

**СПУТНИКОВАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ
ПРОДУКЦИЯ О ПАРАМЕТРАХ СОСТОЯНИЯ
АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И
ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ**

А. Б. Успенский

*Научно-исследовательский центр
космической гидрометеорологии «Планета»*

**Научный семинар Института глобального климата и экологии
имени академика Ю.А. Израэля, 17 декабря 2025 г., среда, 15:00**

СОДЕРЖАНИЕ *

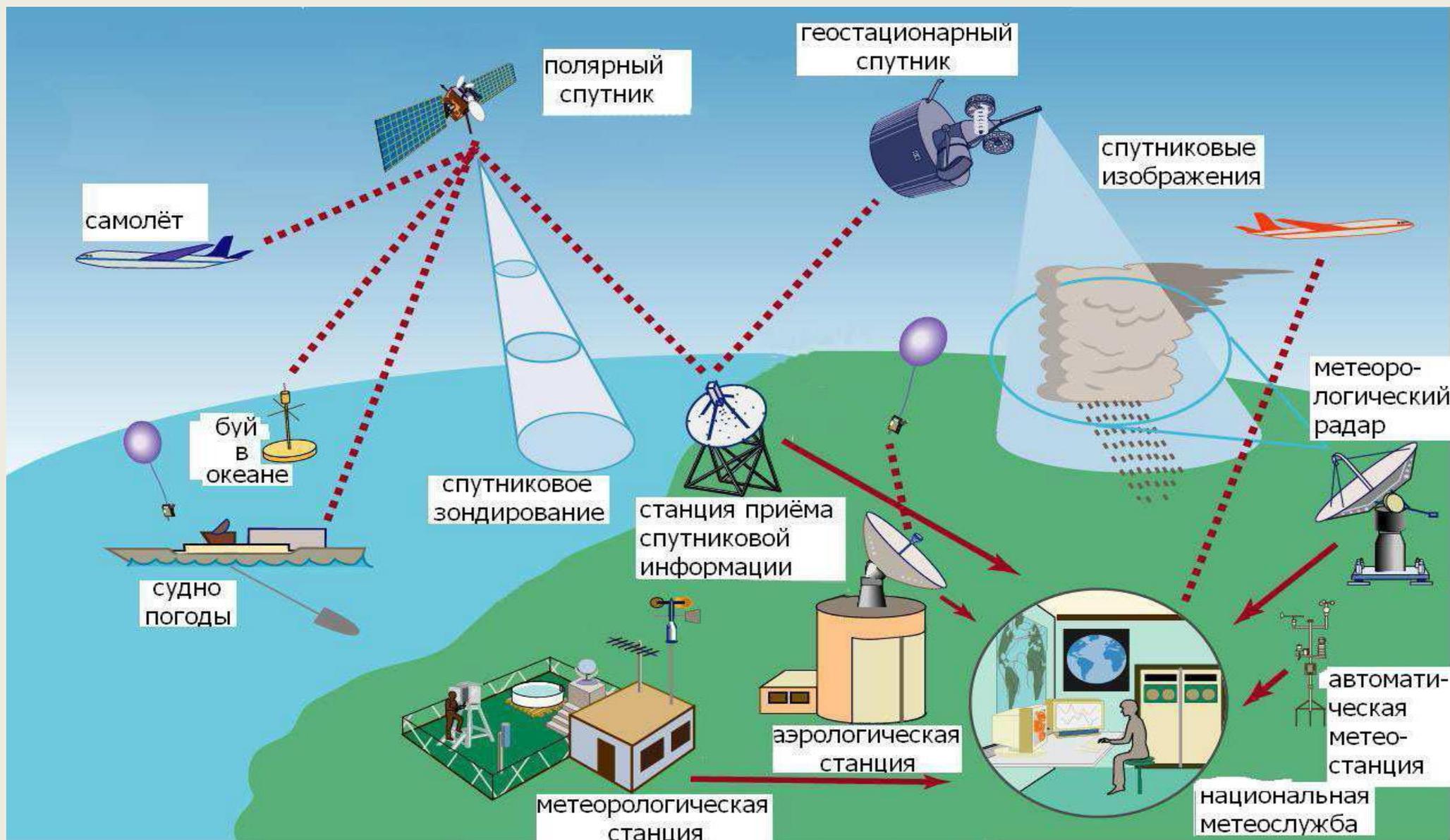
- общие сведения о спутниковой системе наблюдений (орбиты, измерительная аппаратура, существующие и перспективные метеоспутники)
- физические основы и основные законы переноса солнечного и теплового излучения в системе «атмосфера - подстилающая поверхность», спектральные диапазоны, используемые для дистанционного зондирования
- методы анализа и обработки спутниковых данных для получения информационных продуктов по параметрам состояния:
 - атмосферы;
 - гидросферы;
 - подстилающей поверхности.
- задачи численного прогноза погоды
- мониторинг глобальных климатических изменений

* ПРИМЕЧАНИЕ: При подготовке презентации использованы материалы ФГБУ «НИЦ «Планета», проф. Тимофеева Ю. М. (СПбГУ) и д. ф.-м. н. Заболотских Е. В. (РГГМУ)

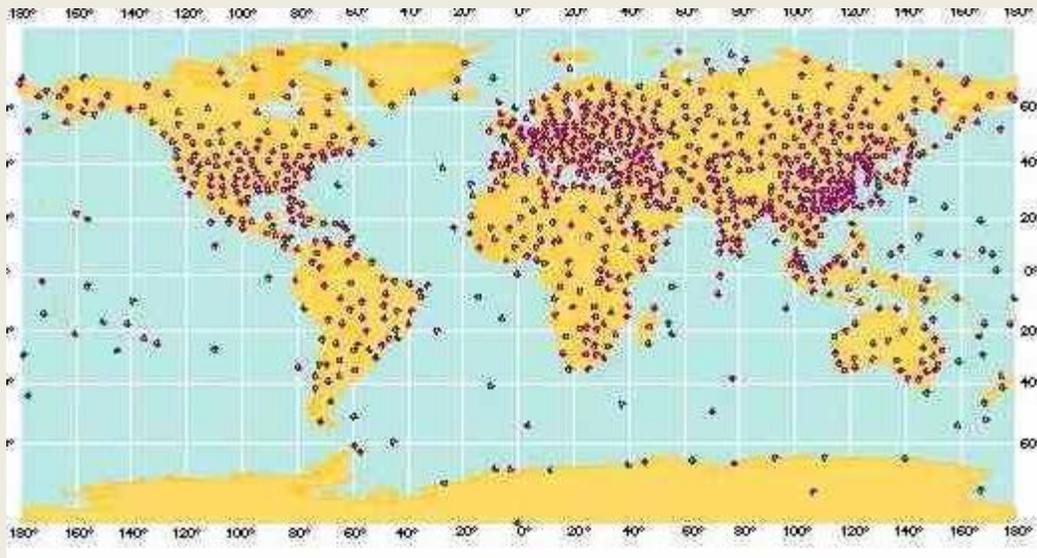
Отечественные и зарубежные космические комплексы гидрометеорологического назначения

Российская МКС в настоящее время представляет 2-х ярусную систему, состоящую из средневысотных полярно-орбитальных, геостационарных и высокоэллиптических КА, и является частью космического сегмента **WIGOS** (**WMO Integrated Global Observing System**) или **Интегрированной Глобальной Системы Наблюдений (ИГСН)**, развиваемого при координации ВМО. **ИГСН ВМО** включает наземный и космический сегменты (подсистемы наблюдений).

Система метеорологических наблюдений

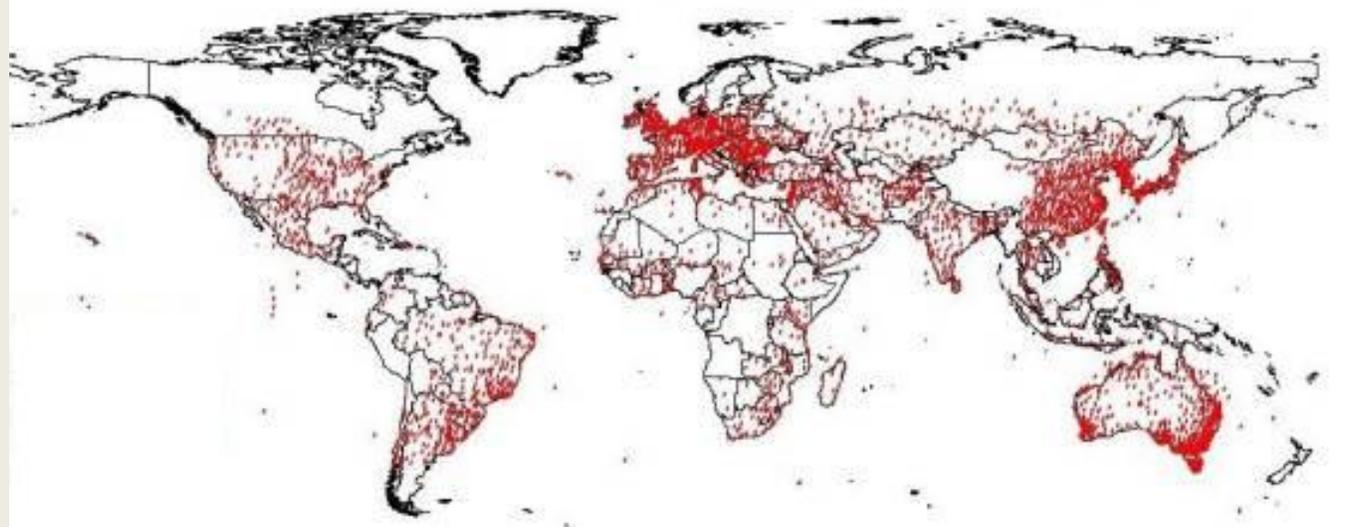


Наземная сеть гидрометеорологических наблюдений



Мировая сеть аэрологического
(радиозондового) зондирования
атмосферы

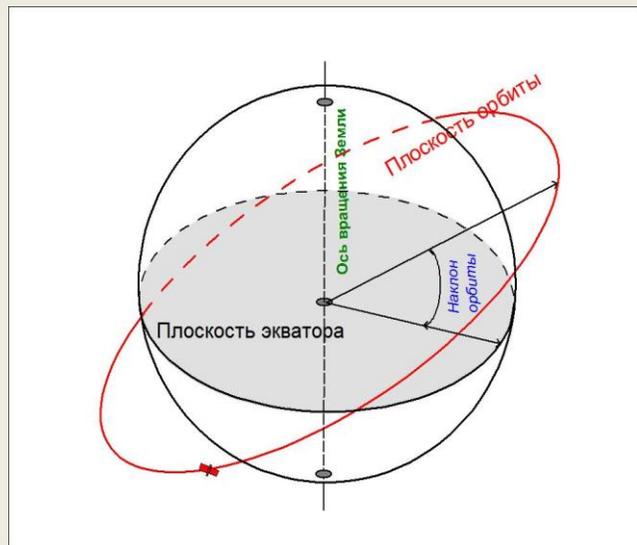
WMO Meteorological Stations



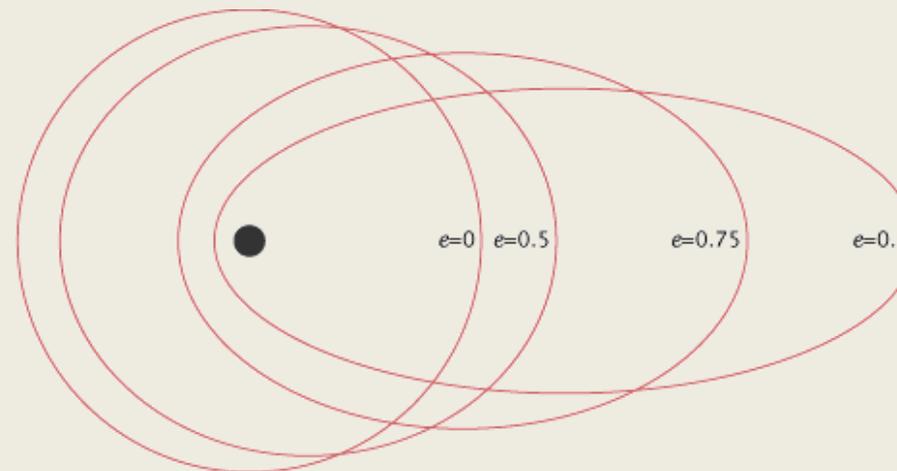
Классификация типов ИСЗ

- **Исследовательские спутники** спутники, предназначенные для испытания перспективной целевой аппаратуры, исследования планет и других космических объектов.
 - **ИСЗ дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ)***- Осуществляют дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) в различных спектральных диапазонах- от УФ до ИК и МКВ. Назначение - слежение за состоянием флоры и фауны, экология, разведка полезных ископаемых и т. д.
 - **Метеорологические спутники***- Предназначены для получения данных в целях предсказания погоды, изучения климата Земли. **Спутниковая метеорология**-разрабатывает методы получения и использования спутниковой метеорологической информации.
 - **«Ионозонд»** предназначен для изучения земной ионосферы, мониторинга геофизической обстановки и космической погоды
 - **Навигационные спутники** - спутники, обеспечивающие решение задачи навигации на Земле GPS и ГЛОНАСС.
 - **Спутники связи** - Искусственный спутник Земли, предназначенный для ретрансляции радиосигнала между точками на земной поверхности, не имеющими прямой видимости.
 - **Микроспутники** - Малые космические аппараты (массой менее 500 кг). Востребованы по причине своей относительно низкой стоимости и доступности, выполняют задачи ДЗЗ, отработки новых технологий.
- * Группировку КА ДЗЗ и метеоспутников обычно называют **Спутники наблюдения Земли**

Элементы орбиты



Для прогнозирования орбитального движения ИСЗ используются данные в формате **TLE** (Two-Line Element). Данные TLE содержат параметры орбиты (**наклонение, долгота восходящего узла, эксцентриситет, аргумент перицентра, средняя аномалия, частота обращения**), однозначно определяющие положение ИСЗ, см. вебсайт www.space-track.org. По этим параметрам можно однозначно прогнозировать положение ИСЗ на орбите. Существуют готовые модели движения ИСЗ по орбите, например, **SGP4**.

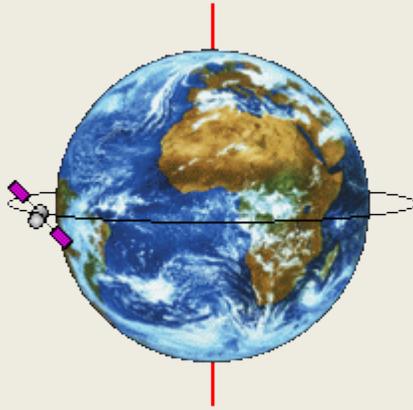


Изменение вида эллиптической орбиты при разных значениях эксцентриситета e

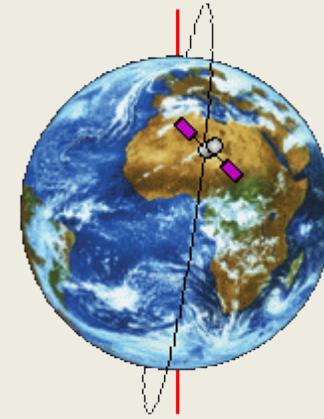
Орбиты спутников



Наклонение $0^\circ < i < 90^\circ$



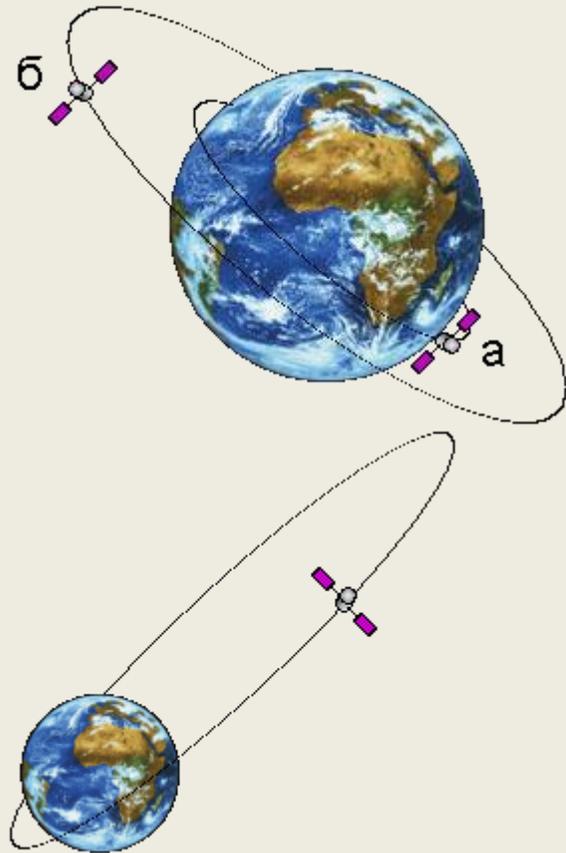
Экваториальная



Солнечно-синхронная

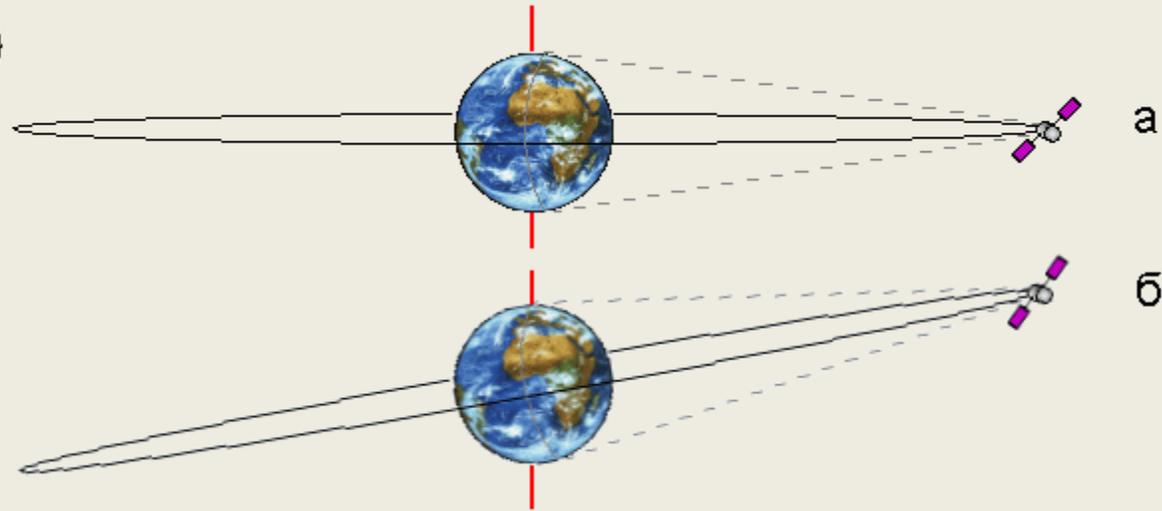
Экваториальная орбита - наклонение $i = 0^\circ$. Прецессия и поворот орбиты будут максимальны - до 10° /сутки и до 20° /сутки соответственно. Ширина полосы видимости спутника, которая расположена вдоль экватора, определяется его высотой над поверхностью Земли. Орбиты с малым наклонением " i " часто называют "около экваториальными"

Солнечно-синхронная орбита (ССО) - часто используется метеоспутниками. Спутник проходит над любой точкой земной поверхности приблизительно в одно и то же местное солнечное время. Для этого орбита должна прецессировать в сторону, обратную вращению Земли (на восток) на 360° в год, чтобы компенсировать вращение Земли вокруг Солнца. Такие условия соблюдаются только для определённого диапазона высот орбит и наклонений - это **высоты 600-800 км** и наклонение i должно быть порядка **98°** , т.е. КА на ССО имеют обратное движение. При увеличении высоты полёта КА наклонение должно увеличиваться, из-за чего он не будет пролетать над полярными районами. Как правило, ССО близки к круговым, но могут быть и эллиптическими.



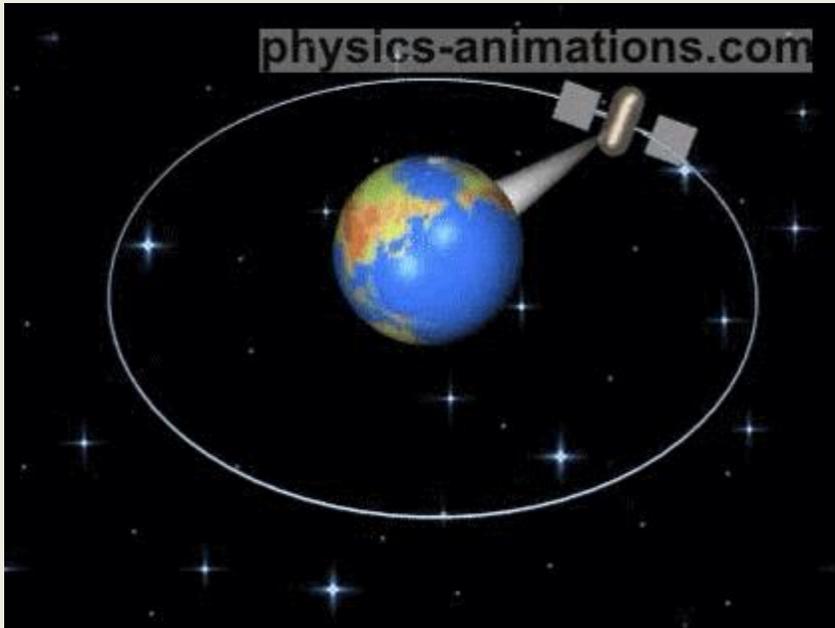
а) Низкоорбитальные КА (LEO)- спутники с высотами от 160 км до 2000 км.

б) Среднеорбитальные КА (МЕО) спутники с высотами от 2000 км до 35786 км.

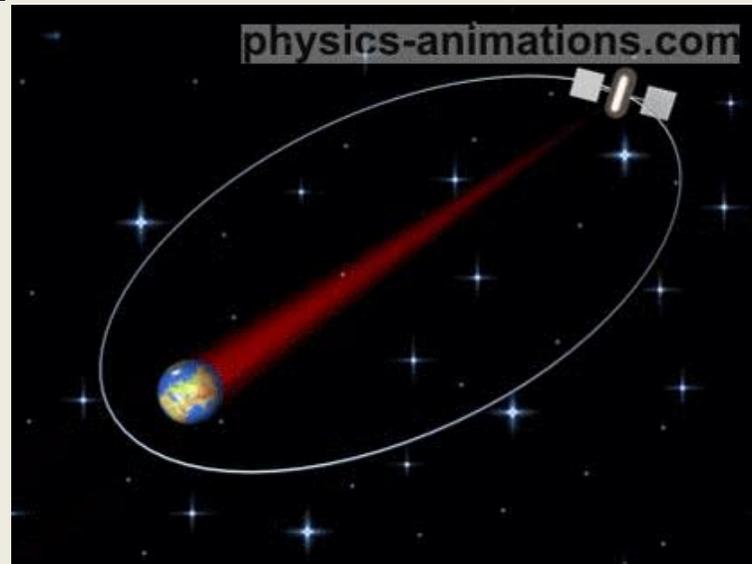


Высокоорбитальные КА (HEO) - спутники, достигающие высот более 35786 км и имеющие большой эксцентриситет (например, спутники серии "Арктика-М", "Молния") называются **высокоэллиптическими**.

а) Геостационарные КА (GEO) - спутники, имеющие период обращения вокруг Земли, равный звёздным (сидерическим) суткам - 23ч 56м 4,09с и $i=0$. Их период обращения совпадает с периодом обращения Земли вокруг своей оси, такие КА "висят" на одном месте, на высоте 35786 км. Если наклонение $i \neq 0$, то такие КА называются **геосинхронными б).**



GEO



HEO

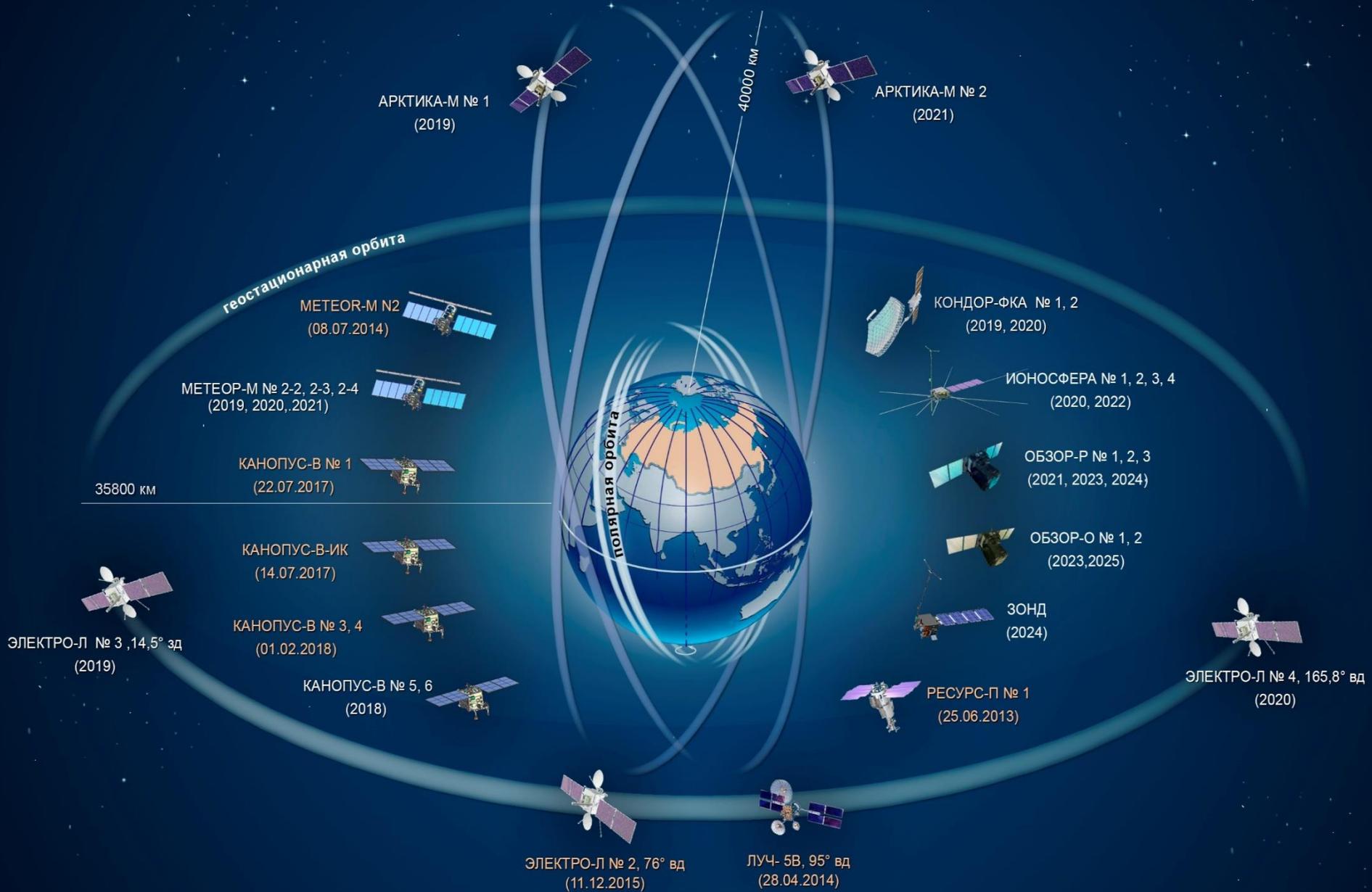
МЕЖДУНАРОДНАЯ ГРУППИРОВКА СПУТНИКОВ НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ



МЕЖДУНАРОДНАЯ ГРУППИРОВКА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СПУТНИКОВ



ДЕЙСТВУЮЩАЯ И СОЗДАВАЕМАЯ ГРУППИРОВКА КА В ИНТЕРЕСАХ РОСГИДРОМЕТА



Преимущества высокоэллиптических орбит при наблюдении арктического региона



ИЗЛУЧЕНИЕ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Основные типы излучений в атмосфере Земли: **прямое солнечное**, т.е. излучение, пришедшее в данную точку от Солнца; **рассеянное солнечное**, т.е. излучение Солнца, испытавшее рассеяние в атмосфере; **отраженное от подстилающей поверхности** солнечное излучение; **собственное излучение атмосферы** (тепловое излучение) и **собственное излучение поверхности** (тепловое). Таким образом, все излучение в атмосфере Земли можно разделить на **солнечное** и **собственное** (тепловое).

Для описания процессов взаимодействия излучения с различными объектами используется понятие монохроматических плоских электромагнитных волн, имеющих строго одно направление и конкретную длину волны. Постулируется принцип независимости подобных монохроматических волн при их наложении. Физическая основа принципа независимости – **некогерентность** естественных источников излучения.

Взаимодействие излучения со средой

Основные механизмы взаимодействия излучения со средой :

ослабление (рассеяние, поглощение); отражение; преломление

$\epsilon_\lambda = R_\lambda / B_\lambda$ – излучательная способность

$R_\lambda = \epsilon_\lambda B_\lambda = a_\lambda I_\lambda$ – в поглощающей и излучающей среде

$I_\lambda = B_\lambda$ - для условий ЛТР

$\epsilon_\lambda = a_\lambda$ – закон Кирхгофа

$a_\lambda I_\lambda = I_\lambda - r_\lambda I_\lambda - \tau_\lambda I_\lambda$, $a_\lambda + r_\lambda + \tau_\lambda = 1$, τ_λ – пропускание среды

1. $a_\lambda = 1$, тогда $r_\lambda = 0$ и $\tau_\lambda = 0$ - для АЧТ

2. $\tau_\lambda = 1$, тогда $a_\lambda = 0$ и $r_\lambda = 0$ – для «прозрачной» среды

3. $\tau_\lambda = 0$, тогда $a_\lambda + r_\lambda = 1$ – для «непрозрачной» среды

$\epsilon_\lambda + r_\lambda + \tau_\lambda = 1$ - следствие закона Кирхгофа

(для среды в состоянии ЛТР)

Уравнение переноса ИК- излучения в атмосфере
(в других обозначениях)

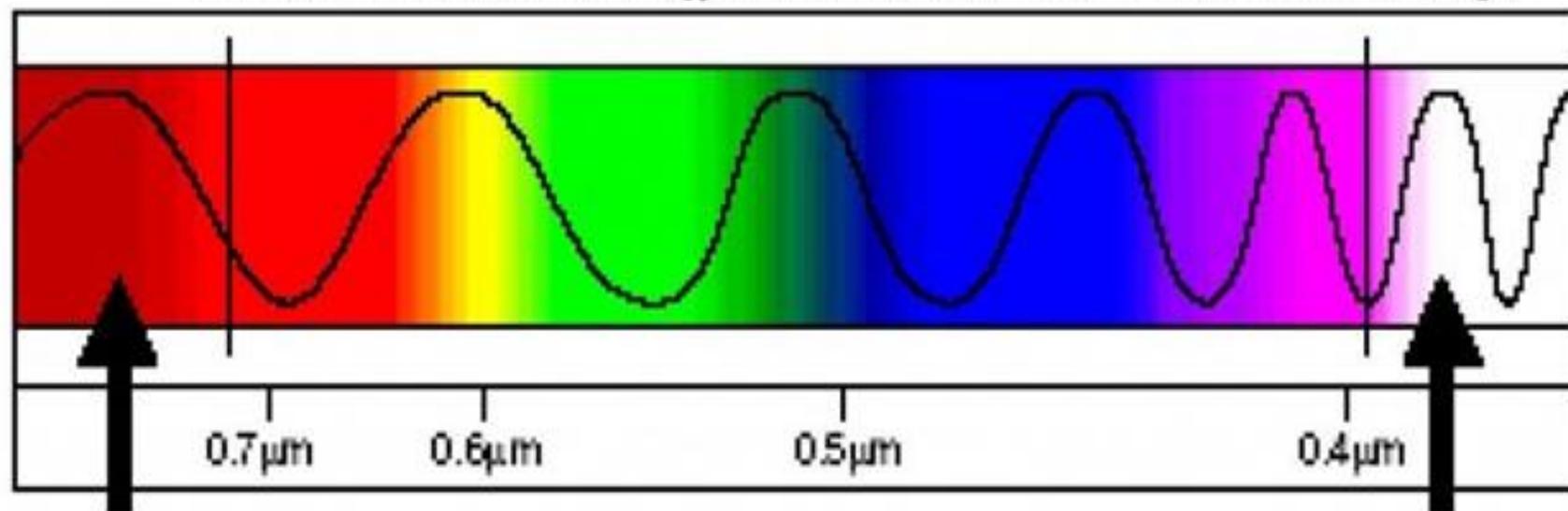
$$I_{\lambda} = B_{\lambda}(T(p_s))\tau_{\lambda}(p_s) + \int_{p_s}^0 (T(p)) \frac{\partial \tau_{\lambda}}{\partial \ln p} d \ln p$$

$$\tau_{\lambda}(p) = \exp \left[\varphi \int_0^p k_{\lambda} q \cdot g^{-1} dp \right]$$

Спектры поглощения атмосферных газов

- Наиболее сильное поглощение **водяного пара** - в районе **6 мкм** и в области вращательной полосы (**20–150 мкм**), хотя вращательные линии "начинаются" от микроволновой области спектра ($\lambda = 1.35 \text{ см}$) и расположены также в "окне прозрачности" **8–12 мкм**.
- Молекула **CO₂** - две интенсивные полосы поглощения – **4.3 и 15 мкм**.
- Полосы поглощения **озона** - вблизи **4.0, 9.6 и 15 мкм**.
- Важные полосы поглощения **CH₄** и **N₂O** - вблизи **7.6; 3.3 и 7.8 мкм**. Достаточно интенсивная полоса **CO** - вблизи **4.7 мкм**. Полосы поглощения **фреонов** - в окне прозрачности **8–12 мкм**.
- Спектральные интервалы, где атмосферное поглощение относительно невелико. Кроме очень важного **окна прозрачности 8–12 мкм**, **окна прозрачности** - вблизи **3.8 мкм** и в ближнем ИК (БИК) диапазоне спектра.
- Основные поглотители в **МКВ области спектра** при длинах волн $\lambda > 100 \text{ мкм}$ - **O₂** и **H₂O**. В МКВ области спектра - большое количество вращательных линий многих атмосферных газов (например, озона, **ClO, NO, N₂O, NO₂, HNO₃** и т. д.).

