

Сравнение наземного и спутникового методов определения вертикальных профилей содержания озона

Ю. И. Бордовская, Я. А. Виролайнен, Ю. М. Тимофеев

Санкт-Петербургский государственный университет

Санкт-Петербург, 198504, Россия

E-mail: bordovskaya@gmail.com

Озон в земной атмосфере — один из важнейших газов из-за поглощения им солнечной ультрафиолетовой радиации, формирования температурного режима стратосферы, влияния на радиационный баланс и климат планеты и токсичной роли в тропосфере. В настоящее время создана глобальная система контроля его содержания. Эта система использует локальные и дистанционные измерения, позволяющие получать регулярную информацию в региональном и глобальном масштабе. Результаты таких измерений содержания озона позволяют формировать совместные базы данных различного пространственного и временного разрешения, которые используются в создании, валидации и совершенствовании разнообразных численных моделей атмосферы, а также применяются в исследованиях изменений озоносферы и климата планеты. Но для создания таких баз данных требуется предварительная валидация и взаимная калибровка различных методов и приборов. В настоящей работе проведено сопоставление измерений профилей содержания озона в атмосфере Санкт-Петербурга с помощью наземного инфракрасного спектроскопического метода и спутникового микроволнового метода (аппаратура MLS) за временной период 2018–2020 гг. Определены величины систематических и стандартных отклонений и коэффициенты корреляций между результатами двух типов измерений.

Ключевые слова: озон, вертикальные профили, дистанционные наземные и спутниковые измерения, сопоставление методов

Одобрена к печати: 15.02.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-225-231

Введение

Озон — один из важнейших газов в земной атмосфере из-за его роли в поглощении солнечной ультрафиолетовой (УФ) радиации и формировании температурного режима стратосферы, влияния на радиационный баланс и климат планеты, а также токсичной роли в тропосфере. В настоящее время создана глобальная система контроля его содержания и атмосферных параметров, влияющих на него. Эта система использует локальные и дистанционные методы измерений, включает наземные, самолётные, аэростатные и спутниковые подсистемы, позволяющие получать регулярную информацию об озоне в региональном и глобальном масштабе. Одна из таких наземных систем — международная сеть для мониторинга климатически важных атмосферных газов NDACC (*англ.* Network for the Detection of Atmospheric Composition Change), использующая измерения прямого солнечного инфракрасного (ИК) излучения высокого спектрального разрешения (Timofeyev et al., 2016). Эти измерения позволяют получать информацию не только об общем содержании озона, но и об элементах вертикального распределения содержания газа (Виролайнен и др., 2015, García et al., 2021; Rougatchev et al., 1996, Schneider et al., 2008).

Существуют также различные спутниковые методы определения содержания озона и его вертикального профиля. Одним из таких высокоинформативных методов измерений выступает микроволновый (МКВ) метод, основанный на измерениях собственного атмосферного теплого МКВ-излучения горизонта Земли (см., например, работу (Waters et al., 2006)).

Результаты измерений содержания озона позволяют формировать совместные базы данных различного пространственного и временного разрешения, которые используются в создании, валидации и совершенствовании численных моделей атмосферы и в исследованиях

изменений озоносферы и климата планеты (см., например, публикацию (Reuter et al., 2020)). Для создания таких баз данных требуется предварительная валидация и взаимокалибровка различных методов и приборов.

В настоящей работе проведено сопоставление измерений профилей содержания озона с помощью наземного инфракрасного спектроскопического метода (Петергоф, Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ)) и спутникового МКВ-метода.

