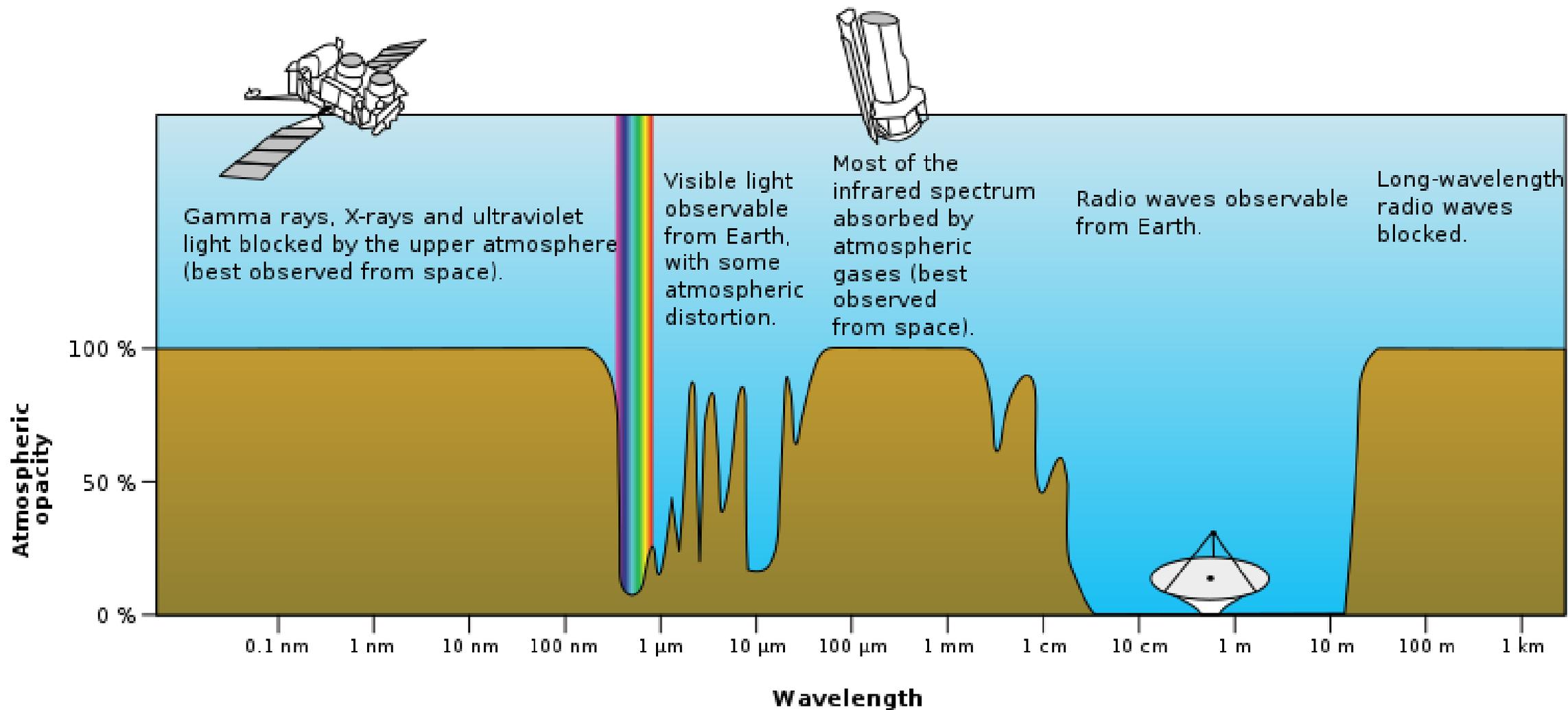


# Мониторинг содержания парниковых газов в атмосфере

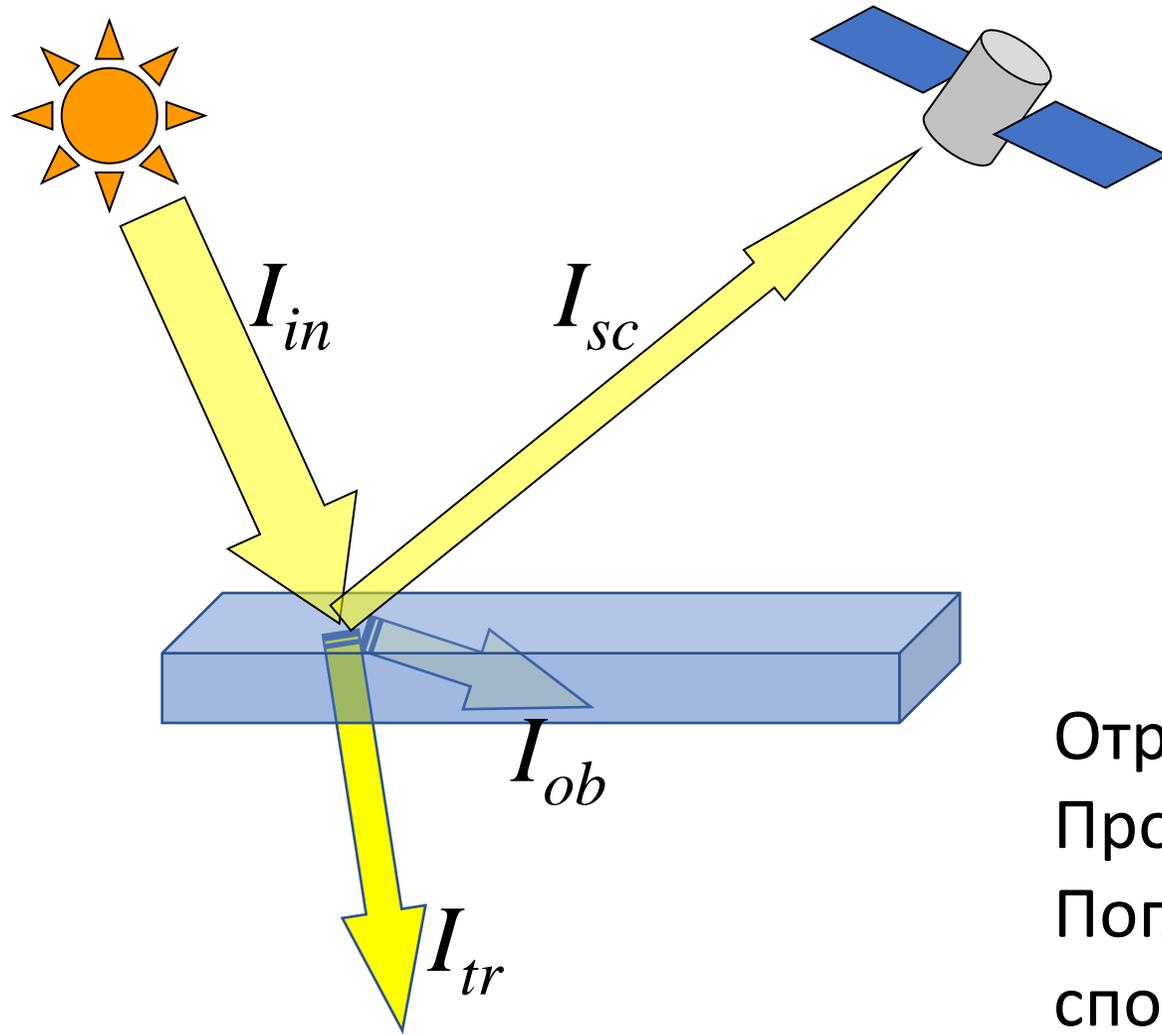
**Д.М. Ермаков**

ИКИ РАН, ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

# Прозрачность атмосферы как функция длины волны



# Отражательная, поглощательная, пропускная способности



$$I_{in} = I_{sc} + I_{tr} + I_{ob}$$

$$1 = (I_{sc} + I_{tr} + I_{ob}) / I_{in}$$

$$1 = \rho + \tau + \varepsilon$$

Отражательная ...