Показатели поглощения χ_λ волн видимой части солнечного спектра



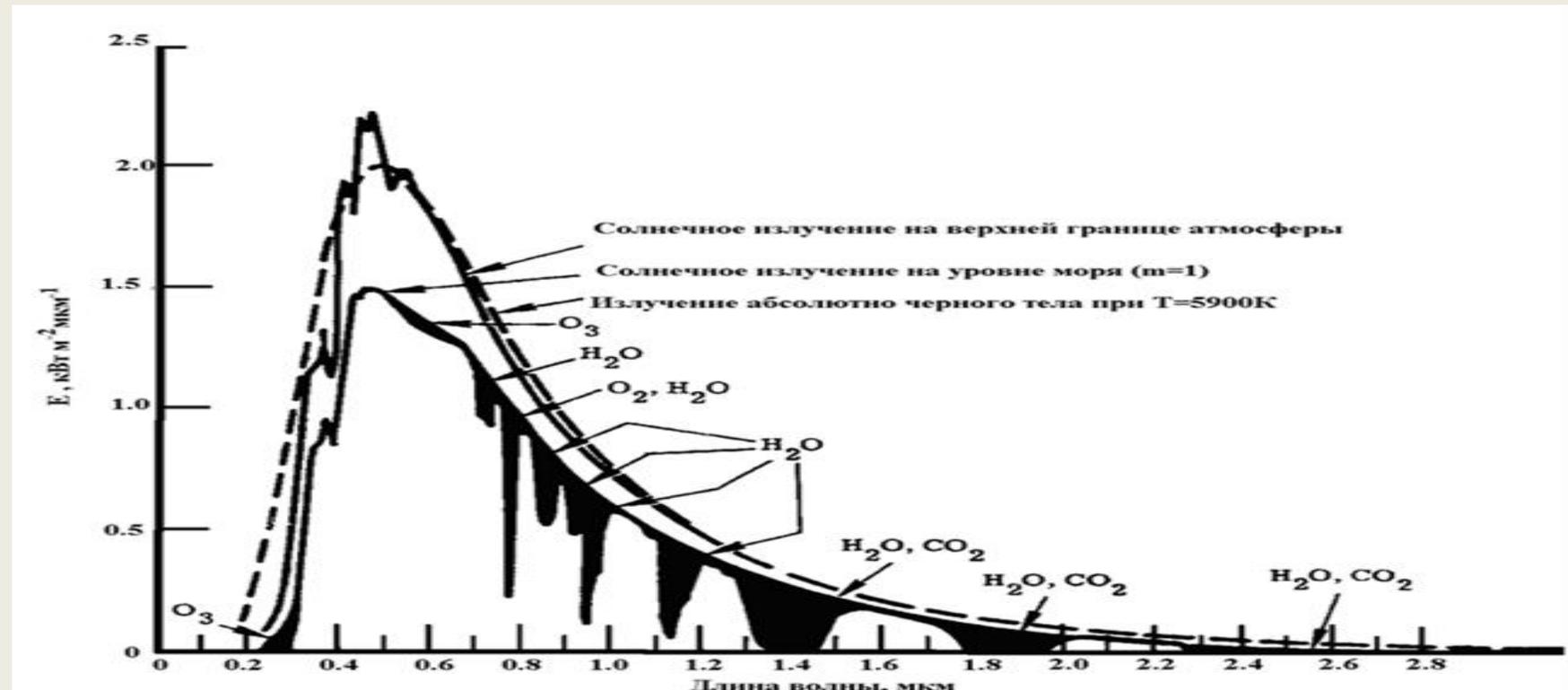
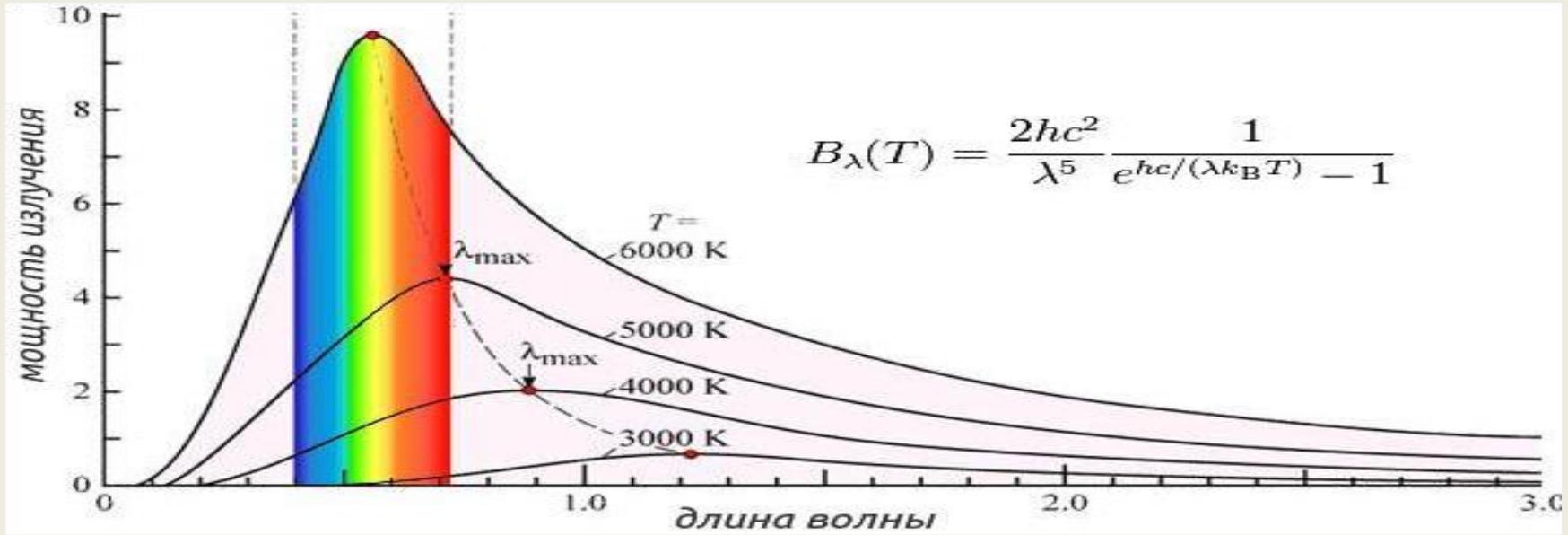
Инфракрасная

Видимая часть солнечного спектра

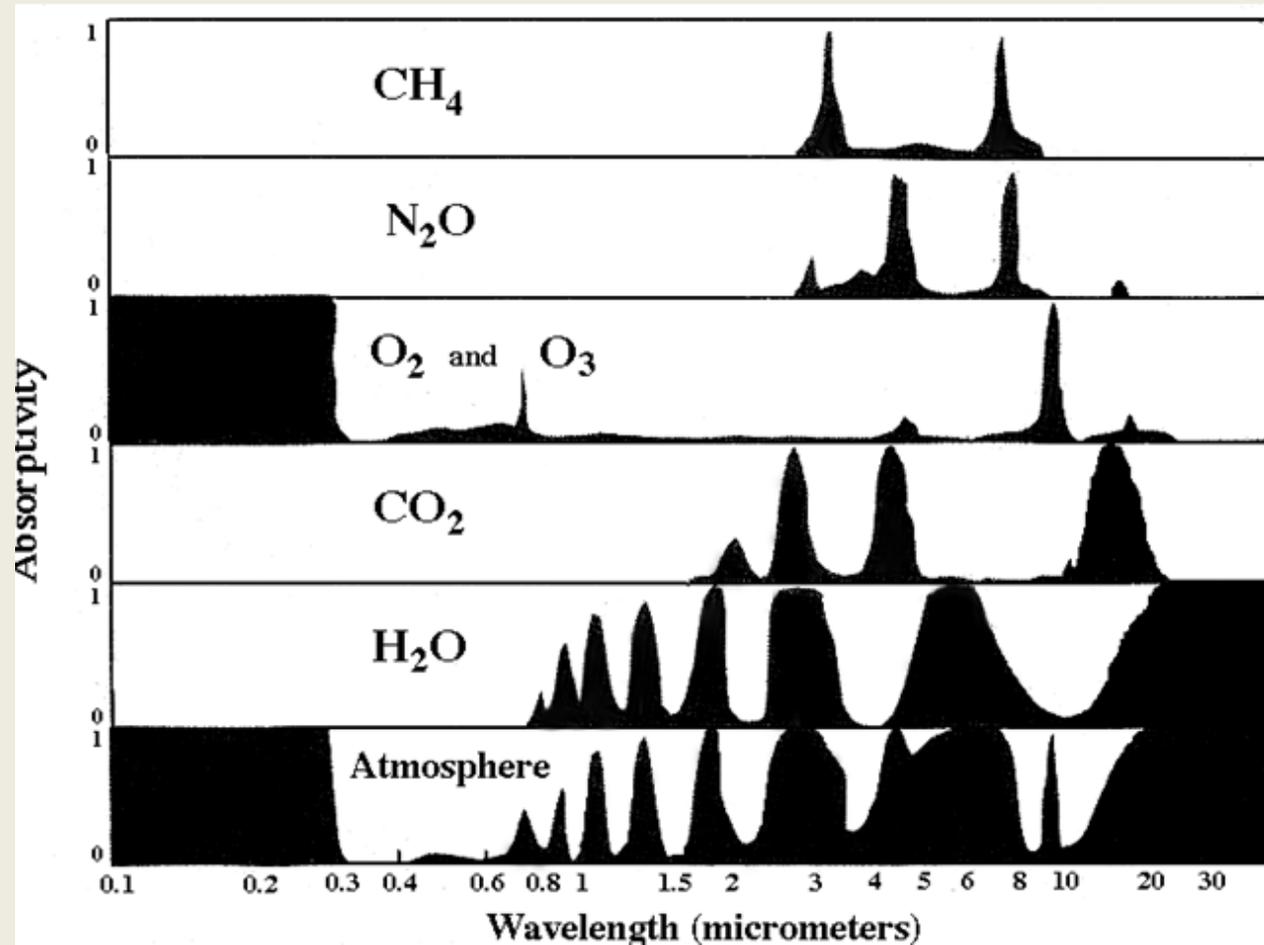
Ультрафиолетовая

Красный	Оранжевый	Желтый	Зеленый	Синий	Фиолетовый	Свет
0.65-0.70	0.60-0.65	0.55-0.60	0.50-0.55	0.45-0.50	0.40-0.45	Длина волны, мк
>500	~350	~60	~25	2	0	$\chi_\lambda \times 10^3$ (м ⁻¹)

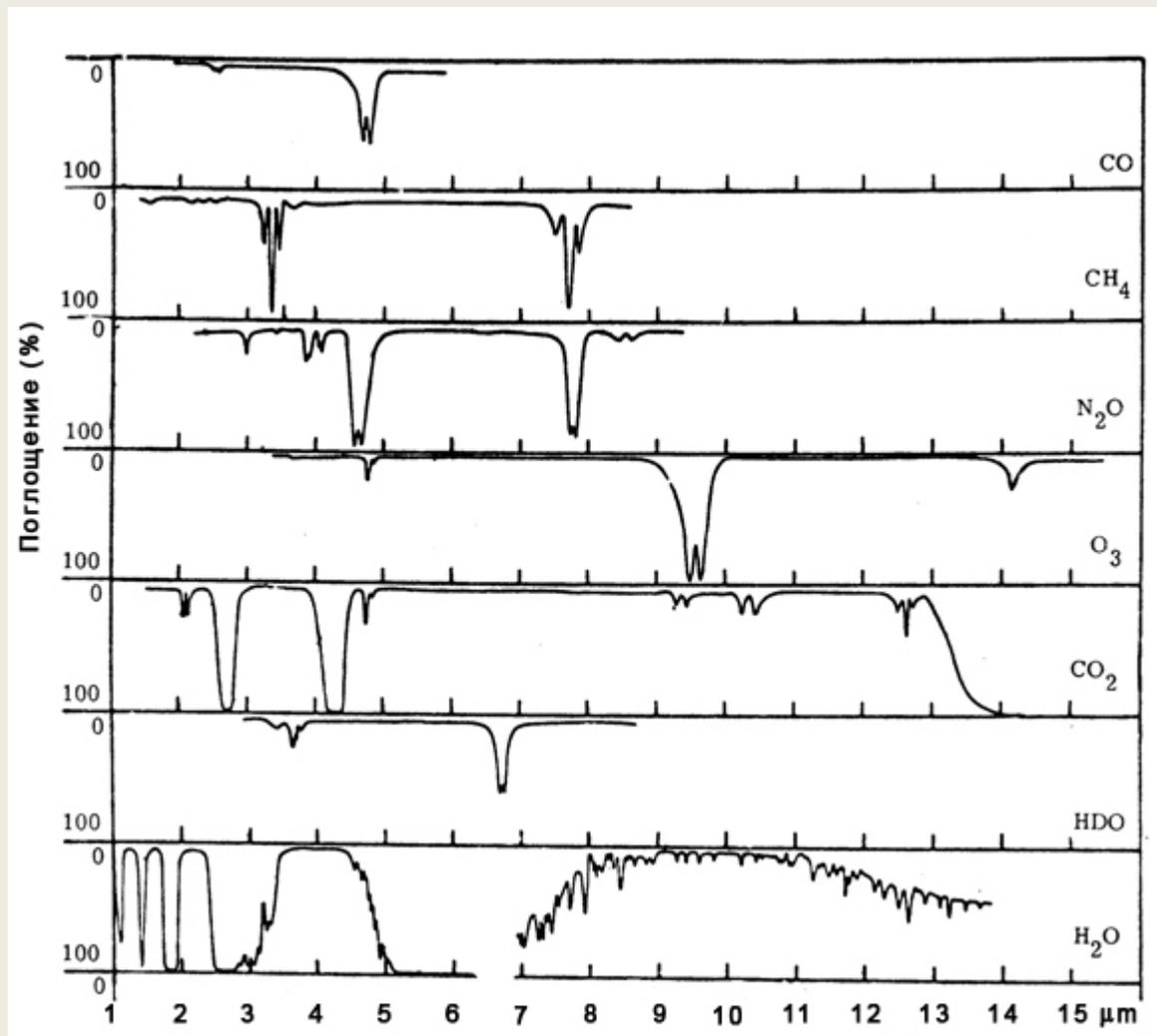
Солнечное излучение



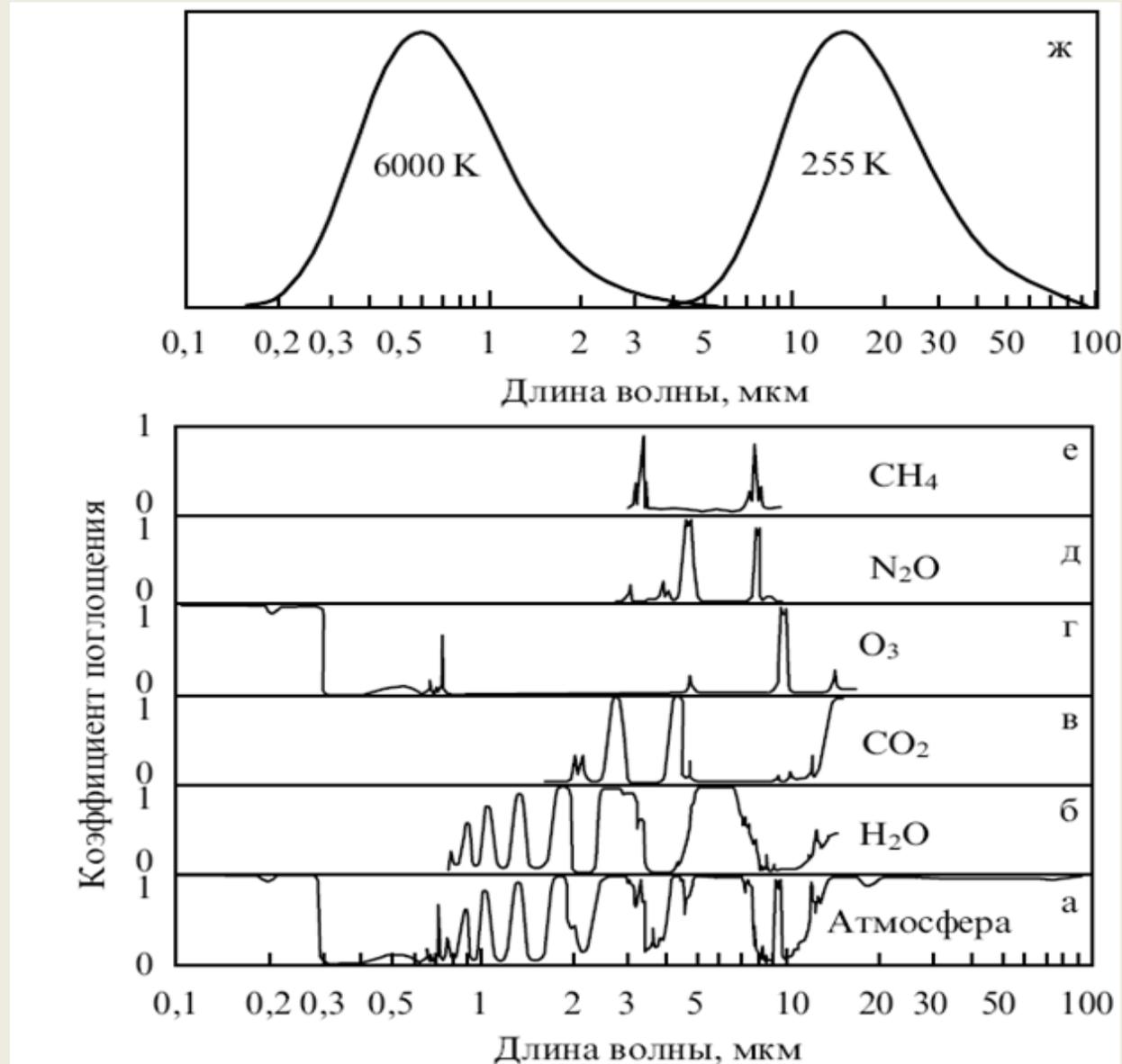
Поглощение излучения в атмосфере



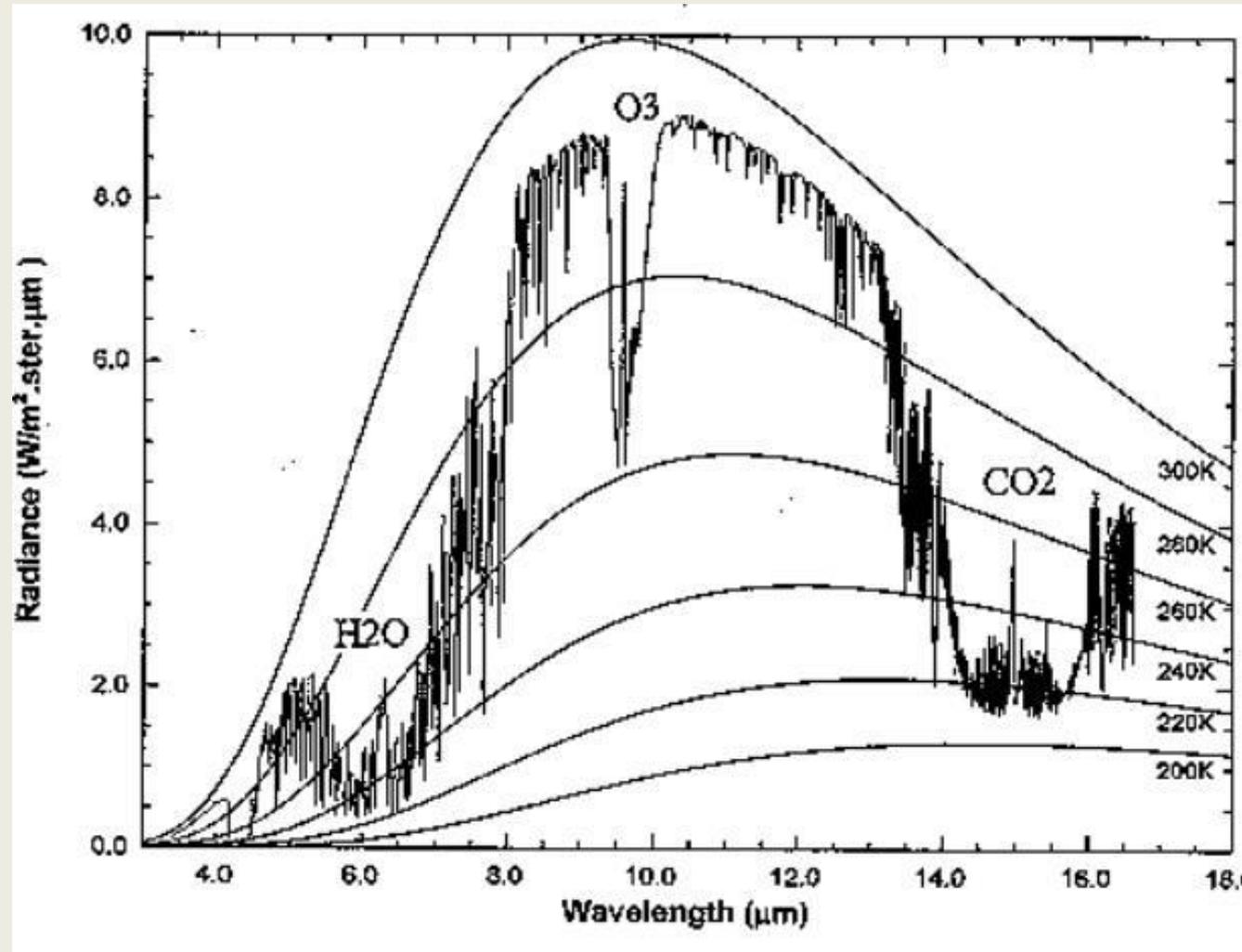
Спектральный ход поглощения излучения в атмосфере



Поглощение излучения в атмосфере различными газовыми компонентами



Полосы поглощения в ИК диапазоне спектра



Атмосфера- параметры состояния

Количественные характеристики состояния атмосферы Земли – *метеорологические величины*, или *параметры физического состояния* системы «атмосфера–земная поверхность»: температура, давление, плотность воздуха, содержание различных газов (например, водяного пара); скорость и направление ветра; характеристики облаков – балльность (количество), высота и толщина облаков; интенсивность осадков; метеорологическая дальность видимости; водность туманов и облаков; потоки лучистой энергии и тепла; характеристики аэрозолей и т.д. а также характеристики подстилающей поверхности – температура суши и океанов, влажность почв и т.д.

Структурные параметры атмосферы – давление, температура и плотность воздуха.

1. Уравнение состояния идеального газа

$$pV = \frac{m}{\mu} RT \qquad p = \frac{\rho}{\mu} RT,$$

где p – давление, T – температура, m – масса, μ – молекулярная масса воздуха, V – объем воздуха, R – универсальная газовая постоянная, ρ – плотность воздуха.

2. Уравнение гидростатики

$$dp = -\rho g dz, \quad \rho = -\frac{1}{g} \frac{dp}{dz}$$

3. Уравнение состояния для идеального газа

$$p = n k T,$$

где n – число молекул в единице объема, k – постоянная Больцмана.

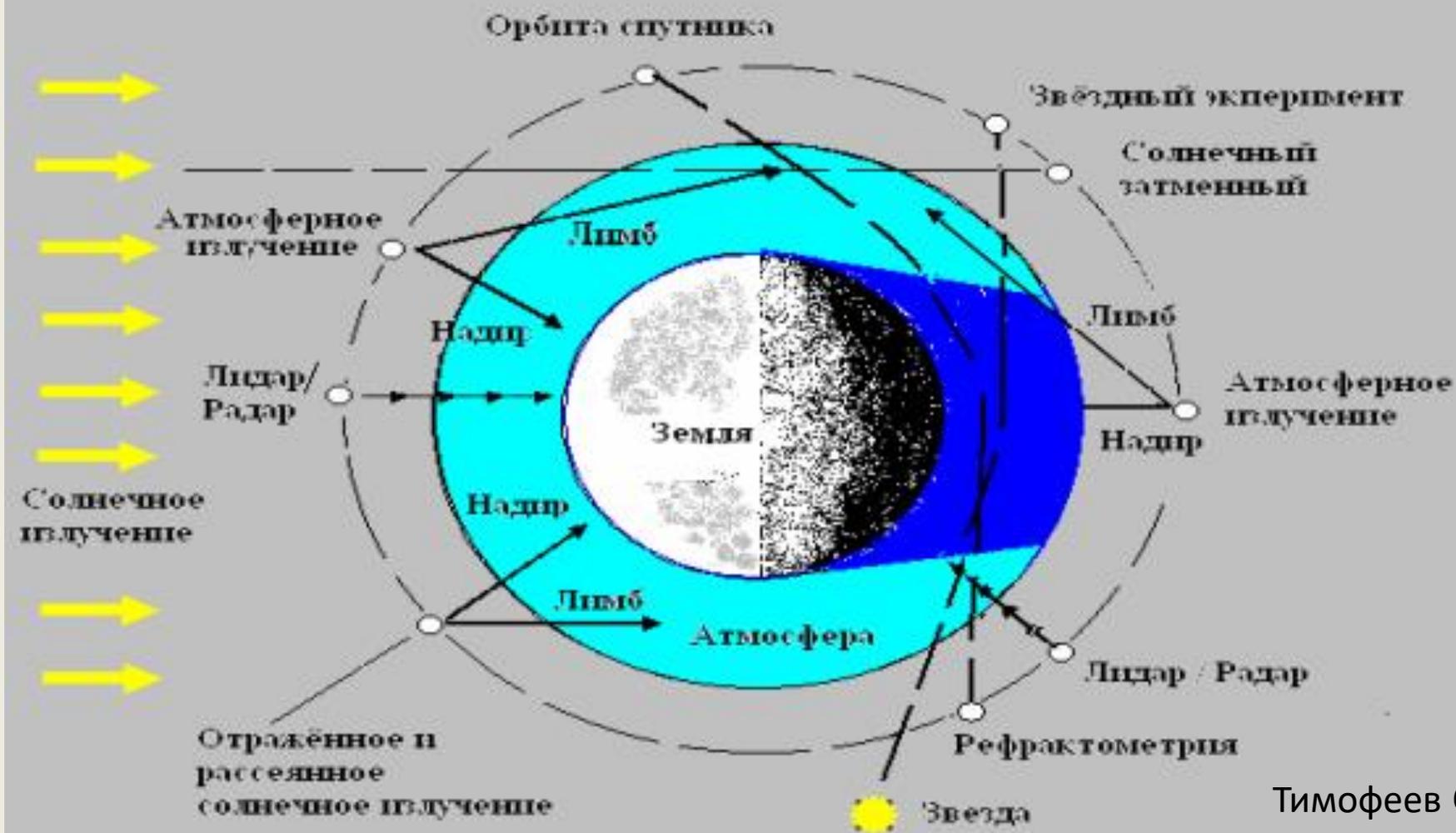
Классификация методов измерений

- **Прямые измерения** - измерения, в которых используются эталоны интересующих характеристик (величин) состояния окружающей среды: измерения длин объектов с помощью эталонов расстояний, массы - с помощью эталонов массы и т. д. При зондировании атмосферы измерения являются косвенными и дистанционными.
- **Косвенные измерения** - измерения, при которых искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям.
- **Локальные (контактные) измерения** - измерения, при которых датчик (как прямых, так и косвенных измерений) находится в непосредственном контакте с исследуемой средой (в той точке пространства, где необходимо проводить измерения).
- **Дистанционные измерения** - измерения параметров физического состояния среды, осуществляемые на различных расстояниях от точки, где проводятся измерения с помощью регистрации характеристик различных полей (электромагнитных, акустических и др.).
- **Методы зондирования атмосферы**, основанные на регистрации различных характеристик электромагнитных полей (гравитационные, электрические, магнитные и акустические методы, а также методы электромагнитного (ЭМ) излучения).
- Методы можно подразделять по источнику поля: **пассивные и активные**. **Пассивные** - регистрируются характеристики естественных полей, присутствующих в природе (гравитационные поля Земли и планет, солнечное излучение, естественная радиоактивность,...); **активные** – используются искусственные поля (например, ЭМ).
- Дистанционные методы, основанные на использовании характеристик электромагнитного поля, можно подразделять **по области спектра** (ультрафиолетовый, видимый, инфракрасный, СВЧ диапазоны), **по основному процессу взаимодействия** (или генерации) излучения (рассеяние, поглощение, излучения, рефракция,...), **по геометрии измерений (надирной и касательной)**.

Спутниковые методы измерений параметров атмосферы и поверхности

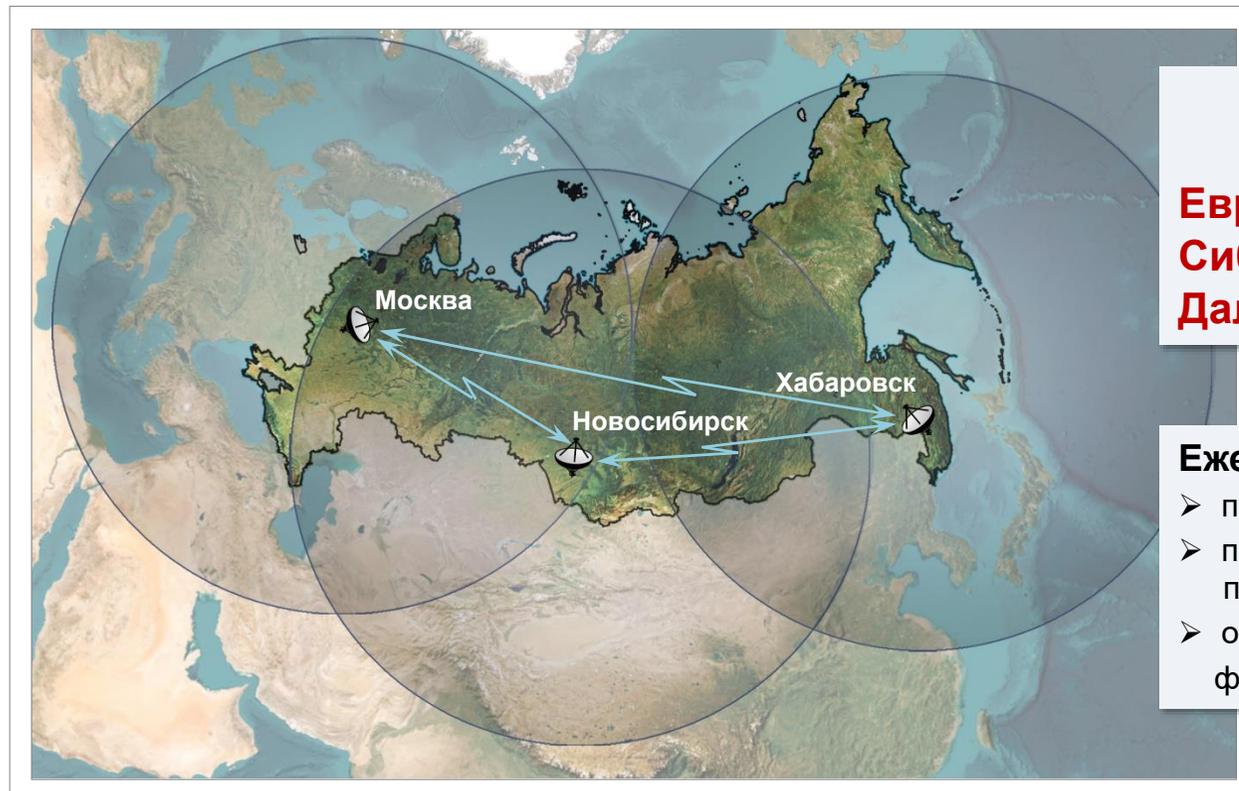
Методы	Определяемые параметры	Примечание
Пассивные методы		
Прозрачность атмосферы (затменный метод, occultation method)	Газовый состав, коэффициент аэрозольного ослабления, микроструктура аэрозолей и облаков, температура, населенности состояний	Использование излучения Солнца, Луны, звезд в УФ, ВИД и БИК областях спектра. Касательные трассы, восходы и заходы источника.
Собственное излучение атмосферы и поверхности (atmospheric radiation method)	Температура, газовый состав, аэрозоли, облака, микроструктура аэрозолей и облаков, колебательные температуры, оптические и физические характеристики поверхностей.	Собственное равновесное и неравновесное излучение атмосферы в ИК и МКВ областях, а также свечения верхней атмосферы в УФ, ВИД и БИК областях спектра. Надирная и касательная геометрия.
Рассеянное солнечное излучение (scattered solar radiation method)	Газовый состав, характеристики аэрозолей и облаков, оптические и физические характеристики поверхностей.	Рассеянное излучение в УФ, ВИД и БИК областях спектра. Надирная и касательная геометрия
Рефракция (refraction method)	Температура и плотность, содержание водяного пара, характеристики турбулентности, гравитационных волн	Измерения изображений Солнца, измерения углов рефракции для излучения внешних источников
Активные методы		
Лидарное зондирование (Lidar)	Аэрозоли, облака, высота облачности, поле ветра, оптические и физические характеристики поверхностей	Проведены первые успешные спутниковые эксперименты
Рефракция (Refraction)	Температура, влажность в тропосфере, характеристики турбулентности, гравитационных волн, ионосферы.	Использование GPS и специальных спутников
Радиолокация (Radar)	Скорость ветра, характеристики облаков, осадков и поверхности	Высокое пространственное разрешение при использовании радаров с синтезированной апертурой

Спутниковые методы измерений



**ИНФОРМАЦИОННАЯ ПРОДУКЦИЯ О
ПАРАМЕТРАХ СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРЫ
дистанционное зондирование атмосферы (ДЗА)**

Государственная территориально-распределенная система космического мониторинга Росгидромета



Спутниковые центры ФГБУ «НИЦ «Планета»:

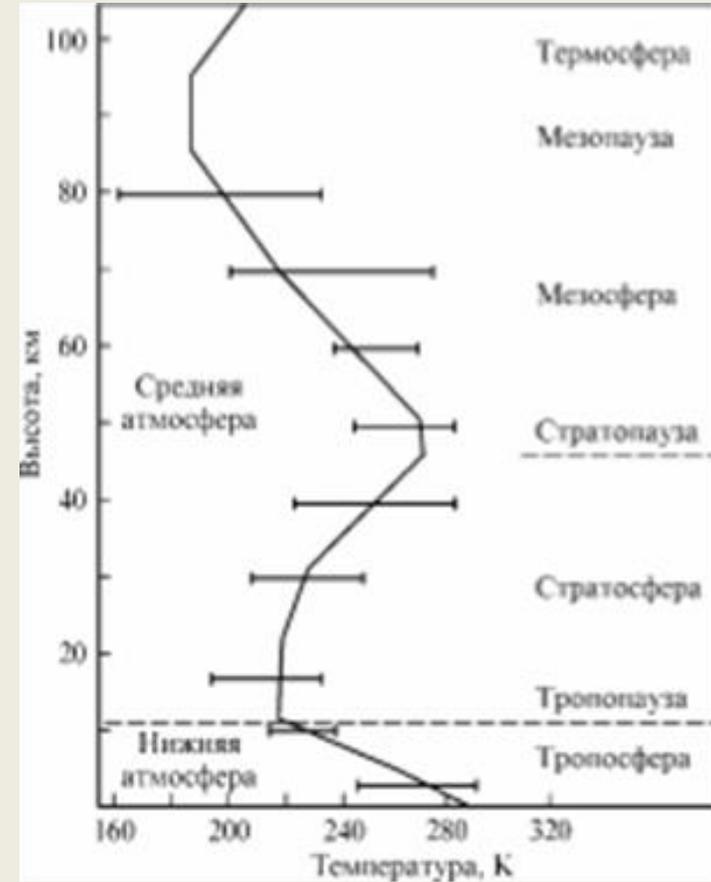
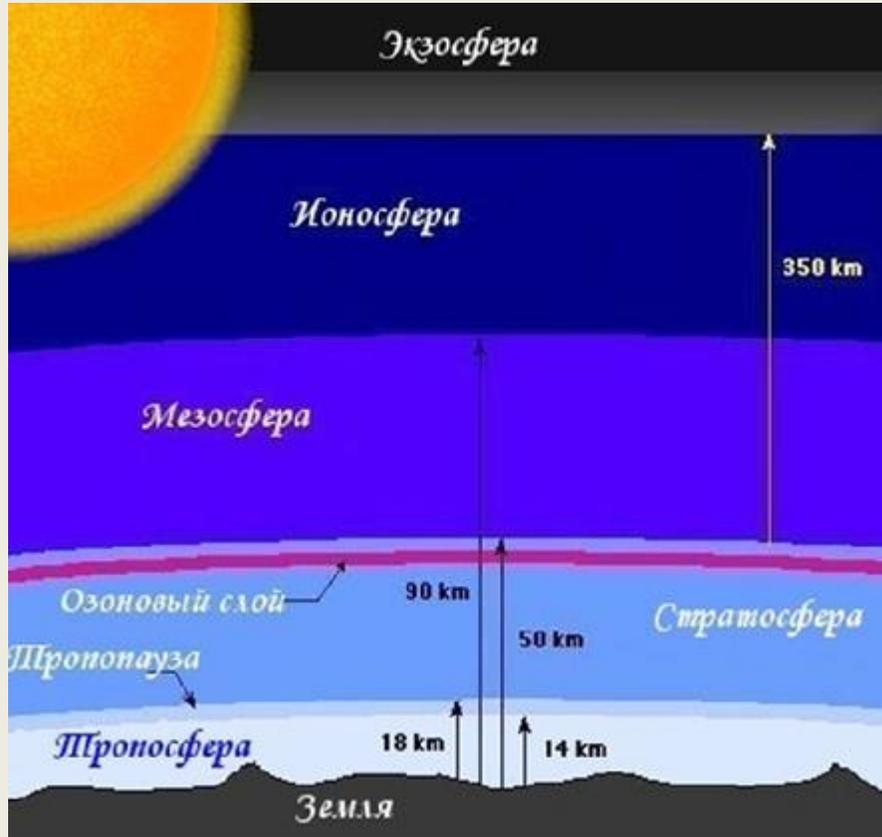
- Европейский** (Москва-Обнинск-Долгопрудный)
- Сибирский** (Новосибирск)
- Дальневосточный** (Хабаровск)

Ежесуточно ФГБУ «НИЦ «Планета»:

- принимает более **1,5** Тбайт спутниковых данных
- производит более **640** видов информационной продукции
- обеспечивает более **590** потребителей федерального и регионального уровня

По **объему** принимаемых данных, **номенклатуре** выпускаемой информационной продукции, **количеству потребителей** система является **самой крупной в России** и одной из крупнейших в мире, а по охвату оперативным космическим мониторингом поверхности Земли (более 1/5 поверхности суши) – **самой крупной в мире**.