Методы измерений вертикальных профилей содержания озона

Наземный спектроскопический ИК-метод измерений вертикальных профилей содержания озона уже длительное время используется на станциях международной сети NDACC (Виролайнен и др., 2015; García et al., 2021; Schneide et al., 2008). В указанных работах анализировались различные факторы, определяющие погрешности дистанционных измерений: влияние выбора спектральных интервалов, объёма и качества используемой априорной информации, численных методов решения обратной задачи, а также проводилось сравнение ИК-метода с различными (наземными и спутниковыми) независимыми измерениями. Так, например, в исследовании (Schneider et al., 2008) проведено сопоставление 53 случаев ИК-измерений и озонзондов. В рассматриваемой работе показано, что случайные погрешности ИК-метода, обусловленные различными факторами, малы (1–5 % на высотах 3–40 км), но они существенны (4–20 % и более) за счёт вертикального сглаживания. Близкие цифры погрешностей приведены в работе (Виролайнен и др., 2015). В исследовании (García et al., 2021) сопоставление инфракрасных наземных измерений с измерениями озонзондов в течение 20 лет (1999–2018) проводилось в астрономической обсерватории Европейского Союза Тейде (*исп.* Observatorio del Teide), расположенной в Исанье (*исп.* Izaña, Тенерифе, Испания).

На научной измерительной станции NDACC St. Petersburg в Петергофе (СПбГУ) определение вертикальных профилей содержания озона осуществлялось с помощью программного обеспечения (ПО) PROFFIT (Hase et al., 2004). При решении обратной задачи анализировались спектры поглощения солнечного излучения в пяти микроокнах полосы поглощения озона 9,6 мкм в интервале 991–1014 см⁻¹. Характеристики интерпретации спектральных измерений подробно рассмотрены в работе (Virolainen et al., 2013). Отметим, что число степеней свободы для озона в среднем составляет немногим более четырёх, т. е. из измерений возможно извлечь четыре независимых параметра вертикального профиля озона. При этом полуширина усредняющих ядер метода, характеризующая его вертикальное разрешение, составляет 7–10 км в тропосфере и 8–18 км в стратосфере.

Погрешности определения вертикального профиля озона (случайные и систематические) исследовались с помощью ковариационных матриц ошибок, рассчитываемых ПО PROFFIT на основе задаваемых неопределённостей тех или иных исходных источников ошибок: приборных, методических, измерительных (см. подробнее в работе (Виролайнен и др., 2015)). Так, суммарная систематическая погрешность составляет 5–8 % для профиля озона на высотах от 0 до 60 км и определяется в основном погрешностью задания спектроскопической информации и в меньшей степени погрешностями задания температурного профиля (до 2 % в стратосфере). Случайная погрешность определения профиля озона составляет до 2 % в тропосфере и от 2 до 6 % в стратосфере и зависит главным образом от погрешности температурного профиля. Вклад в случайную погрешность второго по значимости источника ошибок — шума измерений — составляет не более 1,5 % (для верхней стратосферы). Отметим, что при оценке погрешностей мы не рассматривали погрешности сглаживания профилей озона за счёт ограниченного вертикального разрешения метода, которые, по оценкам авторов исследования (Schneider et al., 2008), составляют 3–10 % (выше 18 км) и 10–30 % (ниже 18 км). При сопоставлении профилей, полученных методами с более высоким вертикальным разрешением (например, озонзондами), сглаженных с помощью усредняющих ядер ИК-метода, эти погрешности можно не принимать в расчёт.

Спутниковый прибор MLS (*англ.* Microwave Limb Sounder), запущенный на спутнике Aura 15 июля 2004 г., измеряет спектры уходящего теплового МКВ-излучения горизонта планеты, а также вертикальные профили температуры и содержания многих газов, в том числе озона (Waters et al., 2006). Периодически проводятся обширные программы валидации данных и совершенствование программ обработки (Livesey et al., 2022). Сравнение данных MLS со спутниковыми, аэростатными, самолётными и наземными измерениями показало, что случайные погрешности измерений вертикальных профилей содержания озона на высотах 10–80 км меняются очень сильно: от 2–3 % в стратосфере до 100 % в мезосфере. Абсолютные погрешности составляют в стратосфере 5–10 % (слой 1–68 мб).

Значения полуширины усредняющих ядер спутникового метода варьируются в зависимости от высоты от 2,5 до 7 км. Относительно высокое вертикальное разрешение спутниковых измерений (2,5–3,5 км) реализуется в слое от 0,21 до 316 мб. Горизонтальное разрешение спутниковых измерений также сильно варьируется в зависимости от высоты измерений. В стратосфере оно составляет 300–400 км и достигает 650 км в мезосфере.

