eds. R. K. Pachauri, L. A. Meyer. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014. 151 p.
17. Peiro H., Crowell S., Schuh A. et al. Four years of global carbon cycle observed from OCO-2 version 9 and in situ data, and comparison to OCO-2 v7 // Atmospheric Chemistry and Physics. 2022. V. 22. No. 2. P. 1097–1130. <https://doi.org/10.5194/acp-22-1097-2022>.
18. Suto H., Kataoka F., Kikuchi N. et al. Thermal and near-infrared sensor for carbon observation Fourier transform spectrometer-2 (TANSO-FTS-2) on the Greenhouse gases Observing SATellite-2 (GOSAT-2) during its first year in orbit // Atmospheric Measurement Techniques. 2021. V. 14. P. 2013–2039. <https://doi.org/10.5194/amt-14-2013-2021>.
19. Taylor T. E., O'Dell C. W., Crisp D. et al. An 11-year record of XCO₂ estimates derived from GOSAT measurements using the NASA ACOS version 9 retrieval algorithm // Earth System Science Data. 2022. V. 14. No. 1. P. 325–360. <https://doi.org/10.5194/essd-14-325-2022>.
20. Timofeyev Y., Virolainen Y., Makarova M. et al. Ground-based spectroscopic measurements of atmospheric gas composition near Saint Petersburg (Russia) // J. Molecular Spectroscopy. 2016. V. 323. P. 2–14. DOI: 10.1016/j.jms.2015.12.007.
21. Uspensky A. B., Rublev A. N., Kozlov D. A. et al. Monitoring of the essential climate variables of the atmosphere from satellite-based infrared sounder IKFS-2 // Russian Meteorology and Hydrology. 2022. V. 47. No. 11. P. 819–828. <https://doi.org/10.3103/S1068373922110012>.
22. Wunch D., Toon G. C., Blavier J-F. L. et al. The total carbon column observing network // Philosophical Trans. A. 2011. V. 369(1943). P. 2087–2112. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0240>.
23. Yang H., Feng G., Xiang R. et al. Spatio-Temporal Validation of AIRS CO₂ Observations Using GAW, HIPPO and TCCON // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 21. Article 3583. <https://doi.org/10.3390/rs12213583>.
24. Zhou L., Divakarla M., Liu X. An overview of the Joint Polar Satellite System (JPSS) science data product calibration and validation // Remote Sensing. 2016. V. 8. No. 2. Article 139. <https://doi.org/10.3390/rs8020139>.

Comparison of ground-based and satellite measurements of CO₂ in Peterhof

A. A. Nikitenko¹, Yu. M. Timofeev¹, Ya. A. Virolainen¹, A. N. Rublev²,
V. V. Golomolzin³, Yu. V. Kiseleva², A. B. Uspensky², D. A. Kozlov⁴

¹ Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia
E-mail: nikki_nic@mail.ru

² State Research Center for Space Hydrometeorology “Planeta”, Moscow 123242, Russia
E-mail: alex.rublev@mail.ru

³ Siberian Center of SRC “Planeta”, Novosibirsk 630099, Russia
E-mail: vvg@rcpod.ru

⁴ State Scientific Center of the Russian Federation “Keldysh Research Center”
Moscow 125438, Russia
E-mail: dima_kozlov@mail.ru

Regular monitoring of CO₂ content is necessary to study current changes in the Earth’s climate and the factors influencing them. Determining anthropogenic CO₂ emissions are based on satellite and ground-based measurements of spatiotemporal variations of CO₂ total content. At the same time, the requirements for measurement errors of CO₂ total content (XCO₂) are very high (~0.5–1.0 ppm or less than 0.25 %). The paper compares the XCO₂ data derived from satellite measurements of outgoing thermal Infrared (IR) radiation by the IKFS-2 Infrared Fourier spectrometer aboard the Russian Meteor-M No. 2 meteorological satellite and ground-based measurements of solar radiation in the Near-Infrared (NIR) range by the Bruker IFS 125HR Fourier spectrometer with high spectral resolution in Peterhof performed by Saint Petersburg State University in 2019–2022. Ground-based measurements by the Bruker IFS 125HR were previously calibrated using a secondary international standard by the mobile Bruker/SUN Fourier spectrometer before comparisons with satellite measurements. Differences in XCO₂ values retrieved by satellite and ground-based methods are within ~1 %.

