

# Методика определения вертикального распределения атмосферного озона на основе измерений прибора ИКФС-2

С. В. Акишина

Санкт-Петербургский государственный университет  
Санкт-Петербург, 199034, Россия  
E-mail: s.akishina@spbu.ru

Различие роли озона в тропосфере и стратосфере требует контроля его содержания в разных атмосферных слоях. В работе впервые представлена методика определения элементов вертикального распределения озона из спектров уходящего теплового инфракрасного излучения, измеренных прибором ИКФС-2 (инфракрасный фурье-спектрометр). Решение обратной задачи восстановления вертикального профиля содержания озона осуществляется в несколько этапов на основе различных методов решения некорректных обратных задач. Для итогового уточнения вертикального распределения озона используется физико-математический подход, реализованный на основе метода статистической регуляризации. Прямая задача решается с применением радиационной модели переноса излучения RTTOV (*англ.* Radiative Transfer for TIROS Operational Vertical Sounder). Для оценок погрешностей и оптимизации алгоритма проведены замкнутые численные эксперименты с использованием модельных спектров ИКФС-2. По результатам замкнутых экспериментов в среднем по всем широтным зонам погрешность определения общего содержания озона составляет 2,3 %, погрешность определения тропосферного содержания озона равна 5,2 е. Д. Наблюдается рост погрешностей восстановления элементов вертикального распределения озона в области высоких широт. На основе разработанной методики обработаны измеренные спектры ИКФС-2. По результатам сопоставления восстановленных профилей с измерениями озонозондов предложенный алгоритм обработки спектров ИКФС-2 недооценивает содержание озона в слое тропосферы и нижней стратосферы и переоценивает в области тропопаузы (слой 220–80 гПа), что наблюдается также по данным измерений инфракрасного зондировщика IASI (*англ.* Infrared Atmospheric Sounding Interferometer).

**Ключевые слова:** вертикальное распределение озона, уходящее тепловое излучение, ИКФС-2, RTTOV

Одобрена к печати: 16.12.2025  
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-71-83

## Введение

Определение содержания озона как в стратосфере, так и в тропосфере имеет большое значение для исследования динамики атмосферных процессов, оценки климатических изменений и моделирования будущего состояния атмосферы. В результате реакций цикла Чепмена (Chapman, 1930) в стратосфере устанавливается равновесие, при котором количество образующегося и разрушающегося озона приблизительно равно. Однако в 80-х гг. прошлого столетия обнаружено уменьшение толщины озонового слоя, связанное с активным производством и использованием озоноразрушающих веществ. Хотя исследования показывают рост содержания стратосферного озона за последние три десятилетия после принятия Монреальского протокола (Chipperfield, Bekki, 2024), скорость уменьшения содержания озоноразрушающих веществ последнее время нестабильна, поэтому ожидаемое к середине XXI в. восстановление озонового слоя до уровня 1980 г. сдвигается к концу столетия (Scientific..., 2022).

В тропосфере озон образуется в результате фотохимических реакций с участием прекурсоров CO, NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub> (Белан, 1996), некоторое количество озона может переноситься из стратосферы. В отличие от озона в стратосфере, тропосферный озон является токсичным загрязнителем атмосферы и вносит вклад до 22 % (WHO..., 2021) в парниковый эффект планеты. Время жизни тропосферного озона составляет от нескольких часов до нескольких недель в зависимости от уровня загрязнённости приземного слоя химически активными в отношении озона примесями (Prather, Zhu, 2024).

Таким образом, в связи с разным временем жизни, механизмами образования и разрушения озона, а также различием трендов изменения содержания и роли озона в разных атмосферных слоях, важно получать информацию не только об общем содержании озона (ОСО) и его временной изменчивости, но и о его пространственном распределении. Активное развитие спутниковых технологий и спектроскопических методов, включая совершенствование алгоритмов решения обратных задач (РОЗ) дистанционного зондирования атмосферы, позволяет повышать точность и пространственное разрешение измерений атмосферных параметров, в том числе содержания озона.

Существуют различные методы измерения как ОСО, так и вертикального распределения озона. Наилучшим вертикальным разрешением (100–150 м) обладает метод озонозондирования, при котором производятся прямые измерения парциального давления озона. Уровень подъёма обычно не превышает 6 гПа. Озонозонд представляет собой метеорологический радиозонд, дополнительно оборудованный блоком измерения парциального давления озона на основе электрохимической концентрационной ячейки (ЕСС-ячейки (*англ.* Electrochemical Concentration Cells)). Согласно требованиям к погрешностям измерений озонозондов, см. отчёт Глобальной системы наблюдений за атмосферой (*англ.* Global Atmospheric Watch) (Smit, Thompson, 2021), неопределённость данных должна быть в пределах 5 % в тропосфере и 5–10 % в стратосфере. Однако малое содержание озона, например, в тропосферном слое тропических широт, приводит к росту погрешности измерений озонозондов до 15 % (Witte et al., 2018), что связано с приближением сигнала датчиков ЕСС-ячеек к нижнему пределу чувствительности.

Информацию о глобальном распределении озона предоставляют спутниковые методы зондирования атмосферы. Например, измерения приборов ACE-FTS (*англ.* Atmospheric Chemistry Experiment Fourier Transform Spectrometer) и MLS (*англ.* Microwave Limb Sounder), обладающие касательной/лимбовой геометрией измерений, позволяют получать вертикальные профили содержания газов с вертикальным разрешением около 4 км (Bernath et al., 2005). Однако в силу наличия облачности, аэрозолей и дымок различного происхождения измерения не доступны на высотах ниже 5–6 км.

Несмотря на разнообразие методов определения содержания озона с высоким вертикальным разрешением, измерения методом уходящего теплового инфракрасного (ИК) излучения также предоставляют уникальную информацию об атмосферном озоне. Главными преимуществами метода считаются сравнительно высокое горизонтальное разрешение, быстрое покрытие измерениями всей земной поверхности в течение суток, возможность измерений при отсутствии солнечного излучения, включая период ночи как обычной, так и полярной, представляющей особый интерес в связи с зимне-весенним разрушением озона в области полярных стратосферных вихрей (Scientific..., 2018). Кроме того, в ближайшие годы приборы ACE-FTS и MLS будут выведены из эксплуатации по причине окончания срока службы (Chipperfield, Bekki, 2024), что подчёркивает важность оптимизации алгоритмов работы с измерениями других приборов и методов дистанционного зондирования.