В настоящей работе использовались данные MLS версии 5.0x за 2018–2020 гг.

Сравнение наземных и спутниковых измерений вертикальных профилей озона

В данном исследовании было проведено сопоставление измерений вертикальной структуры содержания озона наземным методом с помощью фурье-спектрометра производства фирмы Bruker Optic GmbH (Германия) со спутниковыми измерениями прибора MLS с учётом сглаживания профилей MLS с усредняющими ядрами наземного метода. Всего было рассмотрено 154 пары профилей за период с 2018 по 2020 г. Такое число пар было отобрано с использованием пространственного критерия в ~600 км и временного в 2,5 ч.

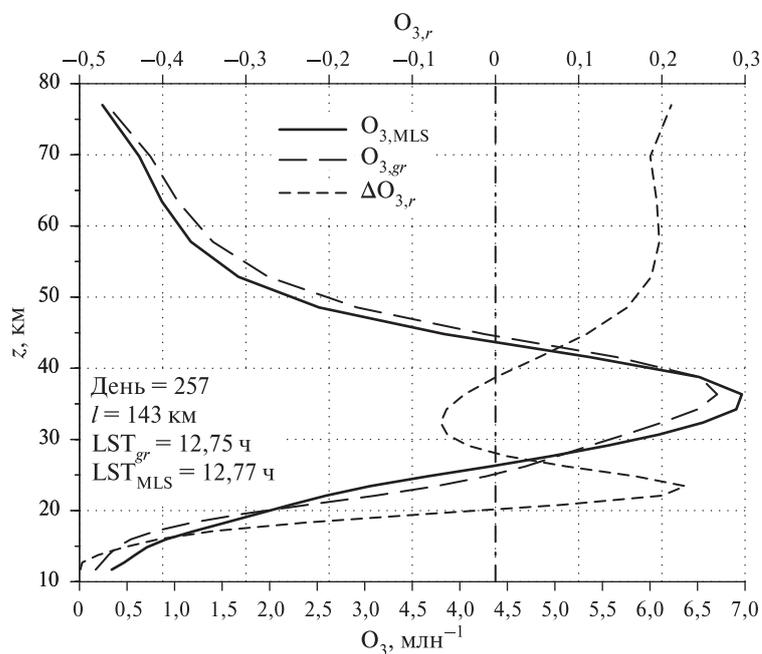


Рис. 1. Сравнение восстановленных профилей содержания озона спутниковым методом (MLS) (сплошная линия) и наземным ИК-методом (штриховая линия, длинный штрих). Обе линии относятся к нижней горизонтальной шкале. Относительная разность $\Delta O_{3,r}$ обозначена штриховой линией (короткий штрих) и относится к верхней горизонтальной шкале. Штрих-пунктиром отмечен ноль верхней горизонтальной шкалы. Измерения проводились 13 сентября 2020 г.; l — расстояние между точками на поверхности по прямой линии, к которым привязаны профили; LST (*англ.* Local Solar Time) — местное солнечное время; LST_{gr} — время, к которому привязан профиль, полученный из наземных измерений; LST_{MLS} — время, к которому привязан профиль, полученный из спутниковых измерений

На *рис. 1* (см. с. 227) приведён пример сопоставления измерений профиля озона двумя методами. Кроме непосредственно самих профилей на рисунке приведён профиль относительной разности $\Delta O_{3,r} = (O_{3,gr} - O_{3,MLS}) / O_{3,MLS}$.

Из *рис. 1* следует хорошее согласие двух типов измерений. Различия в высотной области 20–60 км не превышают 20 %. Значительный рост различий ниже 20 км обусловлен существенным увеличением погрешностей спутникового метода. Так, на высоте 15 км они достигают 20–30 %.

Для количественного описания результатов сравнения восстановления вертикальных профилей озона двумя дистанционными методами использовались величины среднего и стандартного отклонений, а также коэффициент корреляции между двумя типами измерений.

На *рис. 2* приведены среднее и стандартное отклонения различий измерений озона двумя дистанционными методами относительно среднего профиля озона.

