

УДК 551.510.41

ПЕРВЫЕ СПУТНИКОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ (1977 И 1979 гг.), СПУТНИК “МЕТЕОР”, ПРИБОР SI-1)

© 2020 г. Ю. М. Тимофеев^{a, *}, А. В. Поляков^a, Я. А. Виролайнен^a,
В. Делер^b, Д. Эртель^c, Д. Шпенкух^d

^aСанкт-Петербургский государственный университет,
Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, 199034 Россия

^bИзвестия РАН. Физика атмосферы и океана, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

^cИзвестия РАН. Физика атмосферы и океана, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

^dБерлинское академическое общество им. Лейбница, Берлин, Германия

*E-mail: y.timofeev@spbu.ru

Поступила в редакцию 01.08.2019 г.

После доработки 31.01.2020 г.

Принята к публикации 05.02.2020 г.

Измерения спектров уходящего теплового ИК излучения приборов SI-1 в 1977 и 1979 гг. на МИСЗ “Метеор” использовались для определения содержания CO₂ в атмосфере Земли. Для интерпретации спутниковых измерений был разработан и реализован оригинальный алгоритм решения обратной задачи по определению содержания CO₂ на основе методики искусственных нейронных сетей. Алгоритм использует как сами экспериментальные спектры, так и данные о температуре и влажности из архива реанализа NCEP CFSR. Несмотря на наличие заметного разброса отдельных значений содержания CO₂ в 1977 и 1979 году (330–350 ppm), они четко демонстрируют сезонные зависимости содержания для европейского региона и малые значения для южного полушария. Пространственное и временное усреднения восстановленных значений дает средние зимние и весенне-летние значения для европейского региона в 338.2, и 336.5 ± 3.1 ppmv соответственно хорошо согласующиеся с данными наземных измерений на станции Мауна-Лоа.

Ключевые слова: спектры уходящего теплового излучения, спутниковые измерения, содержание углекислого газа

DOI: 10.31857/S0002351520040094

1. ВВЕДЕНИЕ

Углекислый газ (CO₂) является важнейшим антропогенным парниковым газом, и рост его содержания в значительной степени определяет изменения климата Земли в последнее столетие [1]. Уже длительное время ведутся регулярные измерения содержания CO₂ с помощью как наземных (локальных и дистанционных), так и спутниковых наблюдений. Спутниковые измерения CO₂ были начаты с помощью затменного метода на Шаттлах в 1983 г. с помощью GRILL спектрометра, продолжены в 1985–1994 гг. (Фурье-спектрометр ATMOS). В настоящее время измерения CO₂ осуществляются с помощью прибора ACE. Эти измерения позволили получить вертикальные профили содержания CO₂ прежде всего в стратосфере и мезосфере.

Потребности в изучении интенсивностей различных источников и стоков, а также атмосферных

циклов CO₂ для прогнозов изменений климата Земли в XXI столетии стимулировали надирные спутниковые измерения общего содержания (OC) CO₂. Первые примеры интерпретации надирных измерений теплового ИК излучения со спутников для определения CO₂ приведены в работе [2] и относились к периоду 1987–1991 гг. Использовались спутниковые измерения 20 канального прибора HIRS для температурного зондирования и расчеты ИК спектров теплового излучения на основе радиозондовых данных. В этой работе показано, что для достижения точности определения содержания CO₂ в 1% необходимо усреднение спутниковых измерений HIRS на площади ~500 × 500 км² и ~15 дней.

В работе [3] были проанализированы возможности определения содержания CO₂ с помощью Фурье-спектроскопических измерений уходящего теплового излучения прибором IMG, осуществ-

ленных в 1996–1997 гг. Анализ показал, что требуемая точность определения среднего отношения смеси XCO_2 (1% и лучше) может быть реализована только при существенном пространственном и временном усреднении спутниковых измерений.

Позднее данные о CO_2 были получены по измерениям отраженного солнечного и теплового ИК излучения приборами относительно высокого спектрального разрешения SCIAMACHY, AIRS, TES и IASI [4–7]. В последние годы важные спутниковые эксперименты по измерениям содержания CO_2 были реализованы на спутниках GOSAT, (Greenhouse Gases Observing Satellite) и OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2) с помощью измерений отраженного солнечного излучения в ближней ИК области спектра и теплового излучения в средней ИК области [8, 9].

