

**Изменчивость содержания атмосферного озона  
в Арктике и Субарктике зимой 2015–2016 гг.  
по результатам спутниковых и наземных  
измерений и численного моделирования**

***Смышляев С. П., Тимофеев Ю. М., Кирнер О., Фейгин А. М., Беликович  
М. В., Виролайнен Я. А., Гаркуша А. С., Ермакова Т. С., Красильников  
А. А., Куликов М. Ю., Моцаков М. А., Поляков А. В.***

*Российский государственный гидрометеорологический университет*

*Санкт-Петербургский государственный университет*

*Технологический институт Карлсруэ*

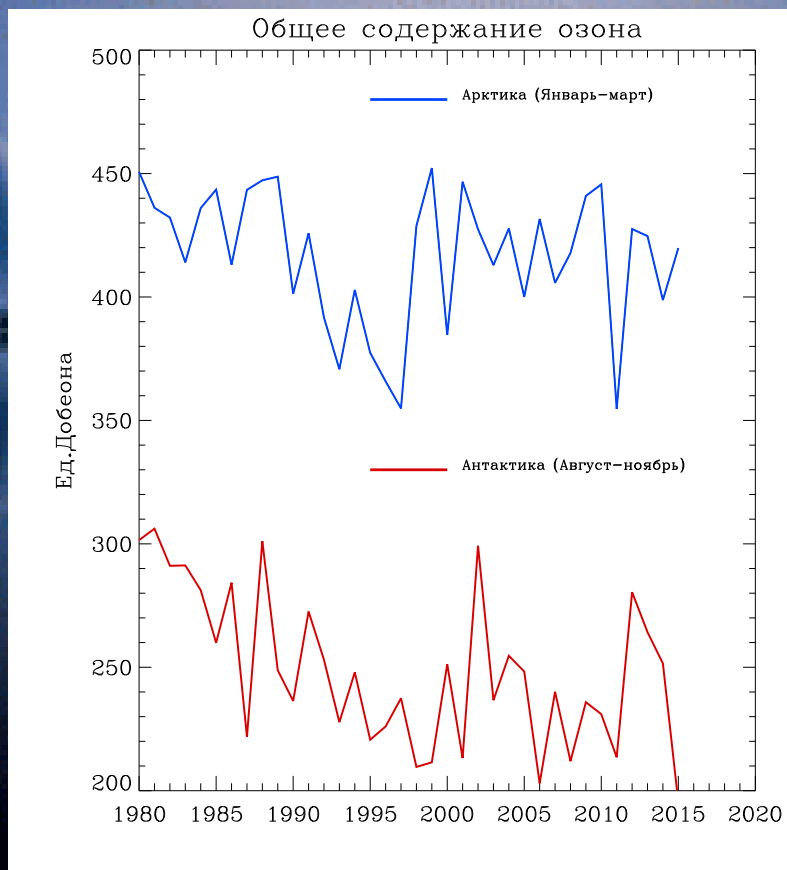
*Институт прикладной физики РАН*

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ  
ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

**Дистанционные методы исследования атмосферных и климатических процессов**

***14-18 ноября 2016 г.***

# Полярный озон до данным спутниковых измерений SBUV



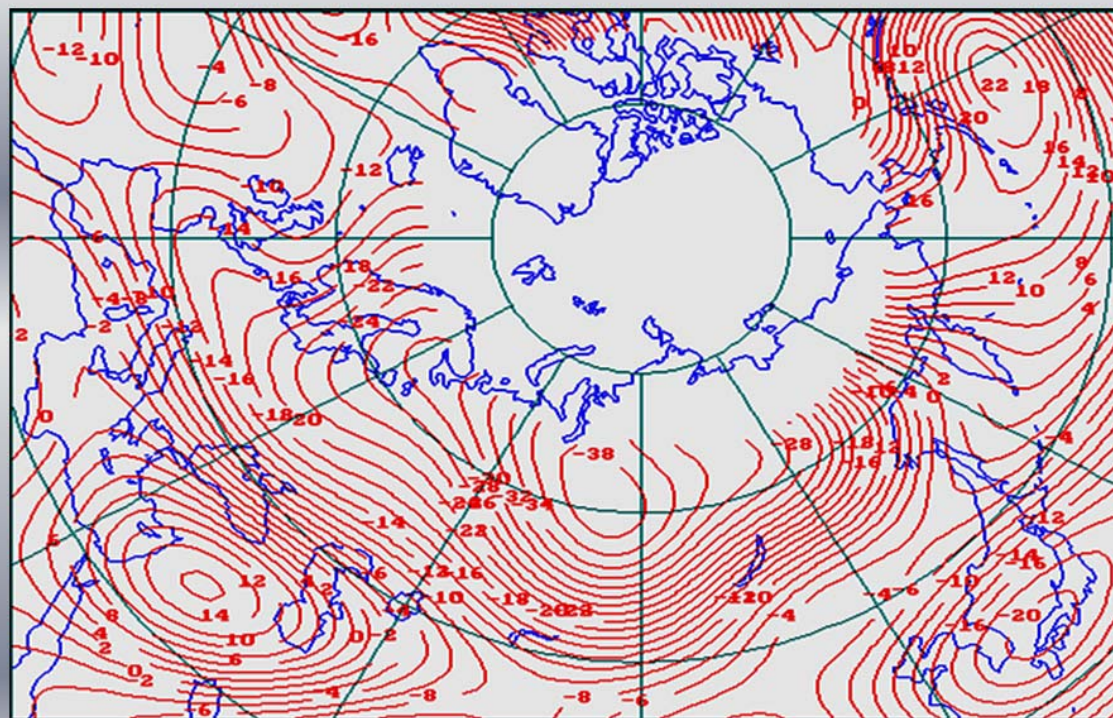
- В Арктике содержание озона в зимне-весенний период в 1.5 раза больше, чем в Антарктике
- Межгодовая изменчивость существенна в обеих полярных районах, однако в Арктике периодически происходят резкие уменьшения ОСО, тогда как в Антарктике время от времени происходит увеличение содержания озона

Прибор SBUV (Solar Backscattered Ultra Violet) на спутниках NIMBUS-7 ,  
NOAA 9-19

# Отклонение общего содержания озона от средних многолетних значений зимой 2015-2016 гг.

Отклонение ОСО от средних долгопериодных значений (в %)