Keywords: CO₂ content, monitoring, CO₂ variation, ground-based spectroscopic measurements, validation, satellite measurements, IKFS-2, Bruker IFS 125HR, thermal radiation method

Accepted: 22.07.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-275-283

References

1. Arshinov M. Yu., Belan B. D., Davydov D. K., Krekov G. M., Fofonov A. V., Babchenko S. V., Inoue G., Machida T., Maksutov Sh., Sasakawa M., Shimoyama K., The dynamics in vertical distribution of greenhouse gases in the atmosphere, *Optika atmosfery i okeana*, 2012, Vol. 25, No. 12, pp. 1051–1061 (in Russian).
2. Golomolzin V. V., Rublev A. N., Kiseleva Yu. V., Kozlov D. A., Prokushkin A. S., Panov A. V., Determination of the total carbon dioxide content over the territory of Russia based on data from the Meteor-M No. 2 satellite, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2022, No. 4, pp. 79–95 (in Russian).
3. Timofeev Yu. M., Berezin I. A., Virolainen Ya. A. et al., Spatial-temporal CO₂ variations near St. Petersburg based on satellite and ground-based measurements, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, Vol. 55, No. 1, pp. 59–64, DOI: 10.1134/S0001433819010109.
4. *A guidebook on the use of satellite greenhouse gases observation data to evaluate and improve greenhouse gas emission inventories*, 1st ed., Matsunaga T., Maksyutov S. (eds.), Satellite Observation Center, National Inst. for Environmental Studies, Japan, 2018, 129 p.
5. Cortesi U. et al., *KLIMA-IASI sensitivity assessment report, final report for phase 1 of the project sensitivity analysis and application of KLIMA algorithms to GOSAT and OCO validation*, 2009, ESA-ESRIN contract N. 21612/08/I-OL.
6. Cortesi U., Del Bianco S., Gai M., Carli B., Carbon dioxide retrieval from IASI measurements using the KLIMA inversion algorithm, *Proc. ESA Living Planet Symp.*, 2010, Vol. ESA SP-686, Article 468, <https://www.researchgate.net/publication/229012858>.