В 1977 и 1979 годах на спутниках “Метеор” были проведены измерения спектров уходящего теплового излучения фурье-спектрометром SI-1 для температурно-влажностного зондирования атмосферы [10]. Задача определения содержания CO_2 тогда не рассматривалась. С учетом созданных к настоящему времени совершенных радиационных моделей атмосферы в ИК области спектра, а также значительного прогресса в решении обратных задач атмосферной оптики, представляет значительный интерес вернуться к анализу данных измерений SI-1 с точки зрения извлечения из них информации о содержании CO_2 . Это важно также в связи с тем, что в 1977–1979 гг. даже наземных измерений CO_2 было очень мало.

2. ИЗМЕРЕНИЯ АППАРАТУРЫ SI-1

Прибор SI-1 был создан в Институте электроники Академии наук ГДР и измерял уходящее тепловое излучение в спектральной области 6.25–25 мкм (400–1600 cm^{-1}) со спектральным разрешением $\sim 5 \text{ cm}^{-1}$ [8]. Случайные погрешности измерений колебались от 0.2 до 5, в среднем составляя около 0.5 мВт/(м² ср cm^{-1}). Данные измерений 1977 года состоят из 1082 спектров (19 дней измерений, 22 орбиты спутника) в период с 5 июля по 23 сентября, осуществленных от северного до южного полюса как над сушей, так и над океанами. Измерения 1979 года включают 1675 спектров за 40 дней (56 орбит) с 26 января по 19 июня. Они также охватывают практически все широты.

На первом этапе на основе анализа яркостных температур уходящего излучения в окне прозрачности 8–12 мкм были выделены безоблачные слу-

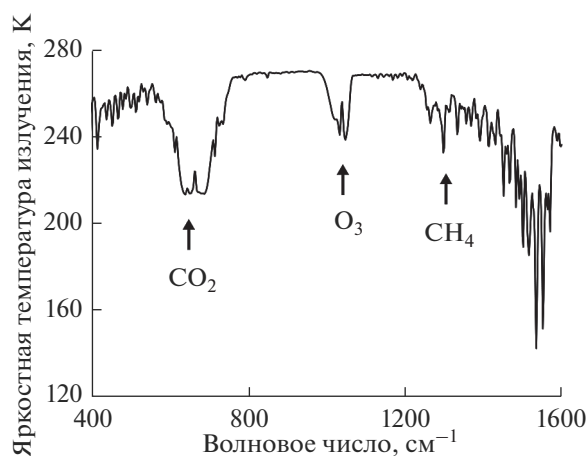


Рис. 1. Средний безоблачный спектр яркостной температуры по данным измерений SI-1.

чай (1015 спектров) для обоих периодов космических наблюдений. В качестве примера приведем рис. 1, где дан средний спектр безоблачной атмосферы в терминах яркостной температуры излучения. В спектре указаны полосы поглощения CO_2 (667 cm^{-1}), озона (1070 cm^{-1}) и метана (1300 cm^{-1}).

Далее, на основе анализа измерительных погрешностей каждого спектра, были выделены качественные спектры с погрешностями менее $\sim 0.5 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \text{ ср } \text{cm}^{-1})$ интенсивности уходящего излучения ($\sim 0.5 \text{ К}$ яркостной температуры). Большая часть таких измерений (всего 155) относится к измерениям 1979 года и разным периодам наблюдений, которые мы анализировали дальше (см. табл. 1).

Условно измерения можно подразделить на две группы – зимние (76 измерений) и весенние (82 измерения) для северного полушария. Пространственно почти все измерений относятся к европейскому региону.

3. ПОСТРОЕНИЕ ОБРАТНОГО ОПЕРАТОРА ЗАДАЧИ

Обратная задача по определению из измерений спектров уходящего теплового излучения содержания CO_2 решалась с помощью методики, основанной на использовании искусственных нейронных сетей (ИНС), успешно применявшейся ранее при обработке данных измерений спутникового фурье-спектрометра ИКФС-2 в температурном и влажностном зондировании атмосферы [11, 12].

Таблица 1. Количество высококачественных измерений SI-1 в разные периоды наблюдений в 1979 году

26–30 января	9–16 февраля	1–4 марта	28 мая–12 июня	19 июня
13	26	37	81	1

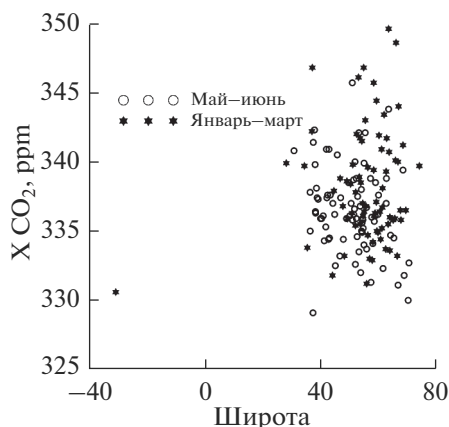


Рис. 2. Примеры восстановления XCO_2 из индивидуальных спектров.