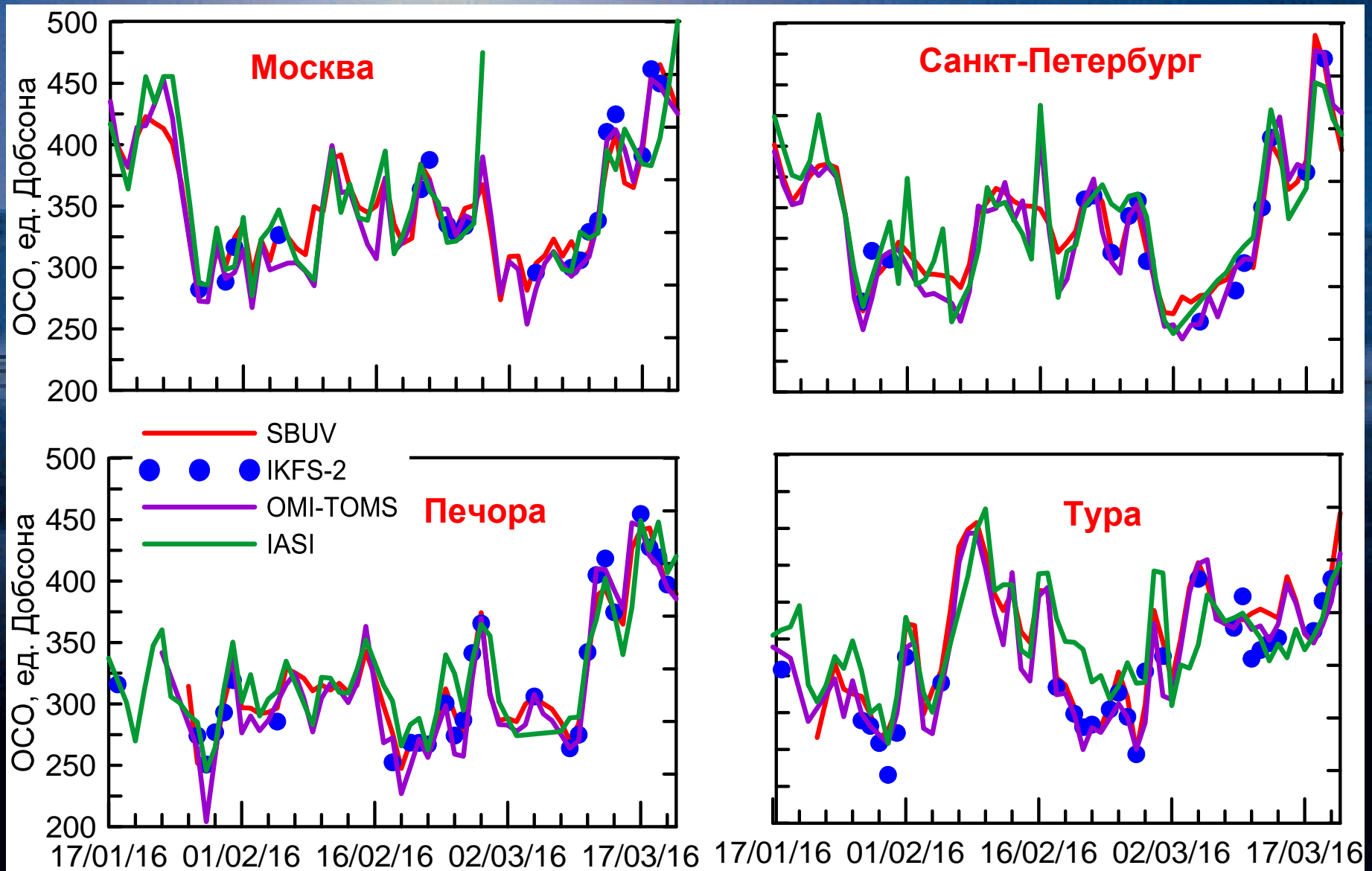
27 января 2016г.



Ozone Monitoring Instrument (OMI, NASA), Центральная аэрологическая обсерватория, Россия

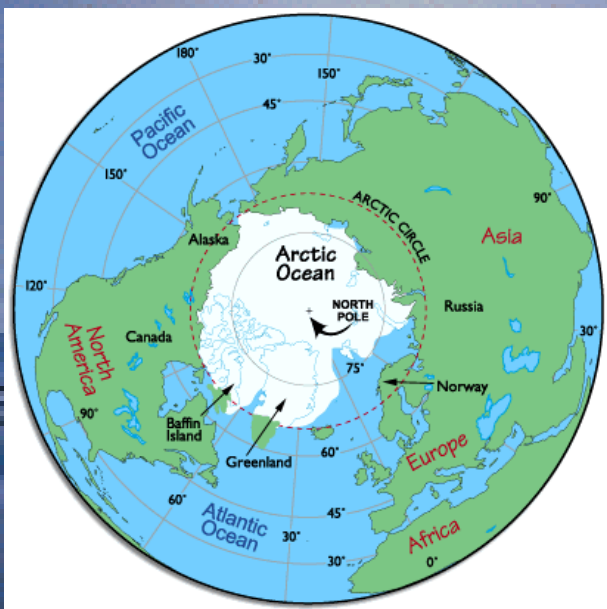
- Анализ ЦАО по результатам измерений прибором OMI на спутнике AURA

