

# Методика определения вертикального распределения озона в атмосфере на основе измерений уходящего теплового ИК излучения с борта спутников серии «Метеор-М» №2

**С.В. Акишина, А.В. Поляков, Я.А. Виролайнен**

Санкт-Петербургский государственный университет, СПбГУ

s.akishina@spbu.ru

## III. Состав атмосферы и перенос примесей

Международная конференция, посвященная 70-летию

Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

**ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТА**

8 апреля 2026 г.

## Почему важно исследовать вертикальное распределение озона?

### 1. Климатообразующая роль озона:

- Оценка вклада в радиационный баланс
- Верификация климатических моделей

### 2. Проблема истощения и восстановления озонового слоя:

- Оценка трендов содержания озона в стратосферных слоях
- Оценка эффективности международных договоров

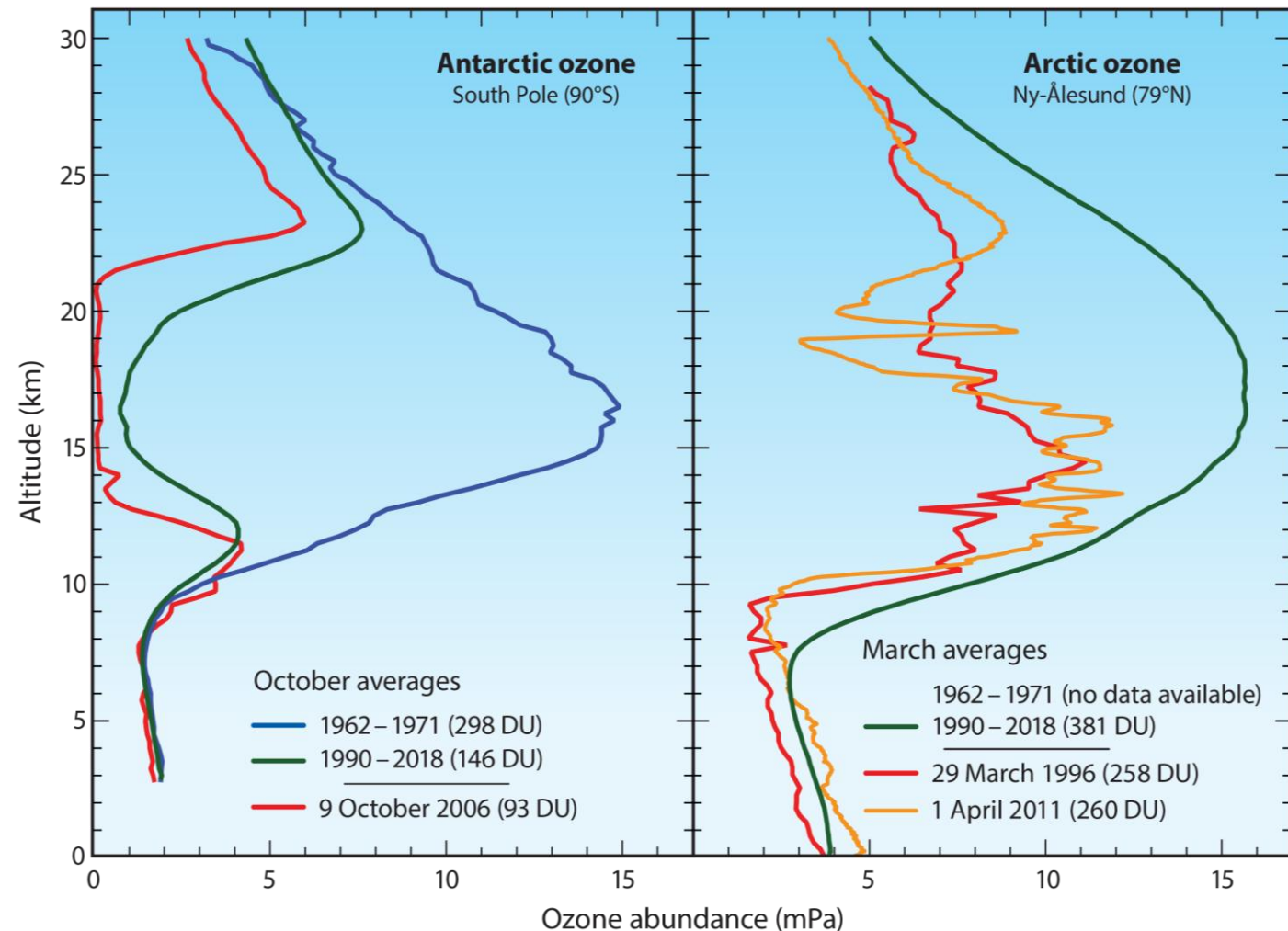
### 3. Влияние на качество воздуха:

- Мониторинг эпизодов роста тропосферного содержания озона

### 4. Изучение атмосферной динамики:

- Исследование процессов:  
стратосферно-тропосферного обмена  
усиления циркуляции Брюера-Добсона

## Polar Ozone Depletion



Вертикальное распределение антарктического (слева) и арктического (справа) озона. По данным озонзондирования

## Измерения общего содержания озона (ОСО)

### наземные измерения:

- спектрофотометры Добсона и Брюера, фильтровый озонметр М-124
- спектрометры УФ-видимого диапазона (SOAZ, DOAS)
- ИК Фурье-спектрометры