Средние различия не превышают 10 % и по высоте меняют знак. На высотах от 11 до 19 км и в слое 28–39 км спутниковые измерения превышают наземные, а на высотах 19–28 км и выше 40 км — наоборот. Стандартные отклонения менее 10 % наблюдаются на высотах 23–42 км. Выше они достигают 15 %. В нижней стратосфере они могут достигать значений больше 20 %. Отметим, что погрешности спутникового метода на высотах 15 км составляют 20–30 %.

В работе (Schneider et al., 2008) сравнение ИК-метода и озонозондовых измерений показало, что среднее расхождение между двумя методами составляет от –5 до +10 %, стандартное отклонение достигает 10 % в тропосфере и нижней стратосфере, а в средней стратосфере близко к 5 %. Приведённые в цитируемой работе меньшие (по сравнению с нашими сопоставлениями) различия между наземным ИК-методом и озонозондированием обусловлены заметно более высокой точностью озонозондовых измерений, чем спутниковые измерения прибора MLS. Так, в исследованиях (Liu et al., 2013; Tarasick et al., 2021) утверждается, что случайные погрешности озонозондов ниже высоты 25 км не превышают ~5 %.

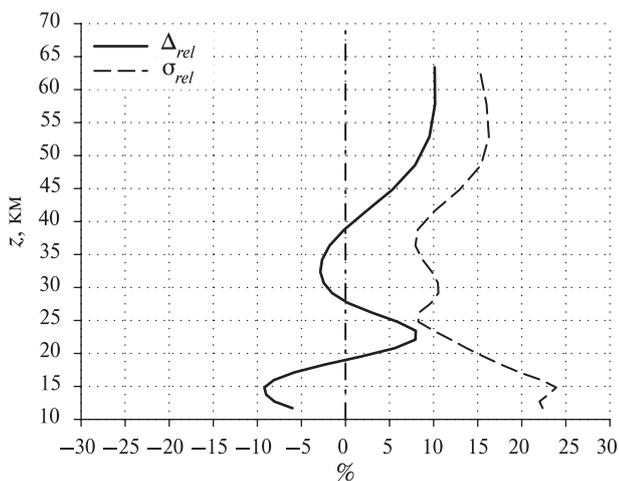


Рис. 2. Среднее отклонение (сплошная линия) и стандартное отклонение (штриховая линия). Штрих-пунктиром отмечен ноль

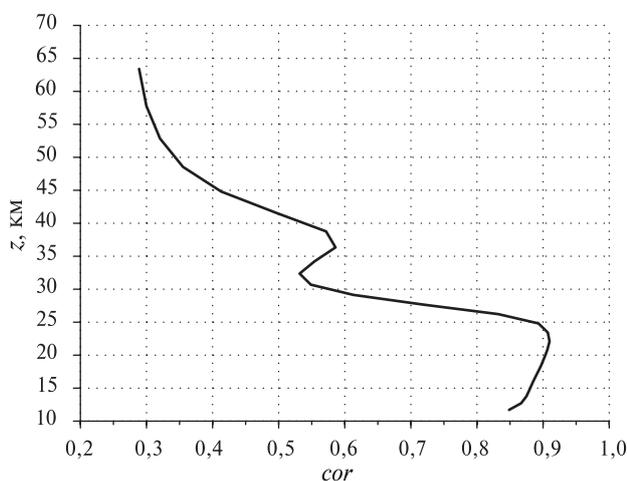


Рис. 3. Высотный ход коэффициента корреляции между измерениями озона двумя дистанционными методами

Аналогичное сравнение озонозондовых и ИК-измерений, осуществлённых в разные периоды времени (García et al., 2021), показали заметное уменьшение расхождений между ними при использовании наземных приборов всё более высокого качества. В последний рассмотренный период 2008–2018 гг. среднее расхождение при различных схемах интерпретации измеренных ИК-спектров составляло 7–8 % (слой 0–20 км) и достигало 15 % и выше. Стандартное отклонение в слое 0–20 км составляло 5–6 % и 3–4 % и выше в зависимости

от используемой схемы интерпретации наземных измерений. Анализ высотной зависимости различий двух методов показал, что минимальные различия в стандартном отклонении (~3,5 %) наблюдаются на высоте 29 км для периода измерений 2008–2018 гг.