# Сопоставление ОСО по данным различных спутников в нескольких пунктах



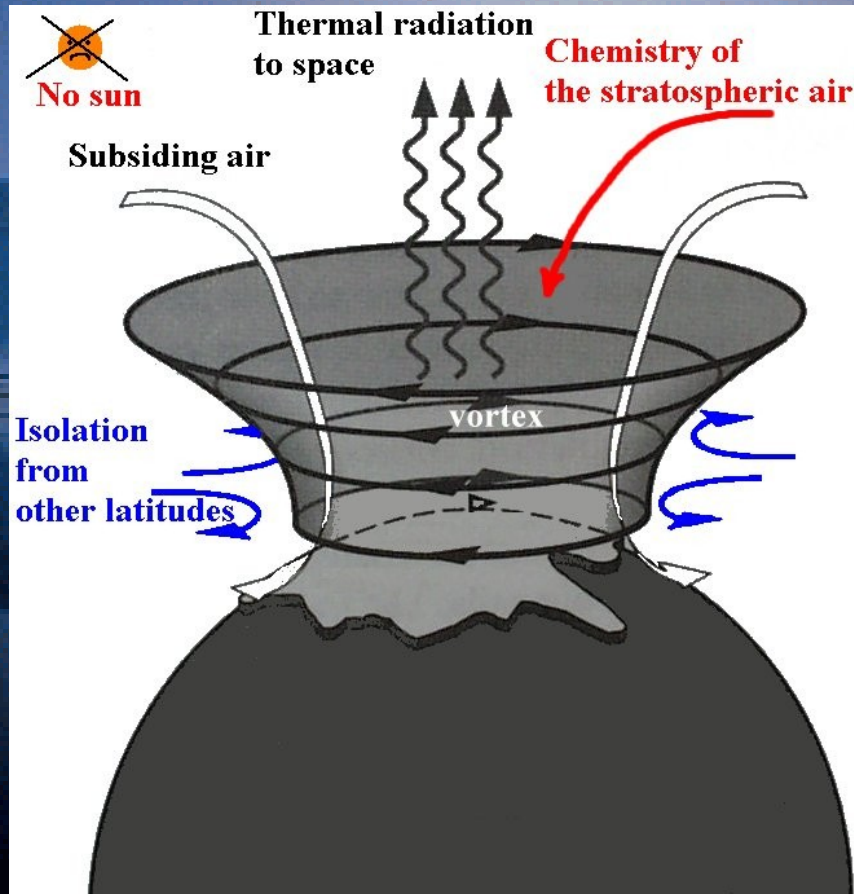


# Различия между Арктикой и Антарктикой



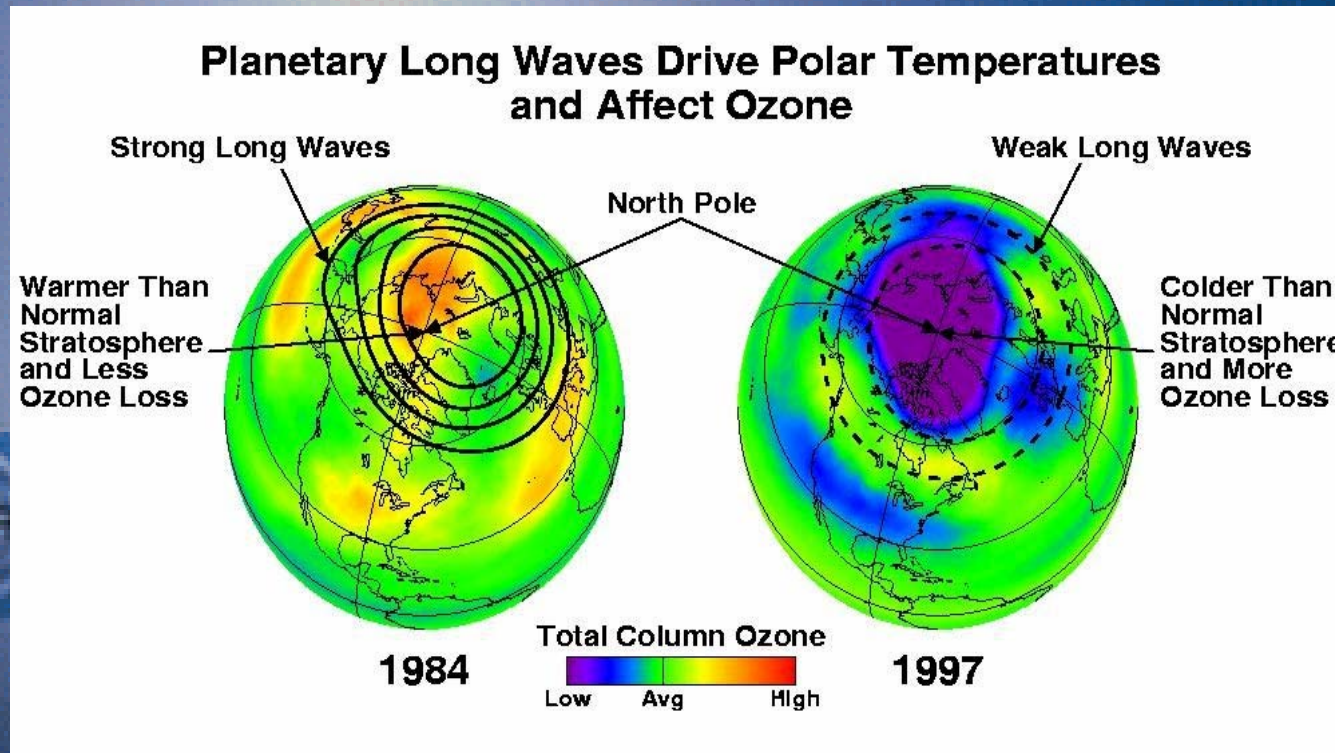
- Принципиально различная орография:
  - В Арктике – в центре океан
  - В Арктике – вокруг суша
  - В Антарктике – суша
  - В Антарктике - океан

# Циркумполярный вихрь



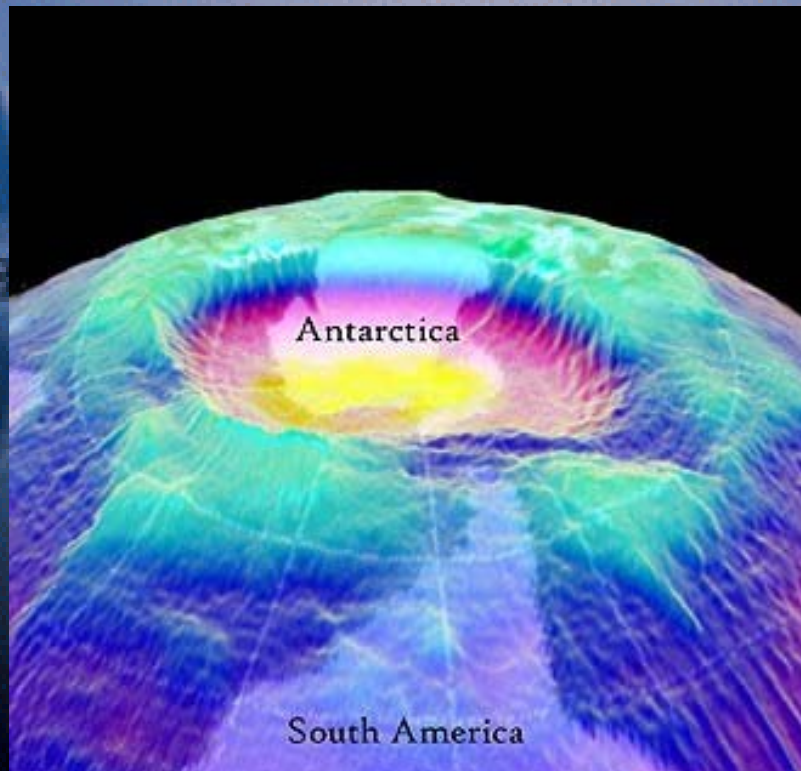
- Изолирует воздух внутри полярной стратосферы от обмена со средними широтами
- Внутри вихря происходит охлаждение воздуха
- Формируются полярные стратосферные облака
- В отсутствие солнца охлаждение происходит быстрее и разрушается озон
- Важна **устойчивость** циркумполярного вихря

# Влияние Планетарных Волн на Устойчивость Циркумполярного Вихря и Озоновые Дыры



- Stronger planetary waves in the Northern Hemisphere warm the Arctic stratosphere and suppress stratospheric cooling and ozone destruction
- Polar Vortex is stronger in the Southern Hemisphere – mass exchange is weaker there

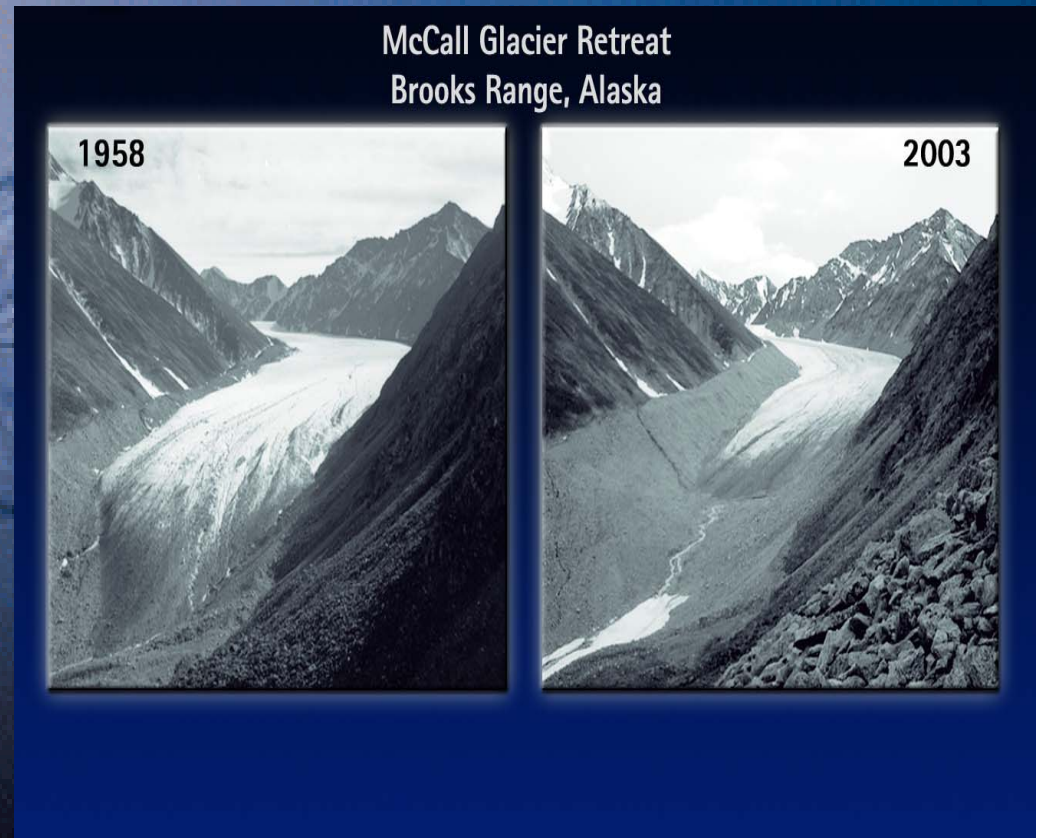
## Особенности полярной стратосферы в период формирования озоновых аномалий



- Изоляция полярной стратосферы внутри циркумполярного вихря
- Низкие температуры
- Формирование полярных стратосферных облаков
- Гетерогенные химические реакции на поверхности ПСО
- Денитрификация и дегидрация
- Каталитическое химическое разрушение озона в хлорных и бромных циклах после восхода солнца после полярной ночи



# Изменения Климата и Формирование Озоновых Аномалий



Изменение свойств подстилающей поверхности  
(второй фактор формирования планетарных волн)

# Цель работы

- На основе анализа дистанционных спутниковых и наземных измерений содержания озона, а также результатов численного моделирования сравнить значимость фотохимических и динамических факторов в формировании озоновых аномалий в Арктике и Субарктике зимой 2015-2016 гг.