Пропускная ...

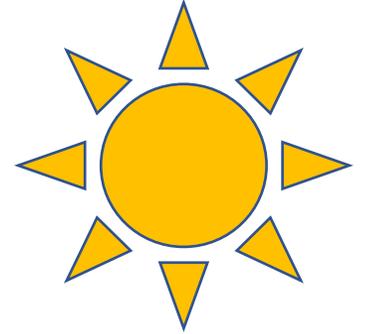
Поглощательная/излучательная  
способности вещества

Соотношения между ними зависят от частотного диапазона и направления распространения излучения, температуры объекта

## Абсолютно черное тело



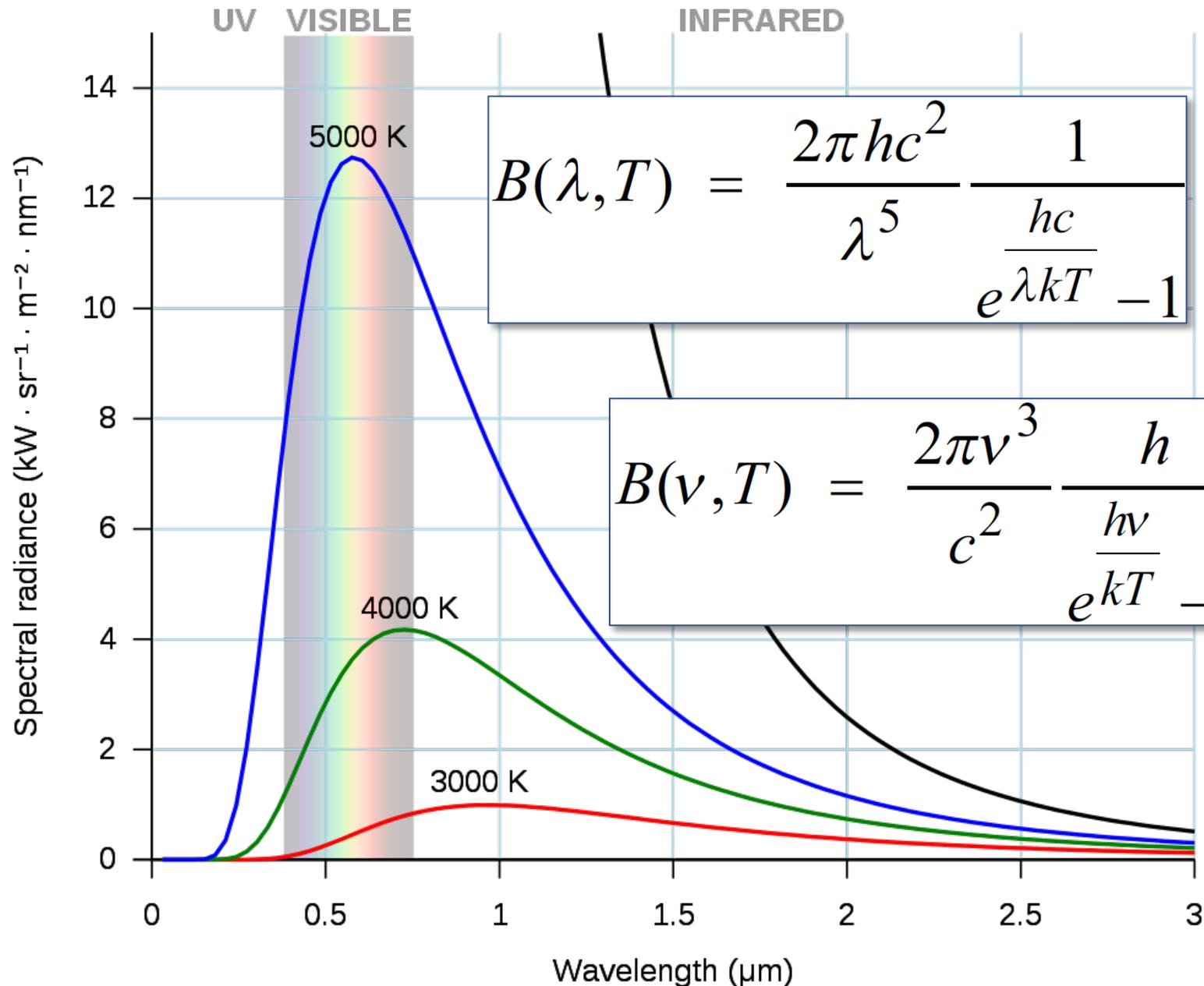
$$1 = \rho + \tau + \varepsilon$$
$$\rho = \tau = 0, \varepsilon = 1$$



Излучение абсолютно черного тела подчиняется закону Планка

$$B(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad \text{или} \quad B(\nu, T) = \frac{2\pi \nu^3}{c^2} \frac{h}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

# Свойства чернотельного излучения



Закон смещения Вина:

$$\lambda_{max} \sim 1/T$$

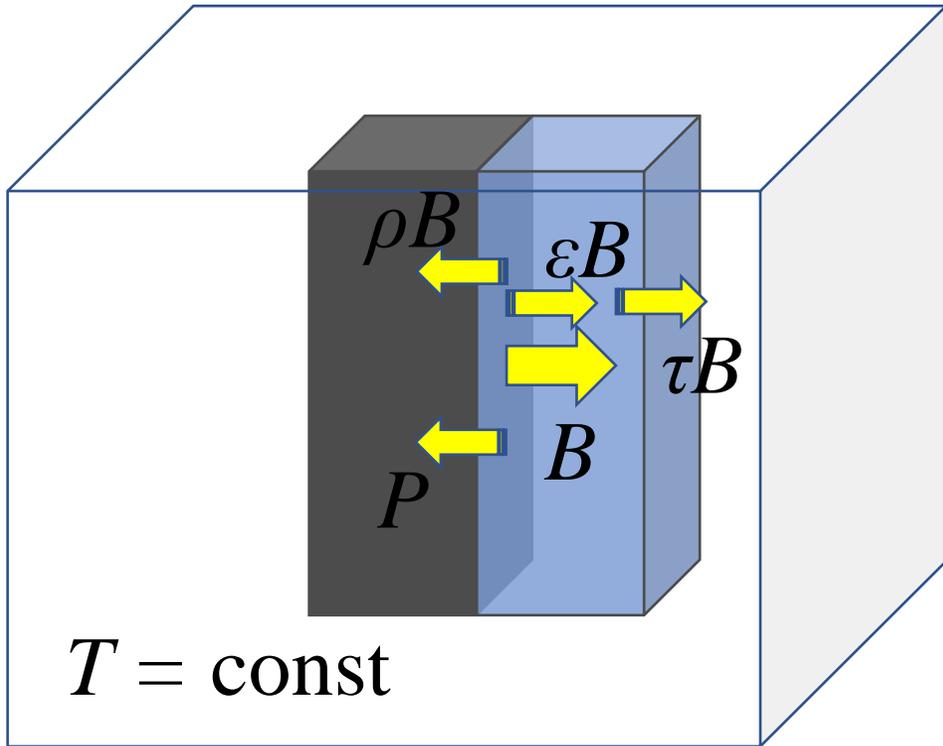
Закон Стефана-Больцмана:

$$J \sim T^4$$

Закон Рэля-Джинса:

$$B(T) \sim T \text{ при } h\nu/kT \ll 1$$

# Закон Кирхгофа. Понятие яркостной температуры



Энергия, излучаемая черным телом

$$B = \rho B + \tau B + \varepsilon B$$

равна сумме энергий, рассеиваемой, пропускаемой и поглощаемой серым телом.

Из условия термодинамического равновесия следует, что энергия, излучаемая серым телом

$$P = \varepsilon B$$

равна поглощаемой энергии излучения черного тела.

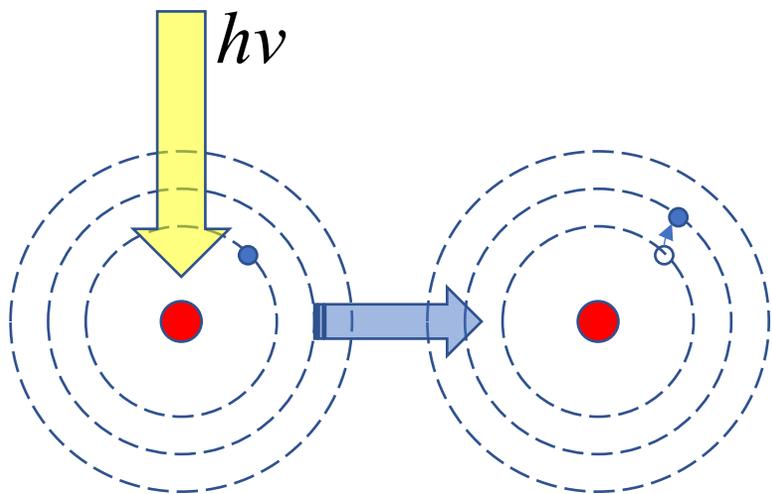
То есть,  $\varepsilon$  – и коэффициент поглощения, и коэффициент излучения.

$$\text{Если } B(T) \sim T, \text{ то } P(T) = \varepsilon B(T) \sim \varepsilon T \equiv T_{br}$$

$T_{br}$  – (радио)яркостная температура тела при термодинамической, равной  $T$

# Механизмы молекулярного поглощения излучения

## 1. Электронные переходы



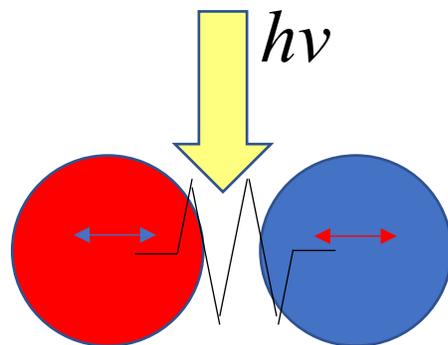
Энергия перехода  $E \sim 10$  эВ

Частота волны излучения

$$\nu = E/h \sim 10^{15} \text{ Гц}$$

(УФ и видимый спектр)

## 2. Колебания



Энергия колебательных переходов  $E \sim 0.1 - 1$  эВ

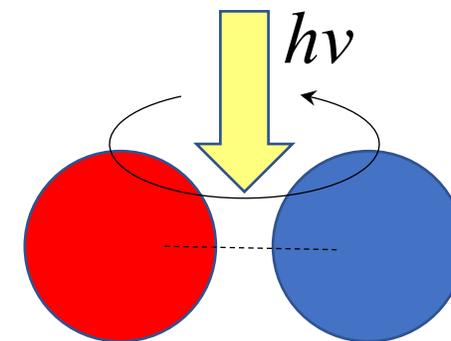
Частота волны

излучения

$$\nu = E/h \sim 10^{13} - 10^{14} \text{ Гц}$$

(тепловой ИК спектр)

## 3. Вращения



Энергия вращательных переходов

$$E \sim 10^{-4} - 10^{-2} \text{ эВ}$$

Частота волны

излучения

$$\nu = E/h \sim 10^{10} - 10^{12} \text{ Гц}$$

(дальний ИК + СВЧ)

# Резонансное поглощение: характерные длины волн

## Видимый и ИК диапазон

Длина волны (мкм)	Молекула	Длина волны (мкм)	Молекула	Длина волны (мкм)	Молекула
0,26	O <sub>3</sub>	1,85	H <sub>2</sub> O	4,9	CO <sub>2</sub>
0,60	O <sub>3</sub>	1,95	CO <sub>2</sub>	6,0	H <sub>2</sub> O
0,69	O <sub>2</sub>	2,0	CO <sub>2</sub>	6,6	H <sub>2</sub> O
0,72	H <sub>2</sub> O	2,1	CO <sub>2</sub>	7,7	CH <sub>4</sub>
0,76	O <sub>2</sub>	2,6	H <sub>2</sub> O	9,4	CO <sub>2</sub>
0,82	H <sub>2</sub> O	2,7	CO <sub>2</sub>	9,6	O <sub>3</sub>
0,93	H <sub>2</sub> O	3,9	N <sub>2</sub> O	10,4	CO <sub>2</sub>
1,12	H <sub>2</sub> O	4,3	CO <sub>2</sub>	13,7	O <sub>3</sub>
1,25	O <sub>2</sub>	4,5	N <sub>2</sub> O	14,3	O <sub>3</sub>
1,37	H <sub>2</sub> O	4,8	O <sub>3</sub>	15	CO <sub>2</sub>

# Резонансное поглощение в микроволновом диапазоне

Частота (ГГц)	Молекула
22,4	H <sub>2</sub> O
57	O <sub>2</sub>
119	O <sub>2</sub>
183	H <sub>2</sub> O

# Молекулярное (рэлеевское) рассеяние

Коэффициент ослабления ( $\text{м}^{-1}$ ):  $\gamma \sim 1 / \lambda^4$

Рэлеевское рассеяние на молекулах атмосферных газов заметно, в основном, в УФ и синей области спектра. Однако, важную роль могут играть

## аэрозольное рассеяние...

На мелких твердых частицах и капельках (размеры от 10 нм до 10 мкм).