### спутниковые измерения:

#### лимбовая геометрия:

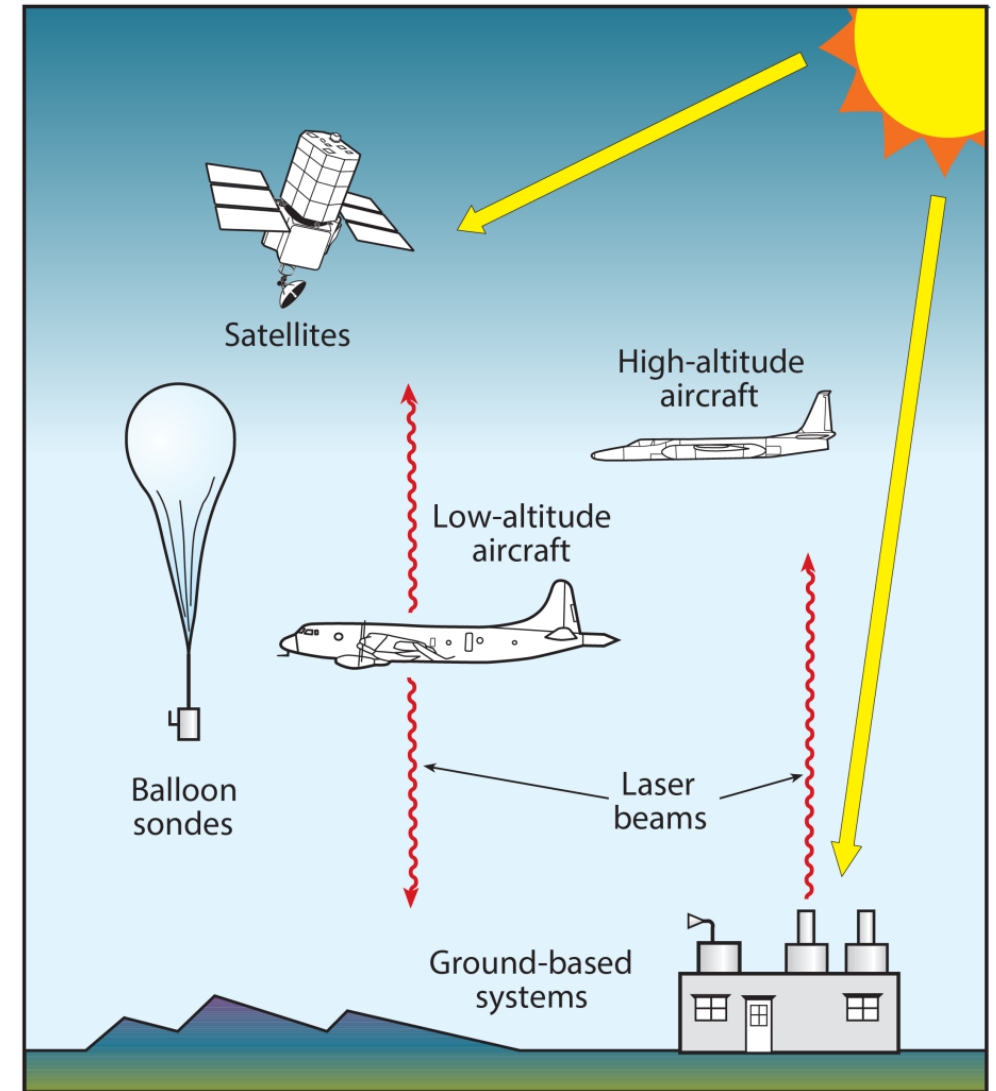
- метод прозрачности по Солнцу (ACE-FTS)
- метод уходящего теплового МКВ излучения (MLS)

#### измерения в надир:

- метод рассеянного и отраженного солнечного излучения (OMI, TROPOMI)
- **метод уходящего теплового ИК излучения (AIRS, CrIS, IASI, ИКФС-2)**

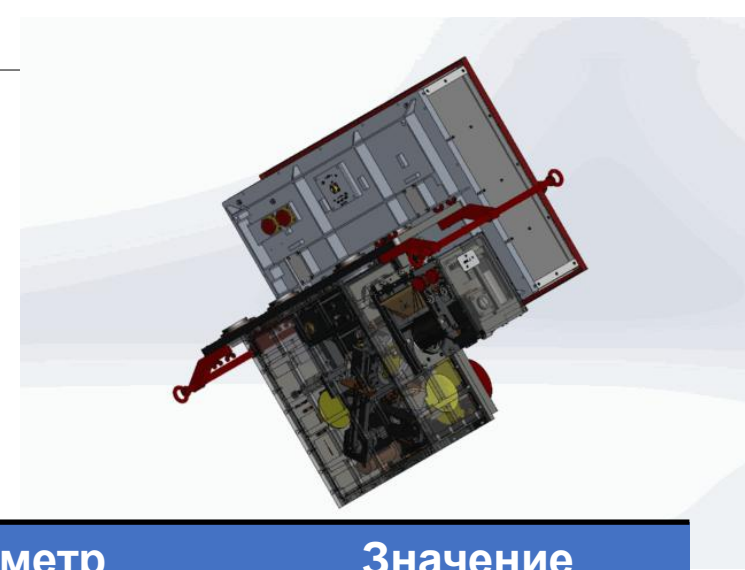
## Измерения профилей озона с высоким вертикальным разрешением

- озонзондирование (разрешение 150 м, до высот ~ 30 км)
- спутниковые измерения (MLS, ACE-FTS , от высот ~ 5 км)
- озоновые лидары



Системы наблюдения атмосферного озона

## ИКФС-2



➤ входит в состав аппаратуры российских метеорологических спутников серии «Метеор-М» №2:

- солнечно-синхронная орбита высотой около 830 км
- март 2015 – декабрь 2022; апрель 2024 – настоящее время
- около 130 тыс. спектров атмосферы в сутки