На *рис. 3* (см. с. 228) приведён высотный ход коэффициента корреляции полученных нами при анализе данных измерений профилей озона ИК-методом и спутниковыми измерениями.

Как видно из *рис. 3*, коэффициент корреляции между двумя типами измерений достаточно высок (0,7–0,9) в слое 10–27 км, а выше 40 км он меньше 0,4. Одно из возможных объяснений такого поведения коэффициента корреляции — это рост случайной погрешности обоих типов измерений с ростом высоты.

Основные результаты и выводы

Проведено сопоставление результатов наземных и спутниковых дистанционных измерений вертикальных профилей содержания озона. Наземные измерения выполнены на станции NDACC St. Petersburg в Петергофе (СПбГУ) и основаны на измерениях солнечного ИК-излучения с высоким спектральным разрешением. Спутниковые данные получены прибором MLS, принимающим уходящее МКВ-излучение горизонта Земли. Сравнения проведены для 154 пар профилей за период с 2018 по 2020 г., отобранных с использованием пространственного критерия в ~600 км и временного в 2,5 ч. Средние различия двух методов не превышают 10 % и по высоте меняют знак. На высотах нижней стратосферы (15–25 км) и в слое 32–39 км спутниковые измерения превышают наземные, а на высотах 25–30 км и выше 40 км — наоборот. Стандартные отклонения менее 10 % наблюдаются на высотах 28–42 км. Выше они достигают 15 %. В нижней стратосфере они могут принимать значения более 20 %, что обусловлено ростом погрешностей измерений спутникового метода.

Интерпретация наземных измерений выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 20-05-00627; сравнение двух методов было проведено в лаборатории «Исследования озонового слоя и верхней атмосферы» СПбГУ, финансируемой Министерством науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению № 075-15-2021-583. Наземные экспериментальные данные получены на оборудовании ресурсного центра СПбГУ «Геомодель». Авторы благодарят научный коллектив MLS за предоставленные данные о содержании озона.

Литература

1. Виролайнен Я. А., Тимофеев Ю. М., Поберовский А. В., Еременко М., Дюфор Г. Определение содержания озона в различных слоях атмосферы с помощью наземной Фурье-спектроскопии // Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана. 2015. № 2. С. 191–200.
2. García O. E., Sanromá E., Schneider M., Hase F., León-Luis S. F., Blumenstock T., Sepúlveda E., Redondas A., Carreño V., Torres C., Prats N. Improved ozone monitoring by ground-based FTIR spectrometry: preprint // Atmospheric Measurement Technique. 2021. DOI: 10.5194/amt-2021-67.
3. 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, ground-based FTIR measurements // J. Quantitative Spectroscopy Radiative Transfer. 2004. V. 87(1). P. 25–52. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2003.12.008.
4. Liu J., Tarasick D. W., Fioletov V. E., McLinden C., Zhao T., Gong S., Sioris C., Jin J. J., Liu G., Moeini O. A global ozone climatology from ozone soundings via trajectory mapping: a stratospheric perspective // Atmospheric Chemistry and Physics. 2013. V. 13(22). P. 11441–11464. DOI:10.5194/acp-13-11441-2013.
5. Livesey N., Read W., Wagner P., Froidevaux L., Santee M., Schwartz M., Lambert A., Millán Valle L., Pumphrey H., Manney G., Fuller R., Jarnot R., Knosp B., Lay R. Earth Observing System (EOS): Aura Microwave Limb Sounder (MLS). Version 5.0x: Level 2 and 3 data quality and description document

- / Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology. Pasadena, California, 2022. 183 p. URL: https://mls.jpl.nasa.gov/data/v5-0_data_quality_document.pdf.
6. Pougatchev N. S., Connor B. J., Jones N. B., Rinsland C. P. Validation of ozone profile retrievals from infrared ground-based solar spectra // *Geophysical Research Letters*. 1996. V. 23(13). P. 1637–1640. DOI: 10.1029/96GL01501.
 7. 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 Y., Morino I., Crisp D., O'Dell C. W., Notholt J., Petri C., Warneke T., Velazco 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 Mazière 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 // *Atmospheric Measurement Technique*. 2020. V. 13(2). P. 789–819. DOI: 10.5194/amt-13-789-2020.
 8. Schneider M., Hase F., Blumenstock T., Redondas A., Cuevas E. Quality assessment of O₃ profiles measured by a state-of-the-art ground-based FTIR observing system // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2008. V. 8(18). P. 5579–5588. DOI: 10.5194/acp-8-5579-2008.
 9. Tarasick D. W., Smit H. G. J., Thompson A. M., Morris G. A., Witte J. C., Davies J., Nakano T., Van Malderen R., Stauffer R. M., Johnson B. J., Stübi R., Oltmans S. J., Vömel H. Improving ECC ozonesonde data quality: Assessment of current methods and outstanding issues // *Earth and Space Science*. 2021. V. 8(3). e2019EA000914. DOI: 10.1029/2019EA000914.
 10. Timofeyev Y., Virolainen Y., Makarova M., Poberovsky A., Polyakov A., Ionov D., Osipov S., Imhasin H. 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.
 11. Virolainen Y. A., Timofeyev Y. M., Poberovsky A. V. Intercomparison of satellite and ground-based ozone total column measurements // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2013. V. 49(9). P. 993–1001. DOI: 10.1134/S0001433813090235.
 12. Waters J. W., Froidevaux L., Harwood R. S., Jarnot R. F., Pickett H. M., Read W. G., Siegel P. H., Cofield R. E., Filipiak M. J., Flower D. A., Holden J. R., Lau G. K., Livesey N. J., Manney G. L., Pumphrey H. C., Santee M. L., Wu D. L., Cuddy D. T., Lay R. R., Loo M. S., Perun V. S., Schwartz M. J., Stek P. C., Thurstans R. P., Boyles M. A., Chandra K. M., Chavez M. C., Chen G.-S., Chudasama B. V., Dodge R., Fuller R. A., Girard M. A., Jiang J. H., Jiang Y., Knosp B. W., LaBelle R. C., Lam J. C., Lee K. A., Miller D., Oswald J. E., Patel N. C., Pukala D. M., Quintero O., Scaff D. M., Van Snyder W., Tope M. C., Wagner P. A., Walch M. J. The Earth observing system microwave limb sounder (EOS MLS) on the aura Satellite // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2006. V. 44(5). P. 1075–1092. DOI: 10.1109/TGRS.2006.873771.

Comparison of ground-based and satellite methods for determining vertical ozone profiles

Yu. I. Bordovskaya, Ya. A. Virolainen, Yu. M. Timofeyev

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 198504, Russia
E-mail: bordovskayay@gmail.com

Ozone in the Earth's atmosphere is one of the most important gases due to absorption of solar UV radiation, the formation of the temperature regime of the stratosphere, the effect on the radiation balance and climate of the planet and its toxic role in the troposphere. A global content monitoring system has now been established. The system uses local and remote measurements, to provide regular information on a regional and global scale. The results of various measurements of ozone content make it possible to form joint databases of different spatial and temporal resolutions measurements, which are used in the creation, validation and improvement of various numerical models of the atmosphere and their use in the study of changes in the ozonosphere and climate of the planet. But the creation of such databases requires preliminary validation and mutual calibration of various methods and devices. In this paper, a comparison of measurements of ozone profiles using the ground-based IR spectroscopic method in Saint Petersburg and the satellite method (MLS device) for the time period 2018–2020 is carried out.