Спектральная зависимость коэффициента ослабления излучения:

$$\gamma = \gamma_0 / \lambda^n, \quad n = 0,2 - 2 \text{ (для аэрозолей)} - \text{уравнение Ангстрема}$$

## ...и рассеяние на частицах льда и воды

- туман, низкие облака (радиус капель от 10 нм до 50 мкм):  $\gamma \sim 1 / \lambda^{1,9}$
- осадки (радиус капель порядка 1 мм):  $\gamma \sim 1 / \lambda^0$  (кроме СВЧ диапазона)

# Спутниковые приборы для исследования состава атмосферы

## 1. Формирователи оптических изображений среднего разрешения

Имеют отдельные спектральные каналы в полосе  $\sim$  от 0,4 до 15 мкм

Пространственное покрытие: сплошное/с перекрытием, разрешение  $\sim$  1 км

Задачи (в зависимости от набора и характеристик спектральных каналов):

- картирование облачности и общего содержания аэрозолей;
- определение/вертикальное профилирование свойств аэрозолей;
- вертикальное профилирование атмосферной влажности

Примеры приборов (носителей):

AVHRR/3 (NOAA-15 .. -19; Metop-A,-B,-C)    MODIS (EOS-Terra,-Aqua)

SEVIRI (Meteosat-8,-11)    MERIS (Envisat)    POLDER (PARASOL)

# Спутниковые приборы для исследования состава атмосферы

## 2. Сканирующие коротковолновые радиометры

Каналы в полосе ~ от 0,27 до 3 мкм (с расширением до 15 мкм)

Пространственное покрытие: разреженное/сплошное, разрешение ~ 10 км

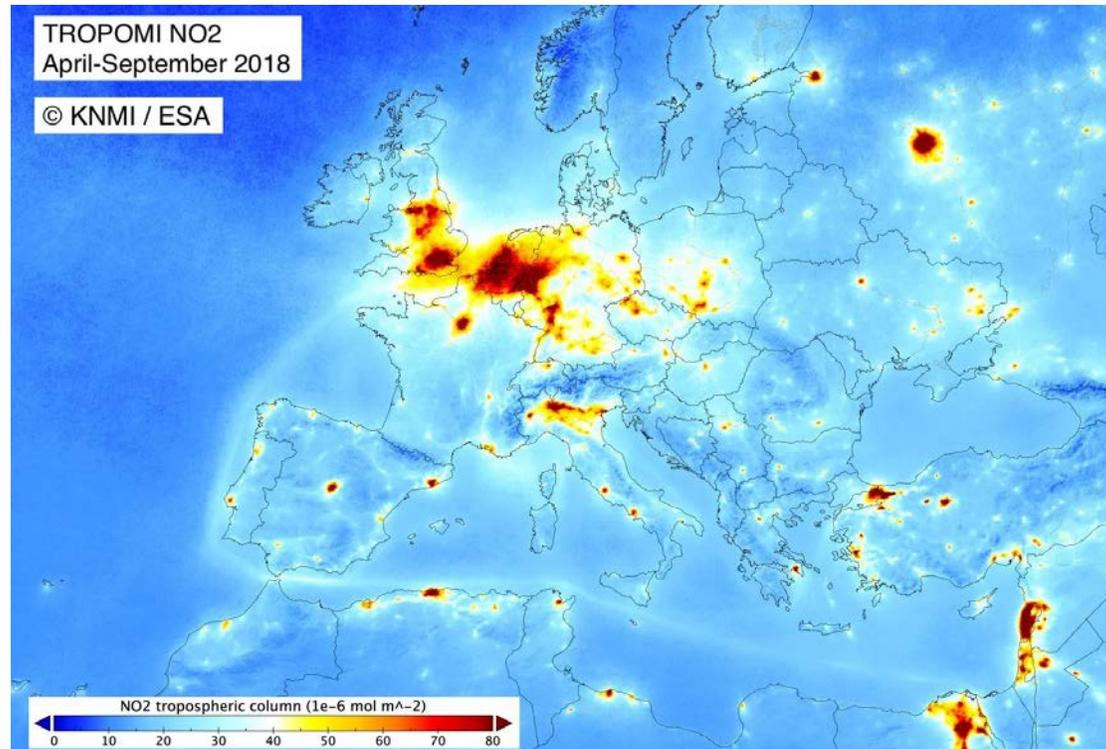
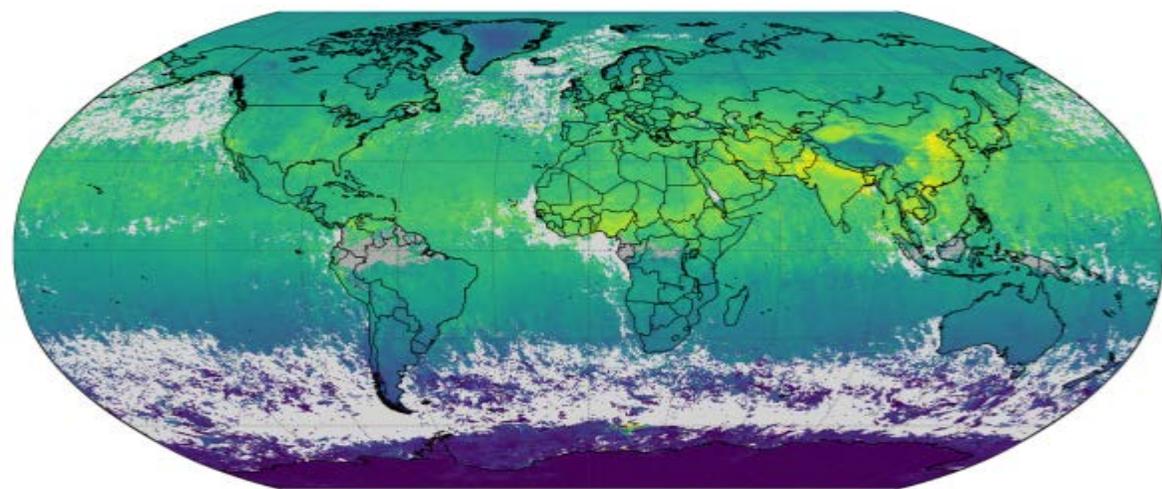
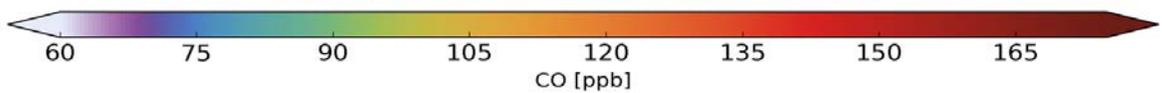
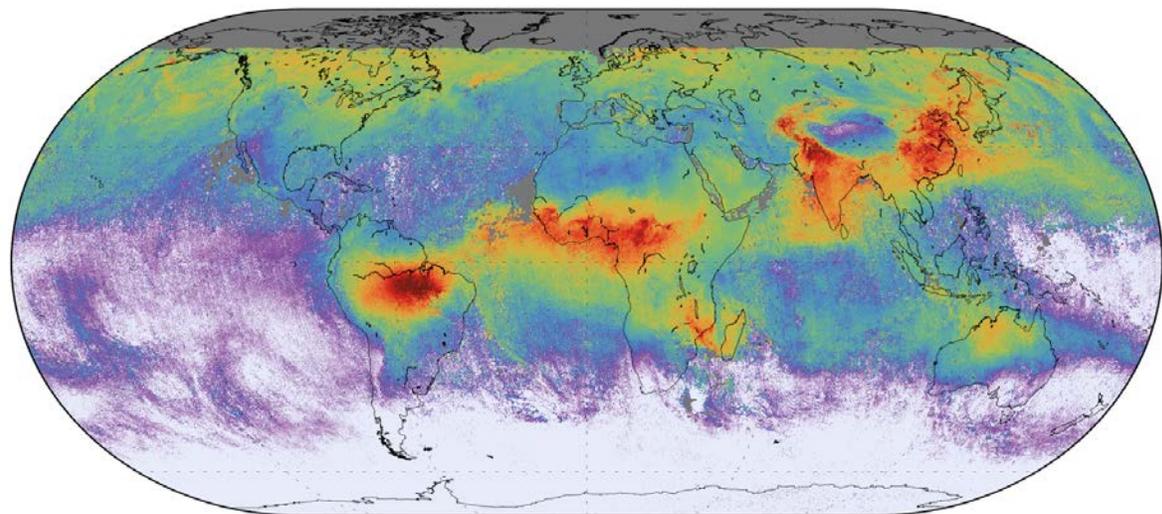
Задачи (в зависимости от набора и характеристик спектральных каналов):

