Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 188–191.

УДК 551.510.534:551.507.362.2
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-188
ORCID 0009-0006-9346-5625

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОЗОНА В АТМОСФЕРЕ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ УХОДЯЩЕГО ТЕПЛОВОГО ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ С БОРТА СПУТНИКОВ СЕРИИ «МЕТЕОР-М» № 2

С.В. Акишина[1], А.В. Поляков[1], Я.А. Виролайнен[1]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия, s.akishina@spbu.ru

DETERMINING VERTICAL OZONE DISTRIBUTION IN THE ATMOSPHERE BASED ON MEASUREMENTS OF OUTGOING THERMAL IR RADIATION FROM METEOR-M No. 2 SATELLITES

S.V. Akishina[1], A.V. Polyakov[1], Ya.A. Virolainen[1]

[1]Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia, s.akishina@spbu.ru

Аннотация. В работе представлена методика решения комплексной обратной задачи определения элементов вертикального распределения озона из спектров уходящего теплового ИК-излучения, измеренных прибором ИКФС-2, установленным на борту спутников серии «Метеор-М» № 2. Восстановления вертикального профиля содержания озона осуществляется после предварительного определения других параметров атмосферы и поверхности с использованием физико-математического подхода на основе метода статистической регуляризации. Предложен алгоритм решения обратной задачи для восстановления излучательной способности поверхности, которая выполняет существенную роль для определения излучения в близкой к полосе озона (9.6 мкм) области спектра.

Ключевые слова: озон, излучательная способность поверхности, дистанционное зондирование, уходящее тепловое излучение, ИКФС-2.

Abstract. This study presents a method for solving the complex inverse problem of determining vertical ozone distribution based on spectra of outgoing thermal infrared radiation measured by the IKFS-2 instrument, which is part of the Meteor-M No.2 satellite series. Retrieving of the vertical ozone profile is carried out after preliminary determination of other atmospheric and surface parameters using a physical-mathematical approach based on the optimal estimation method. We present an algorithm for solving the inverse problem to retrieve the surface emissivity, which is essential for determining radiation in the spectral range close to the ozone band (9.6 μm).

Keywords: ozone, surface emissivity, remote sensing, outgoing thermal radiation, IKFS-2.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия глобальная проблема изменения климата, вызванного, в первую очередь, изменением состава атмосферы, является одной из ключевых проблем будущего развития жизни на Земле. Наряду с влиянием на климат парниковых газов, таких как углекислый газ и метан, существенное влияние на термический режим атмосферы оказывает и атмосферный озон. Именно наличие озонового слоя приводит к характерной форме вертикального профиля температуры в земной атмосфере, с минимумом температуры в тропопаузе и ее стратосферным максимумом. Кроме того, озон защищает биосферу Земли, включая человека и сельское хозяйство, от губительного УФ-излучения.

Вместе с тем, озон в тропосфере — токсичный загрязнитель, поэтому мониторинг всего вертикального распределения озона в атмосфере Земли занимает существенное место, особенно с учетом различных сценариев и прогнозов восстановления разрушенной озоносферы. Однако в настоящее время возможность получения данных об озоне, в частности, его вертикальном распределении в полярных областях (Арктика и Антарктика) ограничена. Специализированные приборы для мониторинга озона (например Ozone Monitoring Instrument на спутнике EOS-Aura [Levelt et al., 2006] и TROPOspheric Monitoring Instrument на спутнике Sentinel-5P [Veefkind et al., 2012]) способны получать данные об озоне только при наличии солнечного излучения. Кроме того, в близкое к полярной ночи время при низком Солнце погрешности полученных значений содержания озона и географической привязки этих данных растут. Среди ограничений выделим также рост погрешностей результатов спектральных измерений в УФ-области, обусловленный меньшей чувствительностью к изменчивости озона на высотах 10–20 км [Fu et al., 2018; Mettig et al., 2022].

Данная работа представляет описание методики получения данных о вертикальном распределении озона по спектрам уходящего теплового ИК-излучения, измеренным российским спутниковым аппаратом ИКФС-2, что позволяет выполнять мониторинг содержания атмосферного озона без указанных ограничений.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

На борту серии российских метеорологических спутников «Метеор-М» № 2 установлен гиперспектральный ИК-фурье-спектрометр ИКФС-2 [Asmus et al., 2014], измеряющий уходящее тепловое ИК излучение в спектральном диапазоне 660–2000 см$^{-1}$. Солнечно-синхронная околополярная орбита космических аппаратов этой серии способствует получению максимума информации в высокоширотной зоне за счет высокой плотности измерений.