# Спутниковые данные SBUV (Solar Backscattered Ultra Violet)

Спутник	Тип орбиты	Высота орбиты, км	Наклонение, град	Период обращения, мин	Прибор для измерения конц. озона	Период работы прибора, гг.
NIMBUS-7	Солнечно-синхронная	955	99.1	104.15	SBUV	1978-1990
NOAA-9	Солнечно-синхронная	850	98.7	101.7	SBUV/2	1985-1998
NOAA-11	Солнечно-синхронная	841	98.9	101.8	SBUV/2	1989-2001
NOAA-14	Солнечно-синхронная	844	99.1	101.9	SBUV/2	1995-2006
NOAA-16	Солнечно-синхронная	849	98.8	102.1	SBUV/2	2000-2010
NOAA-17	Солнечно-синхронная	813	98.6	101.2	SBUV/2	2002-2010
NOAA-18	Солнечно-синхронная	811	98.7	101.2	SBUV/2	2005-2010
NOAA19	Солнечно-синхронная	870	98.7	102.14	SBUV/2	2009-2016

- Космические носители аппаратуры типа SBUV пересекали экватор примерно 14 раз в сутки в одно и то же местное среднее солнечное время, т. е. по долготе точки прохода находились друг от друга на угловом расстоянии  $\sim 26^\circ$ .
- Измерения приборами SBUV (SBUV/2) проводятся вблизи местного вертикала в пределах угла  $\pm 11,3^\circ$ .
- Пространственное разрешение SBUV –  $180 \times 180 \text{ км}^2$ , разрешение SBUV/2 составляет  $168 \times 168 \text{ км}^2$ .

Алгоритм SBUV Overpass методом интерполяции приводит результаты спутниковых измерений к значениям на станциях Всемирной озонметрической сети WOUDC (World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre)

# Спутниковый прибор IASI

<b>MetOp A</b>	<i>Запущен 19 октября 2006</i>
Высота	~817 km
Орбита	Полярная, синхронизированная по солнцу
Местное время	~09:30
<b>IASI</b>	<i>Фурье-спектрометр</i>
Область спектра	645-2760 $\text{cm}^{-1}$
Спектральное разрешение	0.3-0.5 $\text{cm}^{-1}$
Шум (на 280 K)	<0.1-0.2 K (650-1750 $\text{cm}^{-1}$ ) 0.2-0.4 K (1750-2500 $\text{cm}^{-1}$ )
Поле зрения	50 км (3.33°) в надире, 4 одновременных пикселя размером 12 км
Полное покрытие Земли	2 раза в день

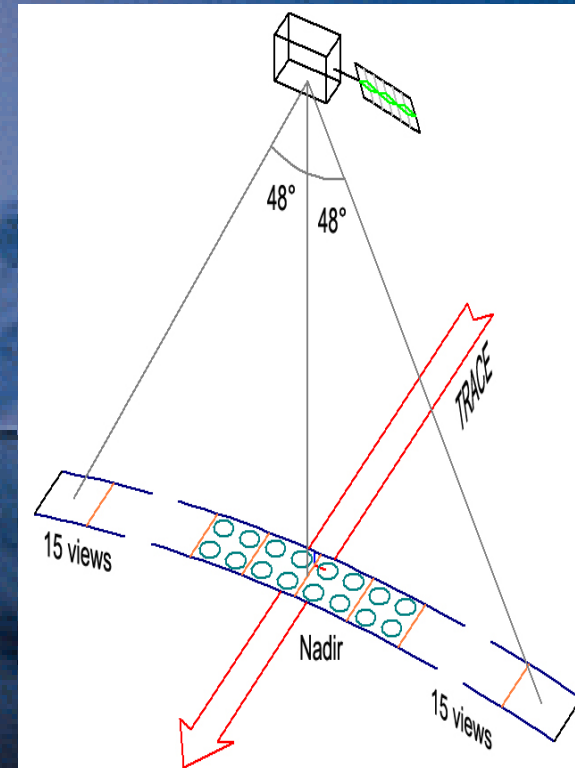


Схема наблюдения прибором IASI со спутника MetOp A

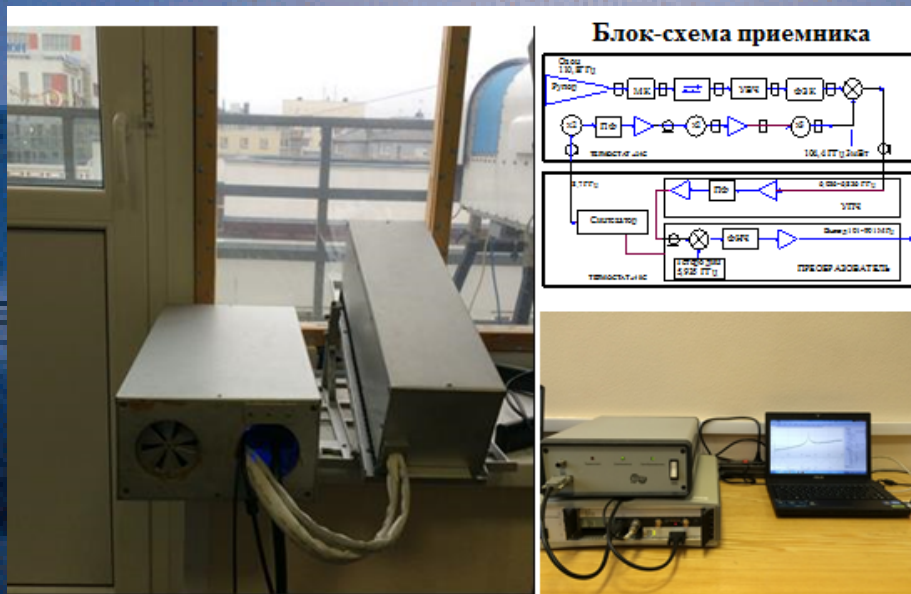


# Интерферометрические измерения стратосферных газов

<b>Instrumentation</b>	<b>Solar FTIR spectrometer Bruker 125HR</b>
<b>Spectral resolution</b>	<b>~0.007 cm<sup>-1</sup> (Norton-Beer medium apodisation)</b>
<b>Location</b>	<b>Saint Petersburg – Peterhof (59.88 N, 29.82 E)</b>
<b>Time series</b>	<b>2009-2016</b>

Gas	Spectral windows	Measurement random error	Influenced gases
O <sub>3</sub>	991.25-993.80 1001.47-1003.04 1005.00-1006.90 1007.35-1009.00 1011.15-1013.55	1-3%	H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
HCl	2727.73-2727.83 2775.70-2775.80 2925.80-2926.00	2-5%	CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> O

# Наземный Спектрорадиометрический Комплекс



Измерения содержания озона  
в Нижнем Новгороде

- Измерения пространственно-временной эволюции концентрации озона на высотах средней атмосферы проводились в Институте прикладной физики РАН (Нижний Новгород) с помощью мобильного полностью автоматизированного наземного спектрорадиометрического комплекса [Красильников и др, 2013; Куликов и др., 2015], предназначенного для непрерывного дистанционного мониторинга структуры озонного слоя Земли по спектрам яркостной температуры атмосферы в линии собственного излучения озона.
- Данный прибор основан на классическом супергетеродинном принципе приема и анализа излучения миллиметрового диапазона длин волн и включает в себя антенну, систему калибровки (модулятор-калибратор), приемник, цифровой анализатор спектра, систему управления, сбора и обработки данных на базе ноутбука.
- Основные характеристики: центральная частота 110.83604 ГГц, полоса анализа 0.8 ГГц, спектральное разрешение 61 КГц, число спектральных каналов 16384, шумовая температура 1450 К, суммарный вес менее 15 кг, полное энергопотребление – менее 100 Вт.
- Отличительной особенностью озонметра является уникальная система калибровки измеряемого сигнала по внутреннему электрически управляемому эталону, исключающему постоянное использование жидкого азота.
- Применение статистических (байесовых) алгоритмов к решению некорректных обратных задач позволяет по каждому полученному спектру (с типичным временем накопления 15-30 мин) восстанавливать с контролируемой точностью вертикальный профиль концентрации озона в диапазоне высот от 15 до 75 км.