- концентрации газовых компонент ( $O_3$ ,  $SO_2$ ,  $HCHO$ ,  $NO_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$  и др.);
  - доля облачности;
- оптическая толщина аэрозоля

Примеры приборов (носителей):

TROPOMI (Sentinel-5 P) UVN/Sentinel-4 (MTG)

# TROPOMI



# Спутниковые приборы для исследования состава атмосферы

## 3. Сканирующие/зондирующие инфракрасные радиометры

Каналы в полосе ~ от 3 до 15 мкм (с расширением до 50 мкм и в ВИД/БИК)

Пространственное покрытие: разреженное/сплошное, разрешение ~ 10 км

Задачи (в зависимости от набора и характеристик спектральных каналов):

- общее содержание или вертикальные профили концентрации газовых компонент ( $C_2H_2$ ,  $C_2H_6$ , CFC-11, CFC-12,  $ClONO_2$ ,  $CO_2$ , COS,  $HNO_3$ ,  $N_2O$ , NO,  $NO_2$ ,  $SF_6$ ,  $O_3$ ,  $SO_2$ ,  $CH_4$  и др.) и аэрозоля;
- вертикальный профиль влажности ( $H_2O$ )

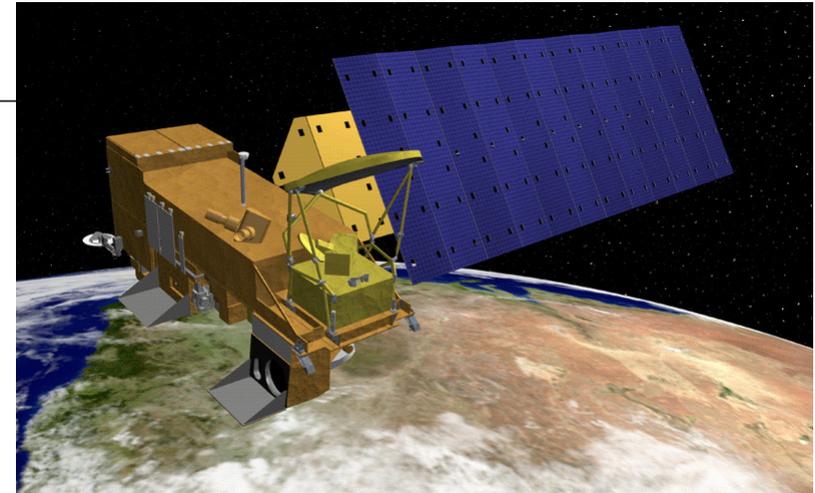
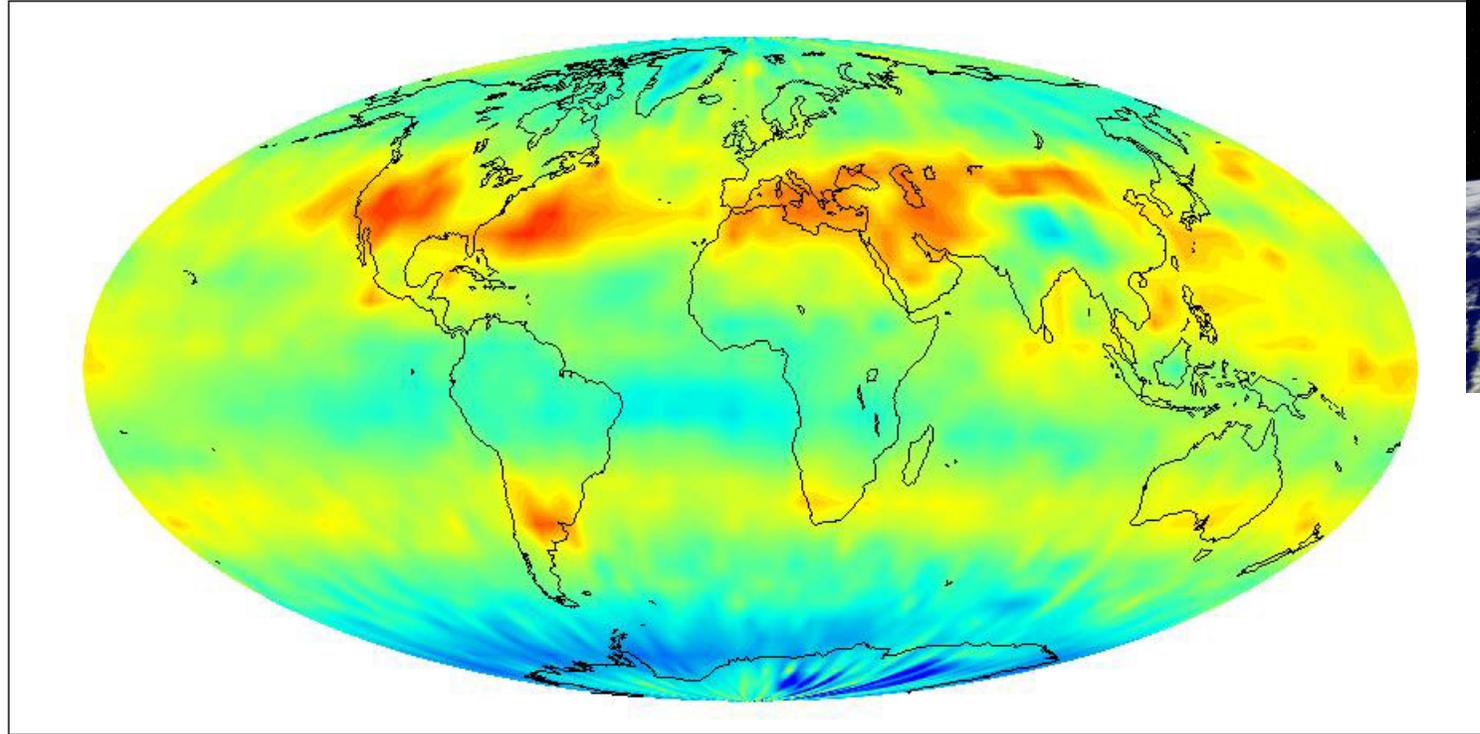
Примеры приборов (носителей):