В представляемом алгоритме интерпретация спектральных измерений осуществляется в два этапа. Нелинейный регрессионный подход, основанный на методе искусственных нейронных сетей (ИНС) [Поляков, 2014], используется в алгоритме для получения начального приближения к решению. На завершающем этапе используется физико-математический подход, основанный на методе статистической регуляризации (англ. Optimal Estimation). Его суть состоит в последовательном уточнении решения на основе одновременной минимизации как разности измеренного и рассчитанного на предыдущем приближении к решению спектров, так и отличия искомого решения от априорной статистики. Применение физико-математического подхода для получения профилей озона требует предварительно восстановления профилей температуры $T(z)$, водяного пара $Q(z)$, температуры поверхности T_s и излучательной способности поверхности (ИСП), что реализовано в алгоритме. Такой комплексный подход позволяет восстанавливать содержание озона, не привлекая данные других спутниковых и наземных систем.

Для уменьшения размерности задачи решение происходит в пространстве главных компонент (ГК) профиля озона. ГК представляют собой коэффициенты разложения вектора по собственным векторам ковариационной матрицы.

В работе [Акишина, 2026] представлена первая версия алгоритма восстановления вертикальных профилей содержания озона по данным измерений ИКФС-2. В данном исследовании параметры методики восстановления были усовершенствованы. Следующая оптимизированная версия алгоритма представлена в табл. 1.

В настоящей версии определение ИСП реализовано на основе применения метода статистической регуляризации. В качестве начального приближения используются данные базы CAMEL (Combined ASTER MODIS Emissivity over Land) [Borbas et al., 2018] со среднемесячными значениями за каждый год измерений. Априорная излучательная способность и ее ковариационная матрица определены на основе данных базы CAMEL для поверхности суши и на основе данных, полученных в работе [Huang et al., 2016], — для водной поверхности. Для построения априорной информации были взяты значения ИСП по всей земной поверхности за 2015–2022 гг. (время работы ИКФС-2 на первом спутнике серии «Метеор-М» № 2).

В новой версии алгоритма уточнены также спектральные каналы для определения вертикального профиля содержания водяного пара и температуры поверхности. В работе [Акишина, 2026] было выявлено, что в силу наблюдаемой зависимости профилей температуры, содержания водяного пара и температуры поверхности их комплексное определение затруднено. Ряд экспериментов показал, что оптимальным подходом является повторное уточнение (восстановление) этих параметров перед итоговым определением содержания озона. В новой версии мы расширили ряд повторных восстановлений (см. табл. 1), чтобы добиться сходимости решения задачи по всем определяемым параметрам.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для валидации получаемых вертикальных профилей содержания озона были отобраны измерения озонозондов за 2015–2022 гг. Для отбора безоблачных случаев измеренные спектры сравнивались с рассчитанными по данным NCEP GFS излучениями в двух наиболее прозрачных каналах окна прозрачности. Критерии рассогласования по времени и пространству составляют 12 ч и 70 км. Решения с нормированной на шум измерений невязкой >2 в спектральных каналах ИСП были отфильтрованы как неудовлетворяющие критерию качества. Таким образом, было отобрано 4347 пар согласованных измерений ИКФС-2 и озонозондов. В табл. 2 представлены средние разности (СР) и стандартные отклонения разностей (СОР) содержания озона по разным атмосферным слоям и широтам результатов применения представленного алгоритма интерпретации спектров ИКФС-2 и сглаженных вертикальных профилей озонозондирования. Сглаживание необходимо для согласования вертикального разрешения двух методов измерений.

Таблица 1. Алгоритм восстановления вертикальных профилей содержания озона по данным измерений ИКФС-2.

Решение прямой задачи	RTTOV v13.2
Начальное приближение, число ГК (O_3)	Метод ИНС, 5 ГК
Спектральные каналы (O_3)	1005–1054 см$^{-1}$, исключая каналы с интенсивными линиями водяного пара и интервал 1038–1042.5 см$^{-1}$
Априорная информация (O_3)	Данные озонозондирования за 2015–2022 гг. (профили с измерениями от 1000 до 6 гПа)
Приземное давление	NCEP GFS
Профили $Q(z)$, $T(z)$ и T_s	Метод статистической регуляризации
ИСП (E)	Метод статистической регуляризации
Порядок восстановления	E, $Q(z)$, $T(z)$, T_s, $Q(z)$, E, T_s, $T(z)$, $Q(z)$, E, T_s, $Q(z)$, E, T_s, $T(z)$, $Q(z)$, E, T_s, $O_3(z)$

Таблица 2. Средние разности (зонд ИКФС-2) и их стандартные отклонения содержания озона в разных широтных зонах за 2015–2022 гг.