➤ измерения в надир уходящего теплового ИК излучения

➤ достоинства метода:

1. сравнительно высокое горизонтальное разрешение
2. быстрое покрытие измерениями всей земной поверхности
3. возможность измерений при отсутствии солнечного излучения, включая период полярной ночи в арктических и антарктических широтах

| Параметр                                             | Значение                                                   |
|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| спектральный диапазон                                | 5-15 мкм<br>(660-2000 см <sup>-1</sup> )                   |
| число спектральных каналов                           | 2701                                                       |
| спектральное разрешение                              | 0.4 см <sup>-1</sup>                                       |
| NESR,<br>[мВт/(м <sup>2</sup> ср см <sup>-1</sup> )] | 0.35 , λ = 6 мкм<br>0.15 , λ = 13 мкм<br>0.45 , λ = 15 мкм |
| пространственное разрешение                          | 35 км                                                      |
| полоса обзора                                        | 1000...2500 км                                             |
| время измерения                                      | 0.5 с                                                      |

# Алгоритм решения обратной задачи

## Физико-математический подход

Прямая задача:

$$\tilde{y} = B(\vec{x}) + \vec{\varepsilon}$$

$\vec{x}$  – вектор состояния атмосферы/поверхности

$\tilde{y}$  – измеряемый спектр

$\vec{\varepsilon}$  – вектор погрешности измерений (шум)

$\bar{\vec{x}}$  и  $D$  – априорный средний профиль и ковариационная матрица

$\Sigma$  – ковариационная матрица шума измерений

$$\Phi(\tilde{x}) \mid \|B(\tilde{x}) - \tilde{y}\|_{\Sigma^{-1}}^2 + \|\tilde{x} - \bar{\vec{x}}\|_{D^{-1}}^2 \rightarrow \min$$

➤ Алгоритм минимизации итерационный:

$$\tilde{\Phi}_k(\tilde{x}_{k+1}) \mid \|A_k \tilde{x}_{k+1} - \tilde{y}\|_{\Sigma^{-1}}^2 + \|\tilde{x}_{k+1} - \bar{\vec{x}}\|_{D^{-1}}^2 + \|\tilde{x}_{k+1} - \tilde{x}_k\|_{L^{-1}}^2 \rightarrow \min$$

[Поляков, 1996]

Линеаризуем оператор  $B$  в окрестности предыдущего приближения к решению и применяем метод статистической регуляризации к полученной линеаризованной задаче:

$$\tilde{x}_{k+1} = \bar{\vec{x}} + (A^T \Sigma^{-1} A + D^{-1} + L^{-1})^{-1} \left( A^T \Sigma^{-1} (\tilde{y} - B(\vec{x}_k) + A(\vec{x}_k - \bar{\vec{x}})) + L^{-1}(\vec{x}_k - \bar{\vec{x}}) \right)$$

$A_k$  – матрица производных оператора  $B$  в точке  $\tilde{x}_k$  (матрица Якоби)

$L = lL_0$ , где  $L_0$  – диагональ матрицы  $D$ ,  $l$  – некоторое положительное число

➤  $\vec{x}_0$  – начальное приближение, на основе метода ИНС

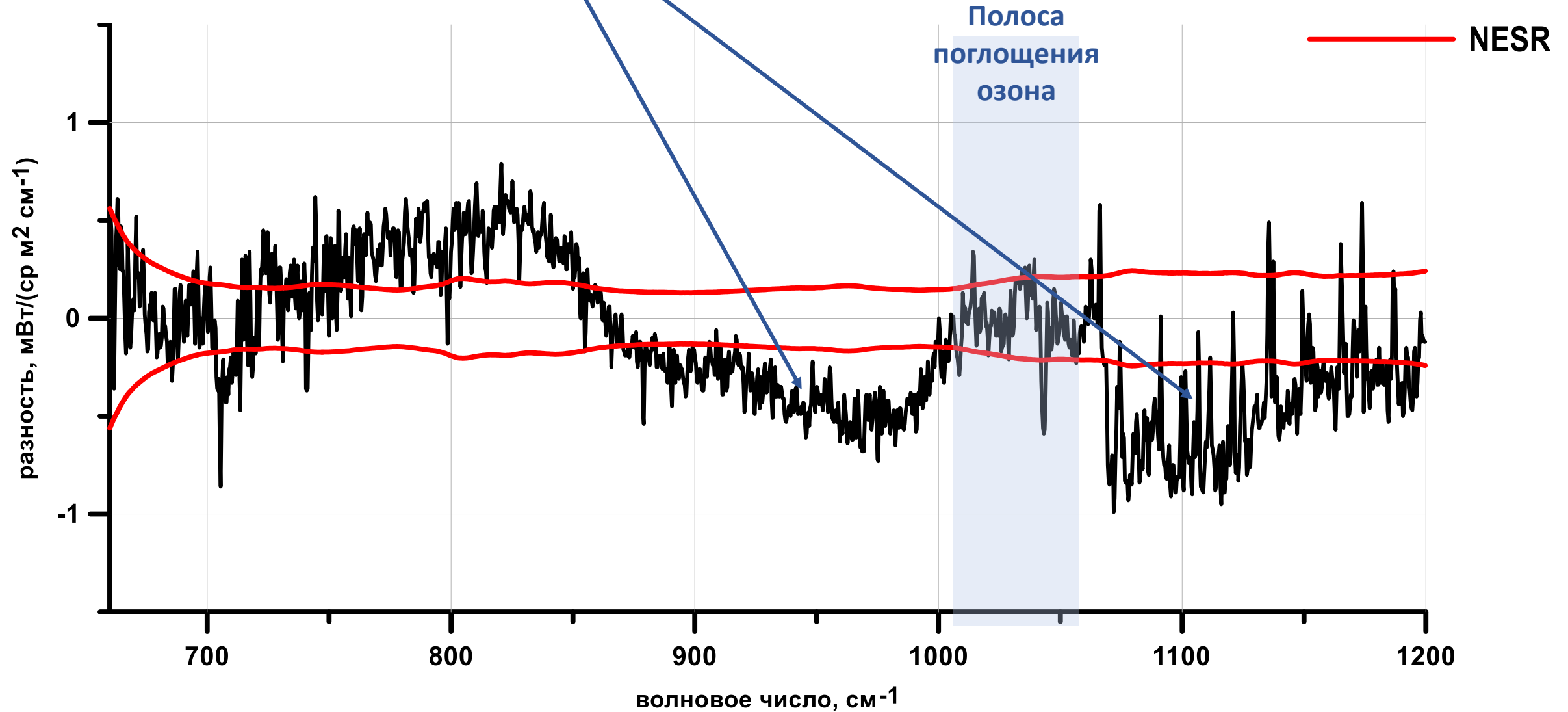
➤ По отношению к восстанавливаемым векторам используется **метод главных компонент (ГК)**