Радиометр GOES (GOES-8 .. -15)      AIRS (EOS-Aqua)

IASI (Metop-A,-B,-C)

# AIRS

NASA AIRS Mid-Tropospheric (8km) Carbon Dioxide  
July 2003



Concentration in parts-per-million by volume

# Спутниковые приборы для исследования состава атмосферы

## 4. Сканирующие микроволновые (СВЧ) радиометры

Каналы в полосе  $\sim$  от 0,1 до 30 см

Пространственное покрытие: с перекрытием, разрешение  $\sim$  10 – 100 км

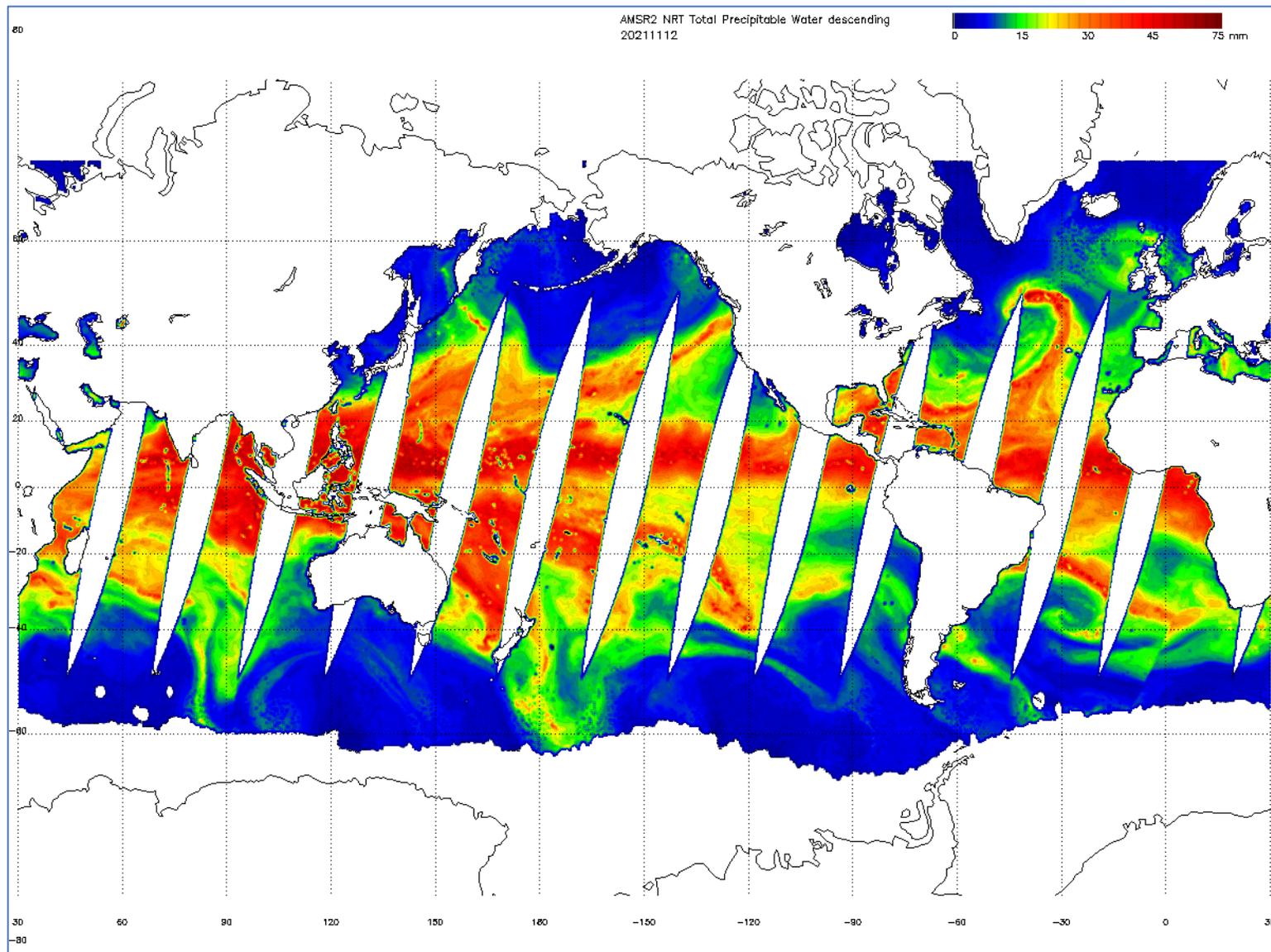
Задачи (в зависимости от набора и характеристик спектральных каналов):

- общее содержание водяного пара, водность облаков
  - интенсивность осадков
- вертикальный профиль влажности

Примеры приборов (носителей):

AMSR-E (EOS Aqua)      AMSR-2 (GCOM-W)      ATMS (Suomi-NPP)  
SSM/I, SSMIS (DMSP F-8 ... -18)