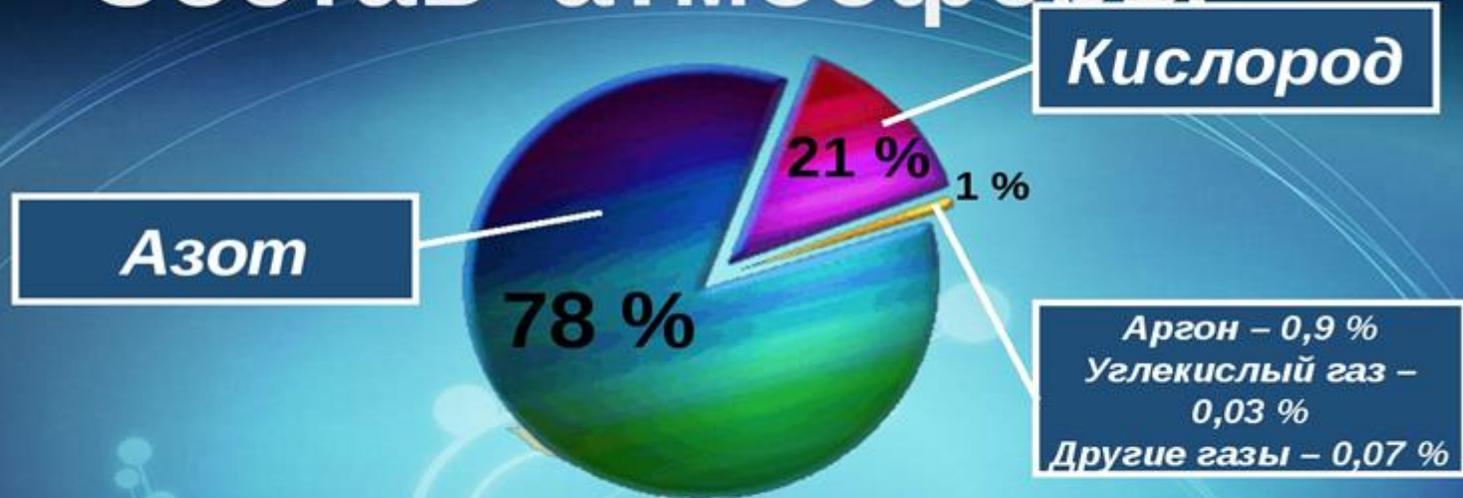
Стратификация атмосферы



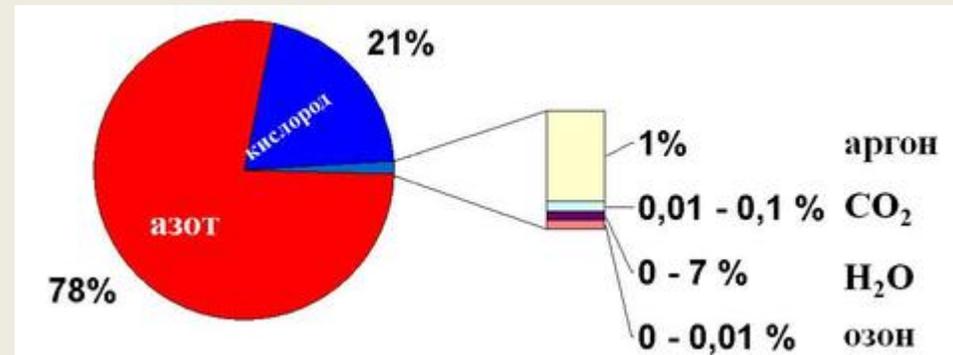
Основные и переходные слои атмосферы

Слой	Средние высоты верхней и нижней границ, км	Переходный слой
тропосфера	0-11	тропопауза
стратосфера	11-50	стратопауза
мезосфера	50-90	мезопауза
термосфера	Выше 90	термопауза
экзосфера	Выше 450	

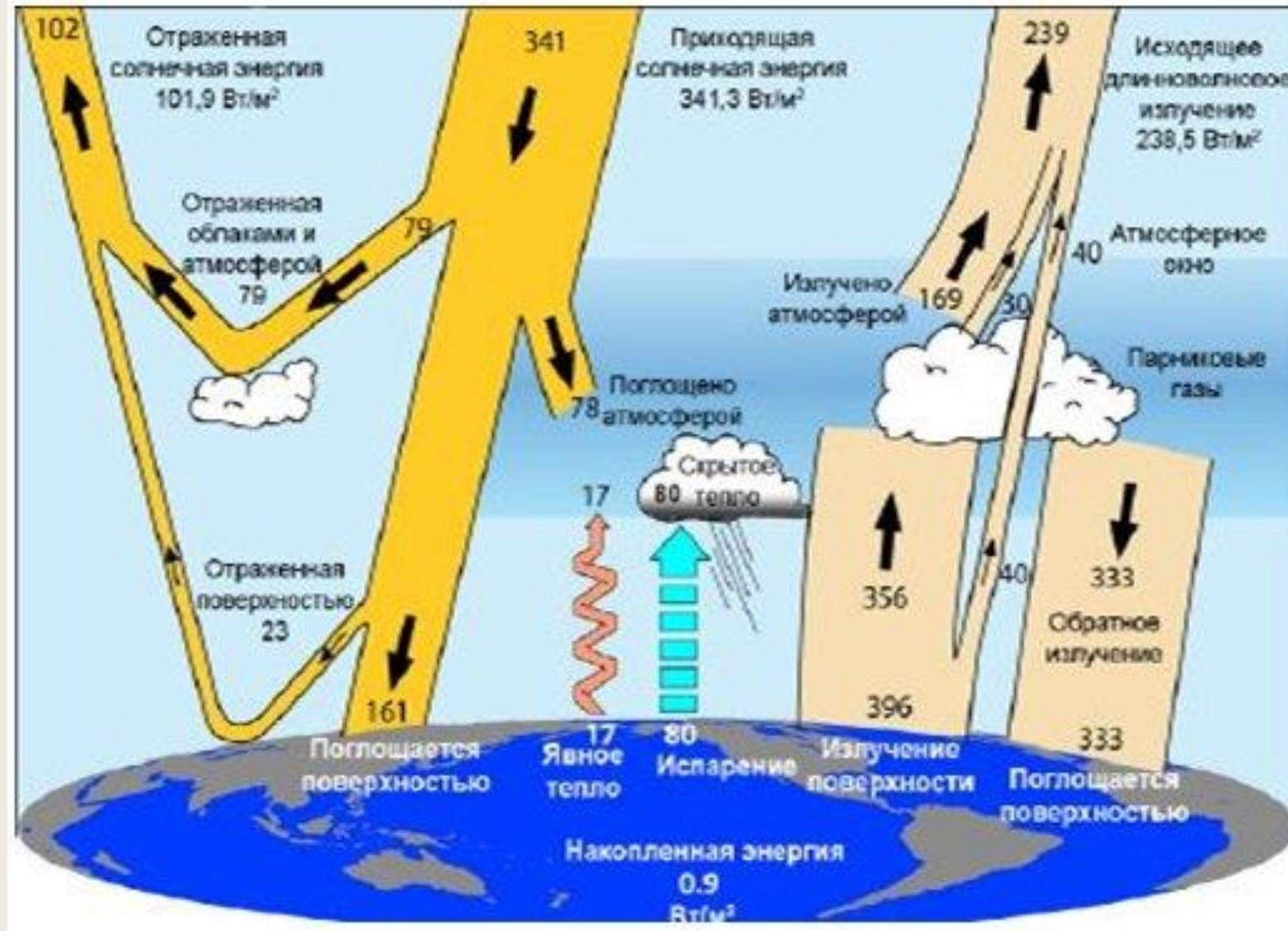
Состав атмосферы



пыль, сажа, вулканический пепел, кристаллики льда и морской соли, микроорганизмы



РБ в системе «атмосфера- подстилающая поверхность»



Космическая система Метеор-М

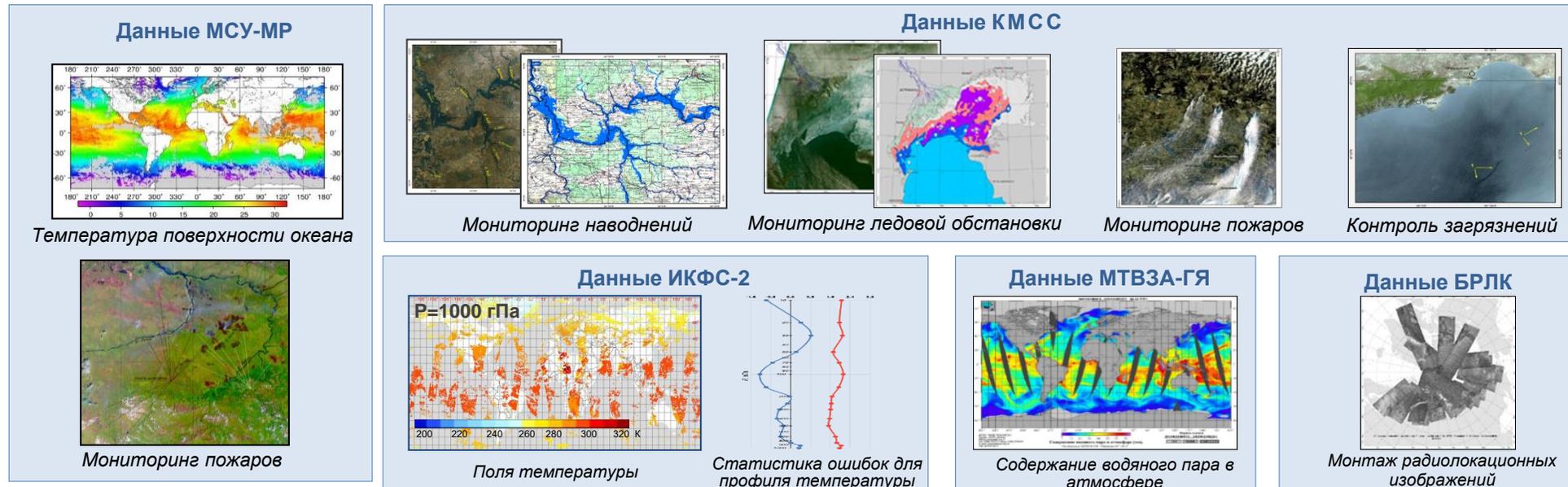
Состав и характеристики аппаратуры КА Метеор-М № 2, 2-2

Аппаратура	Спектральные каналы	Разрешение, км	Полоса захвата, км
Многозональное сканирующее устройство малого разрешения (МСУ-МР)	0,5-0,7; 0,7-1,1; 1,6-1,8; 3,5-4,1; 10,5-11,5; 11,5-12,5 мкм	1	2900
Комплекс многозональной спутниковой съемки (КМСС)	0,52-0,59; 0,64-0,69; 0,785-0,900 мкм	0,06	1000
Микроволновый сканер-зондировщик (МТВЗА-ГЯ)	10,6-183,3 ГГц (29 каналов)	12-75	1500
Инфракрасный зондировщик (ИКФС-2)*	5-15 мкм	35	1000-2500
Бортовой радиолокационный комплекс (БРЛК «Северянин-М»)**	9,6 ГГц	0,5/1	600
Гелиогеофизический аппаратный комплекс			
Система сбора и передачи данных (ССПД)			

Метеор-М №1 запущен 17.09.2009 г., эксплуатация прекращена 15.04.2022 г.
Метеор-М № 2 запущен 08.07.2014 г.,
Метеор-М № 2-2 запущен 05.07.2019 г.,
Метеор-М № 2-3 запущен 27.06.2023 г.,
Метеор-М № 2-4 запуск в 2024 г.

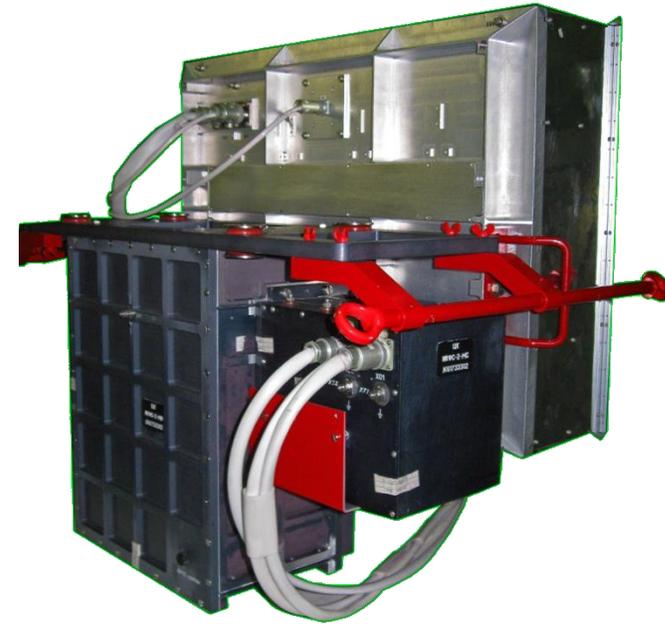
* КА Метеор-М №2, 2-2 ** КА Метеор-М №1, 2 *** КА Метеор-М №2-2

Примеры информационной продукции



Бортовой инфракрасный фурье - спектрометр ИКФС-2

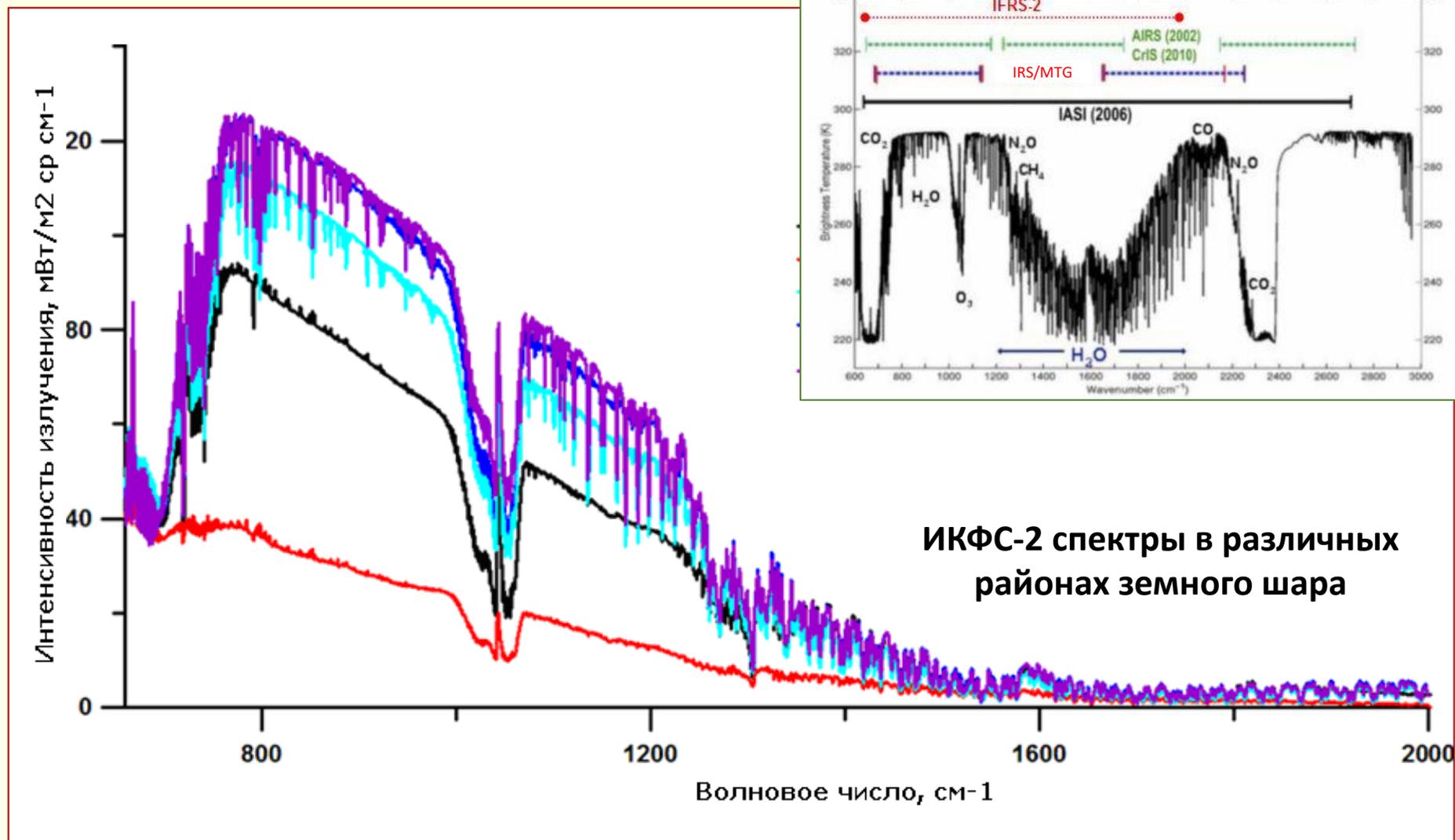
Спутник, орбита	«Метеор-М» №2, ССО
Спектральный диапазон	5-15 мкм (667-2000 см ⁻¹)
Спектральное разрешение	0.5 см ⁻¹
Полоса обзора	1000-2500 км
Шаг пространств. сетки	60-110 км
Пространств. разрешение	30-35 км
NESR, Вт/(ср·м ² ·см ⁻¹)	3·10 ⁻⁴ – 15 мкм, 1·10 ⁻⁴ – 13 мкм 3·10 ⁻⁴ – 6 мкм
Погрешность калибровки	0.5 К
Масса	50 кг
Энергопотребление	50 Вт
Поток информации	600 кбит/с



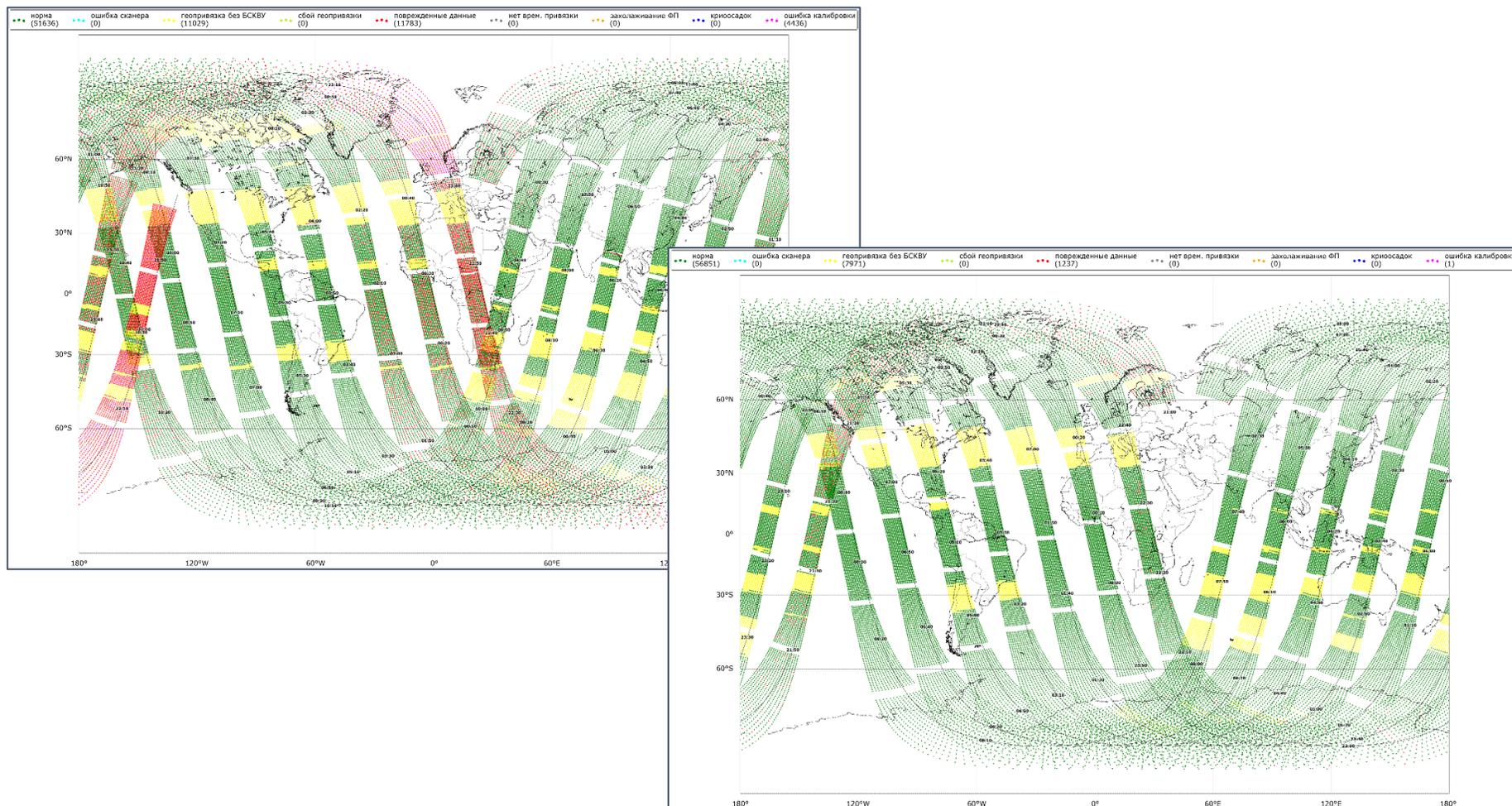
<u>Калибровка ИКФС-2</u>	
Радиометрическая	коррекция нелинейности, определение СПЭЯ, NESR/NEdT
Спектральная	измерение аппаратной функции, привязка к шкале волновых чисел
Геометрическая	IFOV измерения

<u>Валидация ИКФС-2</u>	с использованием данных аппаратуры IASI, CrIS или SEVIRI
-------------------------	--

Гиперспектральные ИК-зондировщики



Глобальное суточное покрытие данными ИКФС-2 (Метеор-М №2)



Процедуры «обращения» спутниковых данных

50-летний опыт привел к развитию двух альтернативных подходов:

- «статистического», т.е. использования различных вариантов линейной регрессии или нейронно-сетевых алгоритмов;
- «физического», т.е. численного решения обратной задачи для уравнения переноса ИК-излучения.

В идеализированной ситуации, а именно, при строгой линейности и точности модели связи между измерениями R и искомыми атмосферными параметрами x (т.е. отсутствии мешающих факторов) - статистический (регрессия) и физический (наилучшая линейная оценка) подходы приводят к одному и тому же результату.

На практике обе эти гипотезы нарушаются, поэтому данные ТВЗА получают, применяя различные комбинации статистического и физического методов.

Быстрые модели радиационных расчетов (FRTM)

1. **RTTOV** (ECMWF, Eumetsat) (последняя версия – RTTOV-13) – быстрый и высокоточный расчет спектров уходящего излучения R и матрицы якобианов H (вариационных производных R по компонентам вектора состояния x)

$R = H(x)$, где H – оператор наблюдений (уравнение переноса). Компоненты вектора x - профили $T(p)$, $q(p)$, $Q(p)$ (на сетке давлений), T_s , ε , T_a , q_a .

RTTOV v.11, 12 адаптированы к ИКФС-2, МТВЗА-ГЯ.

2. **БРМ/ИКФС** и **БРМ/МТВЗА** (ИВМ и МГ & Планета, 2014 - 2016гг.)- разработанные для ИКФС-2 и МТВЗА-ГЯ на основе RTTOV.
3. **SARTA** (UNBC, JPL) – расчет R , H для AIRS
4. **PCARTM** (PCA-based RTM, USA) – расчет R , H для IASI, CrIS.
5. **PCRTTOV** (PCA-based RTTOV, ECMWF) – расчет R , H для IASI
6. **CRTM** (NASA, NOAA) - расчет R , H для IASI, CrIS, AMSU, ATMS и др.

Примечание: в настоящее время FRTM типа RTTOV и CRTM адаптированы для моделирования измерений более 100 видов спутниковой целевой аппаратуры, работающей в УФ, видимом, ближнем ИК, ИК и микроволновом диапазонах спектра (включая атмосферные зондировщики, спектрометры, радиометры- имаджеры и др.)

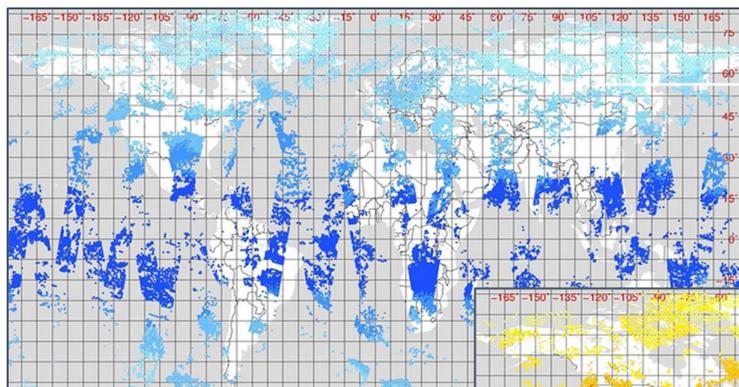
Информационные продукты ДЗА по данным гиперспектральных ИК зондировщиков

- профили температуры в тропосфере и нижней стратосфере с вертикальным разрешением ~ 1 км в тропосфере и точностью порядка 1.0-2.0 К для безоблачных условий;
- тропосферные профили влажности для безоблачных условий с разрешением ~1-2 км и точностью 10 % в терминах относительной и 20-30% в терминах абсолютной влажности;
- данные об ОСО с точностью 3-5 % и вертикальном распределении в слое 20-30 км с точностью 10 %;
- данные об общем содержании МГС атмосферы, включая тропосферные CO₂, CH₄, CO, N₂O (с точностью 2- 5 %);
- данные о параметрах облачного покрова (количество, высота верхней границы, фазовый состав).