	0°–30°		30°–60°		60°–90°	
слой	СР, %	СОР, %	СР, %	СОР, %	СР, %	СОР, %
30–10 гПа	3.9 ± 0.8	7.7	3.9 ± 0.4	11.5	4 ± 1	20
80–30 гПа	-1.6 ± 0.9	9.7	-0.5 ± 0.4	9.0	-0.6 ± 0.6	12.9
p0–10 гПа	3.6 ± 0.6	4.8	4.0 ± 0.4	8.1	4.2 ± 0.5	9.5

	0°–30°		30°–60°		60°–90°	
слой	СР, е.Д.	СОР, е.Д.	СР, е.Д.	СОР, е.Д.	СР, е.Д.	СОР, е.Д.
30–10 гПа	6.4 ± 0.7	4.7	7.6 ± 0.5	9.5	8.8 ± 0.6	9.3
80–30 гПа	-2.5 ± 0.5	4.4	-0.4 ± 0.2	4.8	0.8 ± 0.2	3.8
p0–10 гПа	-1.3 ± 0.3	3.0	-0.8 ± 0.1	2.7	0.6 ± 0.1	1.6
Кол-во пар	431				2385	

±ДИ — доверительный интервал (95 %)

В области верхней тропосферы/нижней стратосферы (слой 220–80 гПа) предлагаемая методика обработки измерений ИКФС-2 завышает содержание озона относительно данных озонозондирования. Подобное завышение наблюдается и в результатах измерений другими аналогичными ИКФС-2 приборами (IASI, CrIS) [Mettig et al., 2022; Boynard et al., 2016]. Это необходимо учитывать при дальнейшем использовании данных, например, при ассимиляции их в модели атмосферы и анализе происходящих процессов. Хотя образование тропосферного озона у поверхности имеет первостепенное значение по сравнению с его переносом из стратосферы [Monks et al., 2015], согласно исследованиям [Li et al., 2024], более 25 % тропосферного озона связано с переносом воздуха из стратосферы. Однако данное явление до сих пор не имеет однозначного описания с точки зрения влияющих процессов. Таким образом, точное определение содержания озона в области верхней тропосферы/нижней стратосферы является одной из первостепенных задач.

Отметим, что относительно результатов валидации, представленных в работе [Акишина, 2026], уточнение ИСП и другие описанные выше изменения алгоритма по определению вертикальных профилей содержания озона привели к уменьшению СОР данных в области тропосферы (слои 220–80 гПа и p0–220 гПа). Кроме того, количество случаев с удовлетворительным критерием качества (по значению нормированной невязки) увеличилось практически в три раза.

В качестве примера на рисунке сопоставляются вертикальные профили содержания озона, полученные 18 марта 2020 г. на основе измерений озонозонда на станции Resolute и с помощью прибора ИКФС-2 вблизи станции. Два профиля хорошо согласуются с учетом разного вертикального разрешения методов. Можно заметить сильное уменьшение содержания озона на высотах выше 100 гПа относительно представленного среднего профиля. Отличие профилей объясняется пространственным смещением зонда в ходе его подъема. Известно также, что озоновые аномалии имеют довольно резкие границы, связанные с границами существования полярного стратосферного вихря — значит, возможны резкие изменения содержания озона. Общее содержание озона, полученное интегрированием профилей, по данным ИКФС-2 составило 216 е.Д., по данным озонозондирования — 232 е.Д.