# Модель газового состава нижней и средней атмосферы РГГМУ

Radiosondes+	1970 – present	NCEP
PIBAL winds	1970 ; present	NCEP
Wind profiles	1992/5/14 ; present	UCAR
Conventional, ASDAR and MDCRS aircraft rep.	1970 ; present	NCEP
Dropsondes	1970 ; present	NCEP
PAOB	1978 – 2010/8	NCEP
GMS, METEOSAT, cloud drift IR & visible winds	1977 ; present	NCEP
GOES cloud drift winds	1997 ; present	NCEP
EOS/Terra/MODIS winds	2002/7/01 ; present	NCEP
EOS/Aqua/MODIS winds	2003/9/01 ; present	NCEP
Surface ship and buoy observations	1977 ; present	NCEP
Surface land observations	1970 ; present	NCEP
SSM/I V6 wind speed	1987/7 ; present	RSS
SSM/I rain rate	1987/7 ; present	GSFC
TMI rain rate	1997/12 ; present	GSFC
QuikSCAT surface winds	1999/7 – 2009/9	JPL
ERS;1 surface winds	1991/8/5 – 1996/5/21	CERSAT
ERS;2 surface winds	1996/3/19 – 2001/1/17	CERSAT

Глобальная конечно-разностная с офф-лайн использованием данных ре-анализа температуры, скоростей ветра, влажности и давления из ре-анализа **MERRA**;

Рассматривается изменчивость кислородных, азотных, хлорных, бромных, водородных и углеродных газов;

Задается изменчивость поверхностных концентраций или потоков с поверхности для газов, влияющих на содержание стратосферных составляющих;

Учитываются фазовые переходы, ведущие к формированию и эволюции сульфатного аэрозоля и полярных стратосферных облаков;

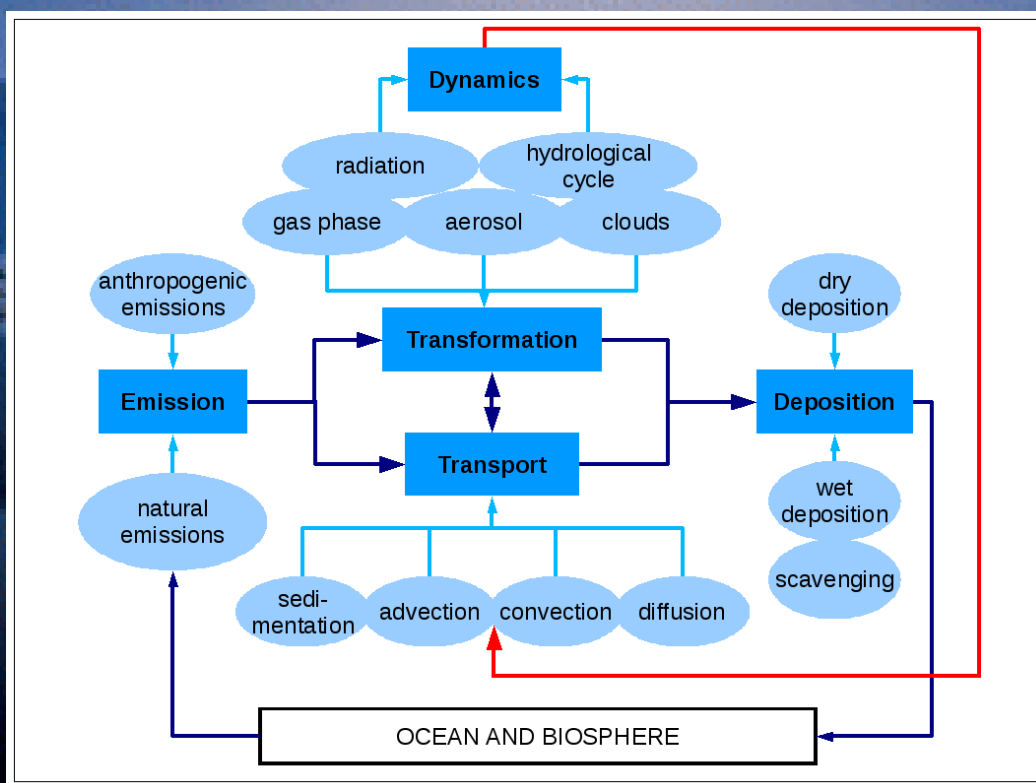
Рассматриваются гетерогенные реакции на поверхности сульфатного аэрозоля и полярных стратосферных облаков;

Учитываются процессы гравитационного осаждения аэрозольных частиц, а также обмен газами между стратосферой и тропосферой

Разрешение **4x5 градусов**

# Химико-Климатическая Модель EMAC

Технологический институт Карлсруэ (Германия)



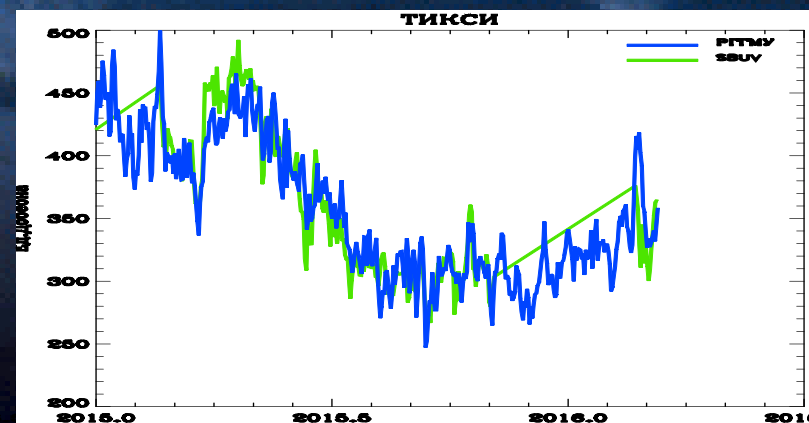
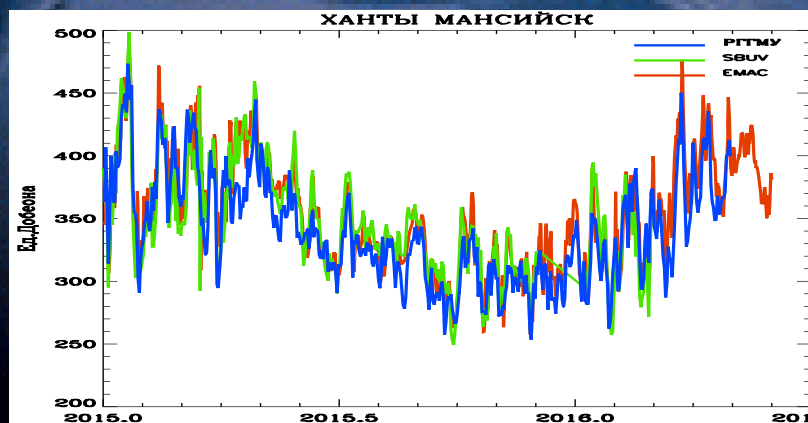
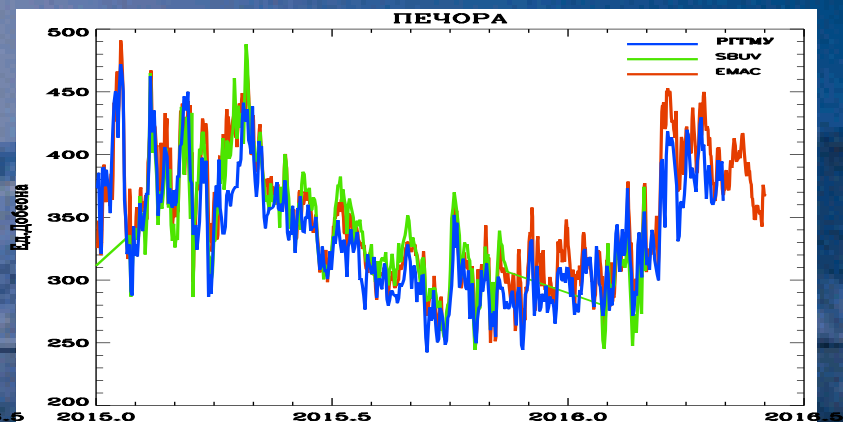
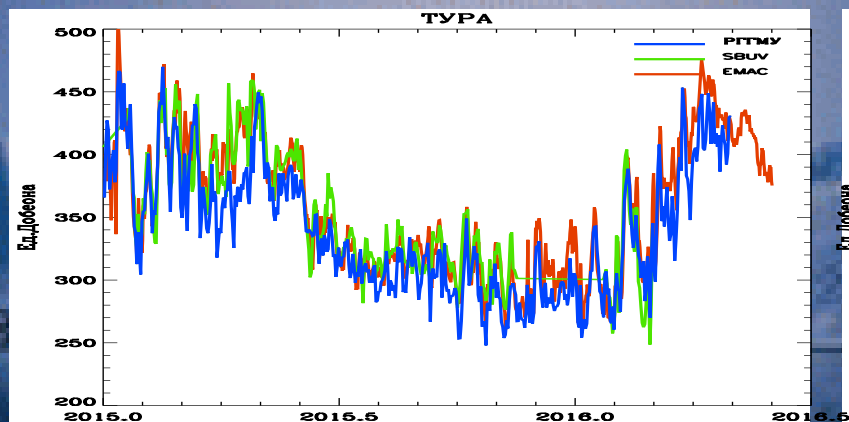
Представляет собой систему численного моделирования химических и климатических процессов и включает в себя под-модели, описывающие процессы в тропосфере и средней атмосфере, а также их взаимодействие с океаном, земной поверхностью и воздействие на них антропогенных факторов.