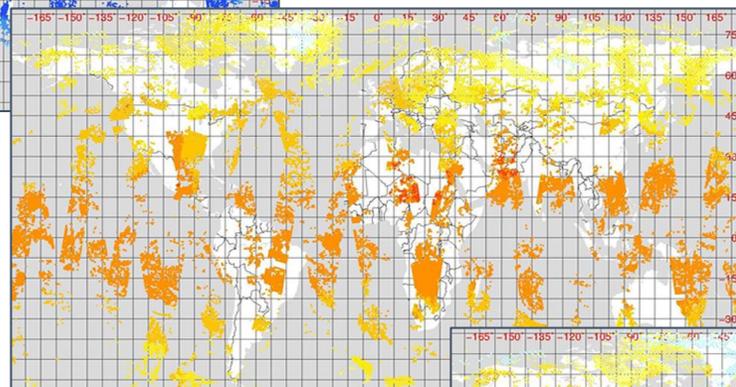
Продукты температурно-влажностного зондирования атмосферы

(по данным ИКФС-2 / Метеор-М №2)

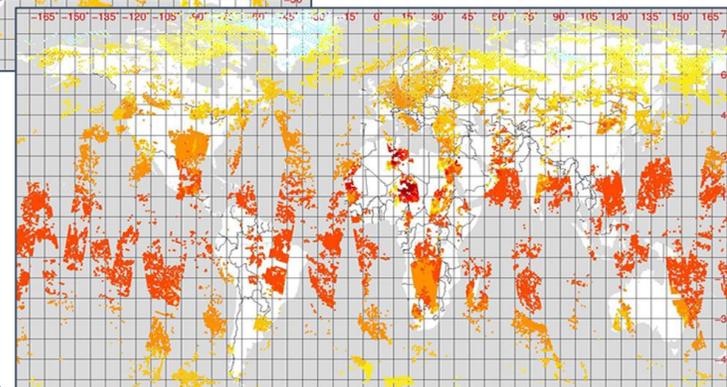
Поля температуры



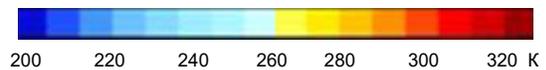
P=100 гПа



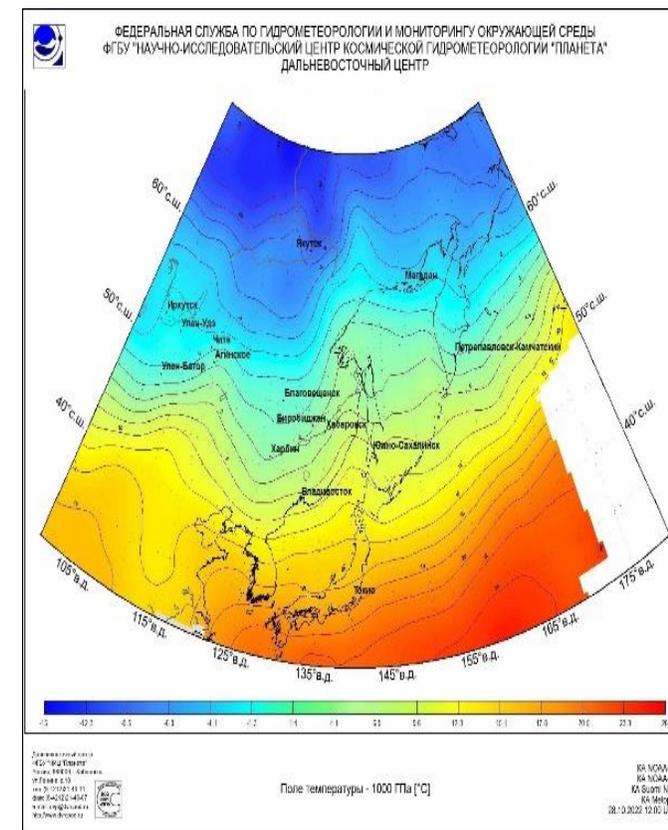
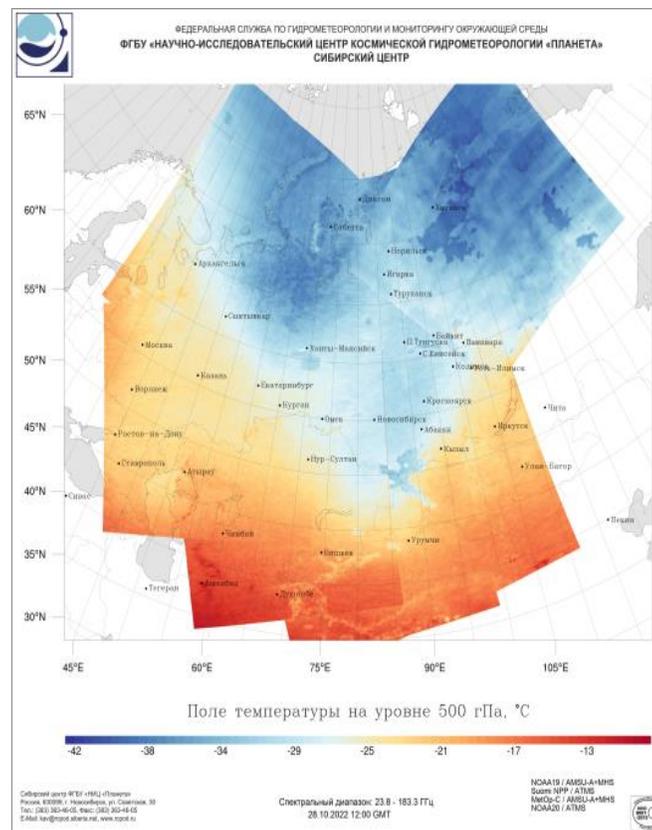
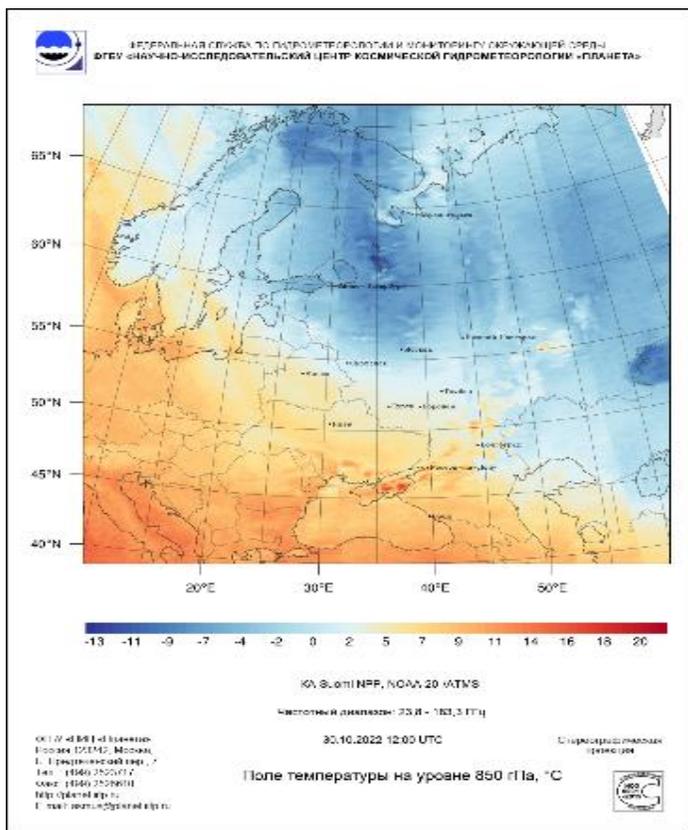
P=750 гПа



P=1000 гПа



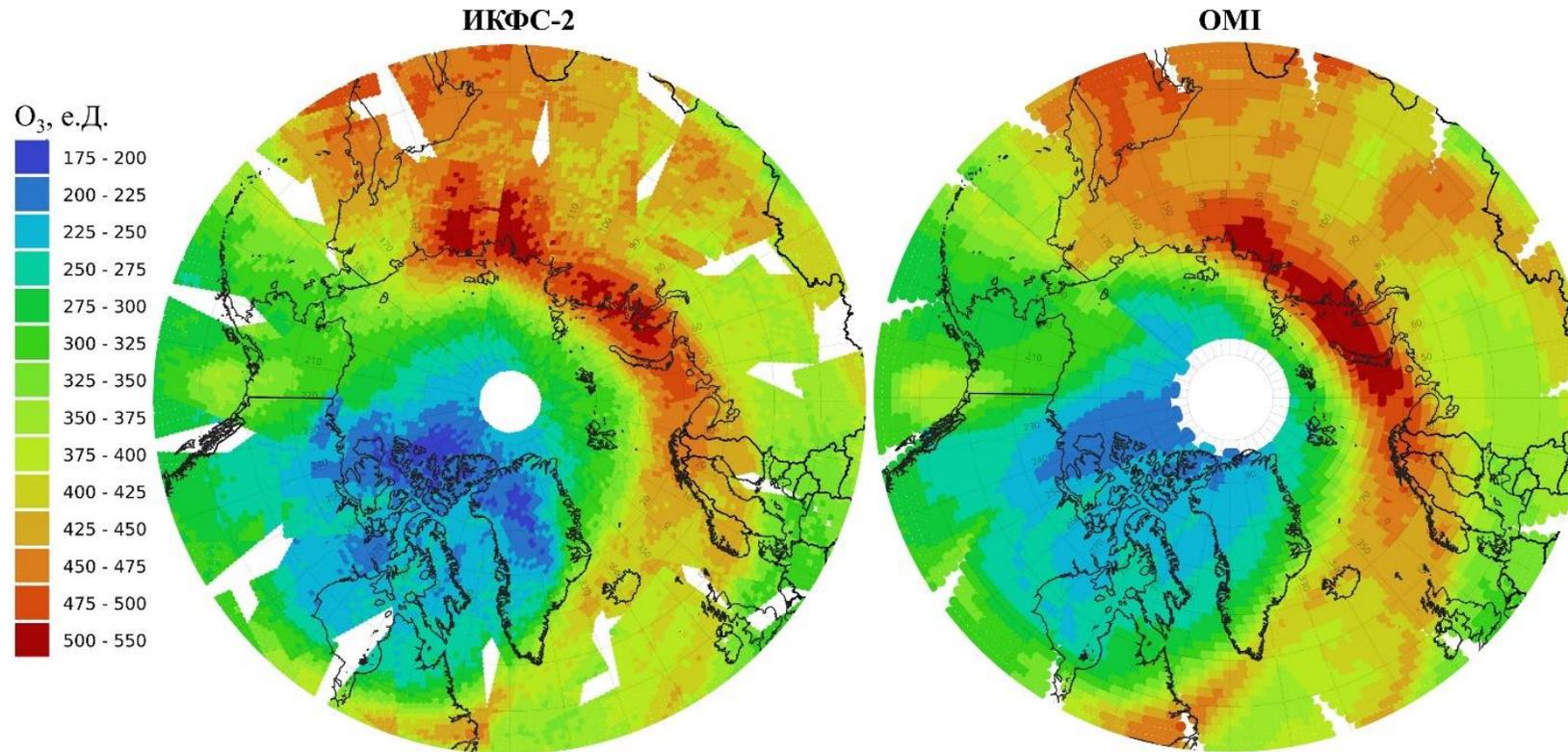
Карты полей температуры по данным КА NOAA, MetOp-B,C/ATOVS, КА Suomi NPP/CrIS,ATMS



Сравнение оценок ОСО по данным ИКФС-2 и ОМІ/Aura

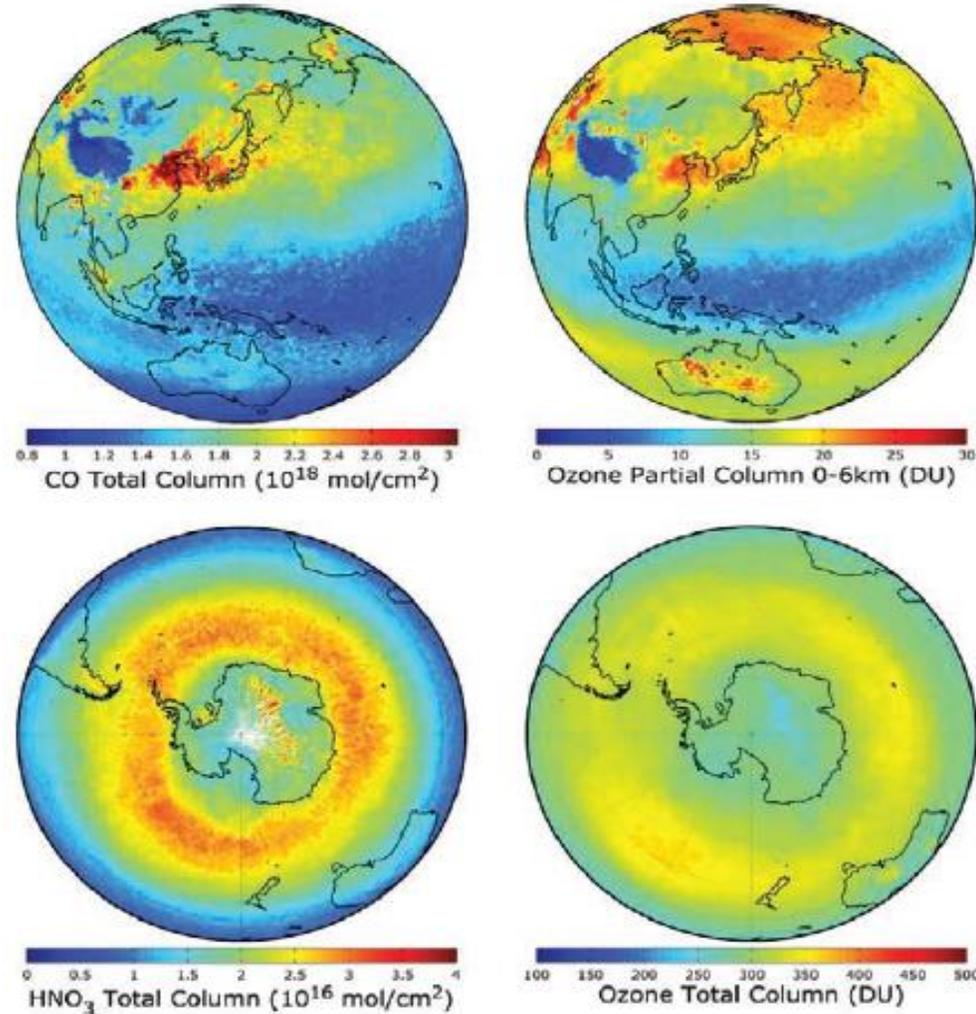
(Тимофеев Ю. М., Неробелов Г. М., Поляков А. В., Виролайнен Я. А. Спутниковый мониторинг озоносферы. – Метеорология и гидрология, 2021, №12, с. 71-79)

18 марта 2020 г.

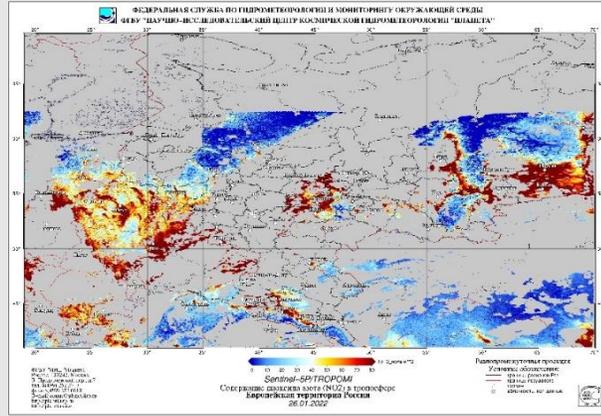


полярные регионы

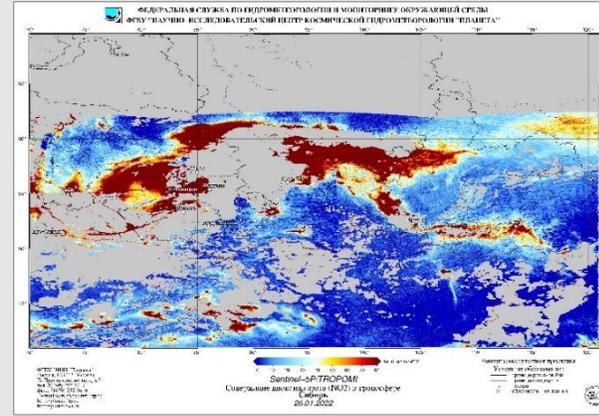
Распределения МГС, восстановленные по данным IASI (с осреднением за июль 2008). Вверху слева – общее содержание CO ; справа – общее содержание озона в тропосфере (0-8 км). Внизу слева - общее содержание азотной кислоты; справа – общее содержание озона в атмосфере



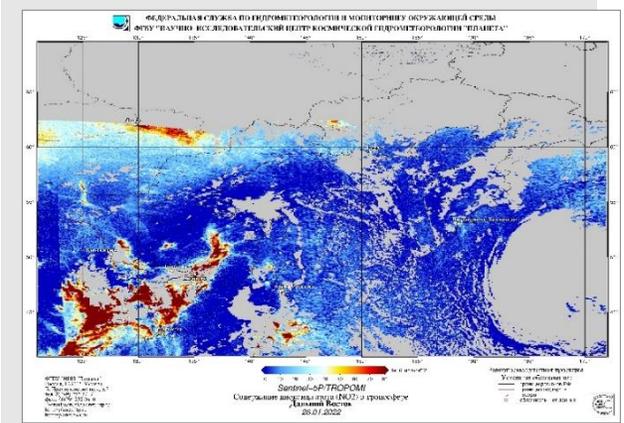
Содержание диоксида азота (NO₂) в тропосфере



26.01.2022

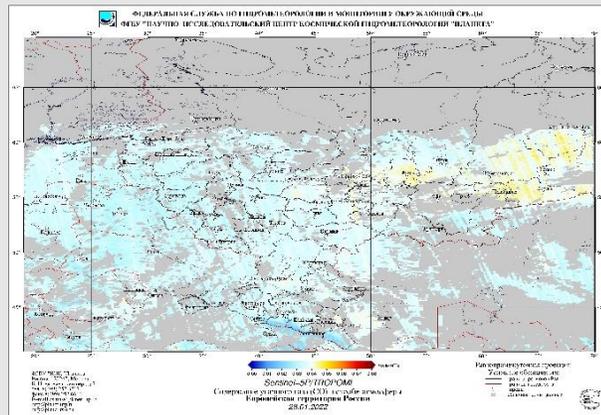


26.01.2022



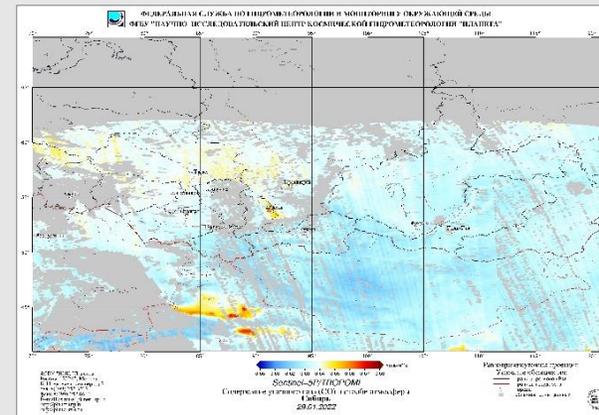
26.01.2022

Содержание угарного газа (CO) в столбе атмосферы



28.01.2022

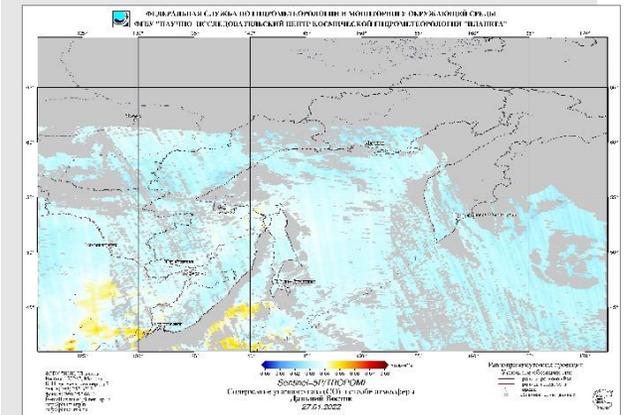
Европейская территория России



29.01.2022

Сибирь

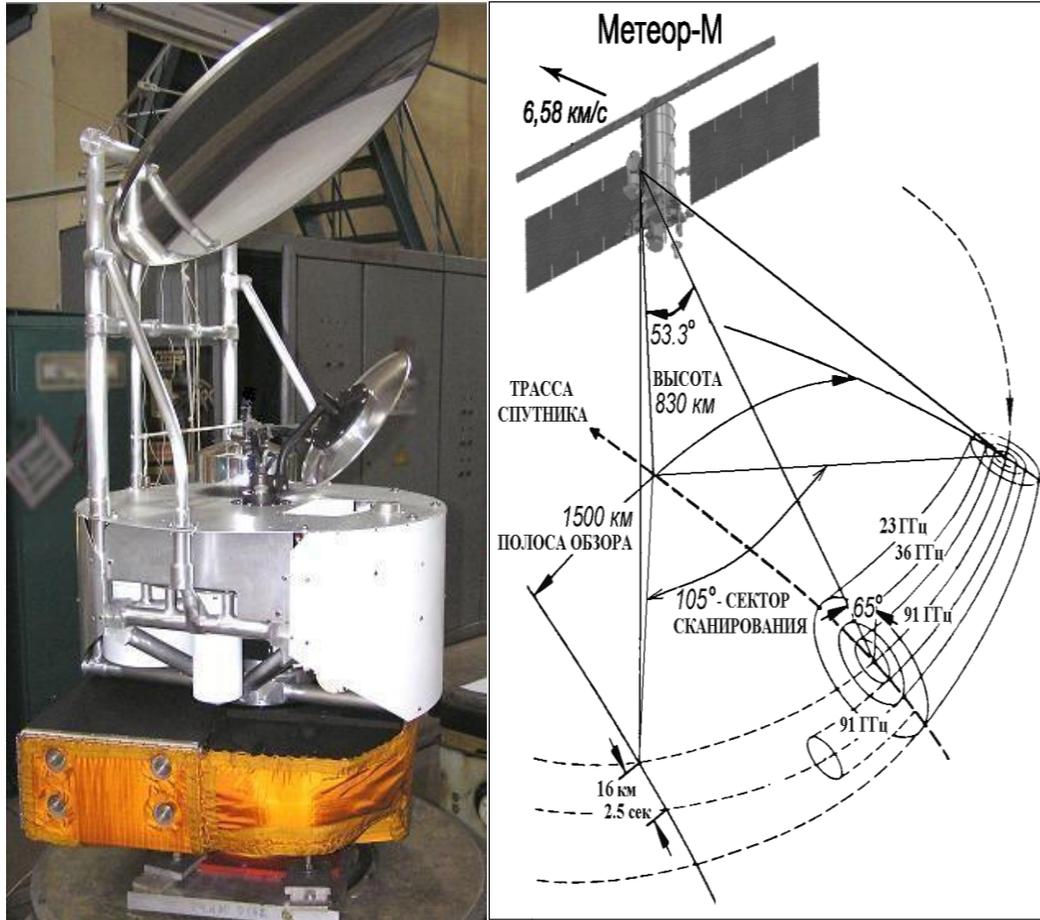
KA Sentinel-5P/TROPOMI



27.01.2022

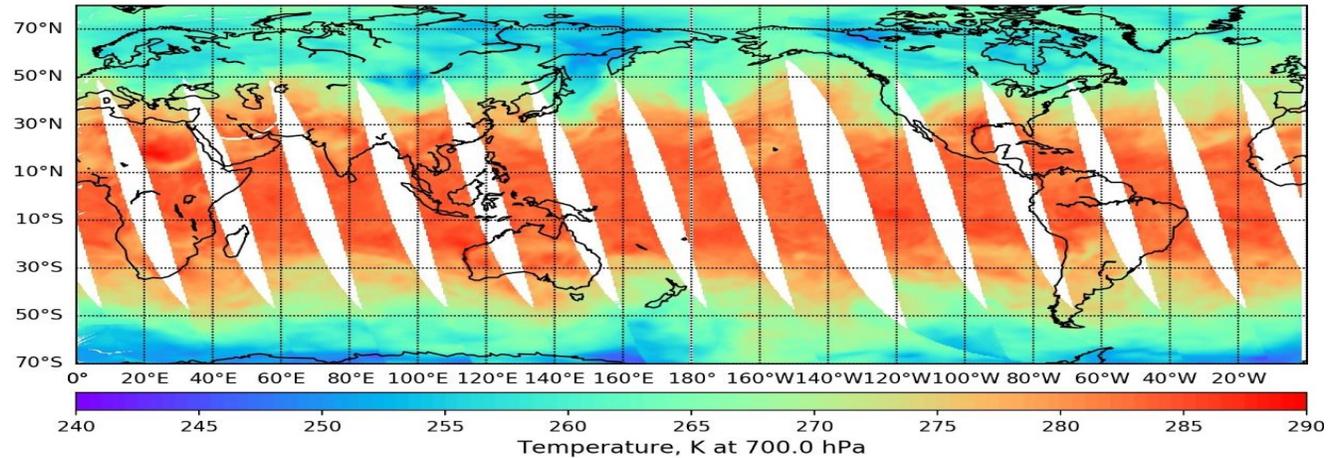
Дальний Восток

Микроволновой радиометр (сканер-зондировщик) МТВЗА-ГЯ

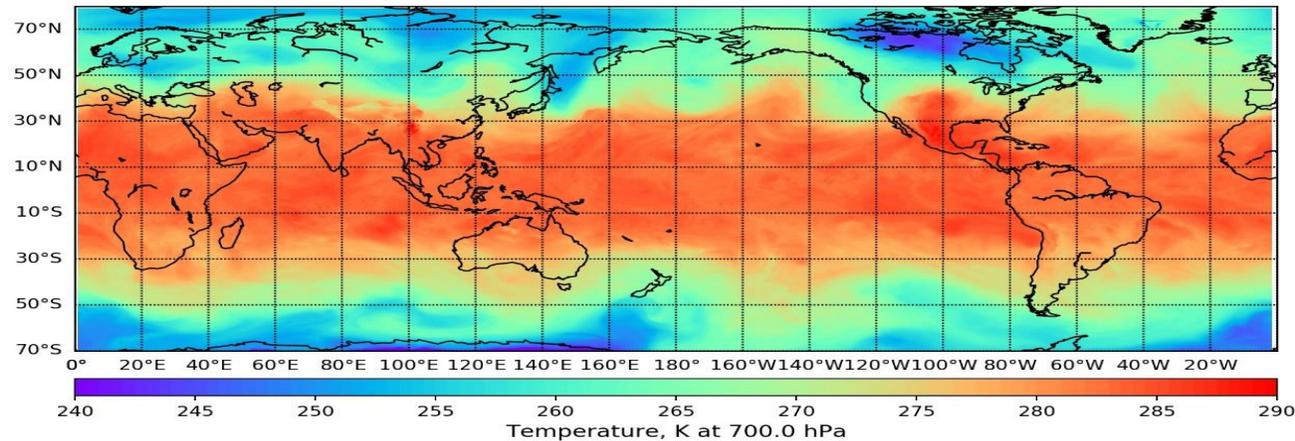


Параметр	Значение
Диапазон	10.6, 18.7, 23.8 31.5, 36.5, 42, 48, <u>52-57, 91, 183.31</u> , ГГц
Пространственное разрешение	10-198 км
Полоса обзора	1500 км
Сканирование	коническое
Режим работы	непрерывный
Период сканирования	2.5 с
Поток данных	35 Кбит/с
Объем ЗУ	1 Гбайт
Вес, не более	94 кг
Потребление, не более	80 Вт

Глобальное поле температуры на изобарическом уровне 700 гПа по данным МТВЗА-ГЯ (суточный композит, восходящие витки) и ECMWF (реанализ, 06 UTC)

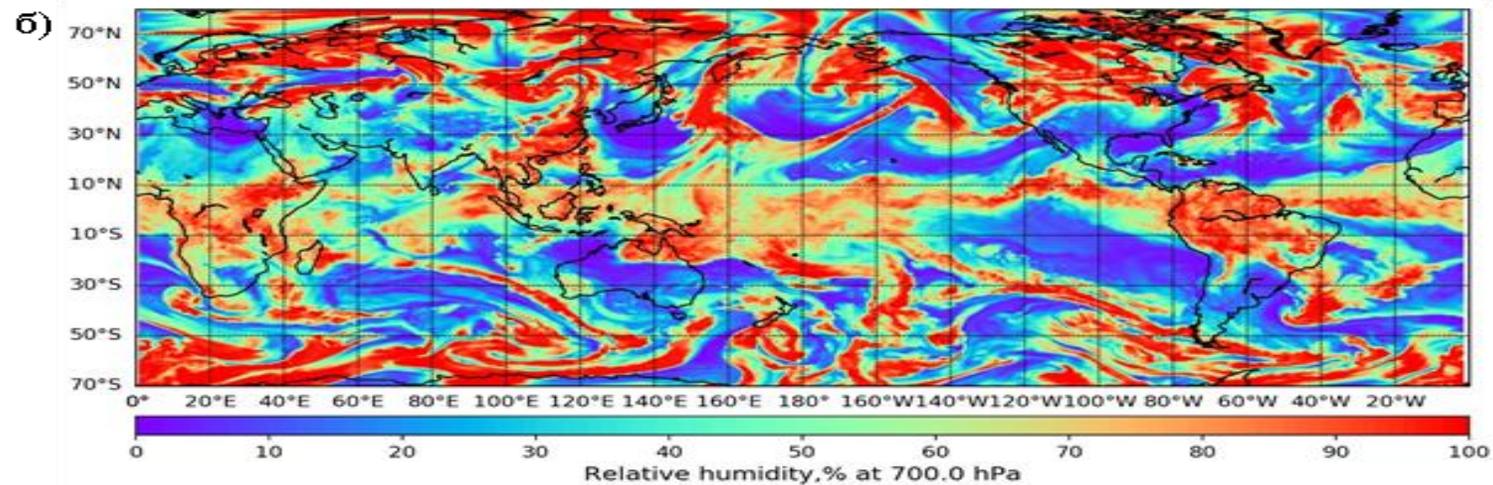
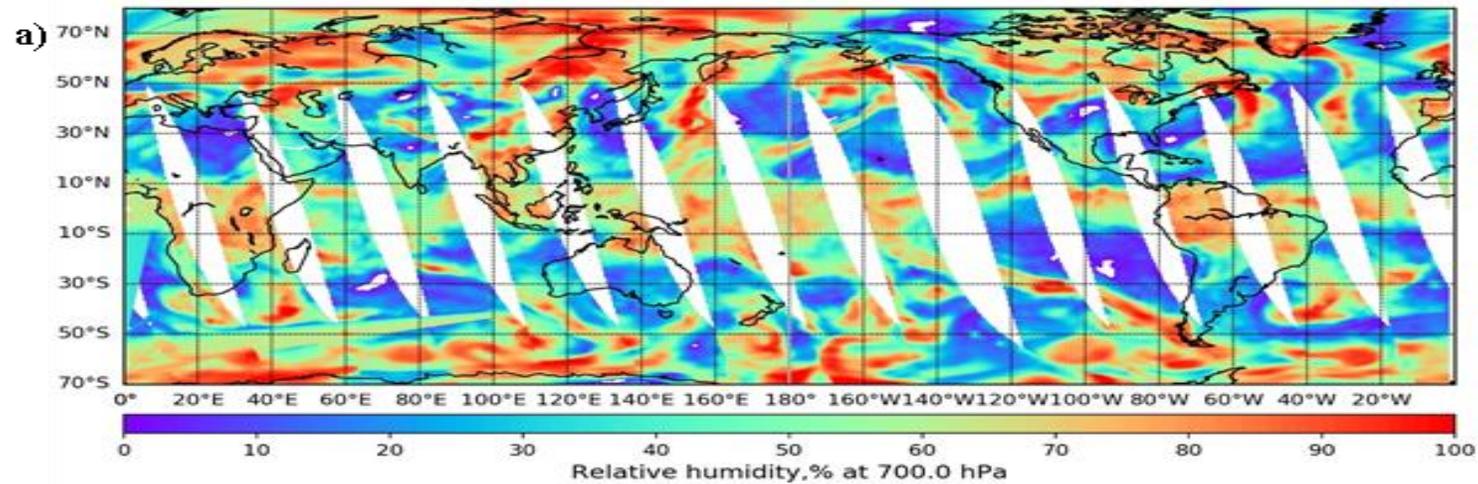


26.04.2021

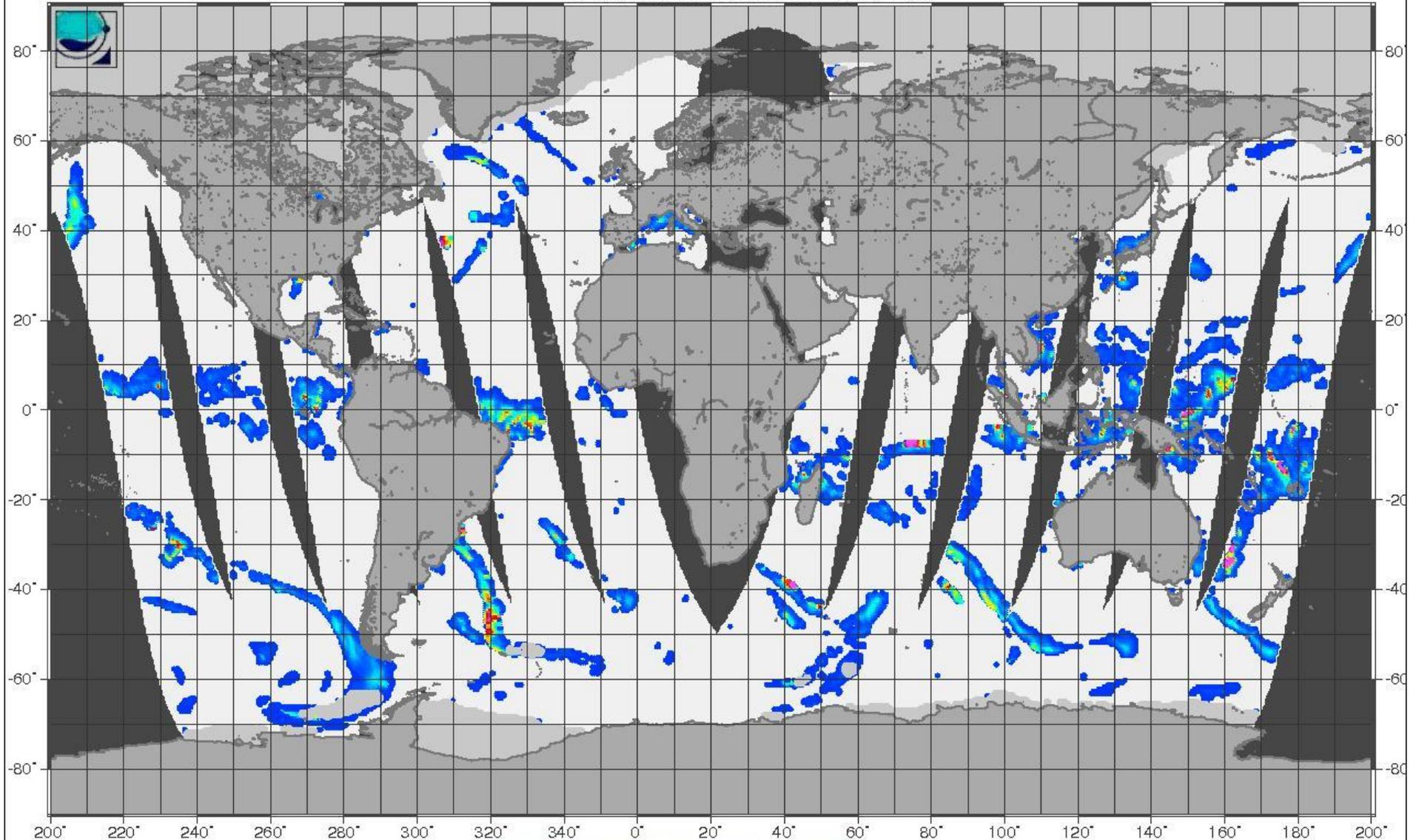


26.04.2021

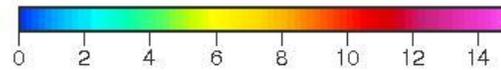
Глобальное поле относительной влажности на изобарическом уровне 700 гПа по данным МТВЗА-ГЯ (суточный композит) и ECMWF (реанализ, 06 UTC)



202203301406...202203302340 12-24 UTC



ФГБУ "НИЦ "ПЛАНЕТА"
Россия, 123242, Москва
Б.Предтеченский пер., 7
Тел: (499) 2523717. Факс: (499) 2526610
E-mail: asmus@planet.iitp.ru
<http://planet.iitp.ru>



Интенсивность дождя (мм/ч)

По данным МТВЗА-ГЯ "Метеор-М" № 2-2

Период съемки
202203301406...202203302340

суша нет данных

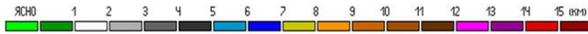
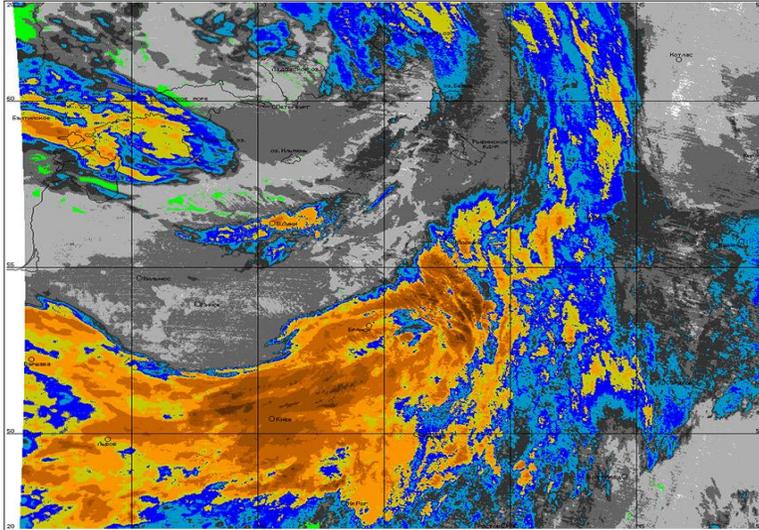
Многозональное сканирующее устройство малого разрешения МСУ-МР