Элементы вертикального распределения озона в атмосфере успешно получают из измерений уходящего теплового ИК-излучения зарубежными спутниковыми приборами AIRS (*англ.* Atmospheric Infra-Red Sounder), CrIS (*англ.* Cross-track Infrared Sounder), IASI (*англ.* Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) (Boynard et al., 2016; Mettig et al., 2022). На борту российских метеорологических спутников серии «Метеор-М» № 2 установлен сходный по своим основным характеристикам гиперспектральный инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2 (Asmus et al., 2014). Алгоритм РОЗ и результаты его применения для восстановления элементов вертикального распределения озона из измерений ИКФС-2 будут впервые представлены в данной работе.

## Описание измерений ИКФС-2

Прибор ИКФС-2, разработанный исследовательским центром имени М. В. Келдыша, является частью оборудования космических аппаратов серии «Метеор-М» № 2, работающих на солнечно-синхронной орбите. Фурье-спектрометр ИКФС-2 измеряет интенсивность уxo-

дящего теплового ИК-излучения Земли в надир с полосой сканирования шириной от 1000 до 2500 км и пространственным разрешением около 35 км. Измеряемые спектры включают 2701 спектральный канал со спектральным разрешением  $0,7 \text{ см}^{-1}$  в спектральном интервале  $660\text{--}1210 \text{ см}^{-1}$  и  $1,4 \text{ см}^{-1}$  в интервале  $1210\text{--}2000 \text{ см}^{-1}$ , функция аподизации — функция Гаусса (Козлов и др., 2018). Прибор оснащён только приёмником излучения CdHgTe, поэтому его чувствительность снижается в коротковолновой области и шум возрастает. Как показано в работе (Козлов и др., 2022), радиометрические характеристики прибора в длинноволновом диапазоне  $660\text{--}1210 \text{ см}^{-1}$  высоки, что позволяет ожидать удовлетворительную информативность измерений в области полосы поглощения озона  $980\text{--}1080 \text{ см}^{-1}$ .

Измерения ИКФС-2 используются преимущественно в интересах оперативной метеорологии (Цырульников и др., 2019) и для мониторинга содержания озона. Относительно определения ОСО и тропосферного содержания озона из спектров ИКФС-2 разработан нейронно-сетевой алгоритм РОЗ, представленный в работах (Polyakov et al., 2023, 2024). Среднеквадратичная погрешность определения ОСО за период с 2015 по 2022 г. на основе этого алгоритма не превышает 3 %. Для слоёв ниже 400 и 300 гПа погрешности аппроксимации составили менее 2,8 и 3,8 е. Д. соответственно (Polyakov et al., 2024).

### Решение прямой задачи

В алгоритме РОЗ необходимо многократно решать и прямую задачу. Существует большое количество различных радиационных кодов для моделирования измерений в широком диапазоне длин волн. В представляемом алгоритме используется быстрая модель переноса излучения RTTOV v13.2 (*англ.* Radiative Transfer for TOVS), основанная на аппроксимации результатов точного моделирования в LBLRTM (*англ.* Line-By-Line Radiative Transfer Model). Версия 13 (Saunders et al., 2018) является развитием модели переноса излучения для TOVS (*англ.* TIROS Operational Vertical Sounder), первоначально разработанной в ECMWF (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) в начале 1990-х гг. Запущенный в 1960 г. TIROS-1 (*англ.* Television InfraRed Observation Satellite) стал первым метеорологическим спутником, предназначенным для наблюдений за облачным покровом и атмосферными процессами, сейчас название фактически стало нарицательным.

Радиационная модель RTTOV позволяет быстро рассчитывать излучение для спутниковых приборов, измеряющих излучение в надир, с учётом профиля температуры, концентрации газов, аэрозолей, а также гидрометеорологических условий и свойств поверхности. Совокупность всех учитываемых параметров называют вектором состояния атмосферы. Обязательным для расчётов газом является только водяной пар, дополнительно можно изменить содержание следующих газов:  $\text{O}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{SO}_2$ .

### Замкнутые численные эксперименты. Определение состояния атмосферы и поверхности

Для оценок погрешностей РОЗ, анализа работы методики и оптимизации её параметров проведены замкнутые численные эксперименты. При постановке экспериментов все параметры атмосферы и поверхности заданы заранее, назовём их исходными. Каждый замкнутый численный эксперимент проводился для целого набора состояний, а результат эксперимента — осреднение по всему набору. Стандартное отклонение разности (COP) исходного и восстановленного вертикального профиля озона (см. формулу (1)) характеризует погрешность измерений ИКФС-2 относительно профиля содержания озона и стало главным критерием оптимальности для выбора параметров алгоритма РОЗ.

$$\text{COP} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n-1}}, \quad (1)$$

где  $\bar{d}$  — средняя разность восстановленного  $O_{3 \text{ восст}}$  и исходного  $O_{3 \text{ исход}}$  элементов вертикального распределения озона;  $d_i = O_{3 \text{ восст}} - O_{3 \text{ исход}}$ ;  $n$  — число состояний атмосферы в наборе.

База исходных параметров атмосферы и поверхности включает 3960 состояний атмосферы, зарегистрированных при запусках озонозондов за 2015–2022 гг. Для более полного учёта наблюдаемых вертикальных особенностей всех параметров выбраны только случаи измерений зондов в диапазоне от 1000 до 10 гПа. Выше точки подъёма зонда профили дополнены соответствующими данными реанализа NCEP GFS (*англ.* National Centers for Environmental Prediction Global Forecast System) (от 10 до 1 гПа) и средним профилем базы SeeBor (*англ.* Seemann-Borbas) (Borbas et al., 2005) (от 1 до 0,005 гПа). Профили температуры и содержания водяного пара взяты из тех же данных радиозондирования. Информация о приземном давлении и температуре поверхности определена по данным реанализа NCEP GFS. Излучательная способность поверхности (ИСП) взята одинаковой для всех состояний, равной 0,98 во всех спектральных каналах, что близко к ИСП водной поверхности, которая достаточно высока и постоянна по спектру (Borbas et al., 2018). Спектры исходных состояний рассчитаны с помощью модели быстрого расчёта переноса излучения RTTOV v13.2. Производные излучения по параметрам атмосферы и поверхности, необходимые для поиска осредняющих ядер задачи и сглаживания исходного профиля, также рассчитываются на основе кода RTTOV.