# AMSR-2



# Спутниковые приборы для исследования состава атмосферы

## 5. Лимбовые зондировщики

Каналы в полосе ~ от 0,1 до 30 см

Пространственное покрытие: разреженное, разрешение ~ 300 км

Вертикальное разрешение 1 – 3 км в слое до 80 км

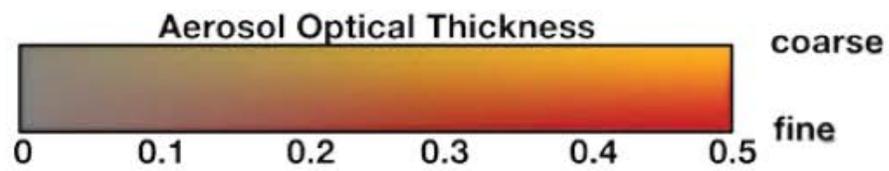
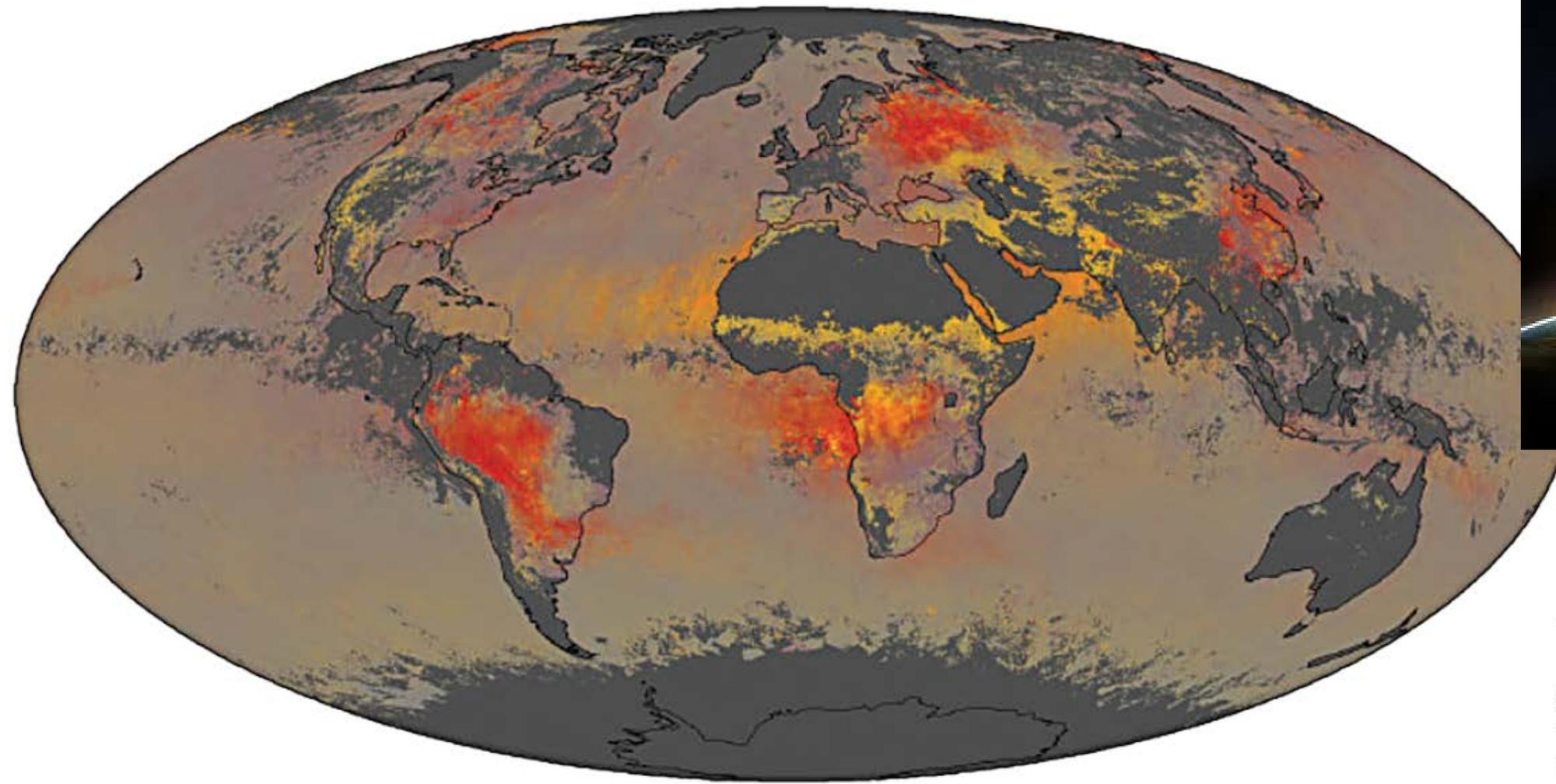
Задачи (в зависимости от набора и характеристик спектральных каналов):

- В диапазоне УФ/ВИД/БИК/КВИК: BrO, CH<sub>4</sub>, ClO, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, HCHO, N<sub>2</sub>O, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, O<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub>, аэрозоль;
- В диапазоне СВИК/ТИК: C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CCl<sub>4</sub>, CF<sub>4</sub>, CH<sub>4</sub>, ClONO<sub>2</sub>, CO, COF<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, HNO<sub>3</sub>, HNO<sub>4</sub>, HOCl, N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, OCS, SF<sub>6</sub>, аэрозоль;
- В СВЧ: BrO, ClO, CO, H<sub>2</sub>O, HCl, HCN, HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, HOCl, N<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, OH, SO<sub>2</sub>

Примеры приборов (носителей):

SAGE-III (МКС)

# SAGE-III



Credit: NASA's Earth Observatory

# Спутниковые приборы для исследования состава атмосферы

## 6. Лидары

Узкие линии в диапазоне от УФ до КВИК

Пространственное покрытие: отдельные точки в надири или под углом.

Задачи (в зависимости от набора и характеристик спектральных каналов):

- лидары обратного рассеяния (одна длина волны УФ или две ВИД + БИК):

вертикальное профилирование типов и концентрации аэрозоля;

- лидары дифференциального поглощения (линия резонансного поглощения

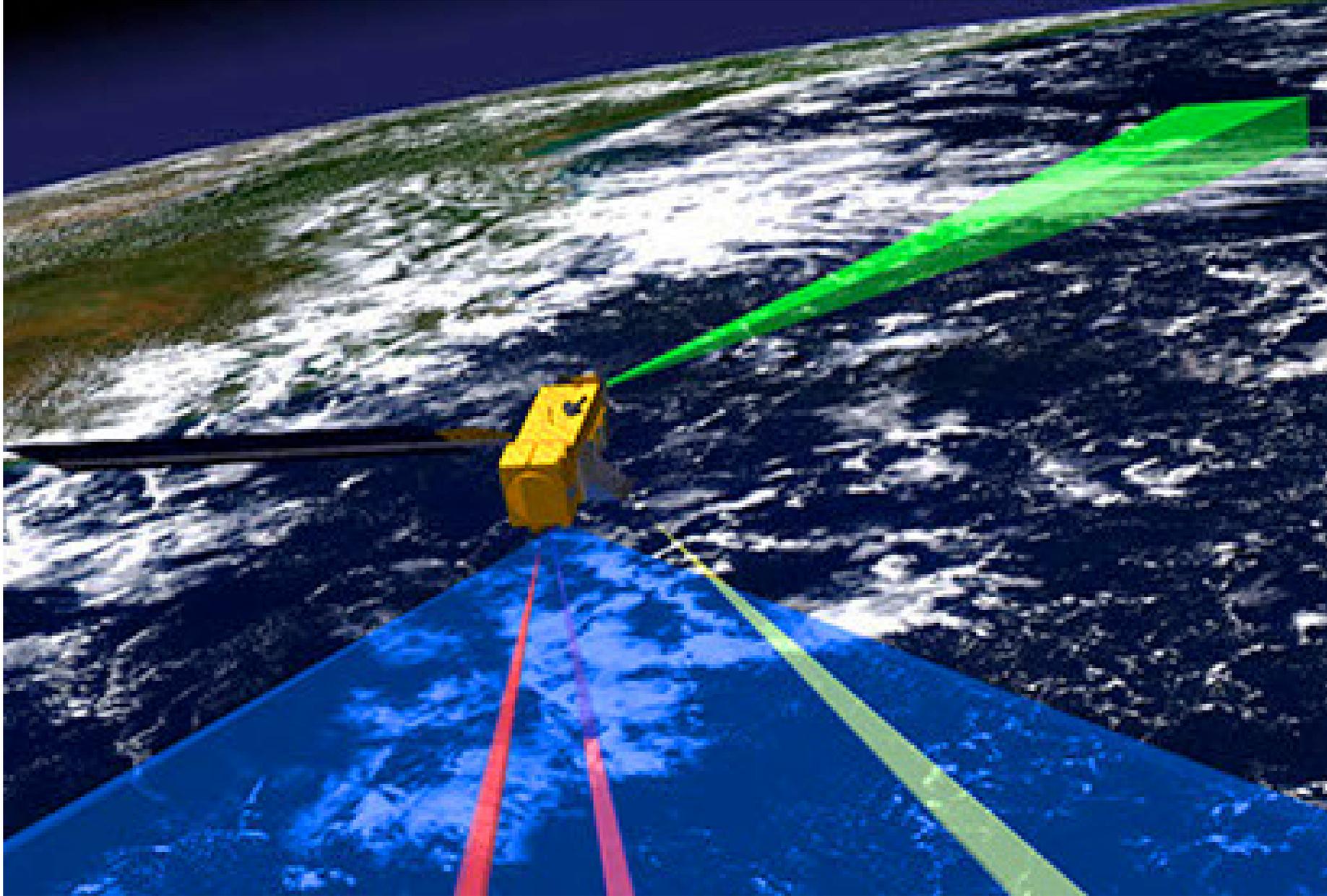
+ близкая линия в окне прозрачности УФ-/ВИД-/БИК-/КВИК- диапазона):

вертикальные профили концентрации  $O_3$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$  и др.