Количество каналов	6
Спектральные полосы, μm	0.5-0.7 0.7-1.1 1.6-1.8 3.5-4.1 10.5-11.5 11.5-12.5
Ширина полосы, км (H=835 км)	2800
Пространственное разрешение, м (H=835 км)	1000
Информативность, Мбит/с	0.66
Количество бит	10
NEDT for 300K - 3.5-4.1 μm - 10.5-12.5 μm	0.5 0.12
Масса, кг	106 (два блока)



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
ФГБУ «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР КОСМИЧЕСКОЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ «ПЛАНЕТА»

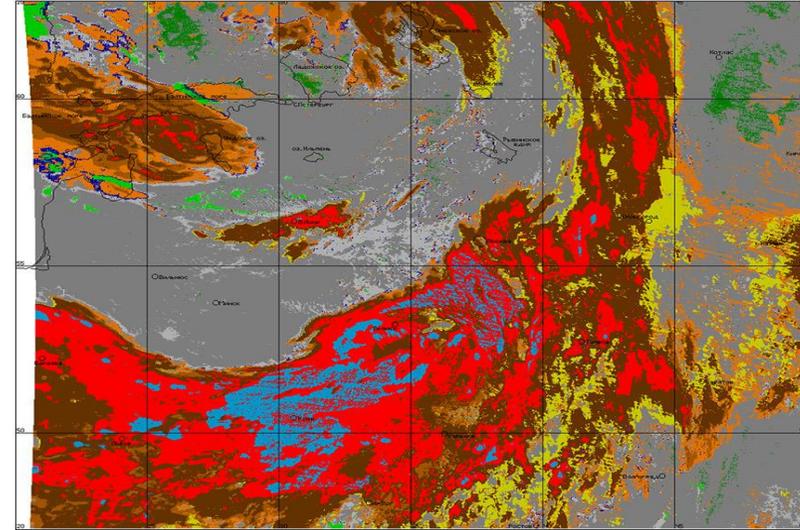


КА Метеор-М №2-2/МСУ-МР
Спектральный диапазон: 0,7-12,5 мкм
30.10.2022 00:57 UTC
Высота верхней границы облачности, км

ФГБУ «НИЦ «Планета»
Россия, 123242, Москва,
Е. Предтеченский пер., 7
Тел.: (499)2523717
Факс: (499)2526610
<http://planet.iitp.ru>
E-mail: asmus@planet.iitp.ru



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
ФГБУ «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР КОСМИЧЕСКОЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ «ПЛАНЕТА»



КА Метеор-М №2-2/МСУ-МР
Спектральный диапазон: 0,7-12,5 мкм
30.10.2022 00:57 UTC
Типы облачности

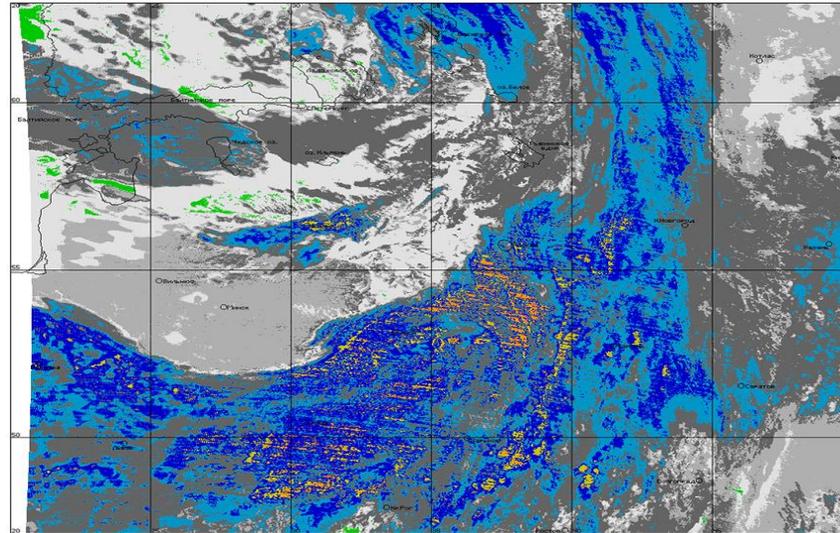
ФГБУ «НИЦ «Планета»
Россия, 123242, Москва,
Е. Предтеченский пер., 7
Тел.: (499)2523717
Факс: (499)2526610
<http://planet.iitp.ru>
E-mail: asmus@planet.iitp.ru



Оценки параметров облачного покрова (высота ВГО, тип) по данным МСУ-МР



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
ФГБУ «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР КОСМИЧЕСКОЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ «ПЛАНЕТА»



ЯСНО ОБЛ/0 0,5 2 5 10 20 30(ММ/Ч)

КА Метеор-М №2-2/МСУ-МР
Спектральный диапазон: 0,7-12,5 мкм
30.10.2022 00:57 UTC

Максимальная мгновенная интенсивность осадков, мм/ч

ФГБУ «НИЦ «Планета»
Россия, 123242, Москва,
Б. Предтеченский пер., 7
Тел.: (499) 2523717
Факс: (499) 2526610
<http://planet.iitp.ru>
E-mail: asmus@planet.iitp.ru



Оценки интенсивности осадков по данным МСУ-МР

Космическая система Электро-Л

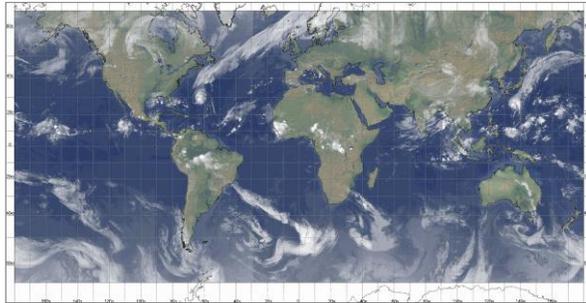
Состав и характеристики аппаратуры КА Электро-Л № 2, 3, 4

Аппаратура	Спектральные каналы, мкм	Разрешение, км
Многозональное сканирующее устройство – геостационарное (МСУ-ГС)	0,50-0,65; 0,65-0,80; 0,80-0,90	1
	3,5-4,0; 5,7-7,0; 7,5-8,5; 8,2-9,2; 9,2-10,2; 10,2-11,2; 11,2-12,5	4
Гелиогеофизический аппаратный комплекс		
Система сбора и передачи данных (ССПД)		

- **Электро-Л №1** запущен 20.01.2011 г. (76° в.д.), эксплуатация прекращена 01.06.2017 г.
- **Электро-Л №2** запущен 11.12.2015 г. (точка стояния до 21.07.2020 г. - 76° в.д., с 23.08.2020 – 14,5 °з.д.),
- **Электро-Л №3** запущен 24.12.2019 г. (точка стояния до 01.06.2020 г. – 165,8 в.д., с 05.07.2020 – 76° в.д.)
- **Электро-Л №4** запущен 05.02.2023 г. (165,8° в.д.)

* КА Электро-Л №1, 2 ** КА Электро-Л №3

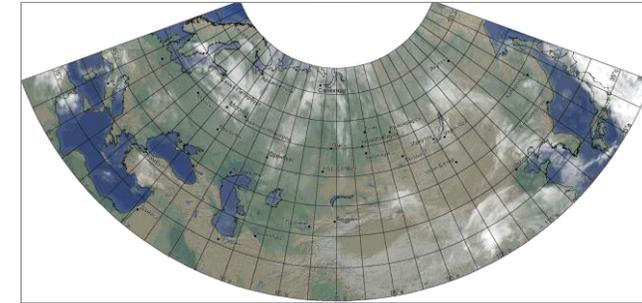
Примеры информационной продукции



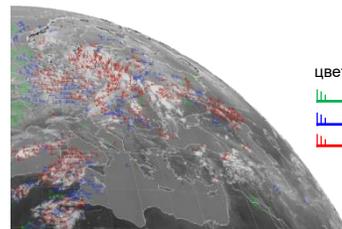
Глобальная карта облачности
(по данным GOES, Meteosat, Электро-Л №3, Himawari-8)



КА Электро-Л №3



Региональная карта облачности. Северная зона



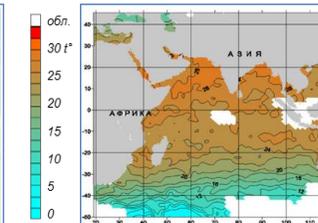
Векторы скорости ветра

цвет	высота	значение скорости
■	ниже 4 км	2-3 м/с
■	4-7 км	5 м/с
■	выше 7 км	25 м/с

Поля ветра по облакам-трассерам

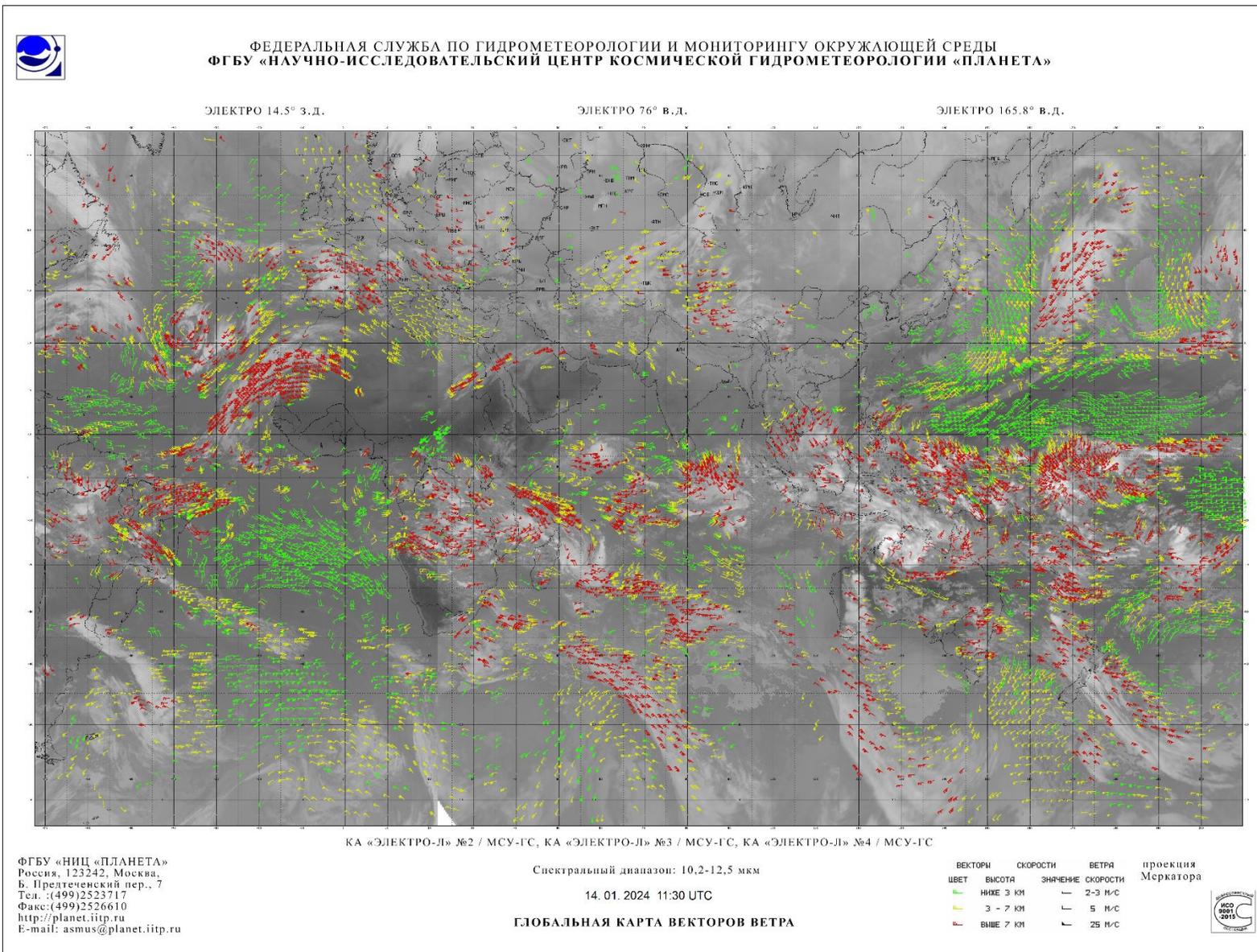


Мониторинг тропических циклонов

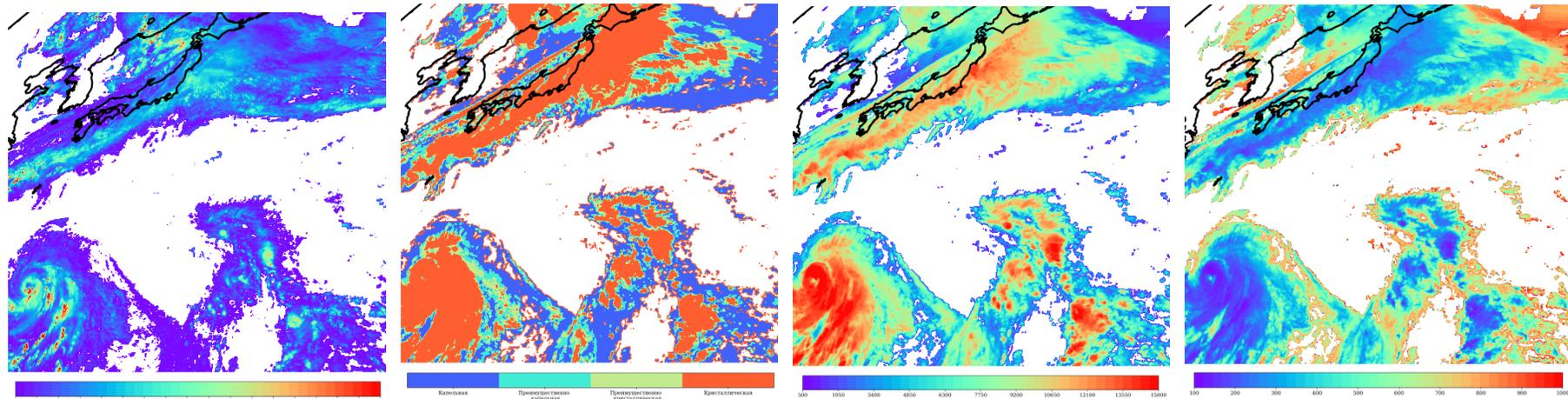


Температура поверхности океана

Карта векторов ветра, построенная по данным КА Электро-Л №2, Электро-Л №3 и Электро-Л №4 в проекции Меркатора



Восстановление параметров облачности по данным МСУ-ГС КА «Электро-Л» №4

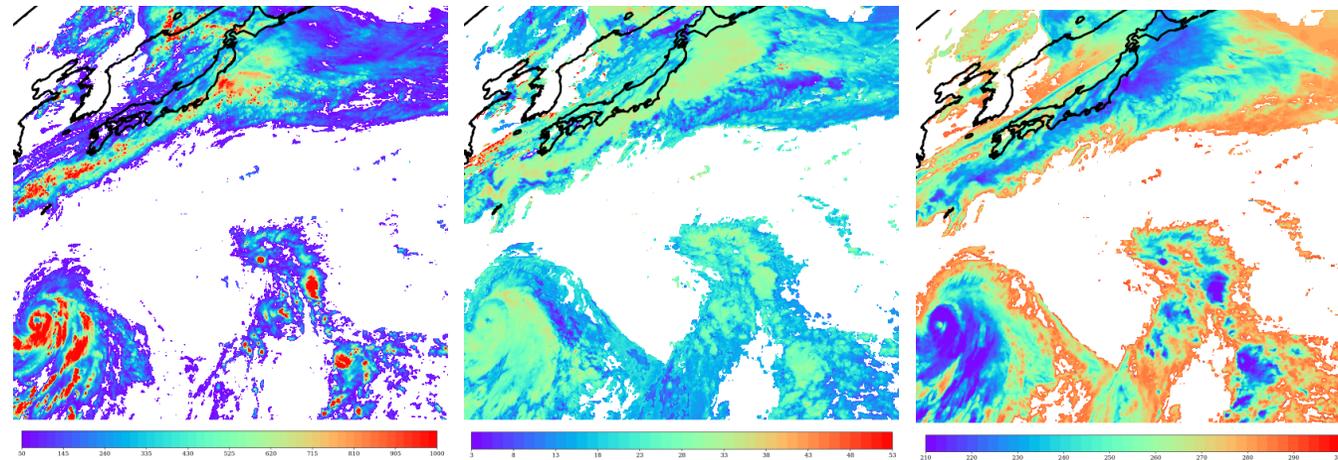


Оптическая толщина облачности

Фазовое состояние облачности

Высота ВГО, м

Давление на ВГО, гПа



Водозапас облачности, г/м³

Эффективный радиус частиц облачности, мкм

Температура ВГО, К

Космическая система Арктика-М

Состав и характеристики аппаратуры КА Арктика-М № 1, 2

- Арктика-М №1 запущен 28.02.2021 г.
- Арктика-М №2 запущен 16.12.2023 г.

Аппаратура	Параметры орбиты	Спектральные каналы, мкм	Разрешение, км
Многозональное сканирующее устройство – геостационарное, модернизированное для высокоэллиптических орбит (МСУ-ГС/ВЭ)	Апогей: ~ 40 000 км Перигей: ~ 1 000 км Наклонение: ~ 63° Период обращения: 12 ч	0,50-0,65; 0,65-0,80; 0,80-0,90	1
		3,5-4,0; 5,7-7,0; 7,5-8,5; 8,2-9,2; 9,2-10,2; 10,2-11,2; 11,2-12,5	4
Гелиогеофизический аппаратный комплекс			
Система сбора и передачи данных (ССПД)			

Примеры информационной информации

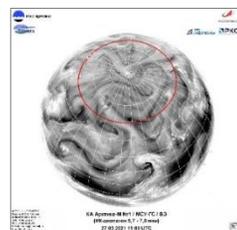


Западный участок

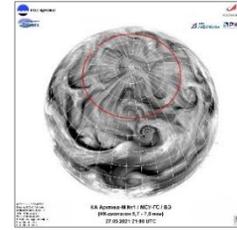


Восточный участок

Цветосинтезированные изображения видимого диапазона (0,5-0,65; 0,65-0,8; 0,8-0,9 мкм)

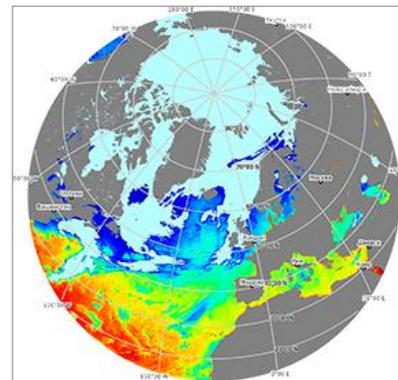


Западный участок

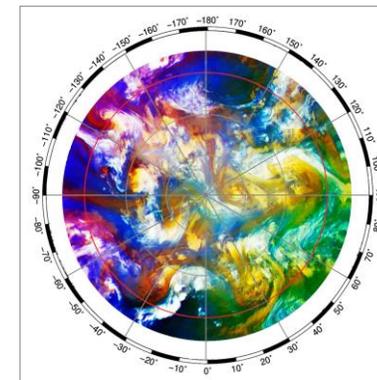


Восточный участок

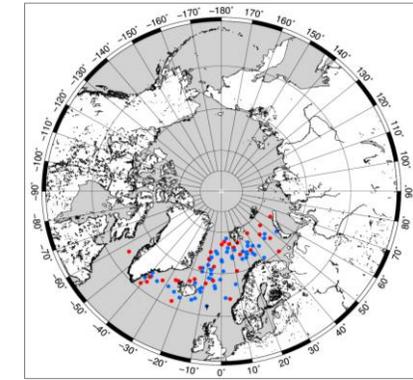
ИК-изображения (5,7-7,0 мкм)



Карта температуры морской поверхности



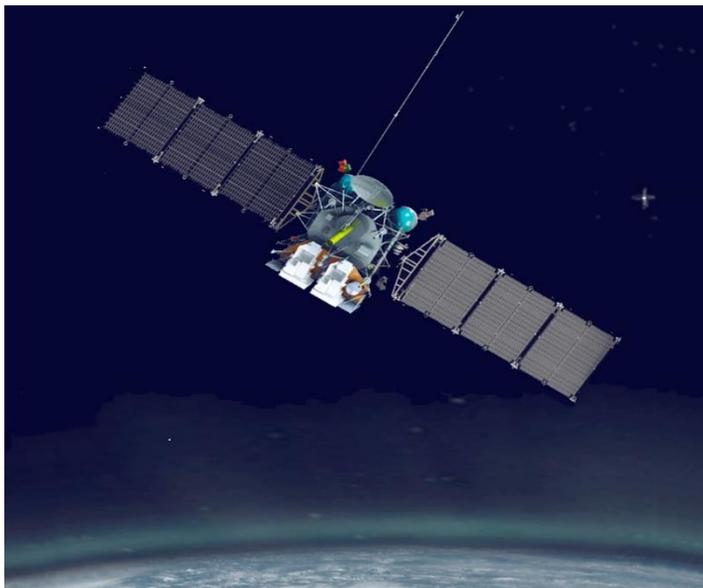
Карта воздушных масс



Карта мезоциклонической активности в Арктическом регионе

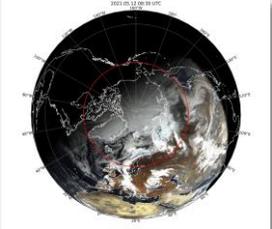
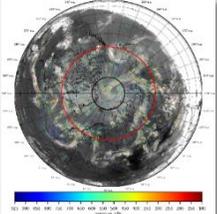
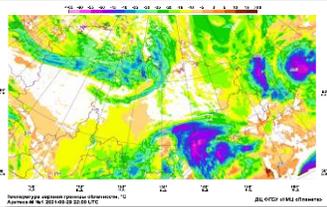
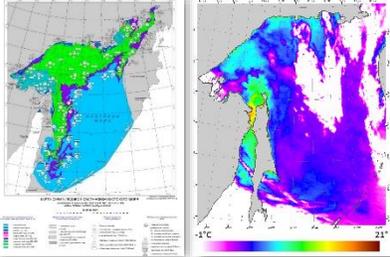
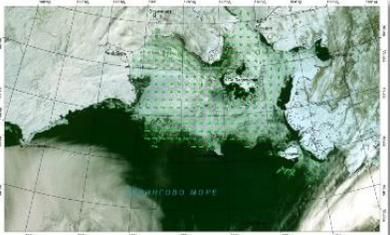
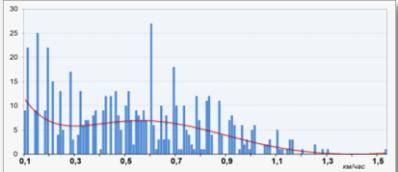
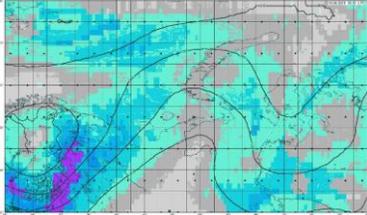
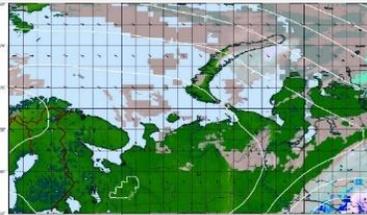
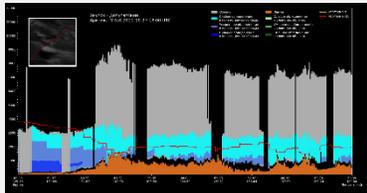
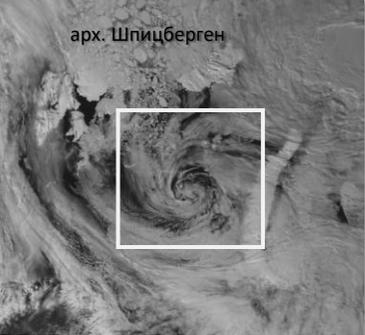
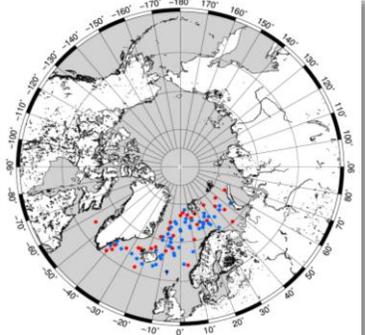
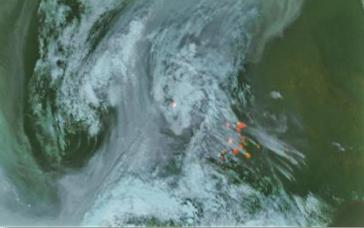
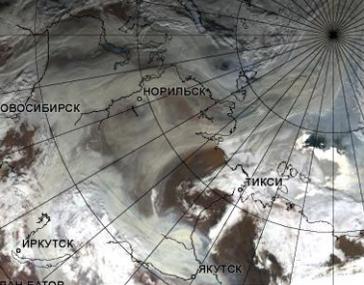
АРКТИКА-М №1 - гидрометеорологический КА с аппаратурой МСУ-ГС/ВЭ, функционирует на высокоэллиптической орбите

Основные характеристики аппаратуры МСУ-ГС/ВЭ



№ канала	Спектральный диапазон, μm	Область применения
1	0.5 – 0.65	Детектирование облачности, слежение за облаками-трассерами для определения направления ветров, наблюдения аэрозоля.
2	0.65 – 0.8	
3	0.8 – 0.9	Детектирование облачности малых размеров.
4	3.5 – 4.01	Детектирование низкой облачности, туманов. Оценка температуры поверхности океанов (ТПО) и температуры поверхности суши (ТПС) ночью
5	5.7 – 7.0	Наблюдения за водяным паром, оценка скорости ветра, высоты полупрозрачной облачности.
6	7.5 – 8.5	Наблюдения полупрозрачной слоистой облачности.
7	8.2 – 9.2	
8	9.2 – 10.2	Мониторинг общего содержания озона, оценка скорости ветра в нижней стратосфере.
9	10.2 – 11.2	Оценка ТПО, ТПС, количества осажденной воды над океанами, слежение за облаками-трассерами для определения скорости и направления ветра, определения характеристик облачности.
10	11.2 – 12.5	

Основные направления использования данных МСУ-ГС/ВЭ

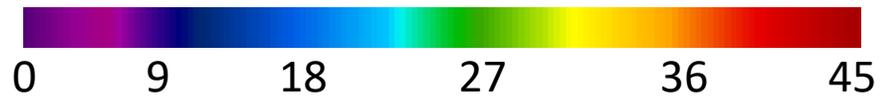
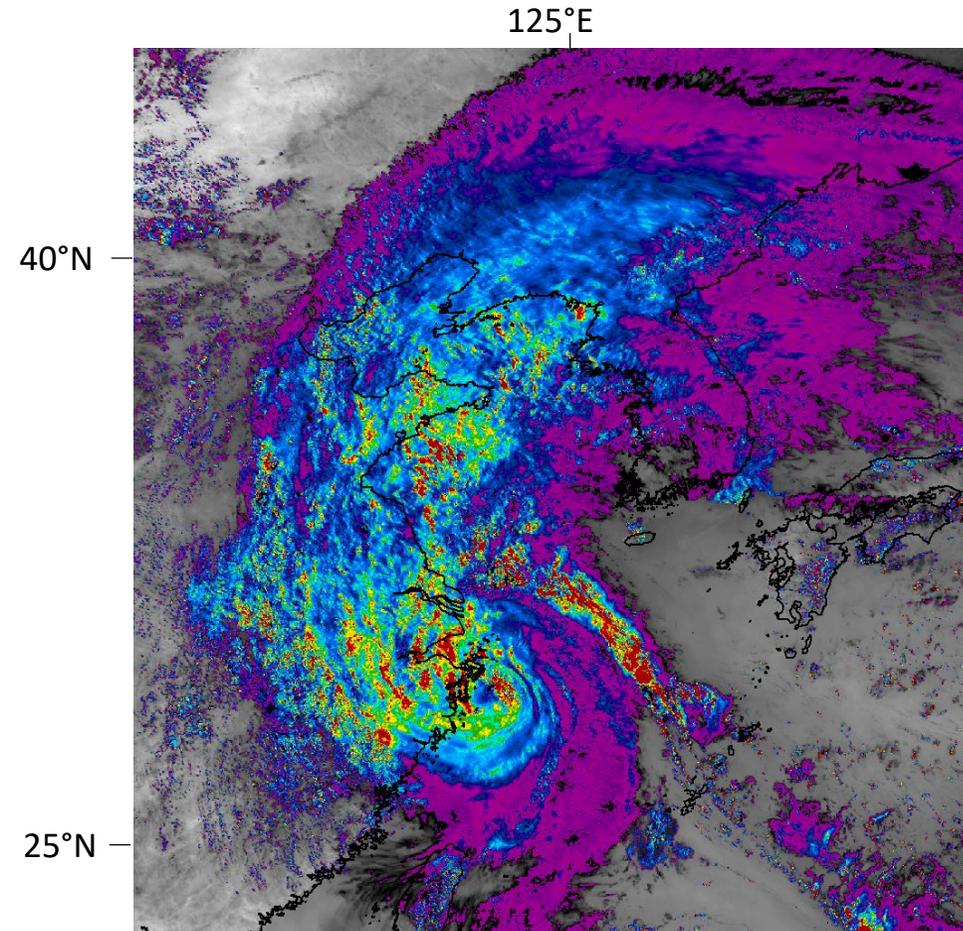
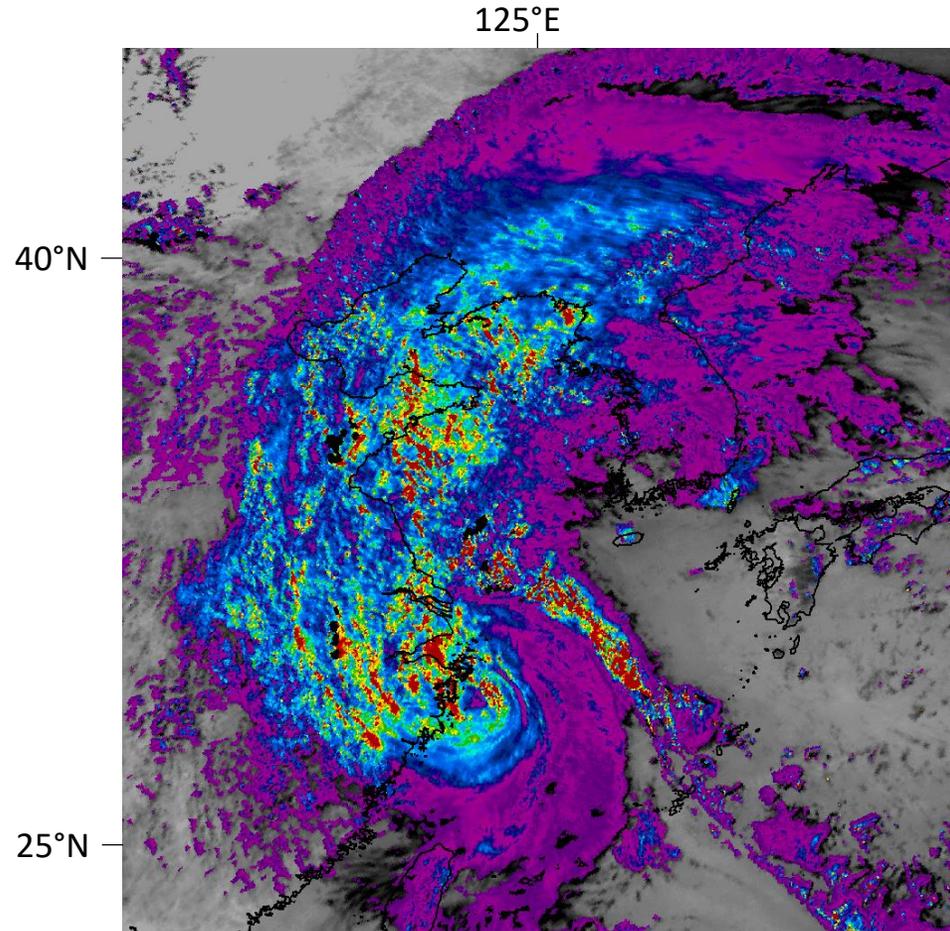
Анализ и прогноз погоды	Анализ и прогноз состояния морей и океанов	Анализ и прогноз условий для полетов авиации	Мониторинг ОЯ (полярные мезомасштабные циклоны)	Контроль экологического состояния окружающей среды и др.
<p>Анимационные карты облачности</p>  <p>Карты векторов ветра</p>  <p>Карты температуры и высоты верхней границы облачности</p> 	<p>Карты параметров ледяного покрова и температуры поверхности океана</p>  <p>Мониторинг дрейфа льда</p>  <p>Скорость дрейфа льда</p> 	<p>Определение максимальной скорости ветра при порывах у земли</p>  <p>Детектирование зон и интенсивности осадков</p>  <p>Вертикальные разрезы облачности и обледенения по воздушным трассам</p> 	<p>Мониторинг и анализ эволюции полярных мезомасштабных циклонов</p>  	<p>Мониторинг пожарной обстановки циклонов</p>  

Cloud Microphysical Properties from MSU-GS/A Arctica-M N1, AHI Himawari-8 : Cloud optical thickness

Arctica-M N1

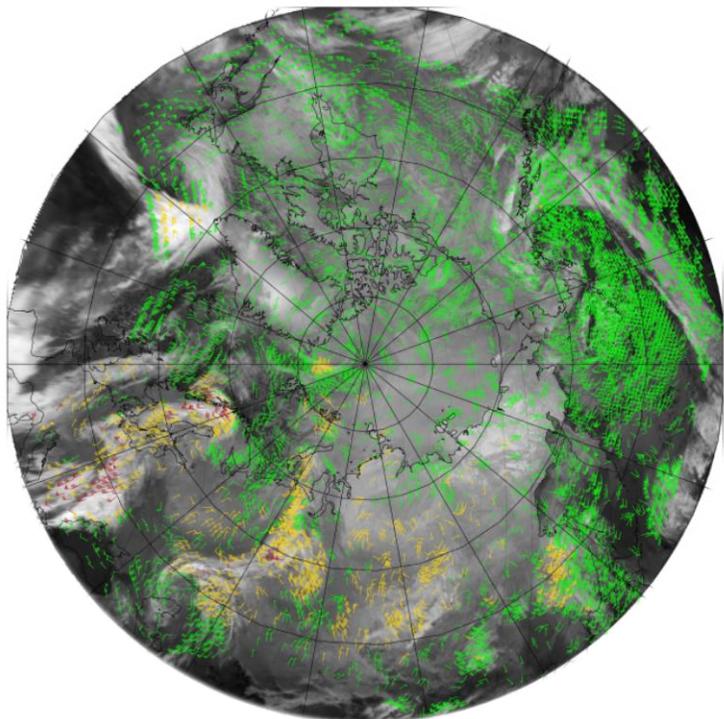
2022.09.14 07:30 UTC

Himawari-8 (AHI)



Характеристики ветра по данным КА «Арктика-М» №1

Арктический регион и прилегающие территории



2022.01.21 06:15 UTC

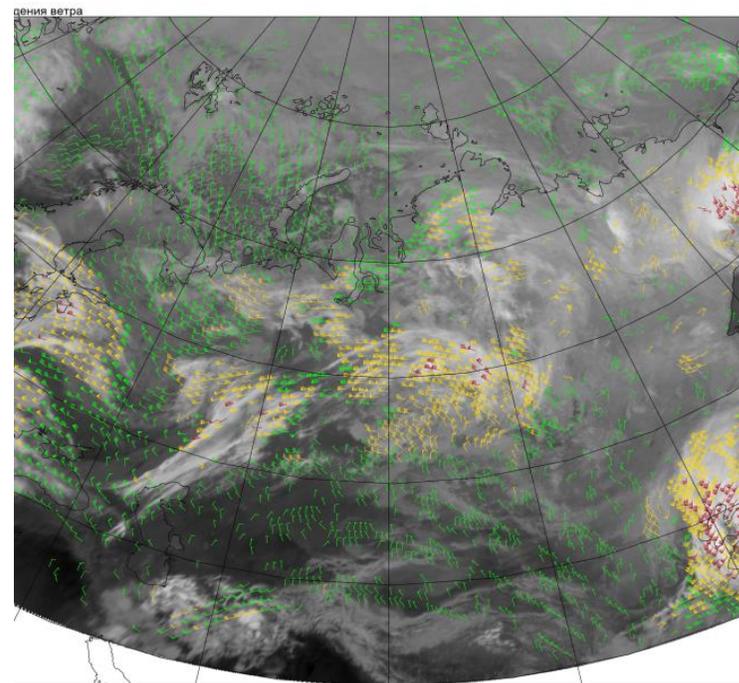
Условные обозначения

Цвет	Высота
■	< 3 км
■	3-7 км
■	> 7 км

Знак	Скорость ветра
	2-3 м/с
	4-6 м/с
	7-8 м/с
	9-11 м/с
	12-13 м/с
	14-16 м/с
	17-18 м/с
	19-21 м/с
	22-23 м/с
	24-26 м/с
	27-28 м/с
.....	и. т. д.