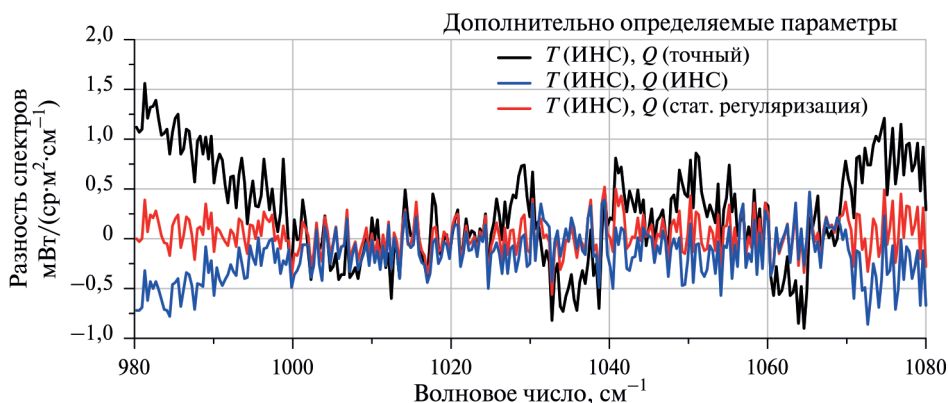
Решение обратных задач в алгоритме осуществляется в несколько этапов на основе различных методов решения некорректных обратных задач. Для получения начального приближения к решению используется нелинейный регрессионный подход, основанный на методе искусственных нейронных сетей (ИНС). Применение метода ИНС существенно сокращает время вычислений, однако не позволяет получать адекватные результаты в случаях, статистически не описываемых набором данных обучения ИНС. Искусственная нейронная сеть относительно профилей озона обучена на профилях базы данных SeeBor и спектрах, смоделированных с использованием LBLRTM (см. подробнее в работе (Поляков, 2014)). На завершающем этапе РОЗ используется физико-математический подход, основанный на методе статистической регуляризации (*англ.* Optimal Estimation) (Rodgers, 2000). Его суть состоит в последовательном уточнении решения исходя из одновременной минимизации как разности измеренного и рассчитанного на предыдущем приближении к решению спектра, так и отличия искомого решения от априорной статистики (Поляков, 1996). Средний априорный профиль и ковариационная матрица озона определены на основе данных озонозондирования по измерениям во всех широтных зонах за 2015–2022 гг. и представлены в работе (Akishina et al., 2025). Отметим, что расчёты относительно содержания озона, описанные в настоящем пункте, выполнены для всех спектральных каналов ИКФС-2 в интервале 980–1080  $\text{см}^{-1}$ .

Для уменьшения размерности задачи используется метод главных компонент (ГК) как по отношению к вертикальным профилям, так и в отношении спектров (при получении начального приближения методом ИНС). Далее задача решается в пространстве ГК, где профиль представляет собой вектор небольшой размерности в пространстве ГК, при этом априорная ковариационная матрица диагональная.

Предварительно перед получением профилей озона восстанавливаются или определяются из баз данных профили температуры, водяного пара, температура поверхности и другие параметры. Результаты замкнутых численных экспериментов не учитывают неопределённости профилей содержания газов  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ , так как их поглощение не оказывает мешающего эффекта на восстановление озона. Кроме того, не учтена неопределённость значений приземного давления  $p_0$  в силу их наличия в данных NCEP GFS, использующихся при обработке измерений ИКФС-2, и неопределённость ИСП, значения которой определяются из базы данных (Borbas et al., 2017).

В эксперименте, когда все параметры для РОЗ заданы точными (исходными), СОР исходного и восстановленного профиля характеризуют оценки составляющих погрешности, связанные главным образом с ошибкой сглаживания и спектральным шумом измерений. Суммарная погрешность минимизируется подбором оптимального числа ГК разложения профиля озона. Выявлено, что оптимально использование 5 ГК.

Далее число не задаваемых точно, а определяемых в ходе РОЗ параметров увеличивалось. Помимо содержания озона, стали восстанавливаться также профили температуры  $T(z)$  и содержания водяного пара  $Q(z)$  (здесь и далее  $z$  — вертикальная координата). На *рисунке* показана разность исходного и рассчитанного по восстановленному состоянию спектров для одного из исходных состояний. Видно, что коррекция содержания водяного пара на основе метода ИНС и уточнение его с использованием метода статистической регуляризации позволяет уменьшить среднюю разность спектров в области крыльев полосы поглощения озона.



Разность исходного и рассчитанного по восстановленному состоянию спектров в интервале полосы озона для трёх замкнутых численных экспериментов с разными способами (указаны в скобках) предварительного определения профилей температуры  $T$  и водяного пара  $Q$ .  $T_s$  и другие параметры заданы точными

Необходимым является предварительное определение не только вертикальных профилей температуры и водяного пара, но и температуры поверхности  $T_s$ . Кроме того, как показано на примере  $Q(z)$  на *рисунке*, уточнение профиля водяного пара на основе метода статистической регуляризации ведёт к уменьшению разности исходного и рассчитанного спектра в области полосы поглощения озона, а значит, и к уменьшению погрешности восстановления вертикального профиля озона. В атмосфере наблюдается зависимость между профилями температуры и содержания водяного пара, между температурой поверхности и профилем температуры, а также эффект «экранирования» поверхности сосредоточенным вблизи неё водяным паром, что в совокупности затрудняет комплексное определение всех параметров. Отсюда приходим к выводу о необходимости повторного уточнения этих характеристик перед итоговым восстановлением содержания озона. Был проведён ряд экспериментов, в которых рассмотрены несколько последовательностей предварительного определения  $Q(z)$ ,  $T(z)$  и  $T_s$  с их повторным уточнением. Установлено, что оптимальным является восстановление параметров в порядке:  $Q(z)$ ,  $T(z)$ ,  $T_s$ ,  $Q(z)$ ,  $T(z)$ ,  $T_s$ . Погрешность определения ОСО, рассчитываемая как СОР исходных и восстановленных ОСО (см. формулу (1)), в этом эксперименте составила 11 е. Д. (3,7%). Общее содержание озона, как и содержание озона в слоях, вычисляется как интеграл вертикального распределения по выделенному высотному интервалу.