## Алгоритм восстановления профилей озона из измерений уходящего теплового ИК излучения ИКФС-2

На основе замкнутых численных экспериментов предложена методика:

|                                                              |                                                                                                                           |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Решение прямой задачи                                        | RTTOV v13.2                                                                                                               |
| Начальное приближение, число ГК                              | Метод ИНС [Поляков, 2014], 5 ГК                                                                                           |
| Спектральные каналы                                          | 1005–1054 см <sup>-1</sup> , исключая каналы с мешающим поглощением водяного пара и интервал 1038–1042.5 см <sup>-1</sup> |
| Априорная информация                                         | Данные озонозондирования (с 2015 по 2022 г.), только профили с измерениями от 1000 до 6 гПа                               |
| Приземное давление, p0                                       | NCEP GFS                                                                                                                  |
| Излучательная способность поверхности, E                     | <b>База данных CAMEL</b><br>(среднемесячные значения на сетке 0.05 x 0.05°) [Borbas et al., 2017]                         |
| Профили водяного пара и температуры, температура поверхности | Метод статистической регуляризации. Восстановление в порядке: <b>Q(z), T(z), Ts, Q(z), Ts</b>                             |

Некорректная оценка «фонового» относительно полосы озона излучения приводит к неверному восстановлению излучения в окне 8-12 мкм



Решается **комплексная обратная задача** – решение должно **сходиться по всем параметрам**

## Новая версия алгоритма восстановления профилей озона из измерений уходящего теплового ИК излучения ИКФС-2

|                                 |                                                                                                                           |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Решение прямой задачи           | RTTOV v13.2                                                                                                               |
| Начальное приближение, число ГК | Метод ИНС [Поляков, 2014], 5 ГК                                                                                           |
| Спектральные каналы             | 1005–1054 см <sup>-1</sup> , исключая каналы с мешающим поглощением водяного пара и интервал 1038–1042.5 см <sup>-1</sup> |
| Априорная информация            | Данные озонозондирования (с 2015 по 2022 г.), только профили с измерениями от 1000 до 6 гПа                               |
| Приземное давление, p0          | NCEP GFS                                                                                                                  |

Методом статистической регуляризации, восстановление в порядке:

$E, Q(z), T(z), T_s, Q(z), E, T_s, T(z), Q(z), E, T_s, Q(z), E, T_s, T(z), Q(z), E, T_s$



В заключение – восстановление  $O_3(z)$

1) Сопоставление относительно общего содержания озона (ОСО)

| N      | станция              | широта,° | долгота,° | высота, м | кол-во пар | СР, % | СОР, % |
|--------|----------------------|----------|-----------|-----------|------------|-------|--------|
| Brewer |                      |          |           |           |            |       |        |
| 1      | Resolute             | 74.700   | −94.970   | 68        | 213        | 9.3   | 5.1    |
| 2      | Churchill            | 58.750   | −94.070   | 26        | 1328       | 5.5   | 3.1    |
| 3      | Obninsk              | 55.100   | 36.610    | 100       | 332        | 5.2   | 3.4    |
| 4      | Edmonton             | 53.550   | −114.110  | 752       | 3743       | 5.7   | 3.4    |
| 5      | Goose Bay            | 53.310   | −60.360   | 26        | 2756       | 6.0   | 2.9    |
| 6      | Lindenberg           | 52.209   | 14.121    | 127       | 2453       | 3.3   | 3.1    |
| 7      | De Bilt              | 52.100   | 5.180     | 24        | 2163       | 2.8   | 3.0    |
| 8      | Saturna Island       | 48.770   | −123.130  | 202       | 2793       | 4.8   | 3.1    |
| 9      | Aosta                | 45.740   | 7.360     | 570       | 339        | 5.2   | 4.8    |
| 10     | Egbert               | 44.230   | −79.780   | 264       | 1360       | 4.8   | 2.5    |
| 11     | Toronto              | 43.780   | −79.470   | 202       | 7956       | 4.7   | 2.9    |
| 12     | Kislovodsk           | 43.730   | 42.660    | 2070      | 575        | 5.8   | 4.3    |
| 13     | Thessaloniki         | 40.634   | 22.956    | 60        | 844        | 3.4   | 3.1    |
| 14     | Mauna Loa (HI)       | 19.540   | −155.580  | 3397      | 2800       | 4.3   | 3.5    |
| 15     | Paramaribo           | 5.806    | −55.210   | 16        | 910        | 0.7   | 4.0    |
| Dobson |                      |          |           |           |            |       |        |
| 16     | Kyiv-Goloseyev       | 50.364   | 30.497    | 206       | 252        | 3.9   | 3.1    |
| 17     | Lannemezan           | 44.129   | 0.370     | 590       | 27         | 8.3   | 3.6    |
| 18     | University of Tehran | 35.730   | 51.380    | 1419      | 12         | 11.0  | 6.6    |