Для обучения ИНС осуществлялось решение прямой задачи — расчет спектров уходящего теплового излучения на основе быстрой модели расчета радиации (БМРР) — RTTOV 12.1. Таким образом были рассчитаны спектры уходящего излучения для ~100000 атмосферных состояний (температуры, влажности, содержания CO_2 и т.д.). Физическое состояние атмосферы бралось по данным анализа-прогноза NCEP CFSR, профили CO_2 моделировались на основе ансамбля состояний RTTOV [13] для периода 1977–1979-х годов.

Анализ погрешностей определения содержания CO_2 с помощью алгоритмов ИНС при моделировании различных погрешностей измерений излучения показал, что при погрешности в ~ 0.5 мВт/(м² ср см⁻¹) отдельные измерения SI-1 дают мало новой информации о CO_2 . В связи с этим при решении обратной задачи — интерпретации спутниковых измерений SI-1 для получения общего содержания CO_2 — в качестве входной информации использовались как измеренные спектры уходящего ИК излучения на спутниках “Метеор”, так и данные о вертикальных профилях температуры и влажности из архива реанализа NCEP CFSR в дни спутниковых измерений. Погрешности определения ОС CO_2 с помощью разработанной методики решения обратной задачи для отдельных спектров составляют 1–2%, при усреднении 5–10 спектров — $\sim 0.8\%$, т.е. ~ 2.5 – 2.8 ppm.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ CO_2

Несмотря на относительно малую информативность отдельных измерений SI-1 относительно содержания CO_2 , мы выполнили восстановление средних для сухой атмосферы отношений смеси XCO_2 для всех измерений, указанных в табл. 1. На рис. 2 приведены восстановления XCO_2 для двух

периодов наблюдений весна—начало лета и зима—начало марта.

Из приведенного рисунка видны следующие особенности полученных результатов:

1. Относительно большие вариации содержания CO_2 в диапазоне ~ 330 – 350 ppm. Эти вариации наглядно характеризуют как относительно большие погрешности восстановления CO_2 прибором СИ-1 для отдельных спектров (~ 1 – 2%), так и естественную изменчивость CO_2 .

2. Максимальные значения содержания CO_2 наблюдаются для зимнего периода, а минимальные — для мая–июня, что соответствует типичному сезонному ходу CO_2 .

3. Единственное измерение в южном полушарии показывает относительно низкое значение XCO_2 — около 330 ppm.

4. Имеющиеся данные позволили оценить средние значения и стандартные отклонения XCO_2 над Европой зимой и на границе весна–лето 1979 г.: зима — 338.2 ± 4.1 ppmv, весна–лето — 336.5 ± 3.1 ppmv. Амплитуда сезонного хода для этих месяцев и значений составляет ~ 1.7 ppm. Для сравнения приведем среднегодовое значение на основе наземных измерений на станции Мауна-Лоа для 1979 года — 336.84 ppm.

5. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Впервые из измерений спектров уходящего теплового ИК излучения, осуществленных в 1977 и 1979 годах (прибор SI-1, спутник “Метеор”) получены оценки содержания CO_2 в земной атмосфере.

2. Для интерпретации спутниковых измерений был разработан и реализован оригинальный алгоритм решения обратной задачи по определению содержания CO_2 на основе методики ИНС. Алгоритм использует как сами экспериментальные спектры, так и данные о температуре и влажности из архива реанализа NCEP CFSR.

3. Несмотря на наличие заметного разброса отдельных значений содержания CO_2 в 1979 году (330 – 350 ppm), результаты четко демонстрируют сезонные зависимости содержаний для европейского региона и малое значение CO_2 для южного полушария.