### Замкнутые численные эксперименты. Набор спектральных каналов

Не все спектральные каналы в диапазоне 980–1080 см<sup>-1</sup> несут достаточно информации о содержании атмосферного озона, свободной от помех со стороны влияния мешающих газов. Например, в области полосы озона наблюдаются отдельные линии водяного пара, которые в условиях высокой влажности атмосферы могут вносить дополнительные погрешности и мешать восстановлению содержания озона. Кроме того, следует исключить «прозрачную»

область центра полосы поглощения озона ( $1038-1042,5 \text{ см}^{-1}$ ), где интенсивность поглощения озона уменьшается. Также выявлено, что неопределённость температуры поверхности ведёт к увеличению невязки в области крыльев полосы озона, вне интервала  $1005-1054 \text{ см}^{-1}$ . Таким образом, использование всего спектрального диапазона не оптимально и каналы, связанные с большой невязкой, были исключены (см. итоговые спектральные интервалы в *табл. 2*).

### Результаты замкнутых численных экспериментов

Оценки итоговой средней разности и COP содержания озона для различных широтных зон и атмосферных слоёв представлены в *табл. 1*. Количество слоёв и их границы выделены согласно среднему по всем широтам числу степеней свободы сигнала DOFS (*англ.* degrees of freedom for the signal) из анализа осредняющих ядер измерений ИКФС-2, представленных в работе (Polyakov et al., 2025). Среднее DOFS для всех широт и сезонов равно 4. Заметим, что для нижних атмосферных слоёв, где содержание озона сравнительно мало, будем рассматривать абсолютные величины (в е.Д.), относительно стратосферных слоёв — относительные (в %). Отдельно в *табл. 1* приведена разность для ОСО и тропосферного содержания озона (слой  $p_0-300$  гПа). Полученные COP есть оценки погрешности алгоритма относительно определения элементов вертикального распределения озона из измерений ИКФС-2.

*Таблица 1.* Погрешности восстановления содержания озона в разных атмосферных слоях и широтных зонах. Определяемые параметры:  $O_3(z)$ ,  $T(z)$ ,  $Q(z)$  и  $T_s$ . Неопределённость ИСП, содержания других газов и приземного давления  $p_0$  не учтены

Широта	0–90°		0–30°		30–60°		60–90°	
Слой	$\Delta \pm \text{ДИ, \%}$	COP, %	$\Delta \pm \text{ДИ, \%}$	COP, %	$\Delta \pm \text{ДИ, \%}$	COP, %	$\Delta \pm \text{ДИ, \%}$	COP, %
30–10 гПа	$-0,9 \pm 0,2$	7,9	$-0,2 \pm 0,3$	5,0	$-1,3 \pm 0,4$	8,5	$-1,6 \pm 0,8$	12,1
80–30 гПа	$-2,7 \pm 0,4$	11,7	$1,8 \pm 0,5$	8,1	$-3,0 \pm 0,5$	9,7	$-5,1 \pm 0,9$	12,2
ОСО	$1,5 \pm 0,1$	2,3	$3,2 \pm 0,2$	2,7	$1,0 \pm 0,1$	1,7	$0,7 \pm 0,2$	2,5
Слой	$\Delta \pm \text{ДИ, е.Д.}$	COP, е.Д.	$\Delta \pm \text{ДИ, е.Д.}$	COP, е.Д.	$\Delta \pm \text{ДИ, е.Д.}$	COP, е.Д.	$\Delta \pm \text{ДИ, е.Д.}$	COP, е.Д.
220–80 гПа	$1,6 \pm 0,2$	6,8	$0,4 \pm 0,2$	3,2	$2,6 \pm 0,3$	6,6	$1,5 \pm 0,7$	9,8
$p_0 - 220$ гПа	$-0,1 \pm 0,2$	6,3	$0,4 \pm 0,3$	6,1	$-1,2 \pm 0,3$	6,0	$1,3 \pm 0,5$	6,9
$p_0 - 300$ гПа	$-0,5 \pm 0,2$	5,2	$1,8 \pm 0,3$	5,7	$-1,0 \pm 0,2$	4,9	$1,9 \pm 0,3$	4,0
Количество пар	3960		1214		1846		900	

**Примечание:**  $\Delta$  — средняя разность, ДИ — доверительный интервал (95 %). Серым цветом выделены отдельно оценки погрешности определения ОСО (в %) и содержания озона в тропосферном слое  $p_0-300$  гПа (в е.Д.).

Таким образом, методика восстановления вертикального распределения озона была оптимизирована. Параметры итогового алгоритма представлены в *табл. 2*.

Рассмотрим *табл. 1*. Для всех атмосферных слоёв наблюдается широтный ход COP исходного и восстановленного состояния, а именно рост погрешности определения содержания озона от низких к высоким широтам. Увеличение погрешности связано с уменьшением информативности измерений уходящего теплового ИК-излучения в полярных областях (Polyakov et al., 2025). Прирост информативности может происходить как за счёт уточнения априорной информации, так и за счёт измерений, что и наблюдается в тропических широтах (0–30°) в силу роста величины градиента профиля температуры. В обоих случаях увеличение суммарной информации приведёт к уменьшению погрешности.

Из *табл. 1* можем заключить, что в случае точного определения ИСП погрешность восстановления ОСО с использованием представленного в *табл. 2* алгоритма в среднем для всех

широт достигает 2,3 %, что соответствует требованиям Глобальной системы наблюдения за климатом (см. <https://gcos.wmo.int/site/global-climate-observing-system-gcos/essential-climate-variables/ozone>) и согласуется с погрешностями восстановления ОСО из спектров ИКФС-2, полученных с применением ИНС (Polyakov et al., 2023, 2025).