В соответствии с синоптическим кодом КН-01

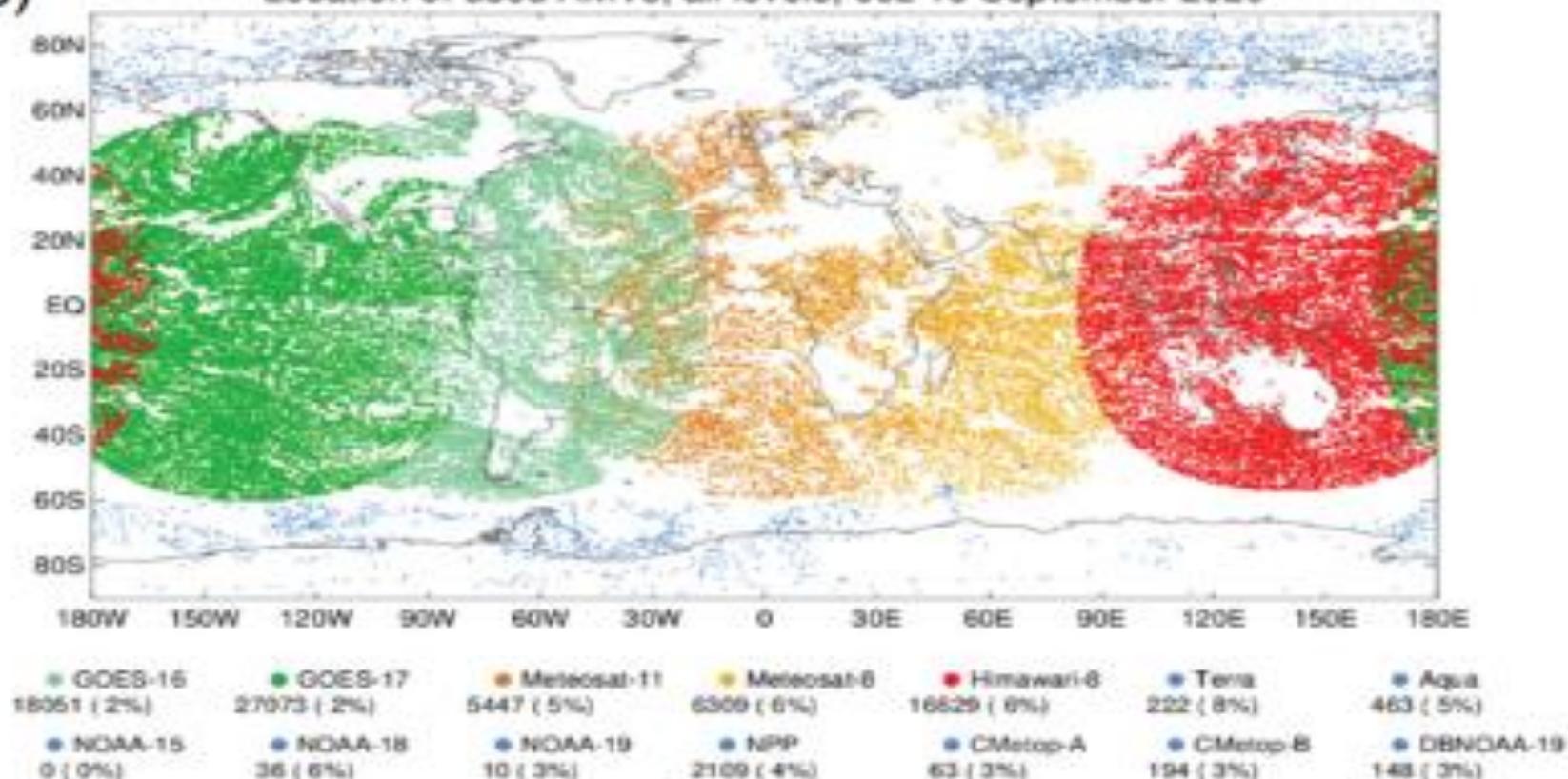
Территория Российской Федерации



2022.01.22 19:00 UTC

(b)

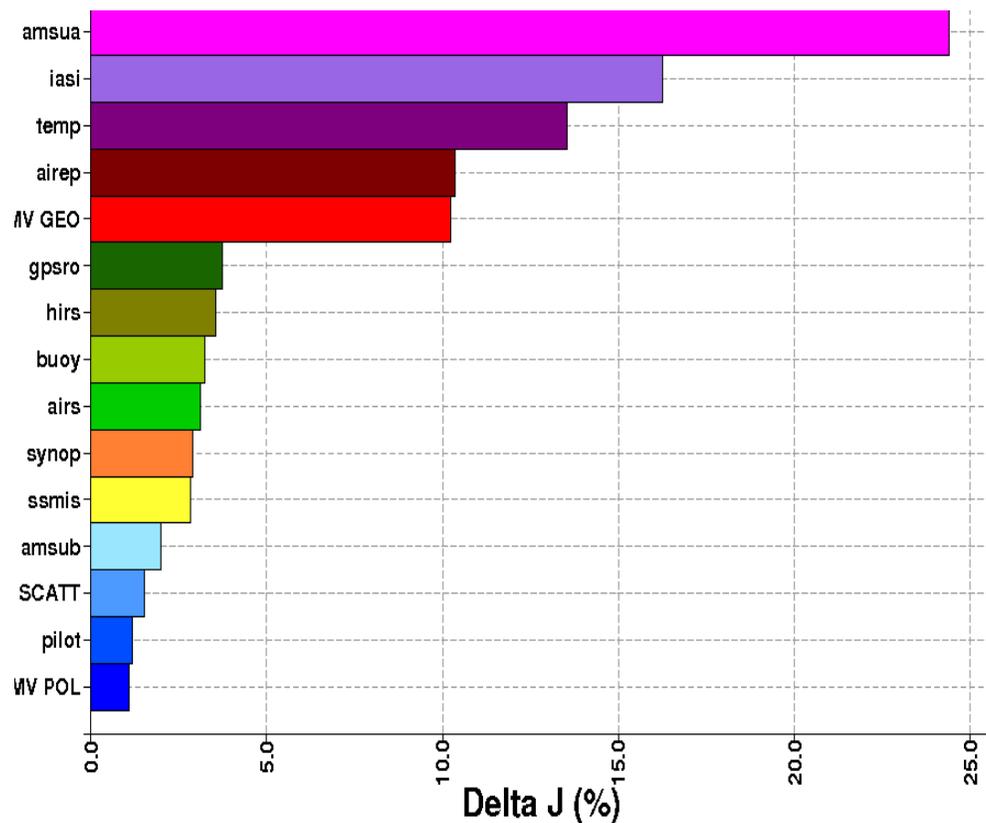
Location of used AMVs, all levels, 00z 15 September 2020



Покрывание данными AMV, ассимилируемыми в глобальной модели NWP UK Met Office для одного модельного цикла: геостационарные AMV + полярные AMV (выделены синим)

Применение спутниковых данных и продуктов ДЗА в численном прогнозе погоды

Роль спутниковых наблюдений в численном прогнозе погоды (по данным UK MetOffice, 2016)

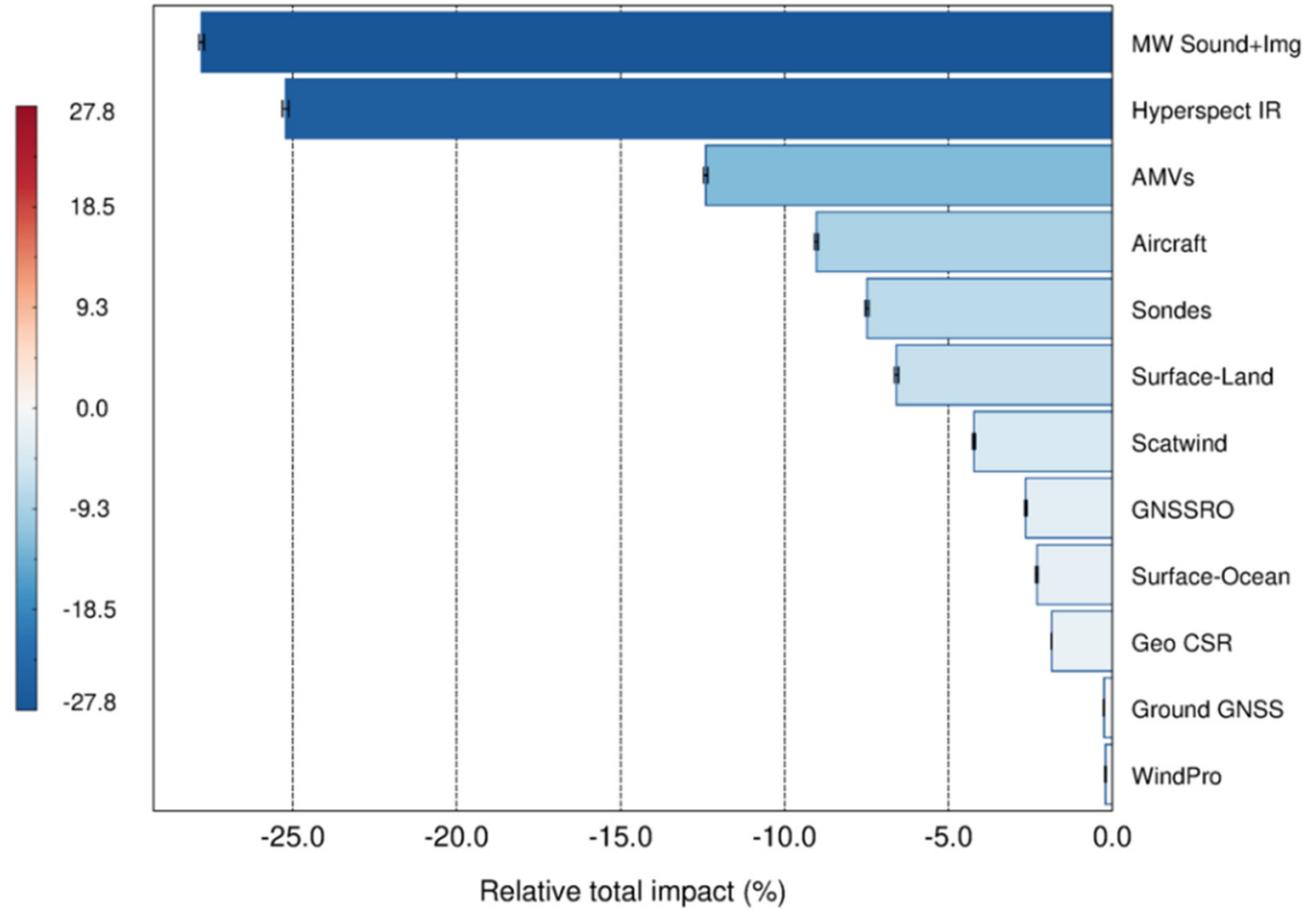


Вклад различных наблюдательных систем в уменьшение погрешности численного прогноза погоды (ЧПП)

Вид наблюдений	Вклад в уменьшение погрешности ЧПП, %
Спутниковые измерения (интегрально)	64
Из них:	
ИК-, МВ-зондировщики	78
МВ-зондировщики	43
ИК-зондировщики	35
Сканеры-имаджеры (оценки векторов ветра)	10
Другие наблюдательные системы	36
Из них:	
Данные радиозондирования	15
Metop-A	25
Из них:	
IASI	49
AMSU-A	31
ASCAT	13
MHS (AMSU-B)	3
GRAS	2

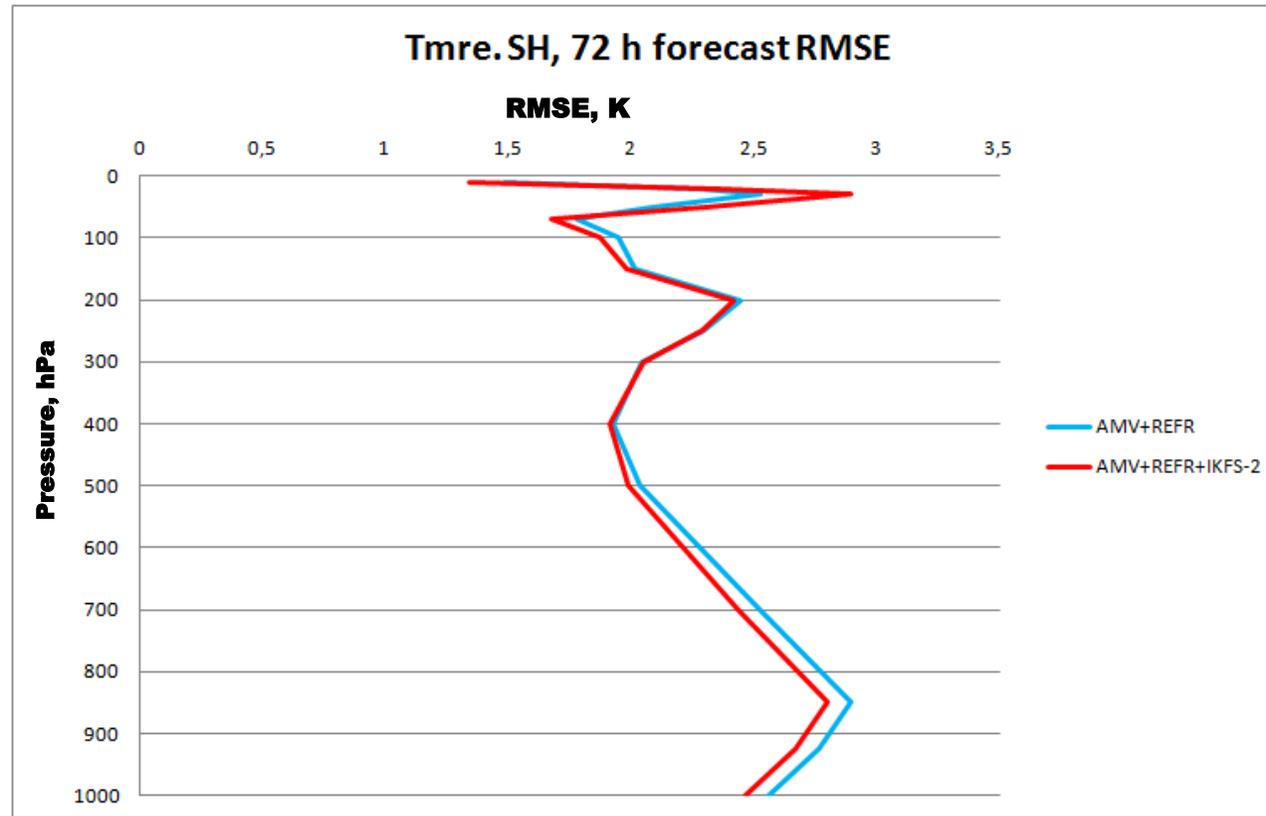
Эффективность усвоения различной спутниковой информации в модели краткосрочного ЧПП

All categories / 20190815T1800Z-20191016T0600Z
 Relative total impact (%)



Relative FSOI for all observations assimilated into the Met Office global NWP system in August–October 2019. The impact is expressed as the percentage of the total impact on the 24 hr forecast error.

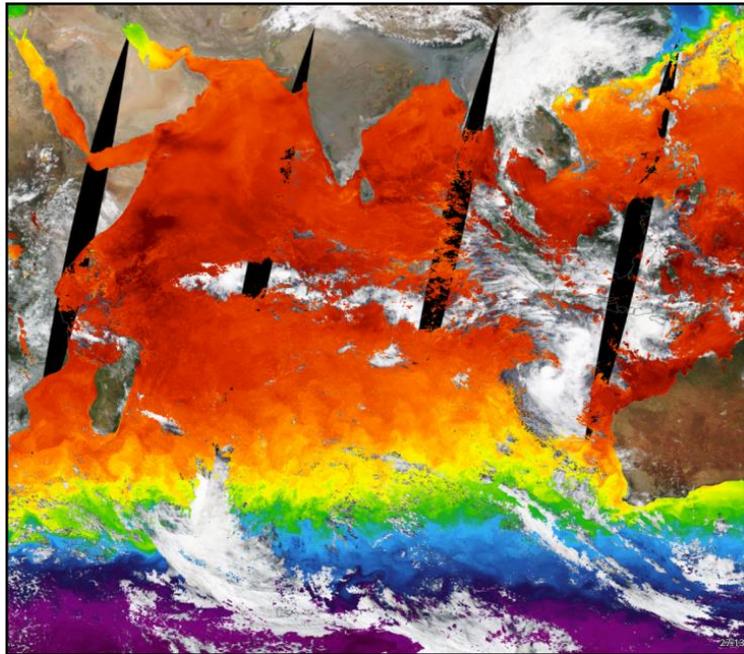
Численные эксперименты по усвоению данных ИКФС-2



RMSEs (K) of three-day temperature forecast in the southern hemisphere:
without IKFS-2 data (blue) and with IKFS-2 data (red)

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПРОДУКЦИЯ О ПАРАМЕТРАХ СОСТОЯНИЯ ГИДРОСФЕРЫ

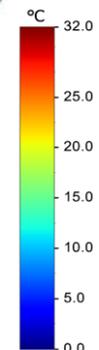
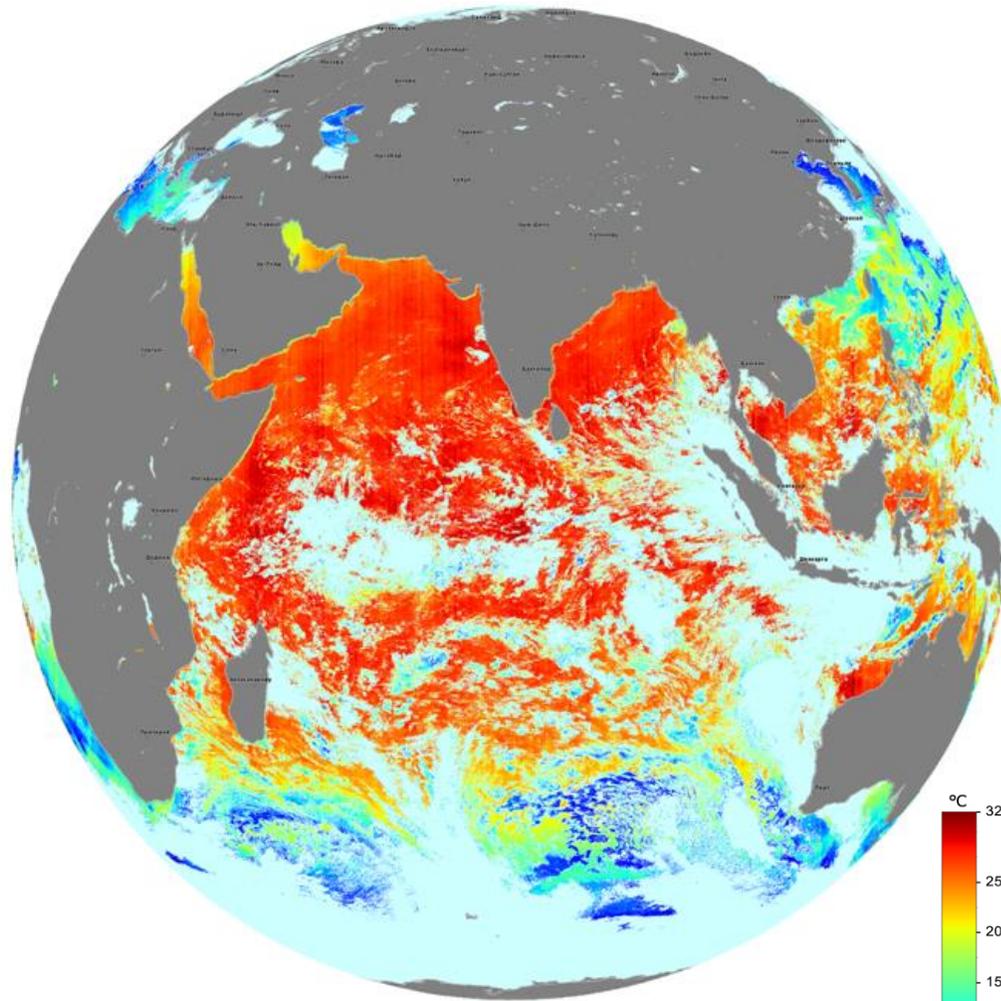
Sea surface Temperature from MSU-GS/Electro-L N3



SST from Suomi NPP / VIIRS, 06.04.2021

UTC

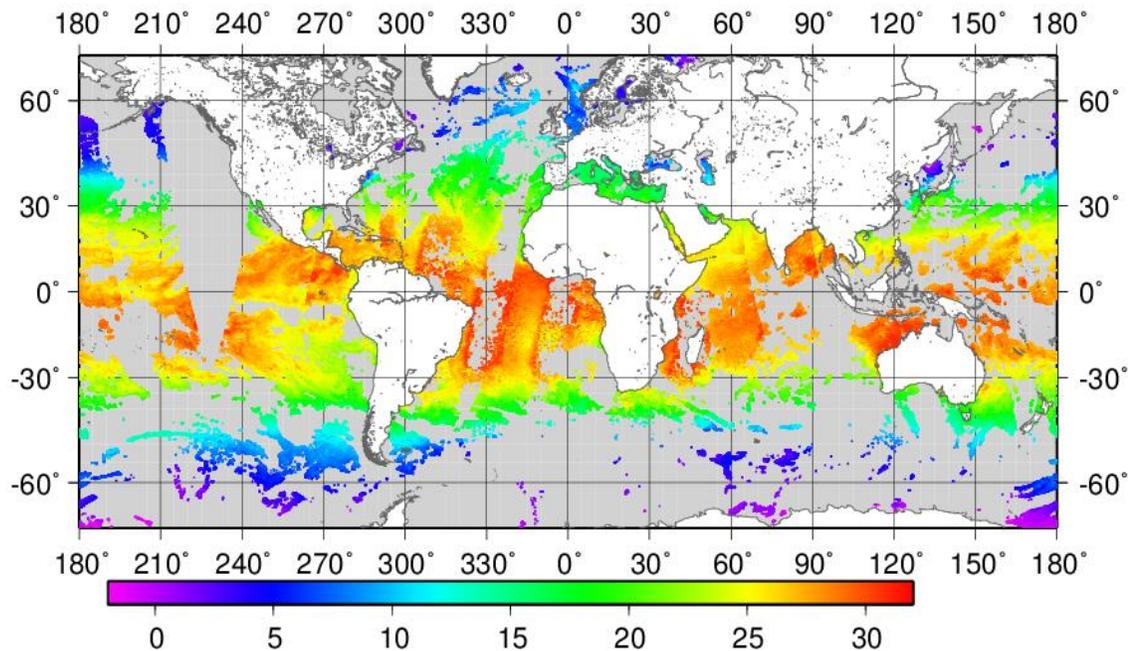
<https://worldview.earthdata.nasa.gov>



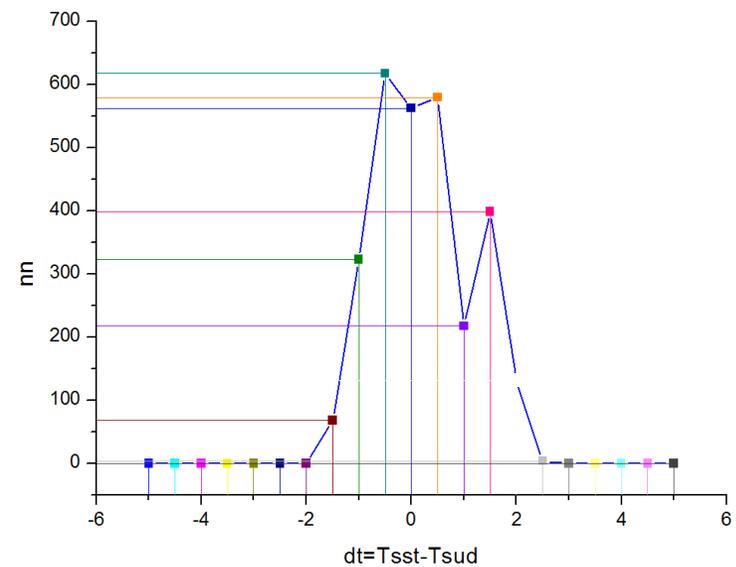
Land
Cloud

06.04.2021 00 – 23 UTC

Глобальные карты температуры поверхности океана (Meteor-M N2,2-2/MSU-MR)

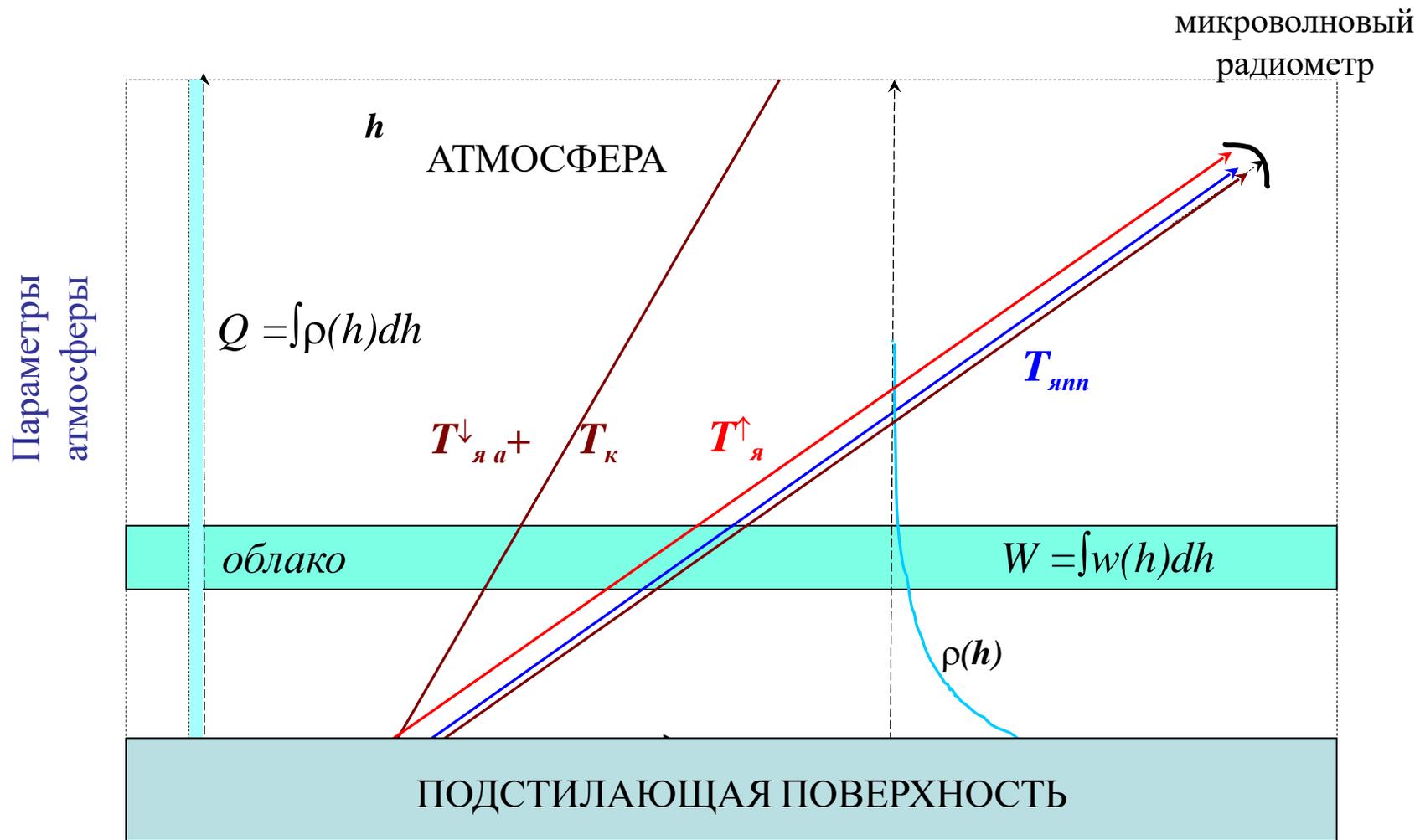


Error statistics of comparison
satellite estimates vs buoy
measurements



Mean bias=0.6 K RMS=0.95 K

Схема формирования микроволнового излучения



Параметры подстилающей поверхности

Заболотских ©

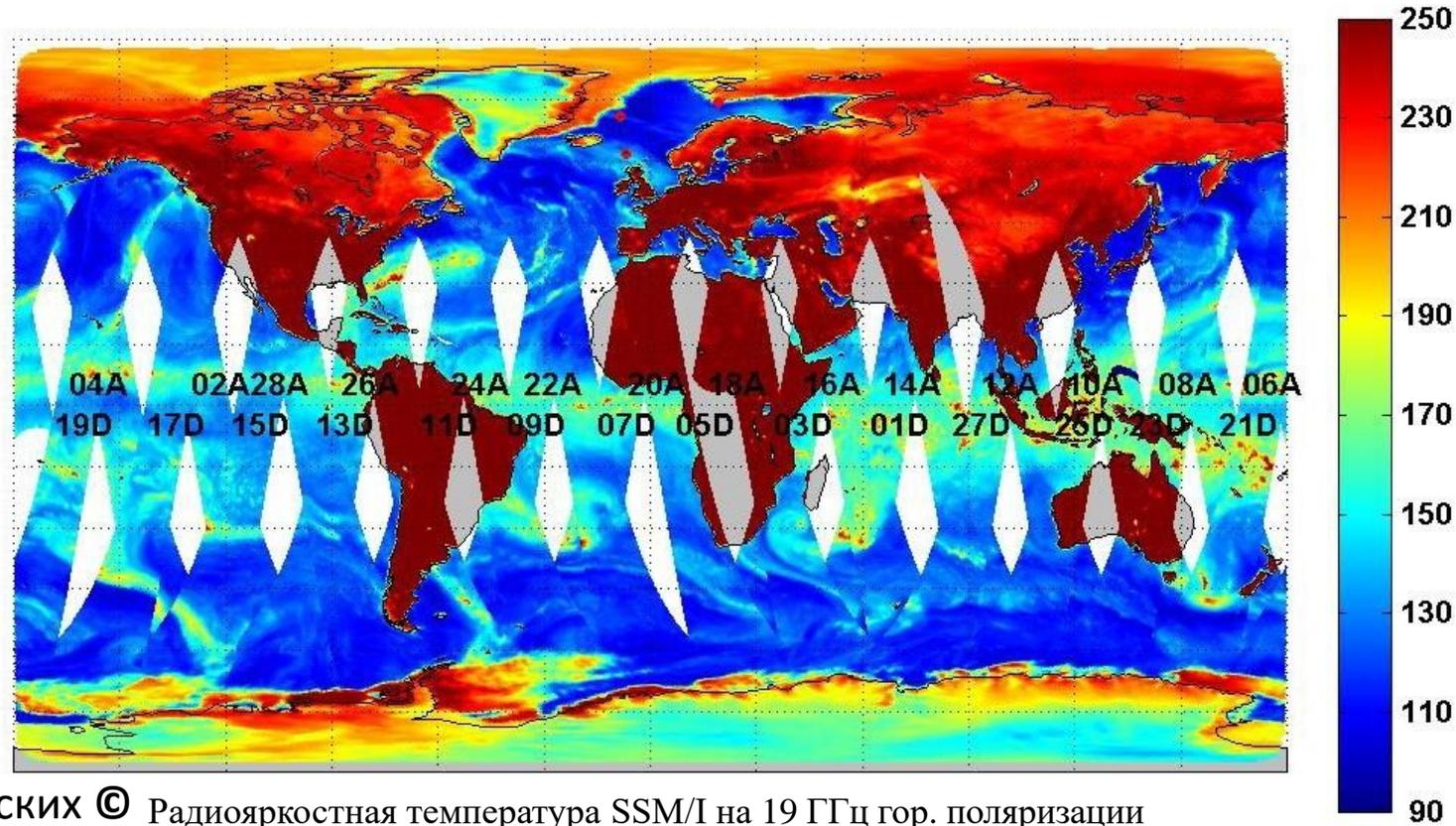
$T_{\text{я}}$ = излучение атмосферы + излучение подстилающей поверхности

Над океаном:

Коэффициент излучения подстилающей поверхности < 1
- Есть возможность определять параметры атмосферы !