4. Пространственное и временное усреднения восстановленных значений XCO_2 дают средние зимние и весенне-летние значения для европейского региона в 338.2, и 336.5 ± 3.1 ppmv соответственно, достаточно хорошо согласующиеся с данными наземных измерений на станции Мауна-Лоа с учетом временной ограниченности спутниковых измерений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ — грант 17-05-00768.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IPCC, 2014: 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 [Core Writing Team, Pachauri R.K. and Meyer L.A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
2. Chédin A., Hollingsworth A., Scott N.A., Serrar S., Crevoisier C., Armante R. Annual and seasonal variations of atmospheric CO₂, N₂O and CO concentration retrieved from NOAA/TOVS satellite observations // *Geophys. Res. Letters*. 2002. V. 29. № 8. P. 110–114.
3. Kobayashi H., Shimota A., Yoshigahara C., Yoshida I., Uehara Y., Kondo K. Satellite-borne high-resolution FTIR for lower atmosphere sounding and its evaluation // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1999. V. 37. № 3. P. 1496–1507.
4. Schneising O., Buchwitz M., Burrows J.P., Bovensmann H., Reuter M., Notholt J., Macatangay R., Warneke T. Three years of greenhouse gas column-averaged dry air mole fractions retrieved from satellite – Part 1: Carbon dioxide // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. V. 8. P. 3827–3853.
5. Olsen E.T. AIRS Version 5 Release Tropospheric CO₂ Products / [https://docsserver.gesdisc.eosdis.nasa.gov/repository/Mission/AIRS/3.3_ScienceData/ProductDocumentation/3.3.4_Product Generation Algorithms/AIRS-V5-Tropospheric-CO₂-Products.pdf](https://docsserver.gesdisc.eosdis.nasa.gov/repository/Mission/AIRS/3.3_ScienceData/ProductDocumentation/3.3.4_Product%20Generation%20Algorithms/AIRS-V5-Tropospheric-CO2-Products.pdf). 2002. 38 pp.
6. Kulawik S.S., Jones D.B.A., Nassar R. et al. Characterization of Tropospheric Emission Spectrometer (TES) CO₂ for carbon cycle science // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10. P. 5601–5623.
7. 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 // *Atmos. Meas. Tech.* 2016. V. 9. P. 2315–2333.
8. Cogan A.J., Boesch H., Parker R.J. et al. 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.
9. Crisp D., Pollock H.R., Rosenberg R. et al. The on-orbit performance of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) instrument and its radiometrically calibrated products // *Atmos. Meas. Tech.* 2017. V. 10. P. 59–81.
10. Kempe V., Oertel D., Schuster R. et al. Absolute IR-spectra from the measurement of Fourier-spectrometers aboard Meteor 25 and 28 // *Acta Astronautica*. 1980. V. 7. № 12. P. 1403–1416.
11. Polyakov A.V., Timofeev Yu.M., Virolainen Ya.A. Using artificial neural networks in the temperature and humidity sounding of the atmosphere // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014. V. 50. № 3. P. 330–336.
12. Timofeyev Yu.M., Uspensky A.B., Zavelevich F.S., Polyakov A.V., Virolainen Ya.A., Rublev A.N., Kukhar'sky A.V., Kiseleva J.V., Kozlov D. A., Kozlov I.A., Nikulin A.G., Pyatkin V.P., Rusin E.V. Hyperspectral infrared atmospheric sounder IKFS-2 on “Meteor-M” No. 2 – Four years in orbit // *J. Quant. Spectr. Rad. Trans.* 2019. V. 238. 106579, <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.106579>
13. https://www.nwpsaf.eu/site/download/documentation/rtm/docs_rttov12/rttov12_svr.pdf

First Satellite Measurements of Carbon Dioxide in the Earth Atmosphere (from SI-1 Spectrometer Aboard “Meteor” Satellite in 1977 and 1979)

Yu. M. Timofeev^{1,*}, A. V. Polyakov¹, Ya. A. Virolainen¹, W. Döhler², D. Oertel³, and D. Spänkuch⁴

¹*Saint Petersburg State University, St. Petersburg, 199034, Russia*

²*Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk, Fizika Atmosfery i Okeana, Pyzhevskii per., 3, Moscow, 119017 Russia*

³*Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk, Fizika Atmosfery i Okeana, Pyzhevskii per., 3, Moscow, 119017 Russia*

⁴*Leibniz Academic Society in Berlin, Berlin, Germany*

*e-mail: y.timofeev@spbu.ru

Spectral measurements of the outgoing thermal IR radiation carried out in 1977 and 1979 (SI-1 instrument, Meteor satellite) were used for estimating the CO₂ content in the Earth's atmosphere. A special algorithm based on the technique of artificial neural networks has been developed for solving the inverse problem of determining the CO₂ content. The algorithm uses experimental spectra, as well as the data on temperature and humidity from the NCEP GFSR re-analysis archive. Despite the presence of a noticeable variation in individual values of CO₂ content in 1977 and 1979 (330–350 ppm), the estimates clearly demonstrate the seasonal variations of carbon dioxide content for Europe and low values for the southern hemisphere. The spatial and temporal averaging of the retrieved CO₂ estimates gives mean winter and spring-summer values for Europe region at 338.2, and 336.5 ± 3.1 ppmv, correspondingly, which is in a good agreement with the ground-based measurements at Mauna Loa station.

Keywords: outgoing thermal radiation spectra, satellite measurements, CO₂ content