спектрофотометры  
Добсона и Брюера, ОСО

1 час, 70 км

март 2015 – декабрь 2022

СР, %

4.6

СОР, %

3.4

- Безоблачные случаи
- Решения с невязкой более 2.0 по каждому из параметров (Q, T, E, Ts, O<sub>3</sub>) отфильтрованы

СР – средняя разность (ИКФС-2 – Брюер/Добсон)  
СОР – стандартное отклонение разностей

## 2) Сопоставление с профилями озонозондирования

- Отбор измерений зондов: верхняя граница – не ниже уровня 10 гПа, нижняя граница – не выше 920 гПа
- Критерии пространственно-временного согласия: **спектры ясного неба ИКФС-2** в радиусе **70 км** от точки запуска озонозонда в пределах **±12 часов**
- Случаи с невязкой в каналах ИСП, равной более 2.0 отфильтрованы

| стратосфера | широты            | 0°–30°     |            | 30°–60°    |             | 60°–90°    |             |
|-------------|-------------------|------------|------------|------------|-------------|------------|-------------|
|             | слой              | СР, %      | СОР, %     | СР, %      | СОР, %      | СР, %      | СОР, %      |
|             | 30–10 гПа         | 3.9 ± 0.8  | <b>7.7</b> | 3.9 ± 0.4  | <b>11.5</b> | 4 ± 1      | <b>20</b>   |
|             | <b>80–30 гПа</b>  | -1.6 ± 0.9 | <b>9.7</b> | -0.5 ± 0.4 | <b>9.0</b>  | -0.6 ± 0.6 | <b>12.9</b> |
|             | p0–10 гПа         | 3.6 ± 0.6  | 4.8        | 4.0 ± 0.4  | 8.1         | 4.2 ± 0.5  | 9.5         |
| тропосфера  | широты            | 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.   |
|             | 220–80 гПа        | 6.4 ± 0.7  | <b>4.7</b> | 7.6 ± 0.5  | <b>9.5</b>  | 8.8 ± 0.6  | <b>9.3</b>  |
|             | <b>p0–220 гПа</b> | -2.5 ± 0.5 | <b>4.4</b> | -0.4 ± 0.2 | <b>4.8</b>  | 0.8 ± 0.2  | <b>3.8</b>  |
|             | p0–300 гПа        | -1.3 ± 0.3 | 3.0        | -0.8 ± 0.1 | 2.7         | 0.6 ± 0.1  | 1.6         |
|             | Кол-во пар        | 431        |            | 2385       |             | 1531       |             |

занижение  
содержания  
озона

## 2) Сопоставление с профилями озонозондирования

- Отбор измерений зондов: верхняя граница – не ниже уровня 10 гПа, нижняя граница – не выше 920 гПа
- Критерии пространственно-временного согласия: **спектры ясного неба ИКФС-2** в радиусе **70 км** от точки запуска озонозонда в пределах **±12 часов**
- Случаи с невязкой в каналах ИСП, равной более 2.0 отфильтрованы