Над сушей, снегом или льдом

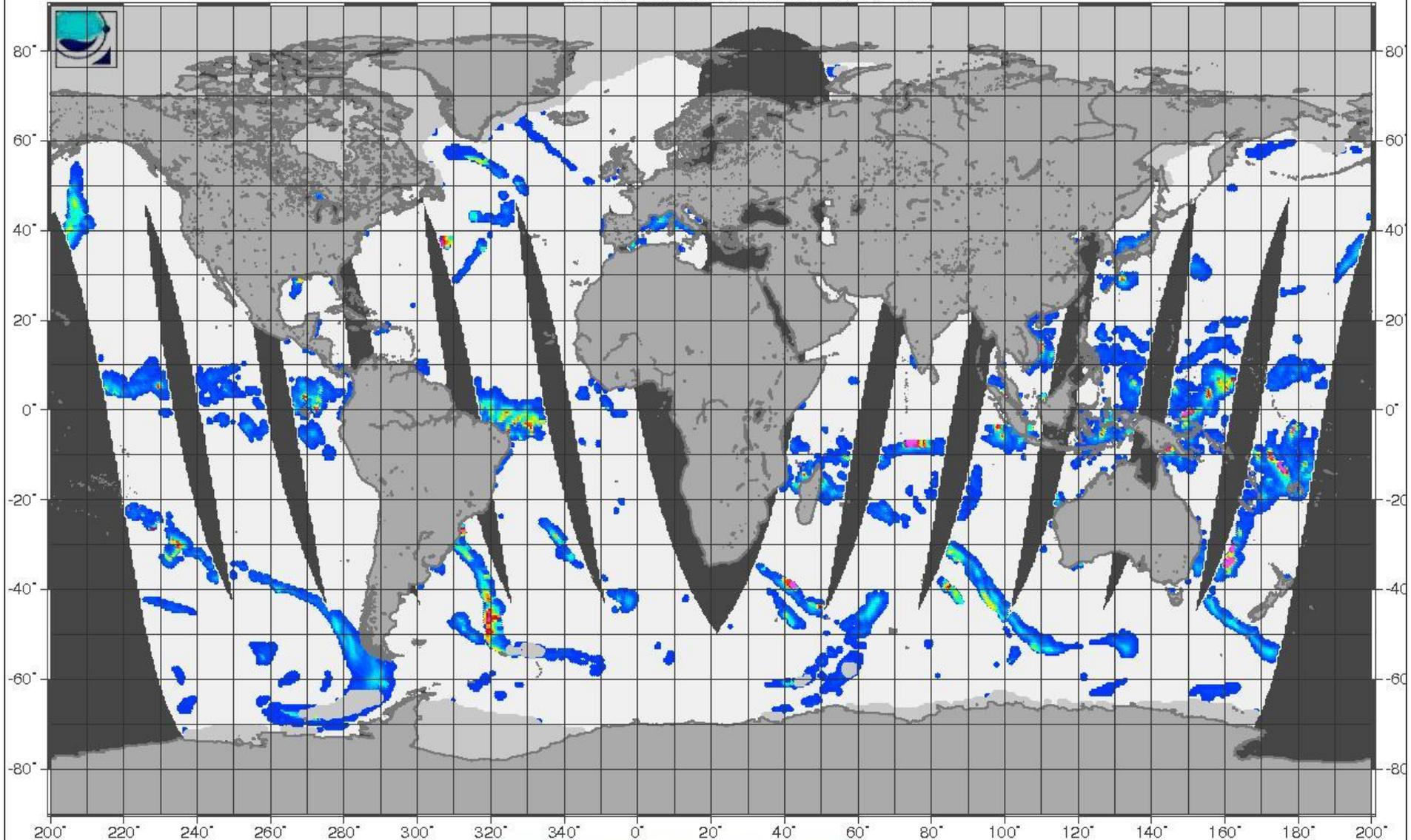
Коэффициент излучения подстилающей поверхности ~ 1
- Нет возможности определять параметры атмосферы !



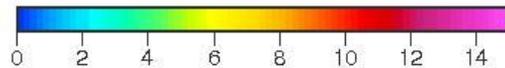
Заболотских © Радиояркостная температура SSM/I на 19 ГГц гор. поляризации

для определения того или иного параметра необходимы многоканальные радиометрические измерения

202203301406...202203302340 12-24 UTC



ФГБУ "НИЦ "ПЛАНЕТА"
Россия, 123242, Москва
Б.Предтеченский пер., 7
Тел: (499) 2523717. Факс: (499) 2526610
E-mail: asmus@planet.iitp.ru
<http://planet.iitp.ru>



Интенсивность дождя (мм/ч)

По данным МТВЗА-ГЯ "Метеор-М" № 2-2

Период съемки
202203301406...202203302340

суша нет данных

над океаном:

Оценка параметров атмосферы и океана:

- Интенсивность осадков (дождя);
- Параметры океана - соленость, температура, приводный ветер;
- Интегральные параметры атмосферы - влагозапас атмосферы и водозапас облаков;
- Профили температуры атмосферы

над отличными от океана подстилающими поверхностями:

- Сплоченность ледяного покрова;
- Влажность почвы;
- Параметры снежного покрова;

Параметры атмосферы

1. $Q = \int_0^{H_{Max}} \rho(h) dh$ интегральное содержание водяного пара в атмосфере
2. $W = \int_{h_n}^{h_e} \omega(h) dh$ интегральное содержание жидкокапельной влаги в облаке

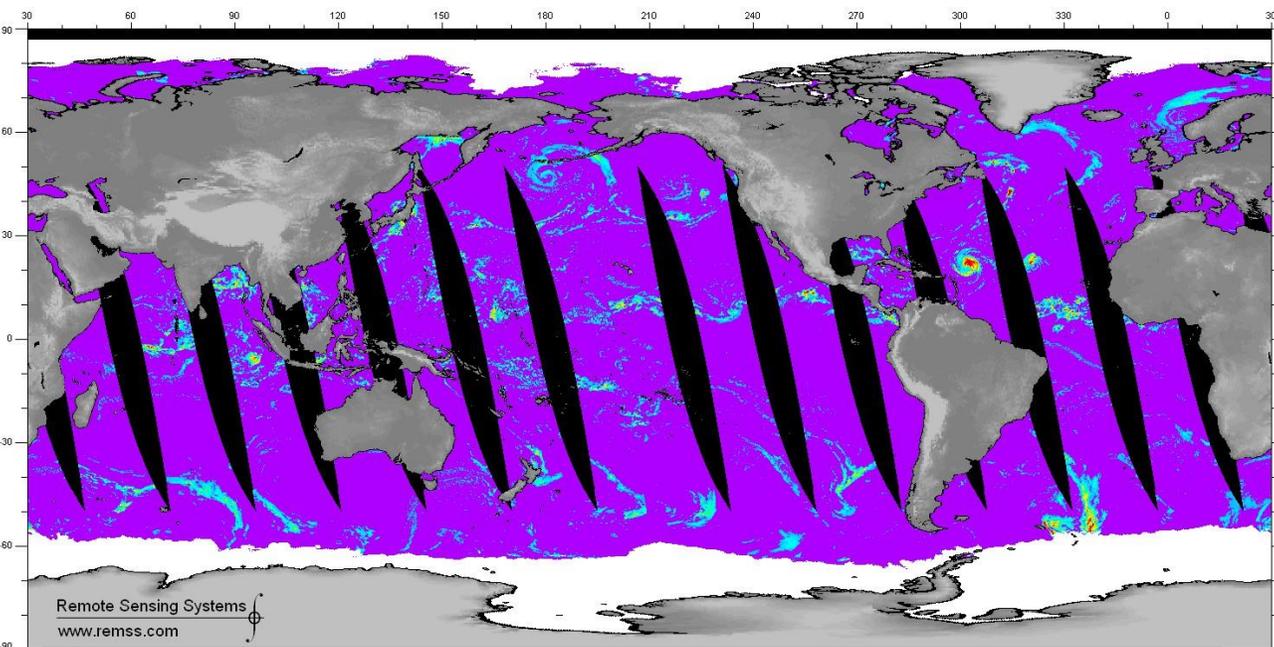
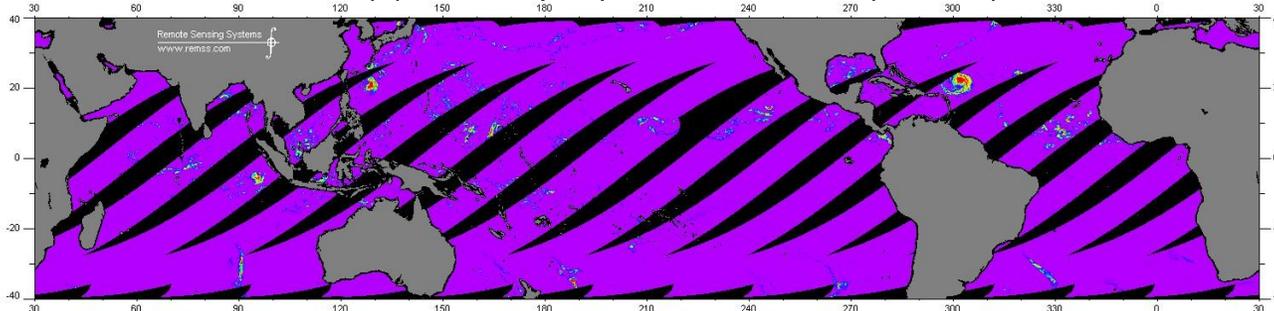
Водозапас облаков и влагозапас атмосферы, наряду с аэрозолями, контролируют планетарное альbedo Земли, и, таким образом, являются одними из важнейших компонентов, определяющих климат.

3. ИНТЕНСИВНОСТЬ ДОЖДЯ – слой осадков, выпадающий за единицу времени

Дождь – атмосферные осадки, выпадающие из облаков в виде капель жидкой воды диаметром от 0.5 мм до 6-7 мм

Кристаллические облака и осадки в виде снега и града не поглощают и не излучают радиацию в микроволновом диапазоне э/м спектра, они могут лишь рассеивать излучение на высокочастотных каналах

Радиометры, ^{TMI} позволяющие оценивать интенсивность осадков:



	частоты	полоса обзора
TMI	10.65-85.5	780
SSM/I - SSMIS	19-183	1700
WindSat	6.8-37	1025
AMSR-E-AMSR2	6.9-89	1450

AMSR-E

Заболотских ©

Определение солёности океана по данным радиометров L-диапазона

Частота $\nu = 1.4$ ГГц, вертикальная и горизонтальная поляризации

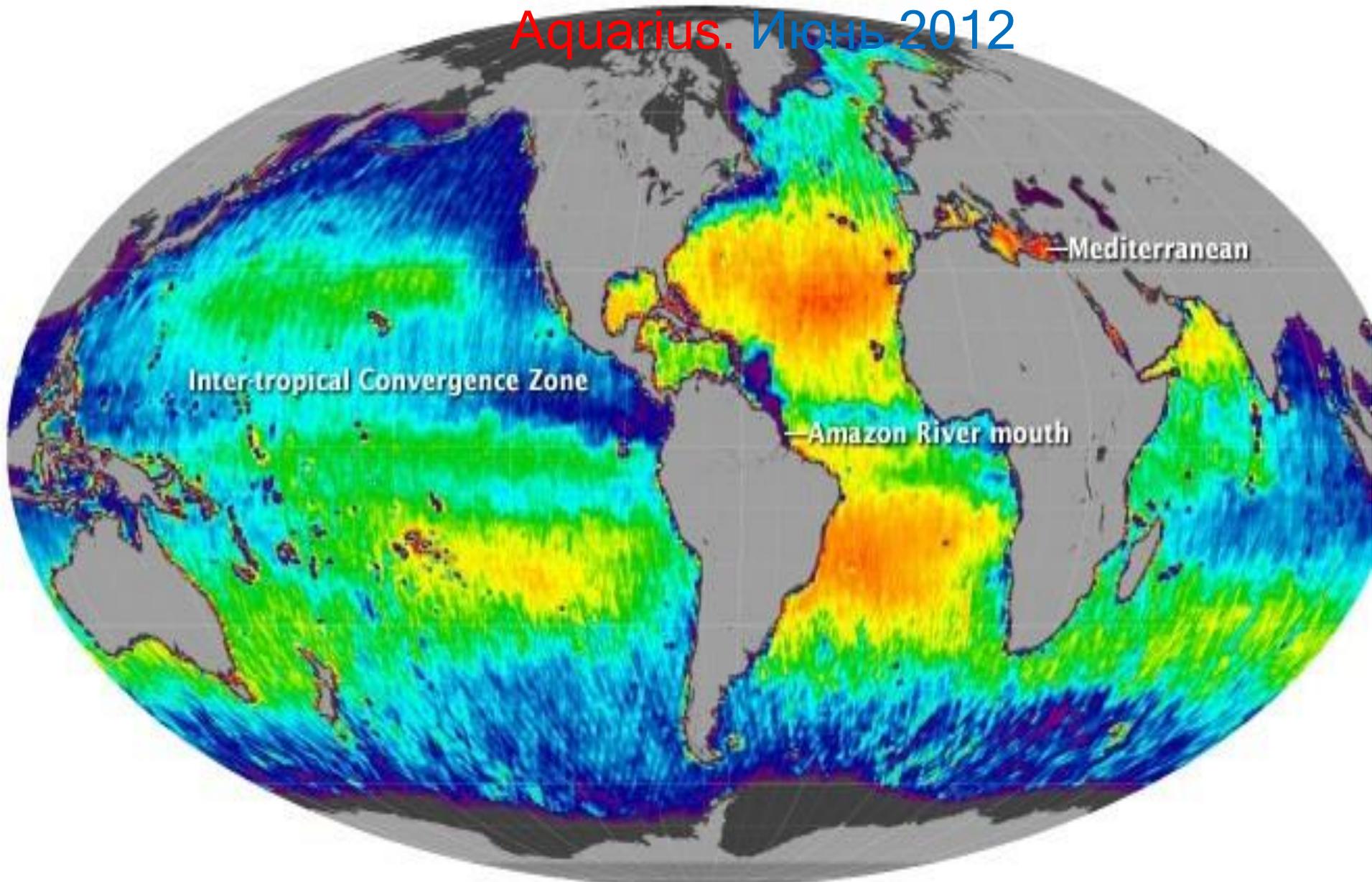
- Осуществляется в настоящее время с использованием данных двух радиометров - на спутниках SMOS (уникальный радиометрический интерферометр MIRAS, разрешение 35×150 км) с 2009 года и Aquarius с 2011 года (150×150 км);
- Использует коррекцию на атмосферу, влияние ветра и температуры океана на $T_{я}$ путем использования данных ECMWF;
- Алгоритм состоит из итерационной схемы поиска наилучшего соответствия между измеренными значениями $T_{я}$ и модельными $T_{я}$;

Данные по солёности:

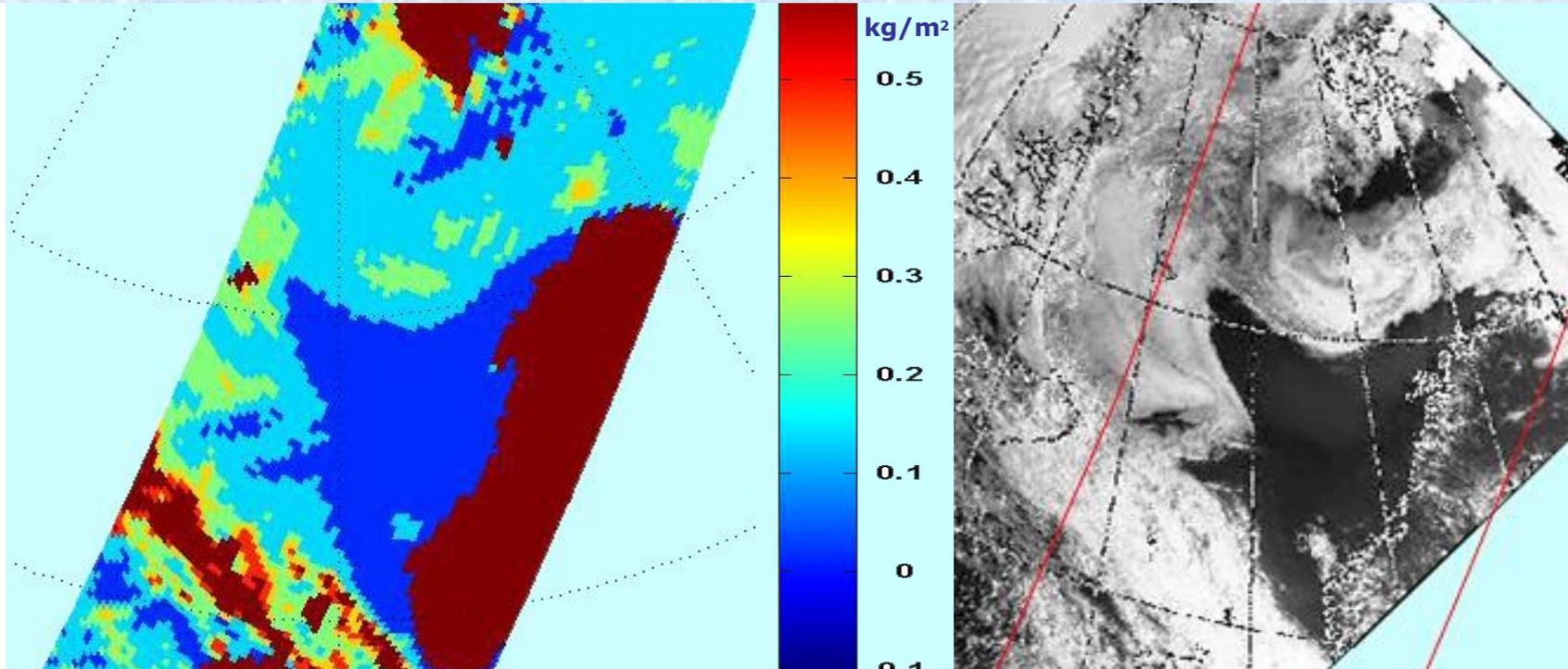


1. ESA - по предварительной заявке с написанием Proposal;
2. Cersat Salinity Center (Ifremer & CLS) - в ближайшее время обещают;
3. <http://www.argans.co.uk> - Quiklooks, animations, maps и т.д.

Aquarius. Июнь 2012



Валидация полярного алгоритма оценки водозапаса облаков:



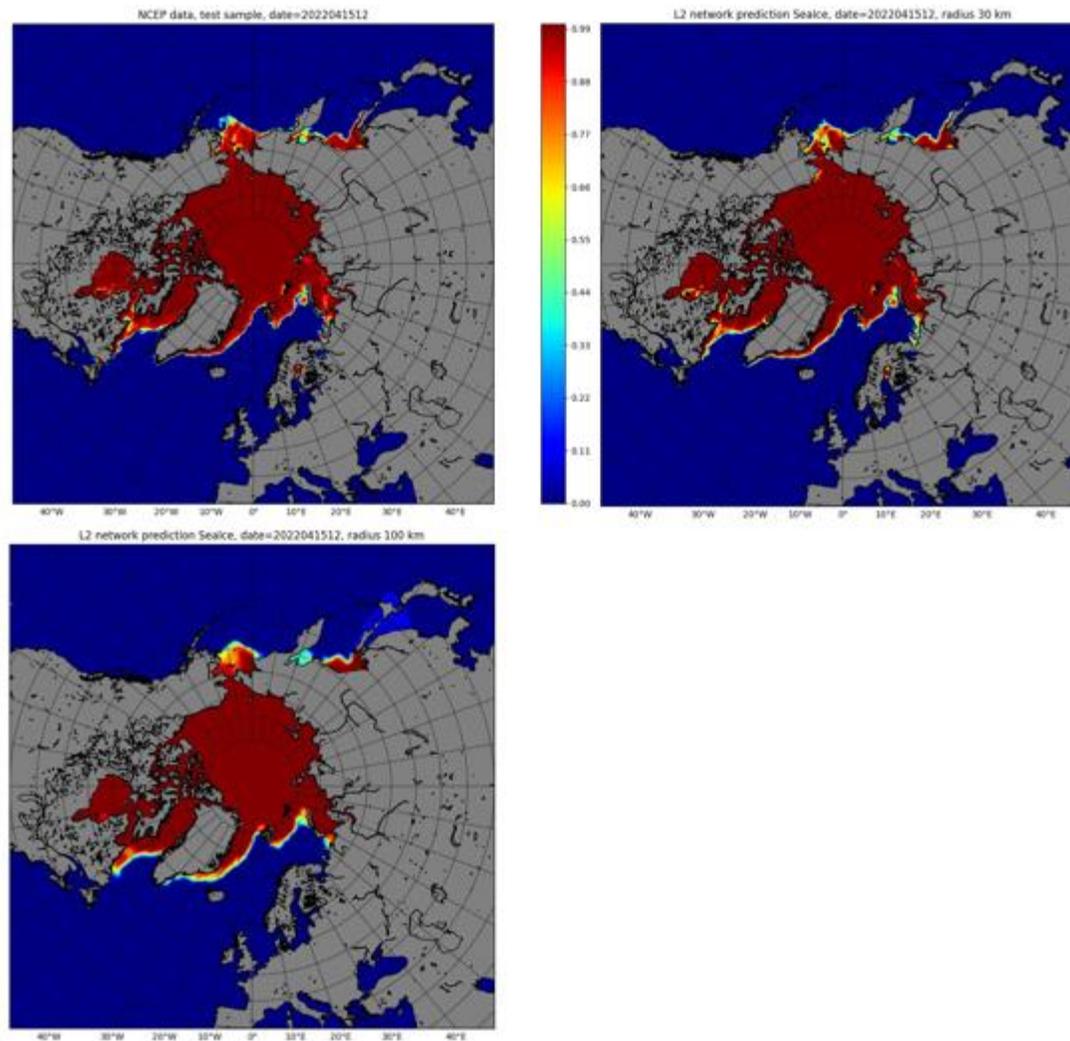
поле W, восстановленное
по данным SSM/I при
помощи НС алгоритма

1 июля 2005 7:44

Заболотских ©

AVHRR изображение
(видимое, 0.58мкм) (Dundee Satellite
Receiving Station)

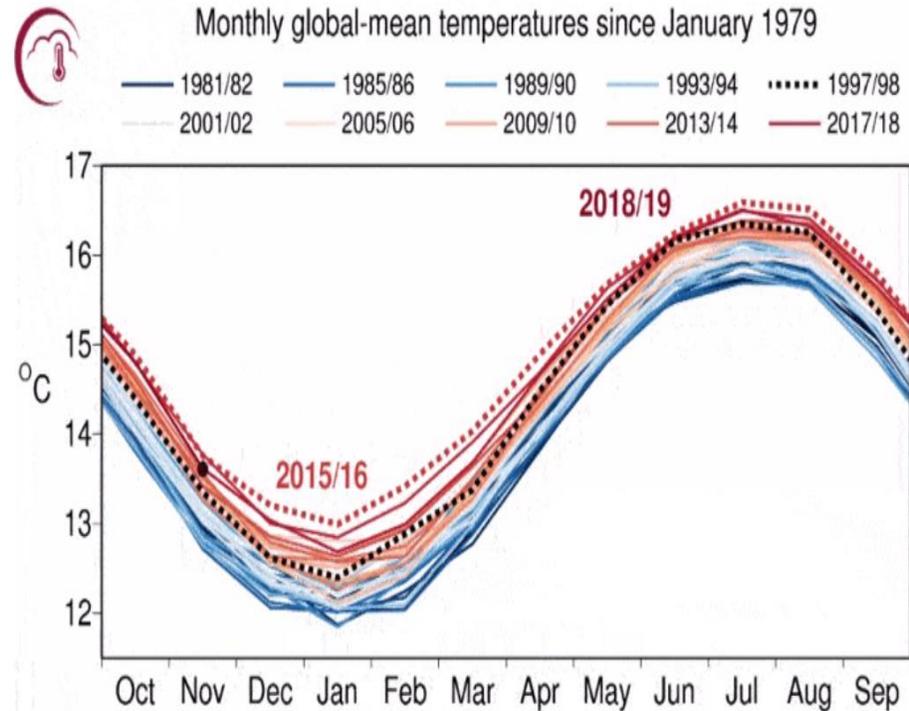
1 июля 2005 7:26



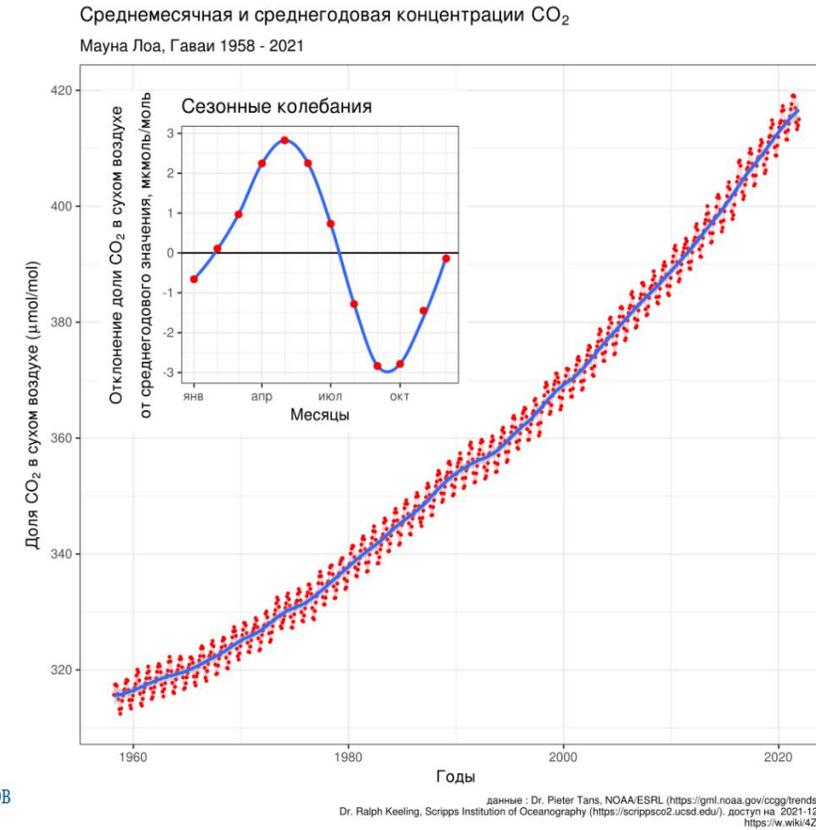
Поле сплочённости морского льда: поле 6-часового прогноза NCEP (слева сверху); восстановление нейросетью по данным AMSR2 (справа сверху); восстановление нейросетью по данным МТВЗА-ГЯ (внизу). Синий цвет – вода, красный цвет – морской лёд, промежуточные цвета – смесь воды и льда (указана сплочённость в долях единицы)

Мониторинг глобальных климатических изменений

GCOS – Глобальная система наблюдений за климатом ВМО



Ежемесячные средние глобальные температуры приземного воздуха с 1979 по 2019 год, предоставленные Службой изменения климата Copernicus (C3S), реализуемой Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF).



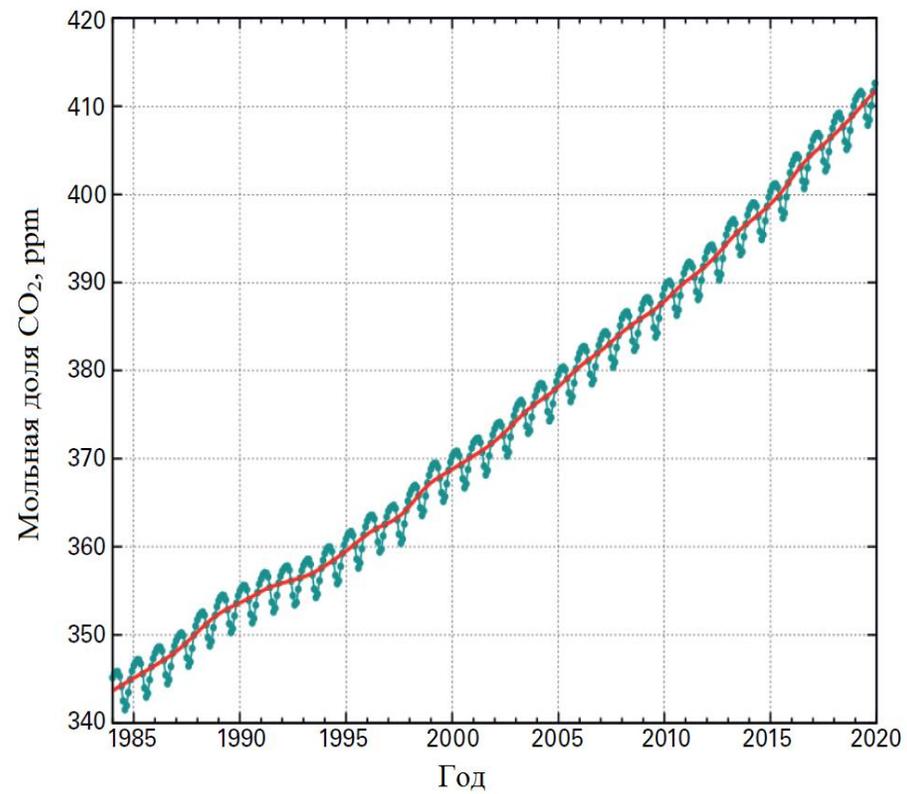


График среднемирового уровня CO₂ в мольных долях (ppm – частиц на миллион)

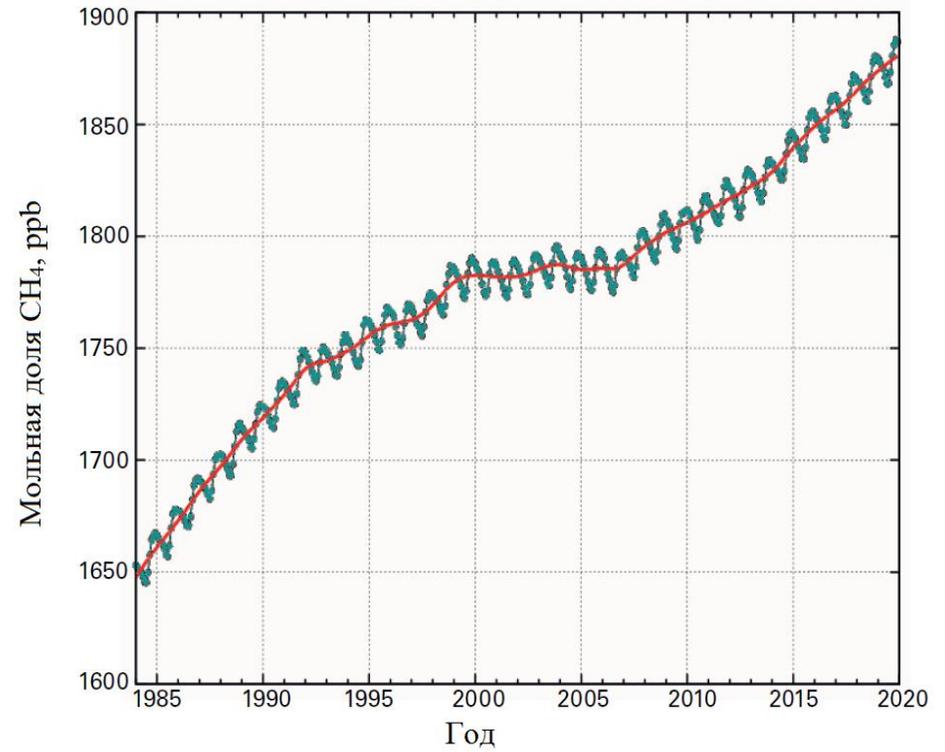
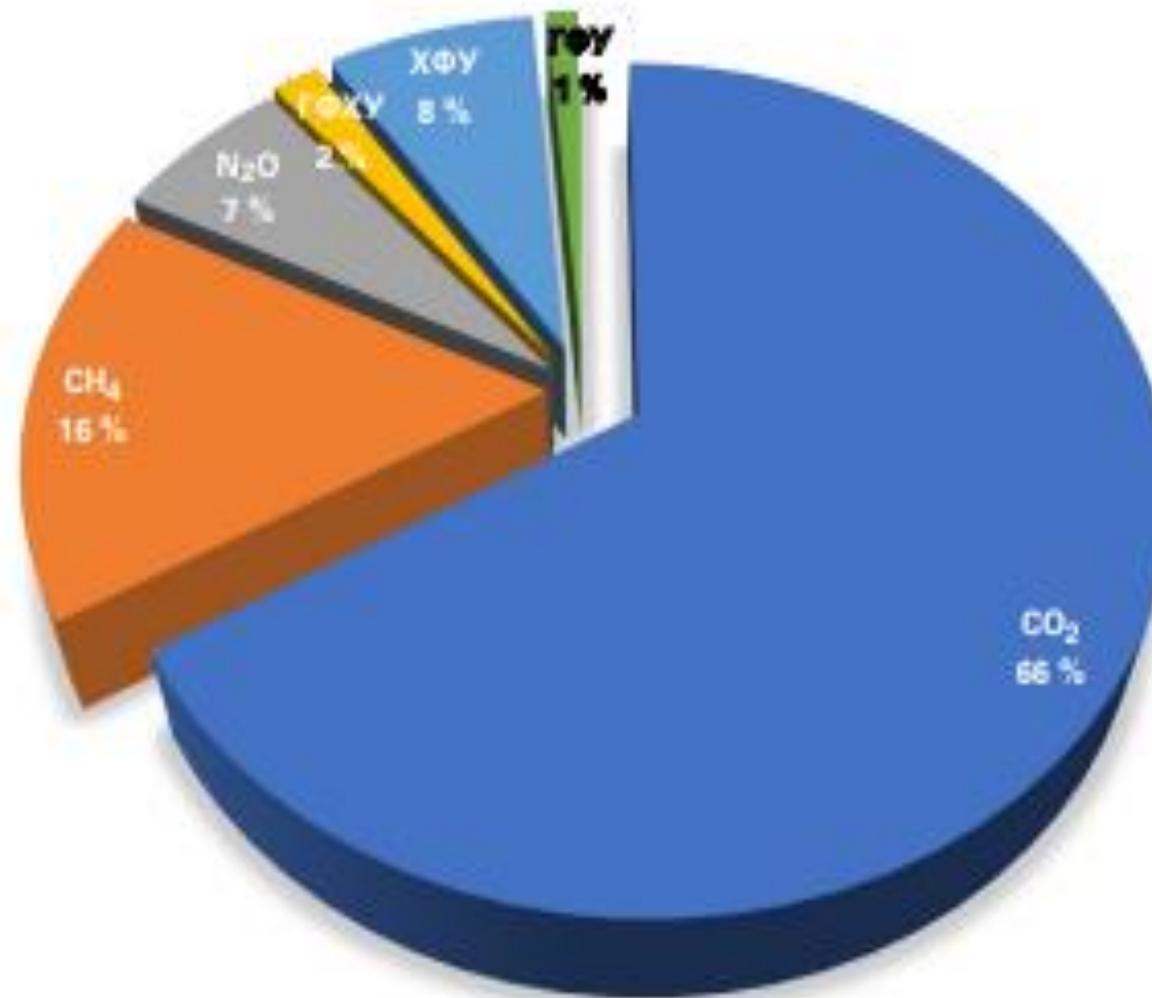