Таблица 2. Итоговый алгоритм восстановления вертикальных профилей содержания озона по данным измерений ИКФС-2

Решение прямой задачи	RTTOV v13.2 (101 уровень давления)
Начальное приближение; число ГК	Метод ИНС; 5 ГК
Спектральные каналы	1005–1054 см <sup>-1</sup> , исключая каналы с интенсивными линиями водяного пара и интервал 1038–1042,5 см <sup>-1</sup>
Приземное давление	NCEP GFS
Профили $Q(z)$ , $T(z)$ и $T_s$	Метод статистической регуляризации. Восстановление в порядке: $Q(z)$ , $T(z)$ , $T_s$ , $Q(z)$ , $T(z)$ , $T_s$
Априорная информация (средний профиль и ковариационная матрица)	На основе данных озонзондирования за 2015–2022 гг. (отобраны профили с измерениями от 1000 до 6 гПа)
ИСП	База данных (Vorbach et al., 2017)

## Обработка измеренных спектров ИКФС-2

Станции озонзондирования распределены по всем широтным зонам и широко используются для валидации спутниковых измерений. Для сопоставления профилей озона, получаемых из спектральных измерений ИКФС-2, отобраны измерения озонзондов за время работы прибора на первом спутнике серии «Метеор-М» № 2 (2015–2022). Для сопоставлений выбраны только те измерения, при которых зонд поднимался до высот выше 10 гПа, а нижняя граница профиля составляла не менее 920 гПа. Далее были отобраны соответствующие спектры ясного неба, измеренные в радиусе 70 км от точки зондирования в пределах  $\pm 12$  ч. Облака экранируют ИК-излучение Земли, ослабляя и тем самым искажая его, поэтому мы рассматриваем только безоблачные условия.

При обработке измерений ИКФС-2 данные об ИСП взяты из базы (Vorbach et al., 2017) со среднемесячными значениями. Для учёта случаев только с соответствующей реальности ИСП решения с итоговой нормированной на шум измерений невязкой в спектральных каналах ИСП, равной более 2,5, были отфильтрованы. Таким образом, в силу большей изменчивости и сложности точного определения ИСП суши для валидации было отобрано 1496 пар измерений ИКФС-2 и озонзондов. В *табл. 3* представлена средняя разность и СОР содержания озона по разным атмосферным слоям и широтам между результатами применения представленного алгоритма интерпретации спектров ИКФС-2 и сглаженными профилями озонзондирования. Сглаживание необходимо для согласования вертикального разрешения измерений.

Рассмотрим *табл. 3*. В слоях 80–30 гПа (нижняя стратосфера) и  $p_0$ –220 гПа (условная тропосфера) в среднем наблюдается занижение содержания озона относительно измерений озонзондов по результатам применения разработанной методики обращения спектров ИКФС-2, что согласуется с оценками замкнутых численных экспериментов (см. *табл. 1*). В области верхней тропосферы/нижней стратосферы (слой 220–80 гПа) предлагаемая методика обработки измерений ИКФС-2 завышает содержание озона относительно данных озонзондирования. При анализе результатов измерений другими аналогичными приборами (IASI, CrIS) наблюдаются сходные особенности в виде положительных смещений восстановленного профиля при сопоставлении с профилями озонзондирования в области тропопаузы (Voynard et al., 2016; Mettig et al., 2022). Объяснением этой особенности может выступать, во-первых, малое содержание озона, что влияет на рост погрешности измерения озонзондов,

особенно в тропиках. Во-вторых, причиной может служить большая естественная изменчивость, так как вариации содержания озона на высотах вблизи 100 гПа достигают 100 %, что в свою очередь связано с постоянным вертикальным обменом воздуха между богатой озоном стратосферой и относительно бедным озоном тропосферным слоем. Кроме того, в области тропопаузы наблюдается изотермическое поведение профиля температуры, что затрудняет исследование методом уходящего ИК-излучения. Причина же именно положительного смещения, наблюдаемого всеми аналогичными приборами, остаётся предметом обсуждений.

Таблица 3. Средняя разность  $\Delta$  (ИКФС-2 – зонд) и СОР содержания озона в разных широтных зонах за 2015–2022 гг.

Широта	0–90°		0–30°		30–60°		60–90°	
	$\Delta \pm \text{ДИ}, \%$	СОР, %	$\Delta \pm \text{ДИ}, \%$	СОР, %	$\Delta \pm \text{ДИ}, \%$	СОР, %	$\Delta \pm \text{ДИ}, \%$	СОР, %
30–10 гПа	2,0±0,7	13,3	3,0±1,0	8,0	1,5±0,8	10,7	1,6±1,8	21,0
80–30 гПа	-4,0±0,6	11,1	-1,0±1,0	9,0	-2,9±0,7	9,1	-6,0±1,0	13,0
$p_0$ – 10 гПа	2,1±0,5	9,2	3,3±0,7	4,5	2,6±0,7	9,1	0,9±0,9	10,0
Слой	$\Delta \pm \text{ДИ}, \text{е.д.}$	СОР, е.д.	$\Delta \pm \text{ДИ}, \text{е.д.}$	СОР, е.д.	$\Delta \pm \text{ДИ}, \text{е.д.}$	СОР, е.д.	$\Delta \pm \text{ДИ}, \text{е.д.}$	СОР, е.д.
220–80 гПа	7,3±0,7	10,6	5,4±0,9	4,9	8,0±1,0	11,0	7,0±1,0	11,0
$p_0$ – 220 гПа	-0,3±0,2	4,7	-1,9±0,6	4,3	-0,5±0,4	5,0	0,7±0,4	4,2
$p_0$ – 300 гПа	-0,1±0,2	2,3	-0,7±0,4	3,2	-0,7±0,2	2,5	0,4±0,2	1,8
Количество пар	1496		254		734		508	

Стандартное отклонение разности содержания озона в высоких широтах возрастает в большей степени для слоёв 30–10 гПа и 220–80 гПа (см. табл. 3). Относительно слоя 30–10 гПа это объясняется большой изменчивостью и нестабильностью высокоширотной озоносферы в зимне-весенний период роста содержания озона и наблюдаемых одновременно отрицательных аномалий его содержания в областях существования полярных стратосферных вихрей. Относительно слоя 220–80 гПа причиной роста СОР содержания озона может служить разность высоты тропопаузы, уровень которой ниже в области высоких широт.

Заметим, что полученная разность в табл. 3 больше оценок погрешности, представленной в табл. 1. Это связано с рядом дополнительных влияющих на рост погрешности факторов, к которым относятся: неопределённость ИСП, не рассматриваемая в замкнутых численных экспериментах; случайные явления, наблюдаемые в реальных измерениях (систематическая разность измеренного и рассчитываемого спектра компенсируется в алгоритме за счёт коррекции спектров); погрешности измерений самих озонозондов, достигающие для некоторых уровней 10–15 % (Witte et al., 2018).