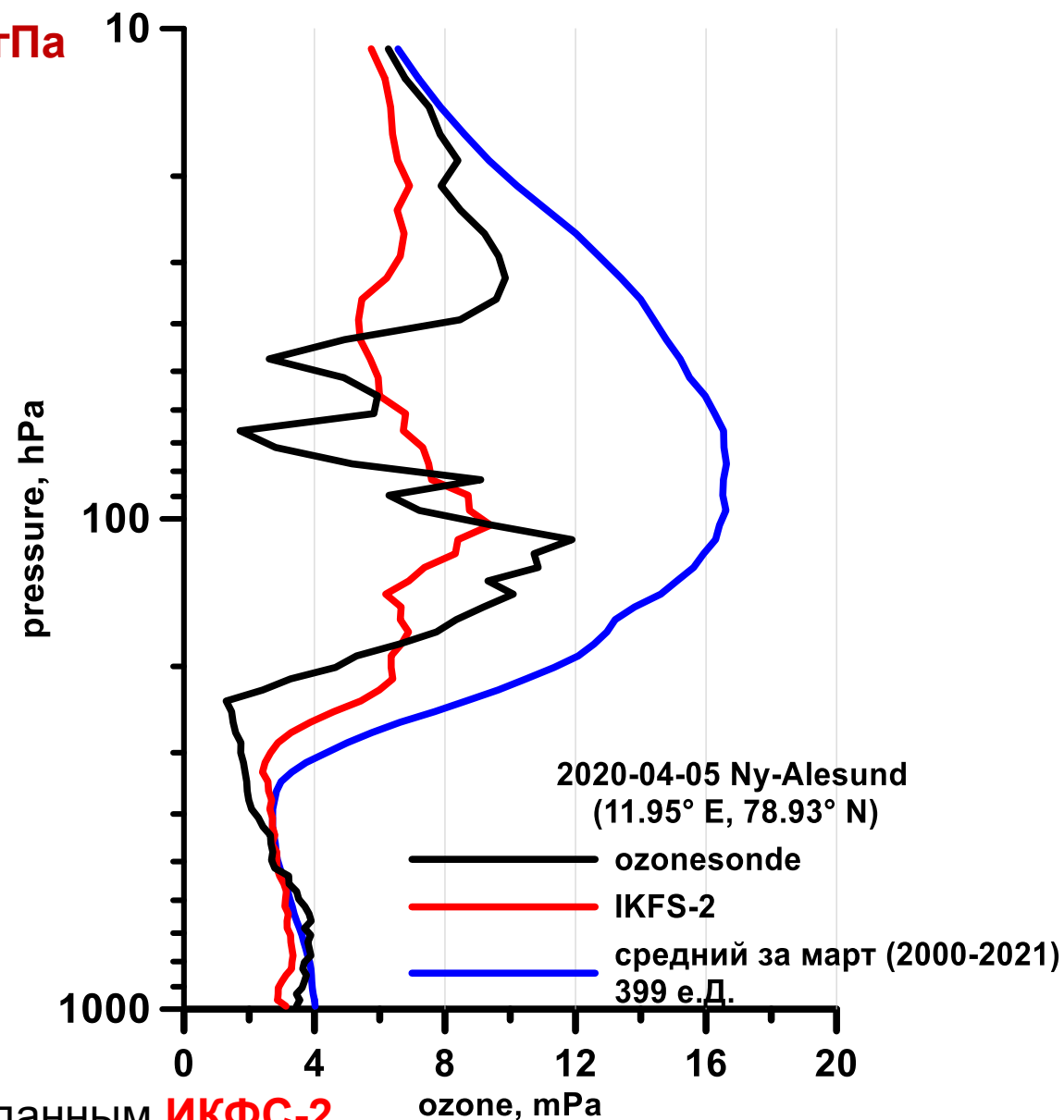
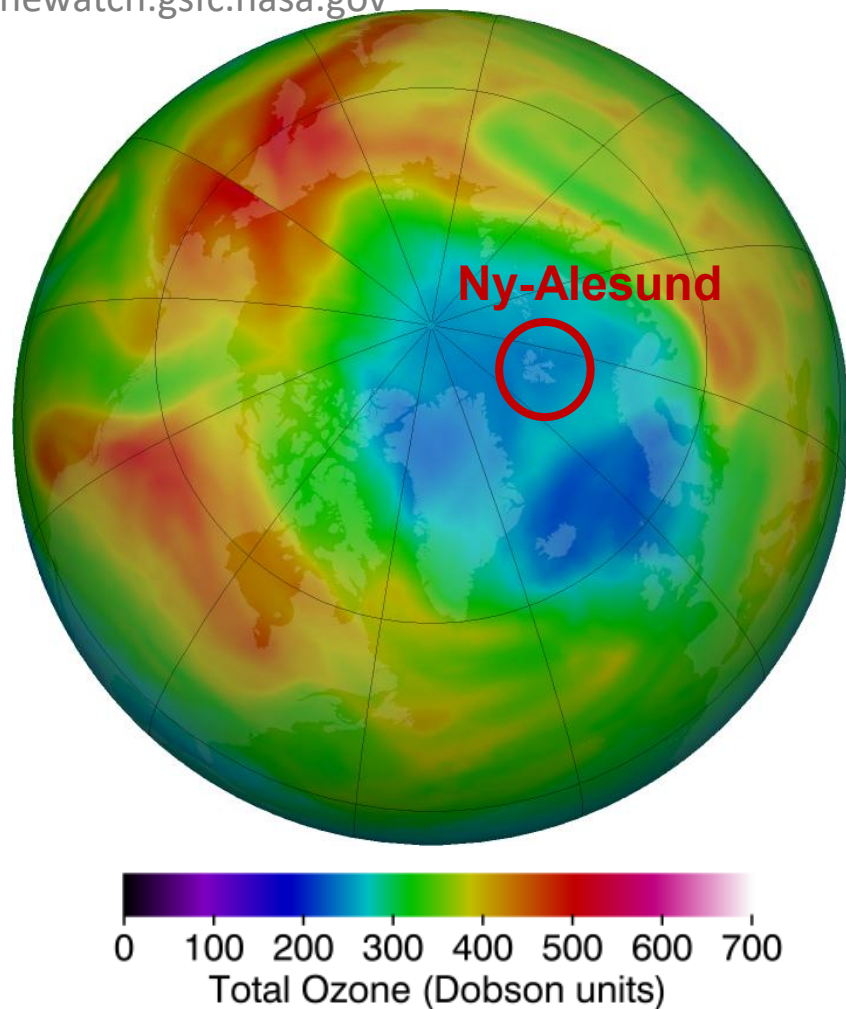
| стратосфера | широты            | 0°–30°     |            | 30°–60°    |             | 60°–90°    |             |
|-------------|-------------------|------------|------------|------------|-------------|------------|-------------|
|             | слой              | СР, %      | СОР, %     | СР, %      | СОР, %      | СР, %      | СОР, %      |
|             | <b>30–10 гПа</b>  | 3.9 ± 0.8  | <b>7.7</b> | 3.9 ± 0.4  | <b>11.5</b> | 4 ± 1      | <b>20</b>   |
|             | <b>80–30 гПа</b>  | -1.6 ± 0.9 | <b>9.7</b> | -0.5 ± 0.4 | <b>9.0</b>  | -0.6 ± 0.6 | <b>12.9</b> |
|             | p0–10 гПа         | 3.6 ± 0.6  | 4.8        | 4.0 ± 0.4  | 8.1         | 4.2 ± 0.5  | 9.5         |
| тропосфера  | широты            | 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.   |
|             | <b>220–80 гПа</b> | 6.4 ± 0.7  | <b>4.7</b> | 7.6 ± 0.5  | <b>9.5</b>  | 8.8 ± 0.6  | <b>9.3</b>  |
|             | <b>p0–220 гПа</b> | -2.5 ± 0.5 | <b>4.4</b> | -0.4 ± 0.2 | <b>4.8</b>  | 0.8 ± 0.2  | <b>3.8</b>  |
|             | p0–300 гПа        | -1.3 ± 0.3 | 3.0        | -0.8 ± 0.1 | 2.7         | 0.6 ± 0.1  | 1.6         |
|             | Кол-во пар        | 431        |            | 2385       |             | 1531       |             |