Моделирование включает в себя обязательное задание начальных условий для тропосферы, стратосферы и нижней мезосферы. В данных сопоставлениях использована модель EMAC (ECHAM5 версии 5.3 и MESSy версии 2.5) с разрешением T42L39, т.е. со сферическим усечением T42 (относящимся к квадратичной Гауссовой сетке  $\sim 2.8 \times 2.8$  градуса по широте и долготе) и 39 гибридными уровнями по вертикали от поверхности до 0.01 ГПа.

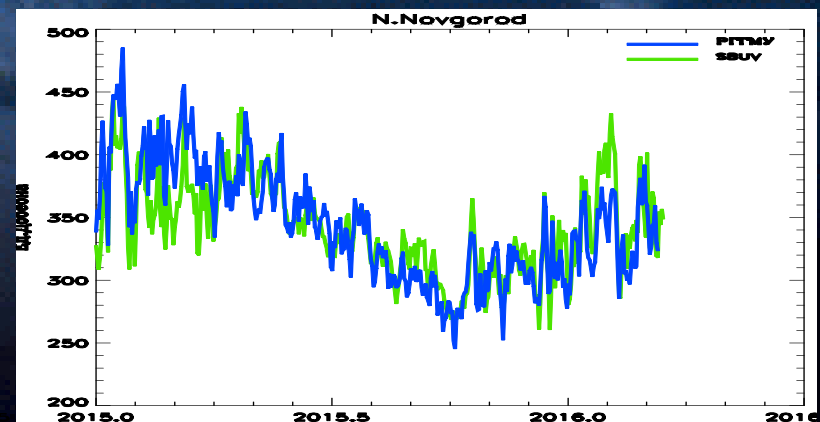
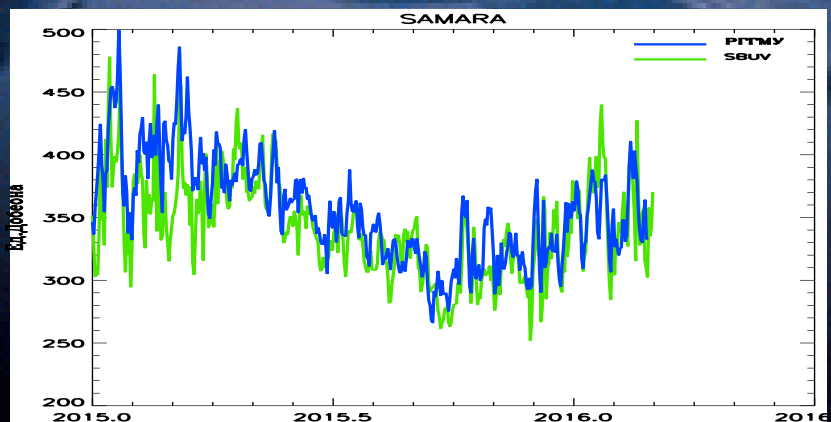
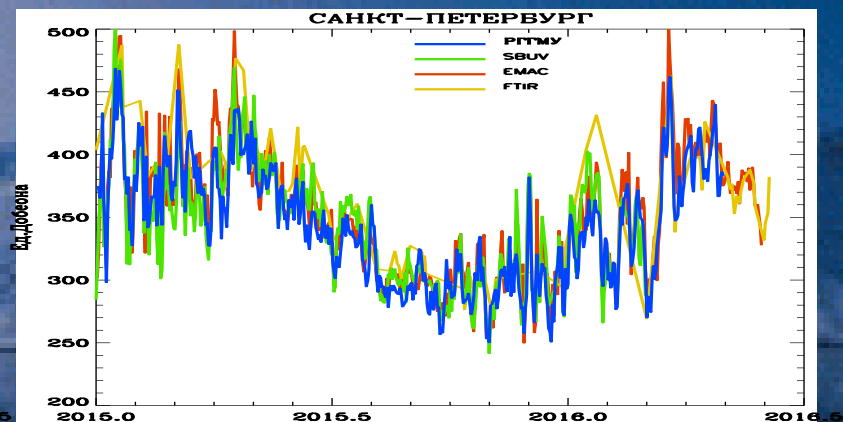
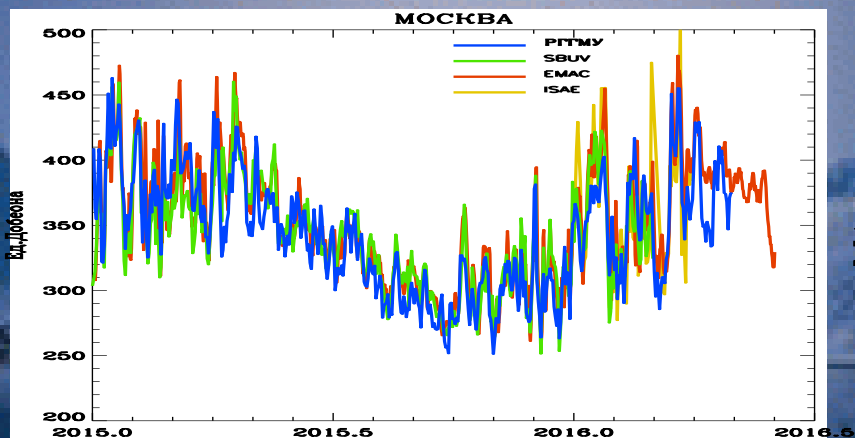
Nudging to ERA-INTERIM