Для анализа восстанавливаемых по данным ИКФС-2 профилей озона в табл. 4 приведены результаты валидации подобных измерений прибора IASI с использованием данных озонозондирования, взятые из работы (Boynard et al., 2016) и полученные так же на основе физико-математического подхода. Отметим равенство знаков средней разности, характеризующих занижение/завышение величины содержания озона относительно измерений озонозондов, за исключением содержания в слое 300–150 гПа, где различие можно объяснить ростом относительной погрешности обоих ИК-зондировщиков. В большинстве случаев СОР с измерениями озонозондов для приборов IASI и ИКФС-2 хорошо согласуются. Высокое СОР содержания озона между ИКФС-2 и озонозондами в слое 25–10 гПа, равное 24 %, может быть связано с нестабильностью содержания стратосферного озона в полярных областях. Заметим, что СОР содержания озона при валидации данных ИКФС2 велико также в слое 300–150 гПа средних широт и равно 43 %. В этой области естественная изменчивость достигает 100 % и высокое СОР может быть следствием изменчивости содержания озона в силу тропосферно-стратосферного обмена.

Таблица 4. Относительная средняя разность  $\Delta$  и СОР содержания озона по данным IASI и озонзондов (за 2008–2014 гг., в радиусе 50 км, в рамках  $\pm 10$  ч), ИКФС-2 и озонзондов (за 2015–2022 гг., в радиусе 70 км, в рамках  $\pm 12$  ч)

Широта		0–30°		30–60°		60–90°	
Прибор	Слой	$\Delta$ , %	СОР, %	$\Delta$ , %	СОР, %	$\Delta$ , %	СОР, %
IASI	25–10 гПа	29,3	9,8	15,6	10,5	5,5	17,8
ИКФС-2		4,0 $\pm$ 1,0	9,0	2,6 $\pm$ 0,9	12,1	4,0 $\pm$ 2,0	24,0
IASI	150–25 гПа	11,7	14,8	4,9	8,5	10,0	17,0
ИКФС-2		6,0 $\pm$ 1,0	5,0	1,4 $\pm$ 0,7	10,0	–1,0 $\pm$ 1,0	12,0
IASI	300–150 гПа	6,6	39,8	–1,8	16,1	19,5	22,6
ИКФС-2		–13,0 $\pm$ 3,0	24,0	20,0 $\pm$ 3,0	43,0	8,0 $\pm$ 2,0	23,0
IASI	$p_0$ – 300 гПа	–14,2	12,6	–13,2	12,3	–4,9	12,1
ИКФС-2		–3,0 $\pm$ 2,0	13,0	–2,7 $\pm$ 0,7	9,1	1,3 $\pm$ 0,6	6,2

## Заключение

Предложена методика для решения комплексной обратной задачи восстановления элементов вертикального распределения озона из спектральных измерений уходящего теплового ИК-излучения спектрометром ИКФС-2. В основе методики лежит уточнение вертикального профиля озона на основе физико-математического подхода РОЗ, обратная задача решается в пространстве главных компонент профиля озона.

В результате замкнутых численных экспериментов получены оценки погрешностей методики относительно определения содержания озона в разных атмосферных слоях и широтных зонах. Погрешность относительно интегрального содержания озона во всём атмосферном столбе (ОСО) в среднем по всем широтам составляет 2,3 %. Полученные оценки удовлетворяют требованиям Глобальной системы наблюдения за климатом и не хуже погрешности определения ОСО другими методами. Погрешность определения тропосферного содержания озона (в слое до 300 гПа) составила примерно 5,2 е. Д., причём предложенный алгоритм несколько занижает содержание озона в тропосфере.

Обработаны измерения ИКФС-2 за 2015–2022 гг., результаты сопоставлены с данными озонзондирования. Наилучшее согласие наблюдается в области тропиков, что объясняется большей информативностью измерений ИКФС-2 в низких широтах. Средняя разность показывает, что ИКФС-2 переоценивает содержание озона на 7,3 е. Д. в области тропопаузы/нижней стратосферы (слой 220–80 гПа), что согласуется с результатами измерений аналогичных зарубежных приборов. При этом в тропосферном слое ИКФС-2 недооценивает содержание озона по сравнению с данными озонзондирования. Сравнение результатов валидации измерений приборов ИКФС-2 и IASI на основе данных озонзондирования также показало хорошее согласие.

Таким образом, представленный алгоритм может применяться для будущей интерпретации спектров ИКФС-2 относительно определения вертикального распределения озона, в том числе для отслеживания аномальных явлений истощения/накопления озона в интересующих атмосферных слоях.

Благодарю Научно-исследовательский центр «Планета» за предоставление доступа к результатам спектральных измерений ИКФС-2. Благодарю рабочую группу HEGIFTOM (*англ.* Harmonization and Evaluation of Ground-based Instruments for Free Tropospheric Ozone Measurements) в рамках проекта TOAR-II (*англ.* Tropospheric Ozone Assessment Report) за предоставление доступа к гармонизированным данным озонзондовых измерений.

Работа выполнена при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета, шифр проекта 124032000025-1.