Keywords: ozone, vertical profiles, remote ground and satellite measurements, comparison of methods

Accepted: 15.02.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-225-231

References

1. Virolainen Ya. A., Timofeev Yu. M., Poberovskii A. V., Eremenko M., Dyufor G., Evaluation of Ozone Content in Different Atmospheric Layers using Ground-Based Fourier Transform Spectrometry, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 2015, No. 2, pp. 191–200 (in Russian).
2. García O. E., Sanromá E., Schneider M., Hase F., León-Luis S. F., Blumenstock T., Sepúlveda E., Redondas A., Carreño V., Torres C., Prats N., Improved ozone monitoring by ground-based FTIR spectrometry: preprint, *Atmospheric Measurement Technique*, 2021, DOI: 10.5194/amt-2021-67.
3. 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, ground-based FTIR measurements, *J. Quantitative Spectroscopy Radiative Transfer*, 2004, Vol. 87, No. 1, pp. 25–52, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2003.12.008.
4. Liu J., Tarasick D. W., Fioletov V. E., McLinden C., Zhao T., Gong S., Sioris C., Jin J. J., Liu G., Moeini O., A global ozone climatology from ozone soundings via trajectory mapping: a stratospheric perspective, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, Vol. 13, No. 22, pp. 11441–11464, DOI: 10.5194/acp-13-11441-2013.
5. Livesey N., Read W., Wagner P., Froidevaux L., Santee M., Schwartz M., Lambert A., Millán Valle L., Pumphrey H., Manney G., Fuller R., Jarnot R., Knosp B., Lay R., *Earth Observing System (EOS), Aura Microwave Limb Sounder (MLS), Version 5.0x, Level 2 and 3 data quality and description document*, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California, 2022, 183 p., available at https://mls.jpl.nasa.gov/data/v5-0_data_quality_document.pdf.
6. Pougatchev N. S., Connor B. J., Jones N. B., Rinsland C. P., Validation of ozone profile retrievals from infrared ground-based solar spectra, *Geophysical Research Letters*, 1996, Vol. 23, No. 13, pp. 1637–1640, DOI: 10.1029/96GL01501.
7. 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 Y., 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 Mazière 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, *Atmospheric Measurement Technique*, 2020, Vol. 13, No. 2, pp. 789–819, DOI: 10.5194/amt-13-789-2020.
8. Schneider M., Hase F., Blumenstock T., Redondas A., Cuevas E., Quality assessment of O₃ profiles measured by a state-of-the-art ground-based FTIR observing system, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, Vol. 8, No. 18, pp. 5579–5588, DOI: 10.5194/acp-8-5579-2008.
9. Tarasick D. W., Smit H. G. J., Thompson A. M., Morris G. A., Witte J. C., Davies J., Nakano T., Van Malderen R., Stauffer R. M., Johnson B. J., Stübi R., Oltmans S. J., Vömel H., Improving ECC ozonsonde data quality: Assessment of current methods and outstanding issues, *Earth and Space Science*, 2021, Vol. 8, No. 3, e2019EA000914, DOI: 10.1029/2019EA000914.
10. Timofeyev Y., Virolainen Y., Makarova M., Poberovsky A., Polyakov A., Ionov D., Osipov S., Imhasin H., 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.
11. Virolainen Y. A., Timofeyev Y. M., Poberovsky A. V., Intercomparison of satellite and ground-based ozone total column measurements, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2013, Vol. 49, No. 9, pp. 993–1001, DOI: 10.1134/S0001433813090235
12. Waters J. W., Froidevaux L., Harwood R. S., Jarnot R. F., Pickett H. M., Read W. G., Siegel P. H., Cofield R. E., Filipiak M. J., Flower D. A., Holden J. R., Lau G. K., Livesey N. J., Manney G. L., Pumphrey H. C., Santee M. L., Wu D. L., Cuddy D. T., Lay R. R., Loo M. S., Perun V. S., Schwartz M. J., Stek P. C., Thurstans R. P., Boyles M. A., Chandra K. M., Chavez M. C., Chen G.-S., Chudasama B. V., Dodge R., Fuller R. A., Girard M. A., Jiang J. H., Jiang Y., Knosp B. W., LaBelle R. C., Lam J. C., Lee K. A., Miller D., Oswald J. E., Patel N. C., Pukala D. M., Quintero O., Scaff D. M., Van Snyder W., Tope M. C., Wagner P. A., Walch M. J., The Earth observing system microwave limb sounder (EOS MLS) on the aura Satellite, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2006, Vol. 44, No. 5, pp. 1075–1092, DOI: 10.1109/TGRS.2006.873771.