# Изменение общего содержания озона на сибирских станциях WOUDC зимой 2015-2016 гг

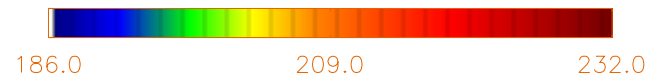
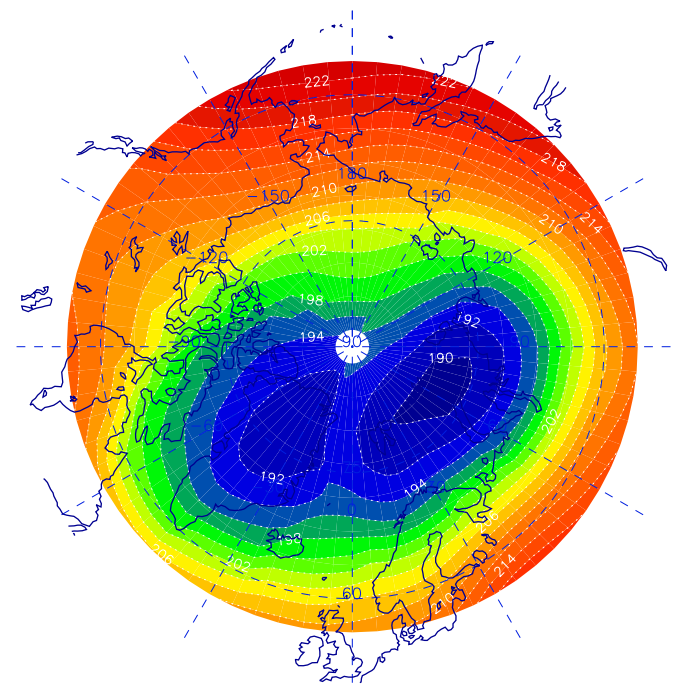
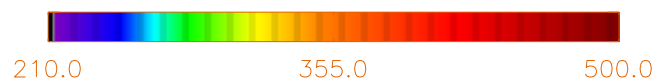
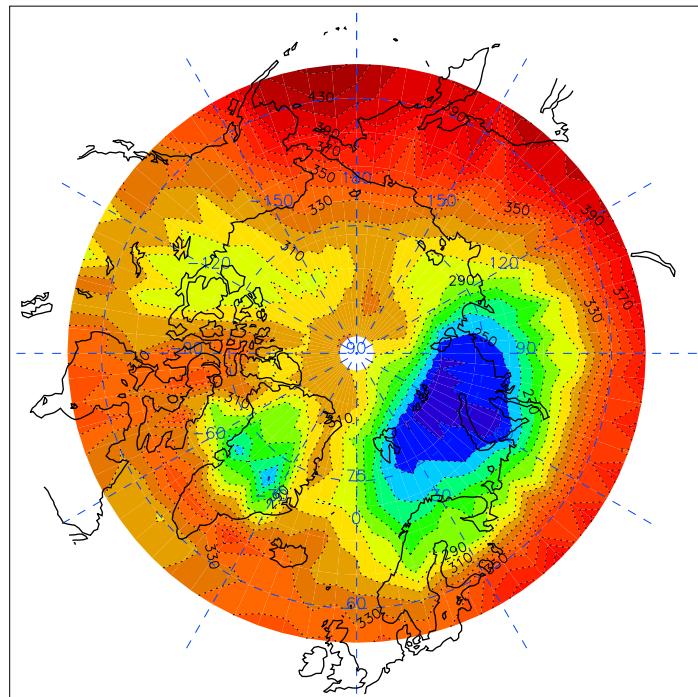


# Изменение общего содержания озона ЕТР зимой 2015-2016 гг

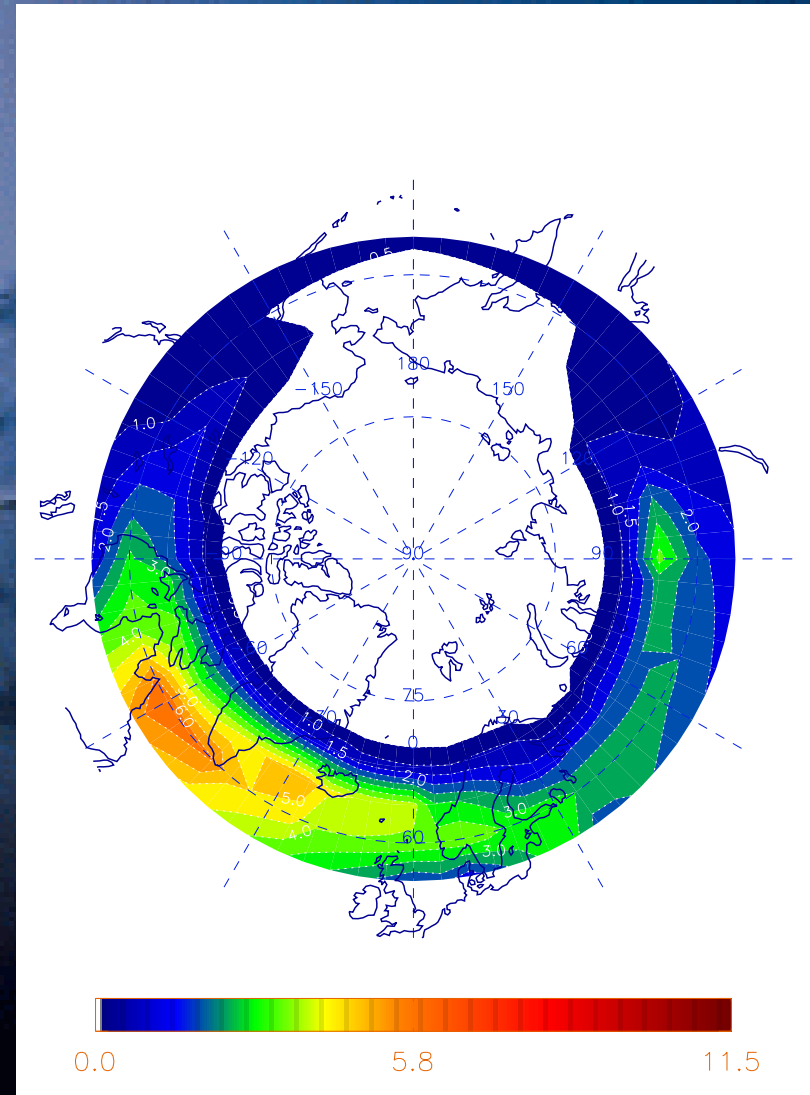
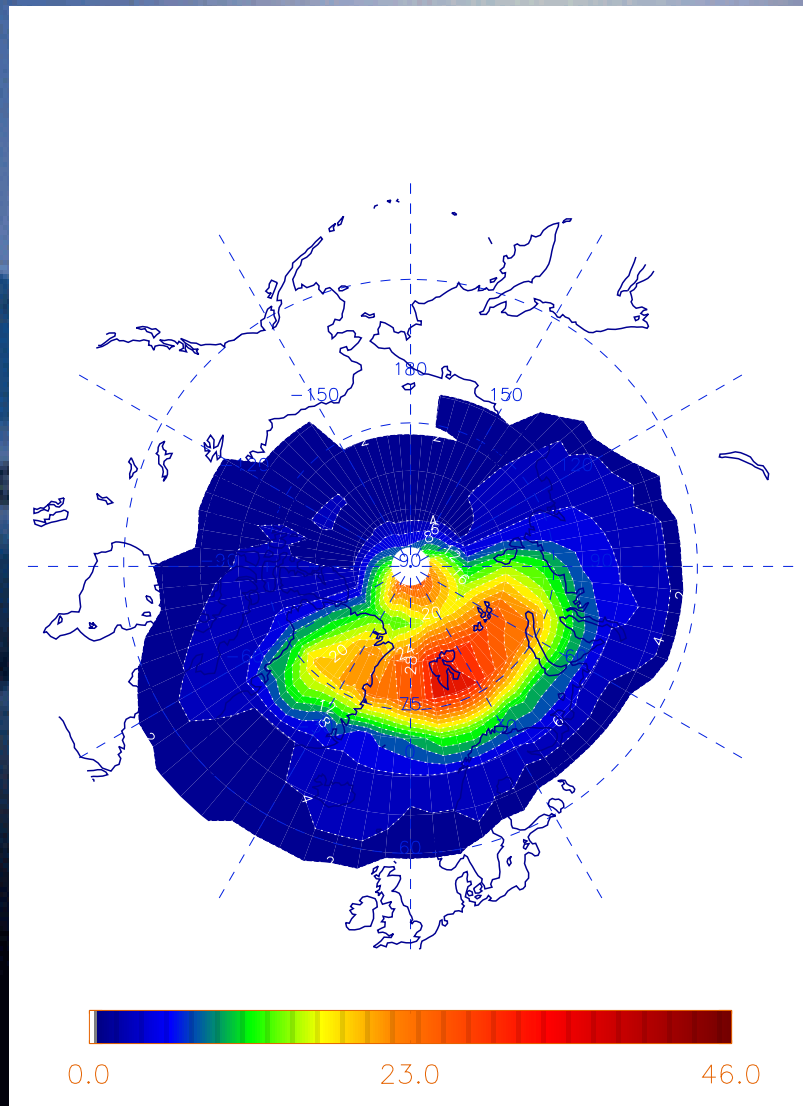