завышение  
содержания  
озона

Вертикальные профили содержания озона в соответствии с измерениями озонозонда и ИКФС-2 вблизи станции Ny-Alesund (арх. Шпицберген, 78.93° широты) 5 апреля 2020 года

**Резкое снижение содержания озона на высотах 100-50 гПа**

<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov>

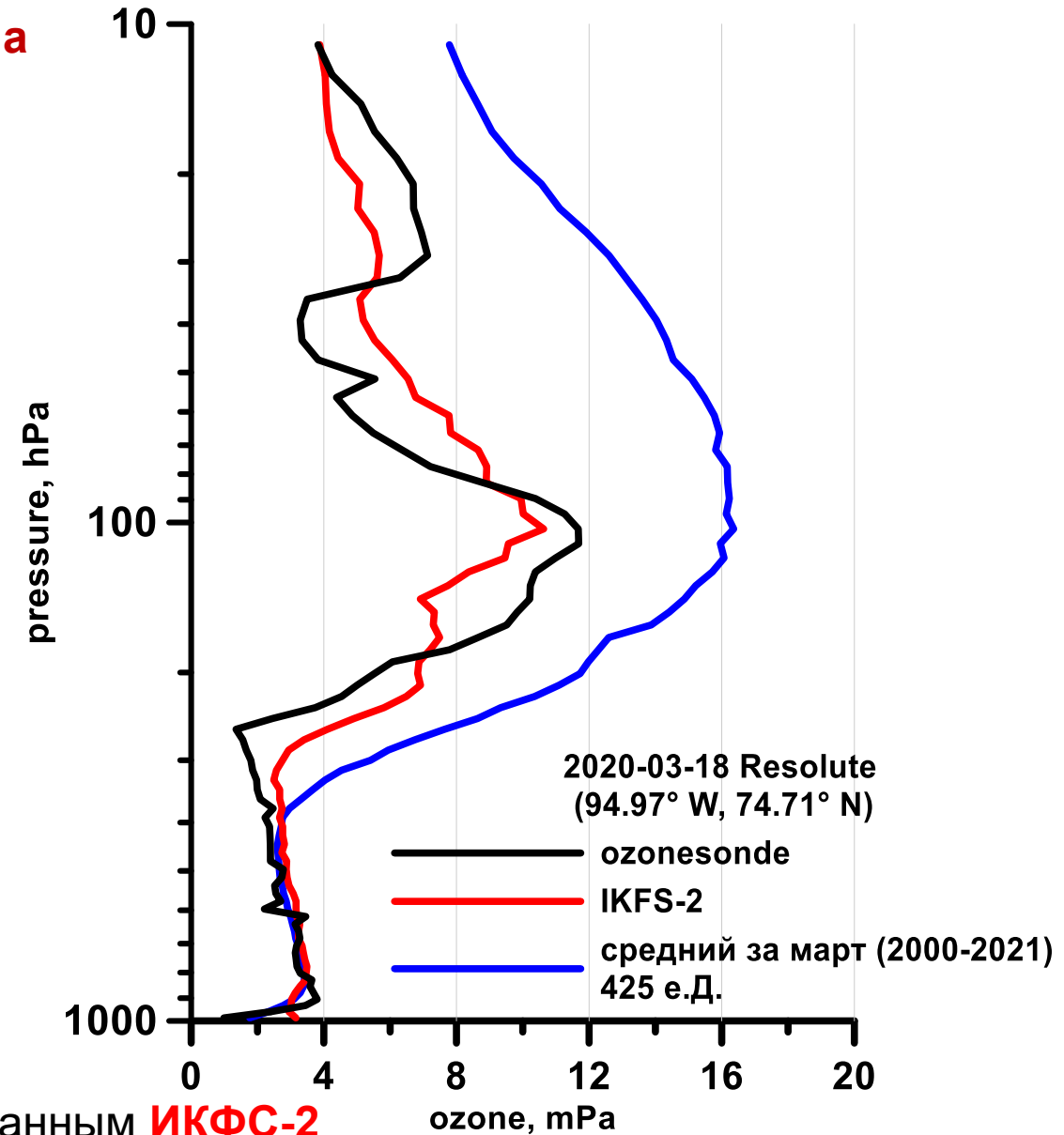
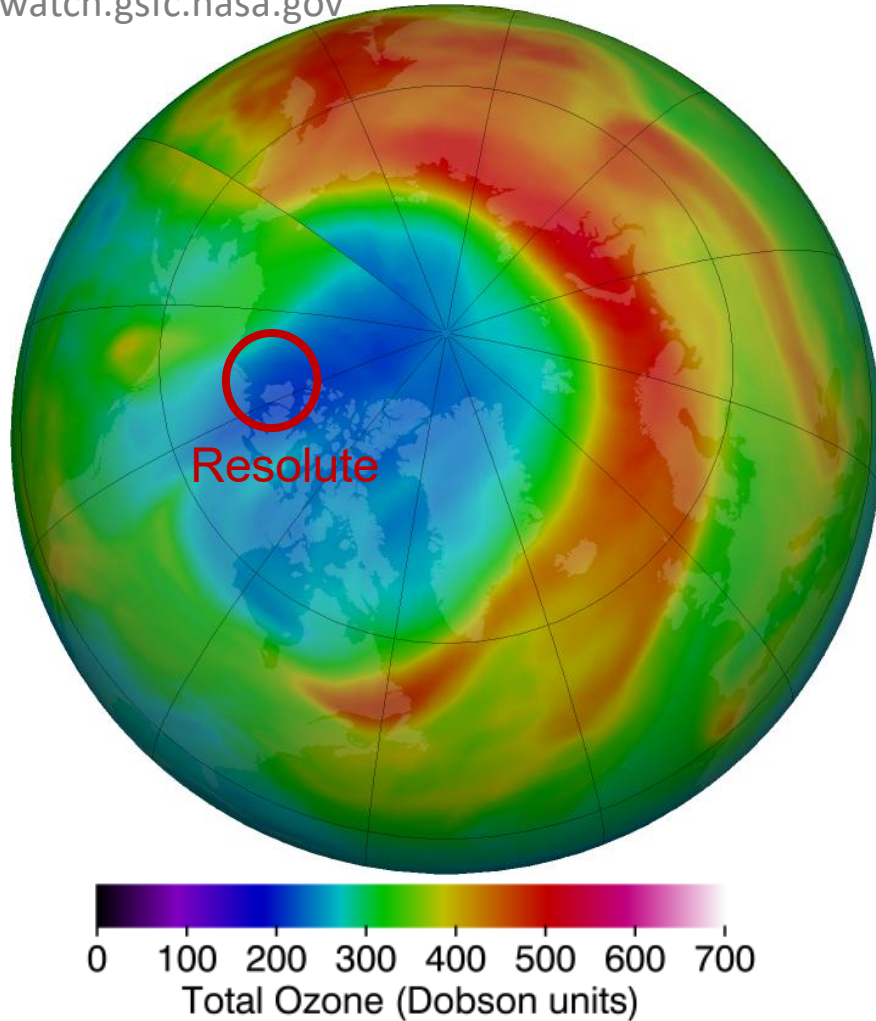