## Литература

1. Белан Б. Д. Проблема тропосферного озона и некоторые результаты его измерений // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 9. С. 1184–1207.
2. Козлов Д. А., Тимофеев Ю. М., Поляков А. В. и др. Методика пересчета спектров теплового излучения атмосферы различного спектрального разрешения для взаимного сопоставления измерений бортовых инфракрасных фурье-спектрометров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 52–60. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-52-60.
3. Козлов Д. А., Козлов И. А., Успенский А. Б. и др. Оценка ковариационной матрицы шума в измерениях бортового инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2 // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 1. С. 53–67. DOI: 10.31857/S0205961422010043.
4. Поляков А. В. К вопросу об использовании априорной статистической информации при решении нелинейных обратных задач атмосферной оптики // Исслед. Земли из космоса. 1996. № 3. С. 11–17.
5. Поляков А. В. Использование метода искусственных нейронных сетей при восстановлении вертикальных профилей атмосферных параметров // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 1. С. 34–39.
6. Цырульников М. Д., Свиренко П. И., Гайфулин Д. Р., Горбунов М. Е., Успенский А. Б. Развитие системы оперативного усвоения данных метеорологических наблюдений в Гидрометцентре России // Гидрометеоролог. исслед. и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 112–126.
7. Akishina S., Polyakov A., Virolainen Ya. Determination of the ozone vertical distribution elements in the atmosphere from satellite spectral measurements of outgoing thermal radiation // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. 2025. V. 1522. Article 012007. DOI: 10.1088/1755-1315/1522/1/012007.
8. Asmus A. A., Zagrebaev V. A., Makridenko L. A. et al. Meteorological satellites based on Meteor-M polar orbiting platform // Russian Meteorology and Hydrology. 2014. V. 39. No. 12. P. 787–794. DOI: 10.3103/S1068373914120012.
9. Bernath P. F., McElroy C. T., Abrams M. C. et al. Atmospheric Chemistry Experiment (ACE): Mission overview // Geophysical Research Letters. 2005. V. 32. No. 15. Article L15S01. DOI: 10.1029/2005GL022386.
10. Borbas E. E., Seemann S. W., Huang H.-L., Li J., Menzel W. P. Global profile training database for satellite regression retrievals with estimates of skin temperature and emissivity // Proc. 14<sup>th</sup> Intern. ATOVS Study Conf. Madison, WI: University of Wisconsin-Madison, Space Science and Engineering Center, Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies (CIMSS), 2005. P. 763–770.
11. Borbas E., Hulley G., Knuteson R., Feltz M. MEASURES Unified and Coherent Land Surface Temperature and Emissivity (LST&E) Earth System Data Record (ESDR): CAMEL users' guide. National Aeronautics and Space Administration, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California, 2017. 32 p.
12. Borbas E. E., Hulley G., Feltz M. et al. The Combined ASTER MODIS Emissivity over Land (CAMEL) Part 1: Methodology and high spectral resolution application // Remote Sensing. 2018. V. 10. No. 4. Article 643. DOI: 10.3390/rs10040643.
13. Boynard A., Hurtmans D., Koukoulis M. E. et al. Seven years of IASI ozone retrievals from FORLI: Validation with independent total column and vertical profile measurements // Atmospheric Measurement Techniques. 2016. V. 9. P. 4327–4353. DOI: 10.5194/amt-9-4327-2016.
14. Chapman S. On ozone and atomic oxygen in the upper atmosphere // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and J. Science. 1930. V. 10. P. 369–383. <https://doi.org/10.1080/14786443009461588>.
15. Chipperfield M. P., Bekki S. Opinion: Stratospheric ozone — depletion, recovery and new challenges // Atmospheric Chemistry and Physics. 2024. V. 24. P. 2783–2802. DOI: 10.5194/acp-24-2783-2024.
16. Mettig N., Weber M., Rozanov A. et al. Combined UV and IR ozone profile retrieval from TROPOMI and CrIS measurements // Atmospheric Measurement Techniques. 2022. V. 15. P. 2955–2978. DOI: 10.5194/amt-15-2955-2022.
17. Polyakov A., Virolainen Y., Nerobelov G. et al. Six years of IKFS-2 global ozone total column measurements // Remote Sensing. 2023. V. 15. No. 9. Article 2481. DOI: 10.3390/rs15092481.
18. Polyakov A. V., Virolainen Ya. A., Nerobelov G. M., Akishina S. V. Technique for determining tropospheric ozone content from spectral measurements of outgoing thermal radiation by the IKFS-2 satellite instrument // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2024. V. 60. No. 5. P. 533–543. DOI: 10.1134/S000143382470049X.
19. Polyakov A., Virolainen Y., Nerobelov G. et al. Assessing total and tropospheric ozone via IKFS-2 infrared measurements on Meteor-M No. 2 // Atmosphere. 2025. V. 16. No. 7. Article 777. <https://doi.org/10.3390/atmos16070777>.
20. Prather M. J., Zhu X. Lifetimes and timescales of tropospheric ozone // Elementa: Science of the Anthropocene. 2024. V. 12. No. 1. Article 00112. <https://doi.org/10.1525/elementa.2023.00112>.

21. Rodgers C. D. Inverse methods for atmospheric sounding. Theory and practice. Series on Atmospheric, Oceanic and Planetary Physics. V. 2. Singapore: World Scientific, 2000. 256 p.
22. Saunders R., Hocking J., Turner E. et al. An update on the RTTOV fast radiative transfer model (currently at version 12) // Geoscientific Model Development. 2018. V. 11. P. 2717–2737. DOI: 10.5194/gmd-11-2717-2018.
23. Scientific assessment of ozone depletion: 2018. Global ozone research and monitoring project — Report No. 58. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2018. 588 p.
24. Scientific assessment of ozone depletion: 2022. GAW Report No. 278. Geneva: World Meteorological Organization, 2022. 509 p.
25. Smit H. G. J., Thompson A. M. Ozonesonde measurement principles and best operational practices: ASOPOS 2.0 (Assessment of Standard Operating Procedures for Ozonesondes). GAW Report No. 268. Geneva: World Meteorological Organization, 2021. 173 p.
26. Witte J. C., Thompson A. M., Smit H. G. J. et al. First reprocessing of Southern Hemisphere ADditional OZonesondes profile records: 3. Uncertainty in ozone profile and total column // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2018. V. 123. No. 6. P. 3243–3268. DOI: 10.1002/2017JD027791.
27. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization, 2021. 294 p.

## Methodology for retrieving vertical atmospheric ozone distribution from IKFS-2 instrument measurements

S. V. Akishina

*Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia*  
*E-mail: s.akishina@spbu.ru*

The difference in the roles of ozone in the troposphere and stratosphere necessitates ozone monitoring in different atmospheric layers. The study presents for the first time a methodology for retrieving vertical ozone distribution from outgoing thermal infrared (IR) radiation spectra measured by the IKFS-2 IR Fourier-spectrometer. The retrieval of the vertical ozone profile is carried out in several steps based on different methods for solving illposed inverse problems. For the final refinement of the vertical ozone distribution, we use a physical-mathematical approach based on the optimal estimation method. We use the RTTOV (Radiative Transfer for TIROS Operational Vertical Sounder) radiative transfer model to solve the direct problem. Closed numerical experiments with IKFS-2 model spectra were conducted to estimate errors and optimize the algorithm. On average, across all latitudes, the error of retrieving total ozone column is 2.3 %, while the error in retrieving tropospheric ozone column is 5.2 DU. We can observe an increase in errors of retrieving vertical ozone distribution elements at high latitudes. Measured IKFS-2 spectra were processed. Based on comparison with ozonesondes, IKFS-2 underestimates ozone content in the troposphere and in the lower stratosphere and overestimates it in the tropopause region (220–80 hPa layer), which is also observed in the IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) measurement data.