# Общее содержание озона и температура в Арктике и Субарктике 31 декабря 2015

Column Ozone, Day 365, Year 2015

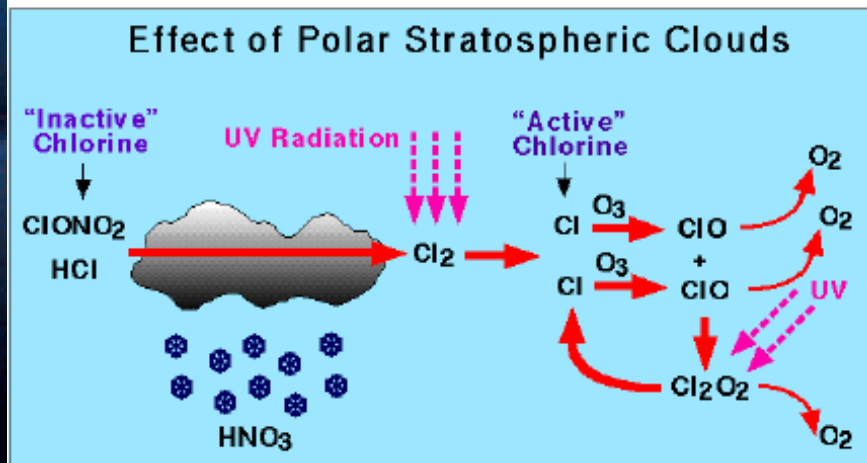
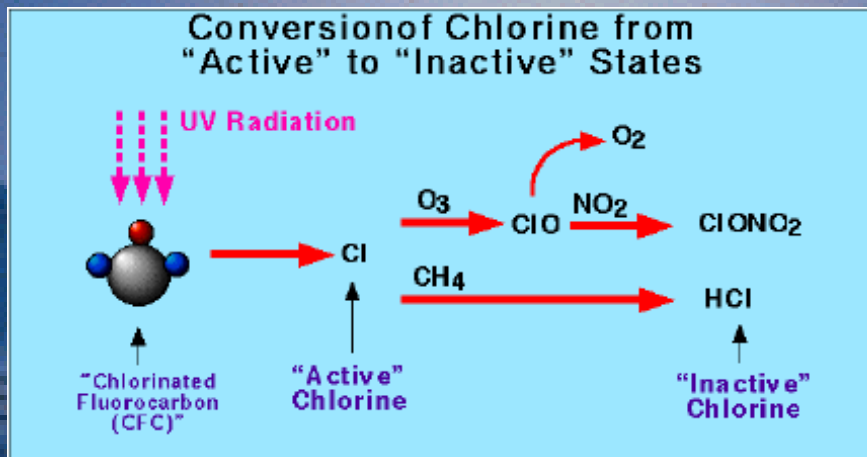


# Полярные стратосферные облака и разрушение озона в Арктике и Субарктике 31 декабря 2015



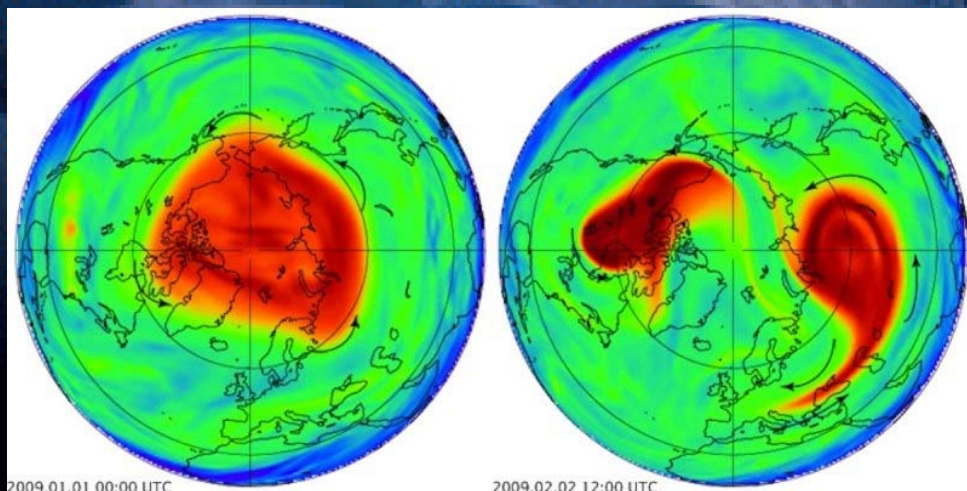


# Гетерогенная Активация на ПСО и Весеннее Разрушение Озона



- Активный хлор (бром) разрушает озон в галогенных каталитических циклах
- Неактивный хлор (бром) находится в связанном с азотными и водородными радикалами состоянии
- Денитрификация и дегидратация полярной стратосферы позволяют хлору (бromу) долго находиться в активной форме и разрушать озон

# Планетарные волны и циркумполярный вихрь



- Крупномасштабные квазистационарные долготные возмущения параметров атмосферы (стационарные планетарные волны) представляют собой вынужденные колебания атмосферы, которые возбуждаются в тропосфере за счет неоднородностей рельефа и **нагрева подстилающей поверхности**
  - Распространяющиеся из тропосферы в стратосферу планетарные волны взаимодействуют со средним потоком и влияют на устойчивость циркумполярного вихря
- В результате внезапных стратосферных потеплений (ВСП) циркумполярный вихрь может разделиться, сдвинуться и разрушиться

# Заключение

- Сочетание дистанционных спутниковых и наземных измерений с численным моделированием позволяет идентифицировать причины наблюдаемых изменений содержания озона;
- Результаты численного моделирования дополняют результаты дистанционных наблюдений в местах их естественного отсутствия (при отсутствии солнечного излучения);
- Наблюдаемые аномалии содержания озона в Арктике и Субарктике зимой 2015-2016 гг. в значительной степени определяются динамическими процессами
- Меняющиеся в результате изменений климата свойства подстилающей поверхности и, в частности, температура поверхности океана и площадь его покрытия льдом могут оказать сильное влияние на стабильность циркумполярного вихря и разрушение озона

A scenic landscape featuring a body of water in the foreground, reflecting the sky and distant mountains. The sky is a deep blue, and the mountains in the background are also blue-toned. The overall scene is calm and serene.

Спасибо за внимание!!!