7. Cortesi U., Bianco S. D., Gai M., Laurenza L. M., Ceccherini S., Carli B., Barbara F., Buchwitz M., KLIMA-IASI final report of project: Sensitivity analysis and application of KLIMA algorithms to GOSAT and OCO validation, *Technical, Scientific and Research Reports*, 2014, Vol. 6, ESA-ESRIN/Contract n. 21612/08/I-OL, 153 p.
8. Diao A., Shu J., Song C., Gao W., Global consistency check of AIRS and IASI total CO₂ column concentrations using WDCGG ground-based measurements, *Frontiers in Earth Science*, 2017, Vol. 11, pp. 1–10, <https://doi.org/10.1007/s11707-016-0573-4>.
9. Frankenberg C., Kulawik S. S., Wofsy S. C. et al., Using airborne HIAPER Pole-to-Pole Observations (HIPPO) to evaluate model and remote sensing estimates of atmospheric carbon dioxide, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, Vol. 16, No. 12, pp. 7867–7878, DOI: 10.5194/acp-16-7867-2016.
10. García O. E., Sepúlveda E., Schneider M. et al., Consistency and quality assessment of the MetOp-A/IASI and MetOp-B/IASI operational trace gas products (O₃, CO, N₂O, CH₄, and CO₂) in the subtropical North Atlantic, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, Vol. 9, No. 5, pp. 2315–2333, <https://doi.org/10.5194/amt-9-2315-2016>.
11. Kulawik S. S., Jones D. B. A., Nassar R. et al., Characterization of Tropospheric Emission Spectrometer (TES) CO₂ for carbon cycle science, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, Vol. 10, No. 12, pp. 5601–5623, DOI: 10.5194/acp-10-5601-2010.
12. Maddy E. S., Barnet C. D., Goldberg M. et al., CO₂ retrievals from the atmospheric infrared sounder: methodology and validation, *J. Geophysical Research*, 2008, Vol. 113, Issue D11, DOI: 10.1029/2007JD009402.
13. Nalli N. R., Tan C., Warner Ju. et al., Validation of carbon trace gas profile retrievals from the NOAA-unique combined atmospheric processing system for the cross-track infrared sounder, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 19, Article 3245, DOI: 10.3390/rs12193245.
14. Noel S., Bovensmann H., Wuttke M. W. et al., Nadir, limb, and occultation measurements with SCIAMACHY, *Advances in Space Research*, 2002, Vol. 29, No. 11, pp. 1819–1824, [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00102-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00102-3).
15. O'Dell C., Eldering A., Gunson M. et al., Improvements in XCO₂ accuracy from OCO-2 with the latest ACOS v10 product, *vEGU21, 23rd EGU General Assembly*, 2021, Article EGU21-10484, DOI: 10.5194/egusphere-egu21-10484.
16. Pachauri R. K., Allen M. R., Barros V. R., *Climate change 2014: synthesis report, Contribution of working groups I, II and III to the Fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, R. K. Pachauri, L. A. Meyer (eds.), Geneva, Switzerland: IPCC, 2014, 151 p.
17. Peiro H., Crowell S., Schuh A. et al., Four years of global carbon cycle observed from OCO-2 version 9 and in situ data, and comparison to OCO-2 v7, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, Vol. 22, No. 2, pp. 1097–1130, <https://doi.org/10.5194/acp-22-1097-2022>.
18. Suto H., Kataoka F., Kikuchi N. et al., Thermal and near-infrared sensor for carbon observation Fourier transform spectrometer-2 (TANSO-FTS-2) on the Greenhouse gases Observing SATellite-2 (GOSAT-2) during its first year in orbit, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, Vol. 14, pp. 2013–2039, <https://doi.org/10.5194/amt-14-2013-2021>.
19. Taylor T. E., O'Dell C. W., Crisp D. et al., An 11-year record of XCO₂ estimates derived from GOSAT measurements using the NASA ACOS version 9 retrieval algorithm, *Earth System Science Data*, 2022, Vol. 14, No. 1, pp. 325–360, <https://doi.org/10.5194/essd-14-325-2022>.
20. Timofeyev Y., Virolainen Y., Makarova M. et al., Ground-based spectroscopic measurements of atmospheric gas composition near Saint Petersburg (Russia), *J. Molecular Spectroscopy*, 2016, Vol. 323, pp. 2–14, DOI: 10.1016/j.jms.2015.12.007.
21. Uspensky A. B., Rublev A. N., Kozlov D. A. et al., Monitoring of the essential climate variables of the atmosphere from satellite-based infrared sounder IKFS-2, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2022, Vol. 47, No. 11, pp. 819–828, <https://doi.org/10.3103/S1068373922110012>.
22. Wunch D., Toon G. C., Blavier J-F. L. et al., The total carbon column observing network, *Philosophical Trans. A*, 2011, Vol. 369, pp. 2087–2112, <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0240>.
23. Yang H., Feng G., Xiang R. et al., Spatio-Temporal Validation of AIRS CO₂ Observations Using GAW, HIPPO and TCCON, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 21, Article 3583, <https://doi.org/10.3390/rs12213583>.
24. Zhou L., Divakarla M., Liu X., An overview of the Joint Polar Satellite System (JPSS) science data product calibration and validation, *Remote Sensing*. 2016, Vol. 8, No. 2, Article 139, <https://doi.org/10.3390/rs8020139>.