**Keywords:** vertical ozone distribution, outgoing thermal radiation, IKFS-2, RTTOV

Accepted: 16.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-71-83

## References

1. Belan B. D., Problem of tropospheric ozone and some results of its measurements, *Atmospheric and Ocean Optics*, 1996, V. 9, No. 9, pp. 754–773.
2. Kozlov D. A., Timofeev Yu. M., Polyakov A. V. et al., Recalculation of outgoing atmospheric spectra measured by infrared Fourier spectrometers with different spectral resolutions, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 1, pp. 52–60 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-52-60.

3. Kozlov D. A., Kozlov I. A., Uspensky A. B. et al., Estimation of the noise covariance matrix in measurements of the onboard infrared Fourier spectrometer IKFS-2, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2022, No. 1, pp. 53–67 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961422010043.
4. Polyakov A. V., On the use of a priori statistical information in solving nonlinear inverse problems of atmospheric optics, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1996, No. 3, pp. 11–17 (in Russian).
5. Polyakov A. V., The method of artificial neural networks in retrieving of vertical profiles of atmospheric parameters, *Atmospheric and Ocean Optics*, 2014, V. 27, No. 3, pp. 247–252.
6. Tsyrlunikov M. D., Svireenko P. I., Gaifullin D. R., Gorbunov M. E., Uspensky A. B., Development of the operational assimilation system for meteorological observation data at the Russian Hydrometeorological centre, *Hydrometeorological Research and Forecasting*, 2019, No. 4 (374), pp. 112–126 (in Russian).
7. Akishina S., Polyakov A., Virolainen Ya., Determination of the ozone vertical distribution elements in the atmosphere from satellite spectral measurements of outgoing thermal radiation. *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science*, 2025, V. 1522, Article 012007, DOI: 10.1088/1755-1315/1522/1/012007.
8. Asmus V. V., Zagrebaev V. A., Makridenko L. A. et al., Meteorological satellites based on MeteorM polar orbiting platform, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2014, V. 39, No. 12, pp. 787–794, DOI: 10.3103/S1068373914120012.
9. Bernath P. F., McElroy C. T., Abrams M. C. et al., Atmospheric Chemistry Experiment (ACE): Mission overview, *Geophysical Research Letters*, 2005, V. 32, No. 15, Article L15S01, DOI: 10.1029/2005GL022386.
10. Borbas E. E., Seemann S. W., Huang H.-L., Li J., Menzel W. P., Global profile training database for satellite regression retrievals with estimates of skin temperature and emissivity, *Proc. 14<sup>th</sup> Intern. ATOVS Study Conf.*, Madison, WI: University of Wisconsin–Madison, Space Science and Engineering Center, Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies (CIMSS), 2005, pp. 763–770.
11. Borbas E., Hulley G., Knuteson R., Feltz M., *MEaSURES Unified and Coherent Land Surface Temperature and Emissivity (LST&E) Earth System Data Record (ESDR): CAMEL users' guide*, National Aeronautics and Space Administration, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California, 2017, 32 p.
12. Borbas E., Hulley G., Feltz M. et al., The Combined ASTER and MODIS Emissivity over Land (CAMEL) Part 1: Methodology and high spectral resolution application, *Remote Sensing*, 2018, V. 10, No. 4, Article 643, DOI: 10.3390/rs10040643.
13. Boynard A., Hurtmans D., Koukoulis M. E. et al., Seven years of IASI ozone retrievals from FORLI: Validation with independent total column and vertical profile measurements, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, V. 9, pp. 4327–4353, DOI: 10.5194/amt-9-4327-2016.
14. Chapman S., On ozone and atomic oxygen in the upper atmosphere, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and J. Science*, 1930, V. 10, pp. 369–383, <https://doi.org/10.1080/14786443009461588>.
15. Chipperfield M. P., Bekki S., Opinion: Stratospheric ozone — depletion, recovery and new challenges, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2024, V. 24, pp. 2783–2802, DOI: 10.5194/acp-24-2783-2024.
16. Mettig N., Weber M., Rozanov A. et al., Combined UV and IR ozone profile retrieval from TROPOMI and CrIS measurements, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2022, V. 15, pp. 2955–2978, DOI: 10.5194/amt-15-2955-2022.
17. Polyakov A., Virolainen Y., Nerobelov G. et al., Six years of IKFS-2 global ozone total column measurements, *Remote Sensing*, 2023, V. 15, No. 9, Article 2481, DOI: 10.3390/rs15092481.
18. Polyakov A. V., Virolainen Y. A., Nerobelov G. M. et al., Technique for determining tropospheric ozone content from spectral measurements of outgoing thermal radiation by the IKFS-2 satellite instrument, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2024, V. 60, No. 5, pp. 533–543, DOI: 10.1134/S000143382470049X.
19. Polyakov A., Virolainen Y., Nerobelov G. et al., Assessing total and tropospheric ozone via IKFS-2 infrared measurements on Meteor-M No. 2, *Atmosphere*, 2025, V. 16, No. 7, Article 777, <https://doi.org/10.3390/atmos16070777>.
20. Prather M. J., Zhu X., Lifetimes and timescales of tropospheric ozone, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 2024, V. 12, No. 1, Article 00112, <https://doi.org/10.1525/elementa.2023.00112>.
21. Rodgers C. D., *Inverse methods for atmospheric sounding. Theory and practice*, Series on Atmospheric, Oceanic and Planetary Physics, V. 2, Singapore: World Scientific, 2000, 256 p.
22. Saunders R., Hocking J., Turner E. et al., An update on the RTTOV fast radiative transfer model (currently at version 12), *Geoscientific Model Development*, 2018, V. 11, pp. 2717–2737, DOI: 10.5194/gmd-11-2717-2018.
23. *Scientific assessment of ozone depletion: 2018. global ozone research and monitoring project — Report No. 58*, Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2018, 588 p.
24. *Scientific assessment of ozone depletion: 2022. GAW Report No. 278*, Geneva: World Meteorological Organization, 2022, 509 p.

25. Smit H. G. J., Thompson A. M., *Ozonesonde measurement principles and best operational practices: ASOPOS 2.0 (Assessment of Standard Operating Procedures for Ozonesondes)*. GAW Report No. 268, Geneva: World Meteorological Organization, 2021, 173 p.
26. Witte J. C., Thompson A. M., Smit H. G. J. et al., First reprocessing of Southern Hemisphere ADditional OZonesondes profile records: 3. Uncertainty in ozone profile and total column, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, V. 123, No. 6, pp. 3243–3268, DOI: 10.1002/2017JD027791.
27. *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*, Geneva: World Health Organization, 2021, 294 p.