OCO: 253 е.Д. по данным озонозондирования, 253 е.Д. по данным ИКФС-2

Вертикальные профили содержания озона в соответствии с измерениями озонозонда и ИКФС-2 вблизи станции Resolute (74.71° широты) 18 марта 2020 года

**Резкое снижение содержания озона на высотах 80-30 гПа**

<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov>



ОСО: 232 е.Д. по данным озонозондирования, 216 е.Д. по данным ИКФС-2

**Предложена методика для решения комплексной обратной задачи получения вертикального профиля содержания озона из спектральных измерений ИКФС-2 уходящего теплового ИК излучения.**

1. Выявлена необходимость доработки методики в части учета излучательной способности поверхности (ИСП) и континуума водяного пара. Разработан алгоритм уточнения ИСП на основе метода статистической регуляризации. Уточнены спектральные каналы для восстановления вертикального профиля водяного пара.
2. Обработаны измерения ИКФС-2 за 2015-2022 годы. **Результаты сопоставлены с данными измерений ОСО спектрофотометрами Добсона и Брюера. Средняя разность ОСО составила 4.6 % с СОР 3.4 %.**
3. **Результаты сопоставлены с данными озонозондирования. Наилучшее согласие относительно определения содержания озона в стратосферных слоях наблюдается в области низких широт, что объясняется большей информативностью измерений ИКФС-2.**
4. Представленный алгоритм может применяться для будущей интерпретации спектров ИКФС-2 по определению вертикальных профилей содержания озона, в том числе для отслеживания аномальных явлений истощения/накопления озона в различных атмосферных слоях.

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

Assessing **Total and Tropospheric Ozone** via IKFS-2 Infrared Measurements on Meteor-M No. 2

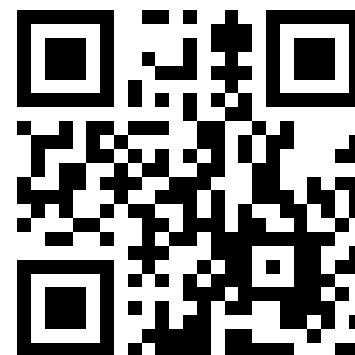
Поляков, А. В., Виролайнен, Я. А., Неробелов, Г. М., Акишина, С. В., Крюковских, Е. П., Козлов, Д., Тимофеев, Ю. М., **2025, ATMOSPHERE**. 16, 7, 31 стр., 16070777.

<https://www.mdpi.com/2073-4433/16/7/777>



Об исследованиях Лаборатории ОЗЛаб СПбГУ:

ЛАБОРАТОРИЯ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ОЗОНОВОГО СЛОЯ  
И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ



**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.2017.

[https://lpdaac.usgs.gov/sites/default/files/public/product\\_documentation/cam5k30\\_v1\\_user\\_guide\\_atbd.pdf](https://lpdaac.usgs.gov/sites/default/files/public/product_documentation/cam5k30_v1_user_guide_atbd.pdf).

**Поляков А.В.** К вопросу об использовании априорной статистической информации при решении нелинейных обратных задач атмосферной оптики // Исследование Земли из Космоса. –1996. –№3. –С 11-17.

**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.

## Благодарности

---

Благодарим **НИЦ «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.

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



Санкт-Петербургский  
государственный  
университет  
[www.spbu.ru](http://www.spbu.ru)

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**

[s.akishina@spbu.ru](mailto:s.akishina@spbu.ru)