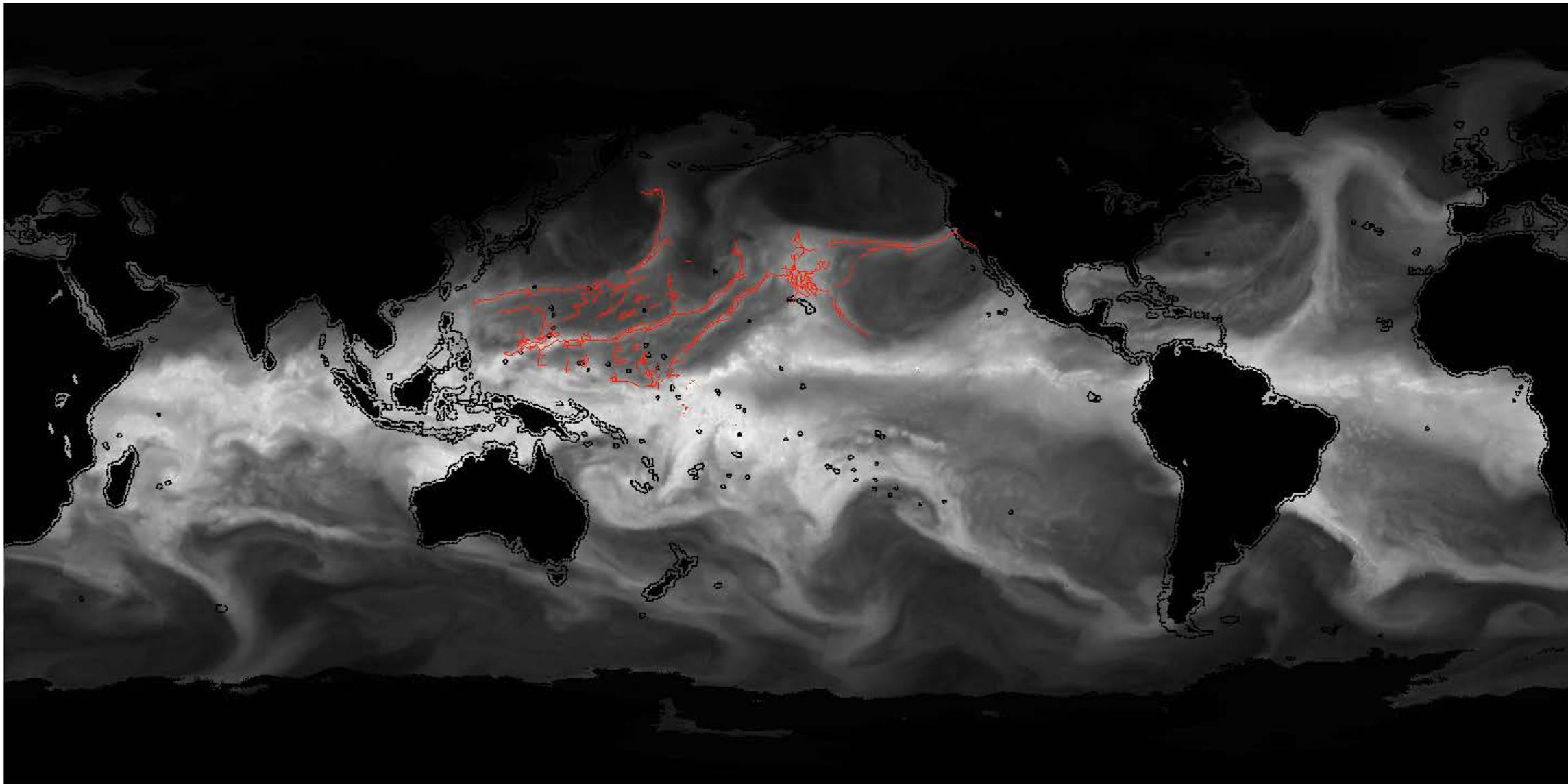
Примеры приборов (носителей):

ALADIN (ADM-Aeolus)    Лидар  $CO_2$  (ASCENDS)

# ASCENDS



# Восстановление атмосферной динамики



# Полезные интернет-ресурсы

← → ↻ wmo-sat.info/oscar/

 **OSCAR**  
Observing Systems Capability Analysis and Review Tool

[Home](#) [Observation Requirements](#) [Space-based Capabilities](#) [Surface-based Capabilities](#) [Analysis](#)

## Welcome to OSCAR

OSCAR is a resource developed by WMO in support of Earth Observation applications, studies and global coordination.

It contains quantitative user-defined requirements for observation of physical variables in application areas of WMO (i.e. related to weather, water and climate). OSCAR also provides detailed information on all earth observation satellites and instruments, and expert analyses of space-based capabilities.

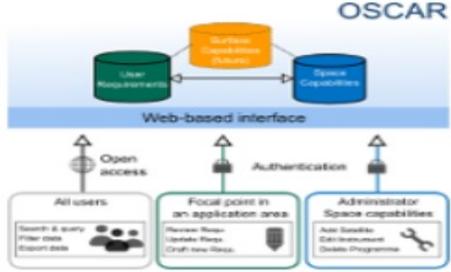
The tool constitutes a building block of WIGOS and more specifically, the so-called [Rolling Requirements Review process](#). OSCAR targets all users interested in the status and the planning of global observing systems as well as data users looking for instrument specifications at platform level. To continue, please select one of the following modules:

- [Observation Requirements](#)
- [Satellite Capabilities](#)
- [Surface based Capabilities](#)

Each of the modules can be consulted individually, however, the tool is also designed with the goal to integrate user requirements with actual capabilities. This facilitates the Rolling Requirements Review process, comparing "what is required" with "what is, or will be available", in order to identify gaps and support the planning of integrated global observing systems.

The tool is being further developed, and additional functionality and information will be added as appropriate. Please consult the [list of open issues](#) for a description of bugs affecting the system. One future objective is to automatically generate first-level analyses of compliance between the quantitative requirements and the actual capabilities (space- or surface-based).

For support and feedback please use the [helpdesk form](#).



OSCAR overview - click to enlarge

<https://space.oscar.wmo.int/>

## Книги, справочники, руководства

У.Г. Рис. Основы дистанционного зондирования. Второе издание. М.: Техносфера, 2006. (пер. с англ.) 336 с.

Руководство по приборам и методам наблюдений. Том IV – Космические наблюдения. Издание 2018 г. Всемирная Метеорологическая Организация, 2018. ВМО-№8. 278 с.