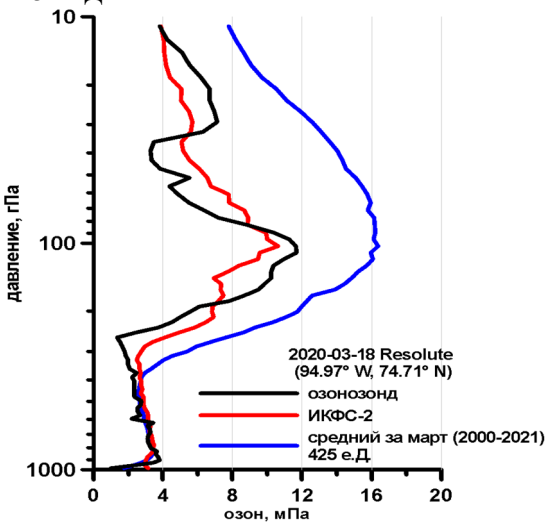

Рис. 1. Вертикальное распределение озона по данным измерений озонозонда и ИКФС-2 вблизи станции Resolute (74.71°N) 18 марта 2020 года. Для сравнения представлен средний профиль содержания озона (осреднение за март 2000-2021 годов)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена новая версия алгоритма решения комплексной обратной задачи восстановления вертикального распределения озона по спектрам уходящего теплового ИК-излучения, измеренным прибором ИКФС-2. В основе алгоритма лежит уточнение вертикального профиля озона на основе физико-математического подхода, решение обратной задачи реализовано в пространстве главных компонент.

В представленной версии методики разработан алгоритм уточнения ИСП на основе метода статистической регуляризации. В новой версии уточнены также спектральные каналы для восстановления вертикального профиля водяного пара и температуры поверхности.

Обработаны измерения ИКФС-2 за 2015–2022 гг., результаты сопоставлены с данными озонозондирования. Уточнения методики привели к уменьшению СОР содержания озона в области тропосферы (слои 220–80 гПа и р0–220 гПа) и увеличению количества случаев с удовлетворительным критерием качества восстановленных данных.

Работа выполнена при поддержке СПбГУ, шифр проекта 124032000025-1.

Благодарим Научно-исследовательский центр «Планета» за предоставление доступа к результатам спектральных измерений ИКФС-2. Благодарим рабочую группу HEGIFTOM в рамках проекта TOAR-II за предоставление доступа к гармонизированным данным озонозондовых измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Акишина С.В. Методика определения вертикального распределения атмосферного озона на основе измерений прибора ИКФС-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2026. Т. 23, № 2. С. 71–83.

Поляков А. В. Использование метода искусственных нейронных сетей при восстановлении вертикальных профилей атмосферных параметров. // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 01. С. 34–39.

Asmus A.A., Zagrebaev V.A., Makridenko L.A., Milekhin O.E., Solovyev V.I., Uspenskii A.B., Frolov A.V., Khailov M.N. Meteorological satellites based on Meteor-M polar orbiting platform // Russ. Meteorol. Hydrol. 2014. V. 39, N. 12. P. 787–794.

Borbas E.E., Hulley G., Feltz M., Knuteson R., Hook S. The Combined ASTER MODIS Emissivity over Land (CAMEL) Part 1: Methodology and high spectral resolution application // Remote Sensing. 2018. V. 10, N. 4. Article 643.

Boynard A., Hurtmans D., Garane K., Goutail F., Hadji-Lazaro J., et al. Validation of the IASI FORLI/EUMETSAT ozone products using satellite (GOME-2), ground-based (Brewer–Dobson, SAOZ, FTIR) and ozonesonde measurements // Atmos. Meas. Tech. 2018. V. 11. P. 5125–5152.

Huang X.L., Chen X.H., Zhou D. K., Liu X. An observationally based global band-by-band surface emissivity dataset for climate and weather simulations // J. Atmospheric Sciences. 2016. V. 73. P. 3541–3555.

Fu D., Kulawik S.S., Miyazaki K., Bowman K.W., Worden J.R., Eldering A., et al. Retrievals of tropospheric ozone profiles from the synergism of AIRS and OMI: methodology and validation // Atmos. Meas. Tech. 2018. V. 11. P. 5587–5605.

Levelt P.F., van den Oord G.H.J., Dobber M.R., et al. The Ozone Monitoring Instrument // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2006. V. 44. P. 1093–1101.

Li Yetong, Yan Xia, Fei Xie, Yingying Yan. Influence of stratosphere-troposphere exchange on long-term trends of surface ozone in CMIP6 // Atmospheric Res. 2024. Vol. 297. Article 107086.

Mettig N., Weber M., Rozanov A., Burrows J.P., Veefkind P., Thompson A.M., et al. Combined UV and IR ozone profile retrieval from TROPOMI and CrIS measurements // Atmos. Meas. Tech. 2022. V. 15. P. 2955–2978.

Monks P.S., Archibald A.T., Colette A., Cooper O., Coyle M., et al. Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer // Atmos Chem Phys. 2015. V. 15. P. 8889–8973.

Veefkind J., Aben I., McMullan K., et al. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications // Remote Sens. Environ. 2012. V. 120. P. 70–83.