График среднемирового уровня CH₄ в мольных долях (ppb – частиц на миллиард)



Вклад наиболее важных ДПГ в увеличение глобального радиационного воздействия, обусловленного этими газами, после доиндустриальной эпохи до 2020 года

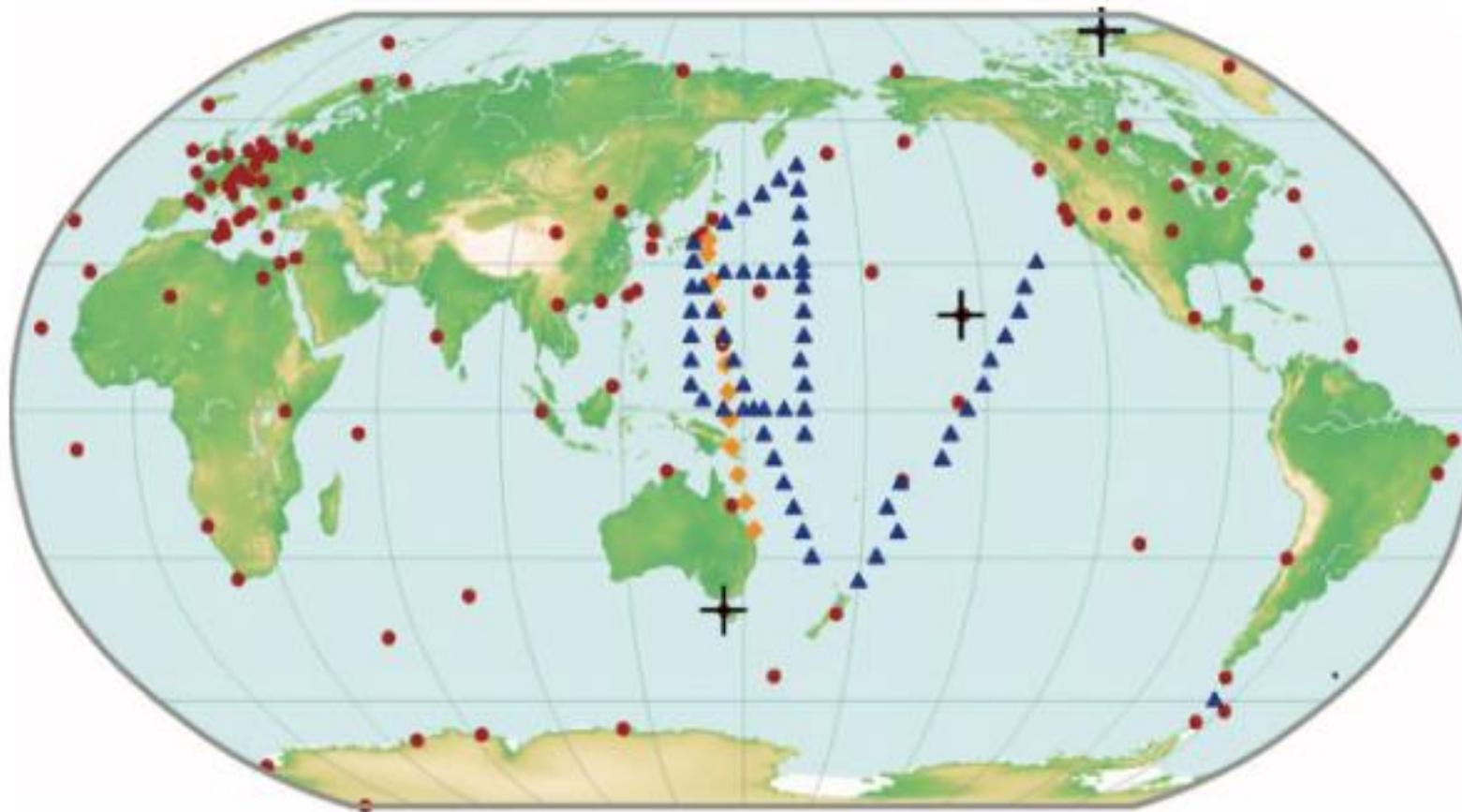
БЮЛЛЕТЕНЬ ВМО ПО ПАРНИКОВЫМ ГАЗАМ № 17 | 25 октября 2021 года

Содержание парниковых газов в атмосфере по данным наблюдений в 2020 году

139 и 138 станций ГСА для CO₂ и CH₄

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Глобальное содержание в 2020 г.	413,2±0,2 млн ⁻¹	1889±2 млрд ⁻¹	333,2±0,1 млрд ⁻¹
Содержание 2020 г. относительно 1750 г. ^a	149%	262%	123%
Абсолютное увеличение в 2019–2020 гг.	2,5 млн ⁻¹	11 млрд ⁻¹	1,2 млрд ⁻¹
Абсолютное увеличение в 2019–2020 гг.	0,61%	0,59%	0,36%
Среднее годовое абсолютное увеличение за последние 10 лет	2,40 млн ⁻¹ /год	8,0 млрд ⁻¹ /год	0,99 млрд ⁻¹ /год

Сеть станций ГСА для мониторинга CO₂, CH₄ в последнее десятилетие



• Наземные измерения • Самолетные измерения ▲ Судовые измерения + Станции сравнения данных по ПГ

4 станции Росгидромета, входящие в ГСА: **Териберка** (Кольский полуостров), **Тикси** (берег моря Лаптевых), **Новый Порт** (полуостров Ямал), **Воейково** (Санкт-Петербург)

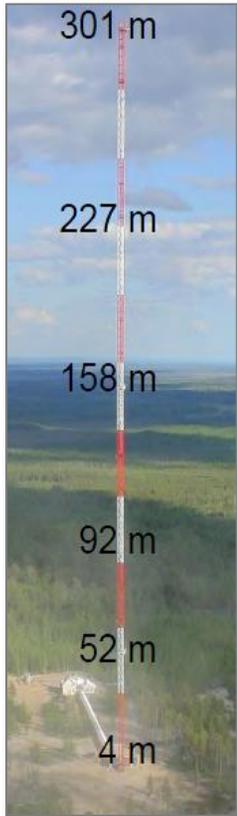
Методы и средства измерений со спутников содержания диоксида углерода и метана в атмосфере

- а) Методы эмиссионной спектроскопии (анализ спектров уходящего теплового излучения – измерений ИК-зондировщиков);**
- б) методы дифференциального поглощения (анализ спектров отраженного и рассеянного солнечного излучения – измерений спектрометров БИК диапазона).**

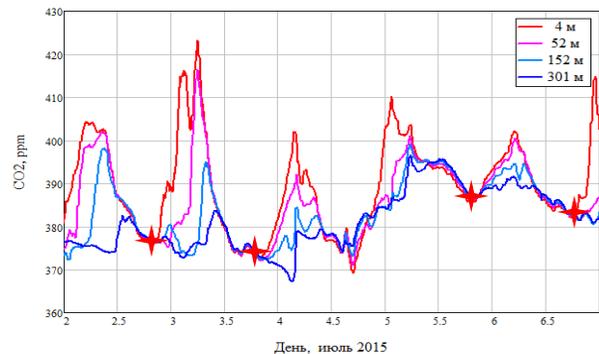
РЕГРЕССИОННАЯ ОЦЕНКА XCO₂ ПО ДАННЫМ ИКФС-2

(Голомолзин В. В., Рублев А. Н., Киселева Ю. В. и др. Определение общего содержания диоксида углерода над территорией России по данным отечественного космического аппарата «Метеор-М» №2. - Метеорология и гидрология, 2022, № 4, с. 79-95)

ZOTTO
Красноярский
край



Мауна-Лоа
о. Гавайи

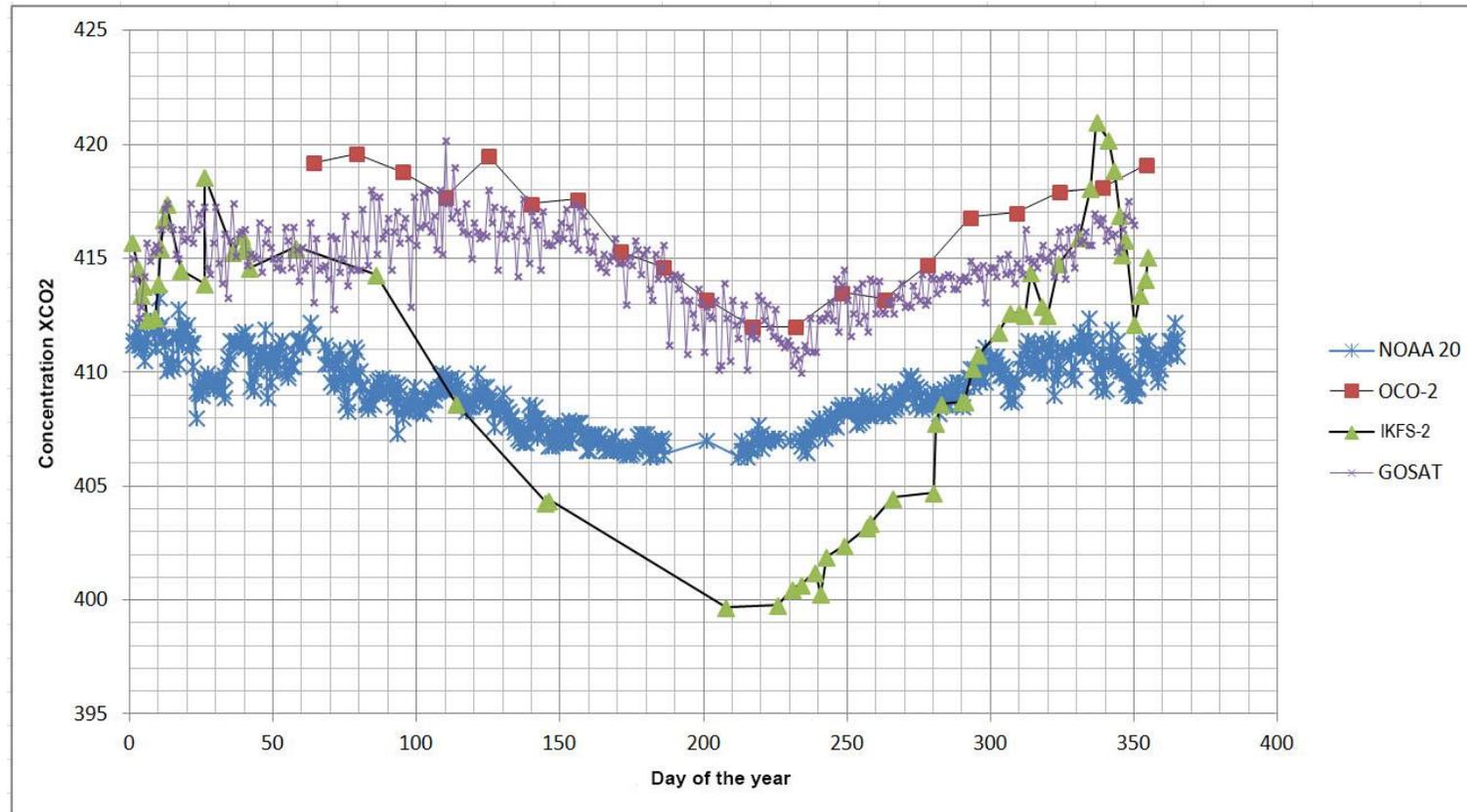


Общее содержание диоксида углерода XCO₂ в атмосфере:

$$C_i = w_0 + \sum_{j=1}^k [w_j x_{i,j} + w_{j+k} x_{i,j}^2]$$

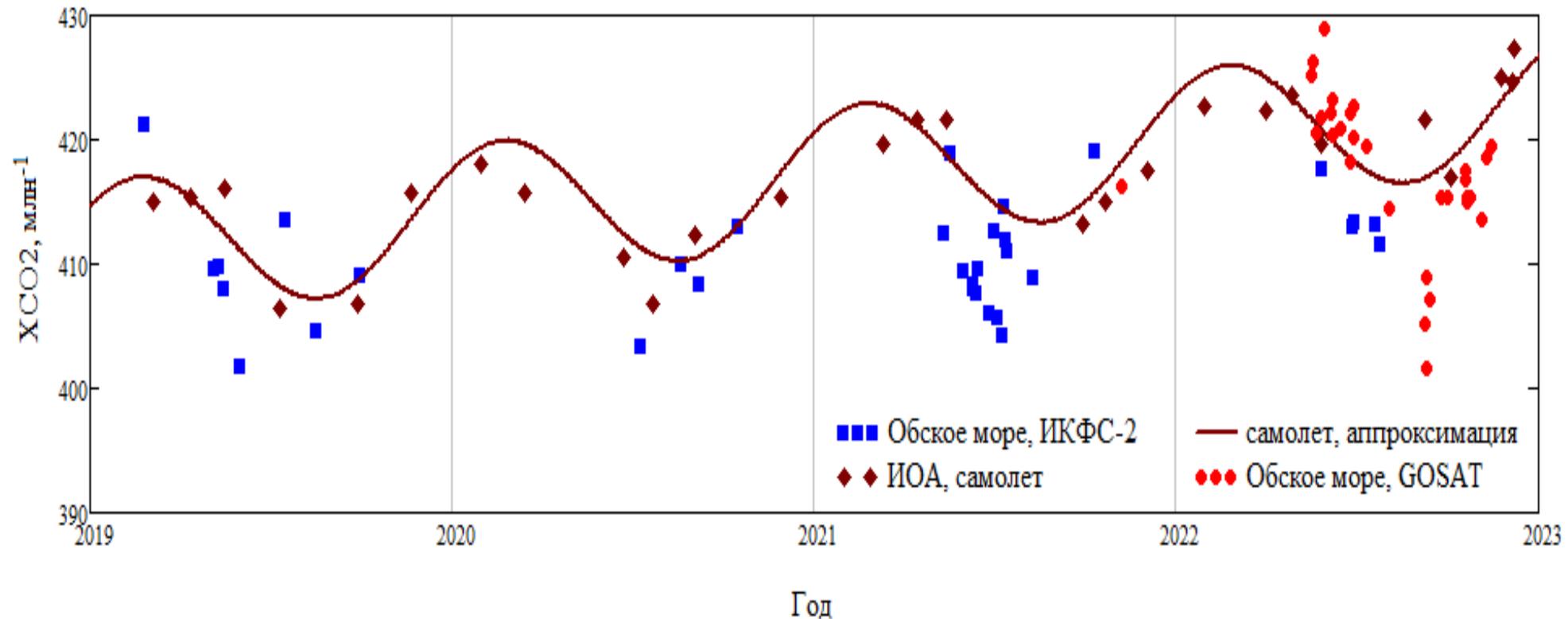
w_0 и w_j - коэффициенты регрессии, C_i - эталонные XCO₂, $x_{i,j}$ - рассчитанные оптические толщины атмосферы для выбранных k каналов ИКФС-2.

Retrieval of the carbon dioxide total column in the atmosphere over Russia from hyperspectral IR sounder IKFS-2 / Meteor-M №2 data



XCO2 estimates from IKFS 2 / Meteor-M No 2, OCO / OCO-2, CrIS / NOAA-20 and TANSO-FTS / GOSAT data (since January 1, 2022)

Сопоставление оценок ХСО₂ (ИКФС) с результатами самолетных (ИОА) и спутниковых (GOSAT) измерений в районе Новосибирского водохранилища



Рублев А. Н., В. В. Голомолзин, А. Б. Успенский, Ю. В. Киселева, Д. А. Козлов, Б. Д. Белан, М. Ю. Аршинов, Ю. М. Тимофеев, А.В. Панов, А. С. Прокушкин. Определение общего содержания диоксида углерода в атмосфере по данным спутникового фурье-спектрометра ИКФС-2: анализ и опыт применения // Исследование Земли из космоса. 2024, № 4

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

Разработан регрессионный алгоритм определения XCO_2 , где предикторами являются эффективные оптические толщины τ_v CO_2 , рассчитанные в нескольких каналах ИКФС-2 в диапазоне 11-14 мкм (ИК окно прозрачности атмосферы - коротковолновое крыло полосы поглощения CO_2 15 мкм).

Эффективная оптическая толщина τ_v

$$\tau_{i,j} = \ln(\varepsilon) - \ln\left(\frac{R_{i,j}}{R_{T_{i,j}}}\right) \cos(Z_i)$$

Результат коррекции на высоту излучающего слоя

$$x_{i,j} = \frac{P_0}{P_{T_i}} \tau_{i,j}$$

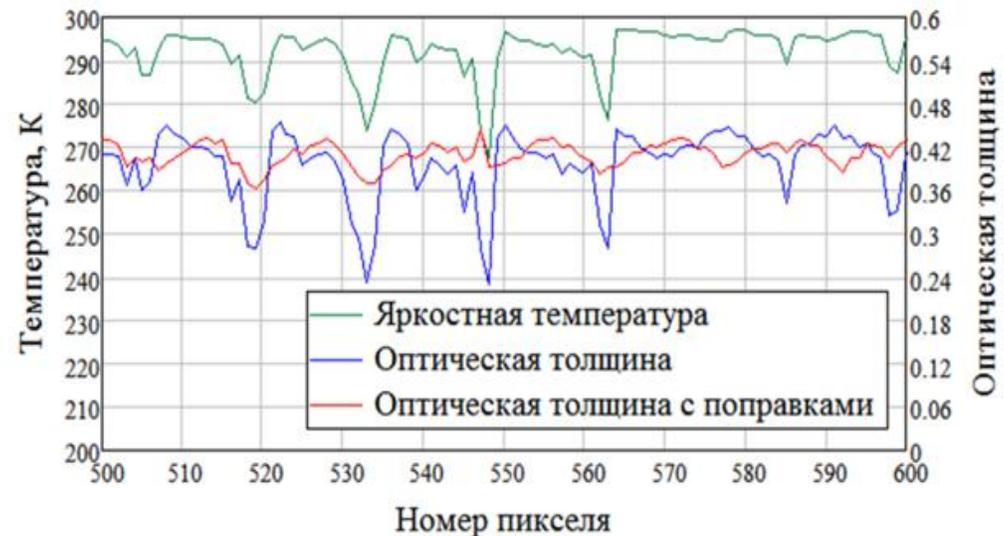
ε - коэффициент излучения земной поверхности или облака;

$R_{i,j}$ - интенсивность регистрируемого ИКФС-2 излучения i -го пикселя в j -м канале,

$R_{T_{i,j}}$ - расчетная интенсивность излучения АЧТ с температурой T , измеренной в канале j с частотой $\nu_0 = 900.1 \text{ см}^{-1}$;

Z_i - зенитный угол оси визирования КА из пикселя.

С учетом CO_2 в подоблачном слое:



Спутник/ Аппаратура / Агентство	CO ₂	CH ₄	Полоса обзора, км покрытие	Разрешение	Период функц.	Статус
Envisat / Sciamachy /ESA	+	+	960	30x60 км ²	2002-2012	эксперимент.
GOSAT (Ibuki-2) /TANSO-FTS /JAXA	+	+	глобальное покрытие - 3 дня	10.5 км	2009 - н. в.	оперативный
OCO-2 / OCO-2/NASA	+	-	10.6	1.3x2.3 км ²	2014- н. в.	оперативный
TanSAT / CarbonSpec/ CMA	+	-	20	1x2 км ²	2016-2019	оперативный
Sentinel-5P /Tropomi/ESA	-	+	2600	7x7 км ²	2017-2023	оперативный
Feng Yun 3D / GAS/CMA	+	+	глобальное покрытие – 1 месяц	10 км	2017- н. в.	оперативный
ISS /OCO-3/ NASA	+	-	11	4км	2018- н. в.	эксперимент.
GOSAT-2 / TANSO-FTS-2/JAXA	+	+	160 глобальное покрытие – 3 дня	10.5 км	2018-2024	оперативный
MicroCarb /Infrared Passive Spectrometer/ CNES	+	-	13.5	40 км ²	2021-2026	планируется
Metop-SG-A1 (Copernicus Sentinel5)/ UVNS / ESA	+	+	2713	7x7 км ²	2024-2031	планируется
GeoCarb (EVM-2) / GeoCarb Instrument /NASA	+	+	Северная и Южная Америка	4x4 км ²	2024-2025	планируется геостационар, 85° W
GOSAT-GW / TANSO-3/ JAXA	+	+	глобальное покрытие – 3 дня	10.5 км	2024- ≥2030	планируется
CO ₂ monitoring mission (CO2M) / NIR and SWIR spectrometer/ ESA	+	+	250	2x2 км ²	2026- ≥2030	планируется
Метеор – МП /СА-МП / Роскосмос	+	+	1000	~ 10 км	После 2025	планируется

Перечень спутниковых миссий по мониторингу ДПГ, гиперспектральные ИК-зондировщики

Спутник/ Аппаратура / Агентство	Спектр. диапазон, см ⁻¹	CO ₂	CH ₄	Полоса обзора, км покрытие	Простр. разреш., км	Период функц.	Статус
Aqua / AIRS / NASA	650-1136, 1216-1613, 2170-2674	+	+	1800	13.5x13.5	2002 – н. в.	оперативный
Metop A, B, C / IASI / Eumetsat	645-2760	+	+	2130	12	2007 – н. в.	оперативный до 2027 г.
JPSS (SNPP, NOAA20) / CrIS NOAA	650-1095, 1210-1750, 2155-2550	+	+	2200	14	2012 – н. в.	оперативный до 2040 г
FY-3D / HIRAS / CMA	650-1136, 1210-1750, 2155-2550	+		2250	. 16	2018 –2022	оперативный
FY-3E/ HIRAS-2/ CMA	650-1136, 1210-1750, 2155-2550	+		2700	16	2021 ≥ 2026	оперативный
Метеор-М №2, 2-3, 2-4, 2-5 / ИКФС-2 / Роскосмос	667-2000	+		1000-2500	30	2014 – н. в.	оперативный до 2025
Metop /IASI-NG/ Eumetsat	645-2760	+	+	2000	12	2024 и после	планируется
Метеор-МП / ИКФС-3 / Роскосмос	645-1200, 1200-2000, 2000-2760	+	+	1000-2000	15x15	после 2025	планируется
MTG-S / IRS / Eumetsat	700-1210, 1600-2175	+	-	640x640	4x4	2024 и после	геостационар планируется
FY-4A, FY-4B / GIRS / CMA	680-1130, 1650-2250	+	+	Китай, 5000 x 5000	16 (12)	2017 – 2028	геостационар оперативный
Электро-М / ИКФС-ГС / Роскосмос ¹⁾	680-1210 1600-2250	+	-	640x640	4x4 (8x8)	после 2025	рассматривается

Спутник/ Аппаратура / Агентство	Спектр. диапазон, см ⁻¹	CO ₂	CH ₄	Полоса обзора, км покрытие	Простр. разреш., км	Период функц.	Статус
Aqua / AIRS / NASA	650-1136, 1216-1613, 2170-2674	+	+	1800	13.5x13.5	2002 – н. в.	оперативный.
Metop A, B, C / IASI / Eumetsat	645-2760	+	+	2130	12	2007 – н. в.	оперативный/ до 2027 г.
JPSS (SNPP, NOAA20) / CrIS / NOAA	650-1095, 1210-1750, 2155-2550	+	+	2200	14	2012 – н. в.	оперативный/ до 2040 г
FY-3D / HIRAS / CMA	650-1136, 1210-1750, 2155-2550	+		2250	. 16	2018 –2022	оперативный
FY-3E / HIRAS-2/ CMA	650-1136, 1210-1750, 2155-2550	+		2700	16	2021 ≥ 2026	оперативный
Метеор-М №2, 2-3, 2-4, 2-5 / ИКФС-2 / Роскосмос	667-2000	+		1000-2500	30	2014 – н. в.	оперативный/ до 2025
Metop /IASI-NG/ Eumetsat	645-2760	+	+	2000	12	2024 и после	планируется
Метеор-МП / ИКФС-3 / Роскосмос	645-1200, 1200-2000, 2000-2760	+	+	1000-2000	15x15	после 2025	планируется
MTG-S / IRS / Eumetsat	700-1210, 1600-2175	+	-	640x640	4x4	2024 и после	геостационар планируется
FY-4A, FY-4B / GIIRS / CMA	680-1130, 1650-2250	+	+	Китай, 5000 x 5000	16 (12)	2017 – 2028	геостационар оперативный
Электро-М / ИКФС-ГС / Роскосмос ¹⁾	680-1210 1600-2250	+	-	640x640	4x4 (8x8)	после 2025	рассматривается

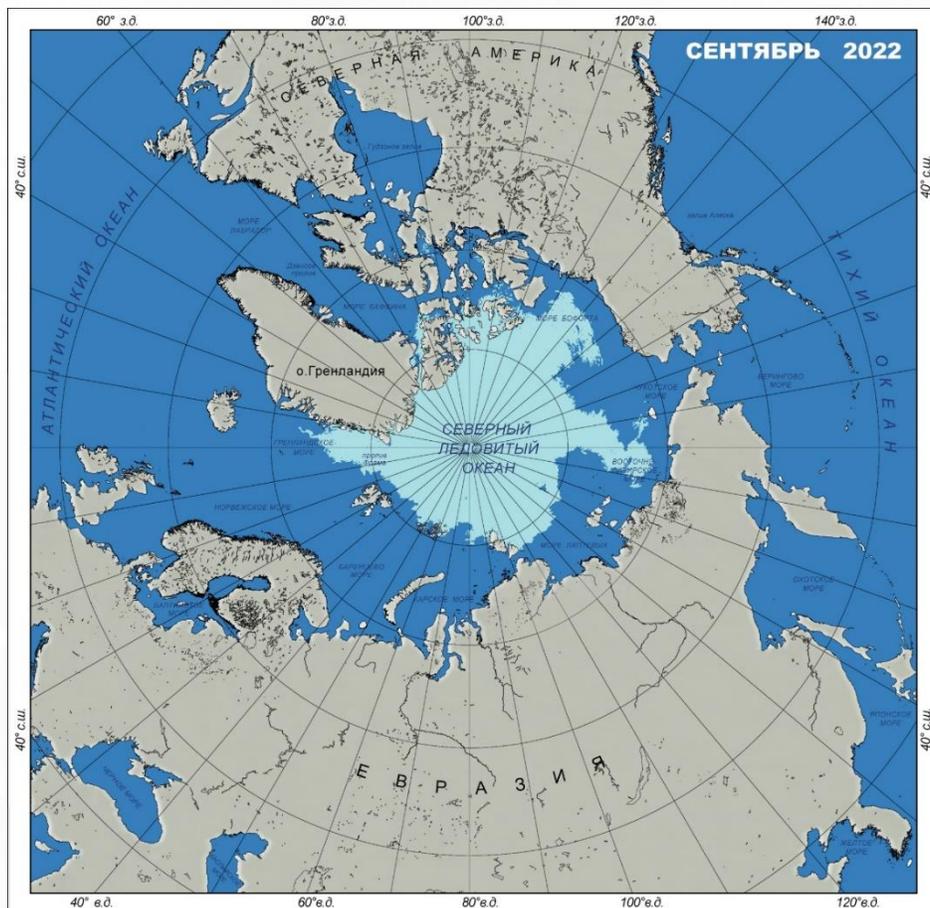
Развитие глобальной интегрированной системы наблюдений (наземного и космического базирования) за атмосферными парниковыми газами

1. Сеть станций ГСА (GAW-Global Atmospheric Watch)
 2. Сеть наблюдений за общим содержанием атмосферного углерода (TCCON, the Total Carbon Column Observing Network, <https://tccon-wiki.caltech.edu/> www.tccon.caltech.edu)
 3. Глобальная справочная сеть NOAA по парниковым газам (GGGRN или Global Greenhouse Gas Reference Network, <https://gml.noaa.gov/ccgg/about.html>) - контактные наблюдения за CO_2 и CH_4 на уровне поверхности, с высоких башен и с самолетов
 4. The international Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC), более 90 станций (<https://www-air.larc.nasa.gov/missions/ndacc/>)
- Данные наблюдений сети ГСА и других сетей доступны в Мировом центре данных по парниковым газам ГСА/ВМО (World Data Centre for Greenhouse Gases GAW/WMO или WDCGG), см. интернет - ресурс <https://gaw.kishou.go.jp/>

Дистанционные измерения XCO_2 и XCH_4 на сети TCCON с помощью наземных Фурье – спектрометров высокого спектрального разрешения используются как эталонные в процедурах калибровки / валидации для спутниковых миссий OCO-2, OCO-3, GOSAT и S5P.

ИЗМЕНЕНИЕ ПЛОЩАДИ МОРСКОГО ЛЬДА В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ

по данным КА «Арктика-М» №1/МСУ-ГС,
Метеор-М/КМСС, NOAA-20/VIIRS, SUOMI NPP/VIIRS, EOS/MODIS, Sentinel-1/SAR-C, Metop/ASCAT



Карта распространения морского льда в Северном полушарии.

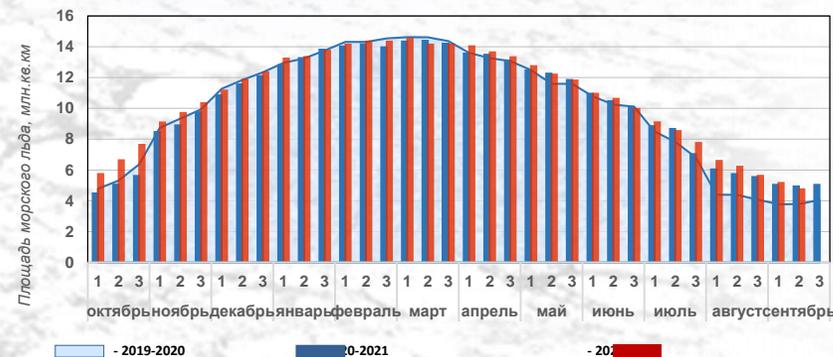
2 декада сентября 2022 г.

 - чистая вода  - морской лёд

Карты распространения морского льда в Северном полушарии составляются ежедекадно на основе комплексной обработки спутниковых данных различного пространственного разрешения и разных спектральных диапазонов.

Карты создаются в графическом и векторном форматах и служат основой для формирования, накопления и анализа многолетних рядов климатически значимых характеристик морского льда Арктики.

Сезонное изменение площади морского льда в Северном полушарии 2019-2022 гг.



Основные потребители:

Росгидромет (Ситуационный центр, Евразийский климатический центр и др.), Минобороны России (ГМС ВС РФ и др.), МЧС России (НЦУКС и др.)

***Спасибо
за внимание
Вопросы ?***



Перечень основной и дополнительной литературы

Основная литература

1. Гуди Р.М. Атмосферная радиация. 1. Основы теории. М., «Мир». 1966.
2. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Термическое зондирование атмосферы со спутников. Л., Гидрометеиздат. 1970.
3. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л., Гидрометеиздат. 1978.
4. Ку-Нан Лиоу. Основы радиационных процессов в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат. 1984. 376 с.
5. Руководство по приборам и методам наблюдений. Том IV – Космические наблюдения. — Женева, ВМО, 2021. 229 с.
6. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики. СПб, «Наука». 2003. 475 с.
7. The Earth Observation Handbook 2012/Special Edition for Rio+20. [ESA SP-1325 July 2012]. – ESA Communications, 272 p.

Дополнительная литература

1. Успенский А.Б. Обратные задачи математической физики – анализ и планирование эксперимента. В кн. «Математические методы планирования эксперимента». Новосибирск, «Наука». 1981.
2. Хргиан А.Х. Физика атмосферы. Л., Гидрометеиздат. 1969.
3. Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь, т. I, II, III. Под ред. А.И. Бедрицкого. СПб. 2009.
4. Космический комплекс гидрометеорологического и океанографического обеспечения “Метеор-3М” с космическим аппаратом “Метеор-М” № 2. Под ред. Л. А. Макриденко, С. Н. Волкова, А. В. Горбунова, А. Л. Чуркина. М., ВНИИЭМ, 2014, 157 с.
5. Y.M. Timofeyev, A.V. Uspensky and F.S. Zavelevich et al. Hyperspectral Infrared Atmospheric Sounder IKFS-2 on "Meteor-M" No. 2 – four years in orbit // Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, Nov. 2019, 106579. <http://doi.org/10.1016/j.jqrst.2019.106579>.
6. М.Д. Цырульников, П.И. Свиренко, Д.Р. Гайфулин, М.Е. и др.. Развитие системы оперативного усвоения данных метеорологических наблюдений в Гидрометцентре России. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы, № 4 (374), 2019, С. 112 – 125.
7. Журналы «Метеорология и гидрология», «Исследование Земли из космоса», Интернет-ресурсы

Электронные ресурсы

1. Сайт ФГБУ «Гидрометцентр России» <http://www.meteoinfo.ru>
2. Сайт Всемирной Метеорологической Организации <http://www.wmo.int>
3. Сайт ФГБУ «НИЦ «ПЛАНЕТА» <http://planet.iitp.ru>