



Санкт-Петербургский  
государственный  
университет

# **Оценки межгодовой изменчивости общего содержания озона над территорией России по данным спутниковых измерений и моделирования**

**Я.А. Виролайнен, Г.М. Неробелов, А.В. Поляков, В.А. Зубов, Е.В. Розанов,  
С.В. Акишина**

# **Спутниковые измерения общего содержания озона (ОСО) ИКФС-2**

**Расположение:** на борту метеорологического спутника «Метеор-М» №2, период измерений: 2015-2022

**Метод:** измерения уходящего теплового излучения в области 660-2000 см<sup>-1</sup> с разрешением 0.4 см<sup>-1</sup>

**Особенности:** основан на интерферометре Майкельсона, детектор HgCdTe, полоса сканирования в 2015-2020 гг. – 1000 км, в 2021-2022 гг. – 1500 км, горизонтальное разрешение в надир ~ 35 км, NESR - 0.15-0.45 мВт/(м<sup>2</sup>×стер×см<sup>-1</sup>), погрешность измерений ОСО – 2-3%.

**Источник данных:** обработка спектров в СПбГУ [Polyakov et al., 2023].

## **OMI**

**Расположение:** на борту спутника Aura, период измерений: 2004-2025

**Метод:** измеряет рассеянное солнечное излучение в диапазоне длин волн 270–500 нм со спектральным разрешением около 0.5 нм.

**Особенности:** пространственное разрешение 13x24 км, полоса сканирования поперек направления движения спутника - 2500 км, погрешность измерений ОСО – 1-2%.

**Источник данных:** ESA (<https://doi.org/10.5067/Aura/OMI/DATA2024>)

## Данные моделирования ОСО

Химико-климатическая модель (ХКМ) **SOCOLv3** [Stenke et al., 2013] состоит из модели средней атмосферы **МА-ECHAM5** [Manzini et al., 2006] и модифицированной версии химико-транспортной модели (ХТМ) **MEZON** [Rozanov et al., 1999]. При численном моделировании использовалось уточнение состояния атмосферы при помощи метеорологического реанализа ERA5. Процедура уточнения выполнена при помощи наджинга.

**МА-ECHAM5** и **MEZON** интерактивно связаны трехмерными полями температуры и ветра, а также радиационным воздействием, вызванным водяным паром, озоном, метаном, закисью азота и хлорфторуглеродов. ХТМ **MEZON** вызывается каждые 2 часа, что делает SOCOL вычислительно очень эффективным. **МА-ECHAM5** является расширенным комплексным пакетом параметризации для климатических приложений модели **ECHAM5** [Roeckner et al., 2005].

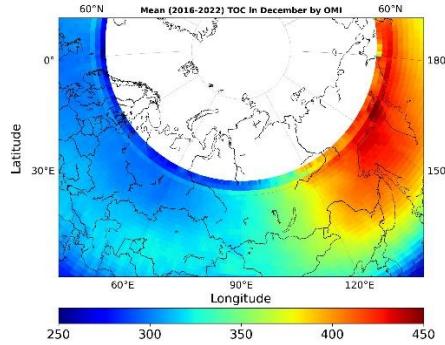
В численном эксперименте используется 39 уровней. Временной шаг модели для динамических процессов и физических параметризаций составляет 15 мин. Горизонтальное разрешение модели – 300-400 км.

Период моделирования: 2008-2022, временной вывод данных – каждые 2 часа.

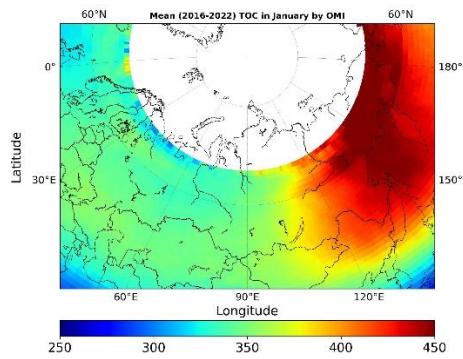
# Пространственная изменчивость ОСО зимой (2016-2022)

OMI

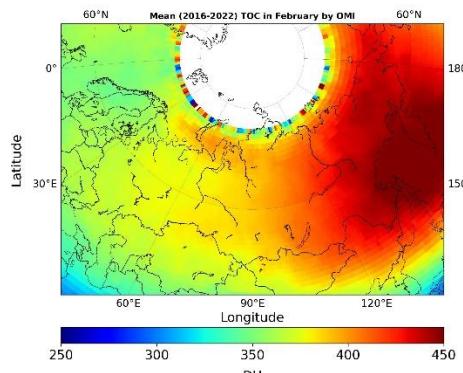
Декабрь



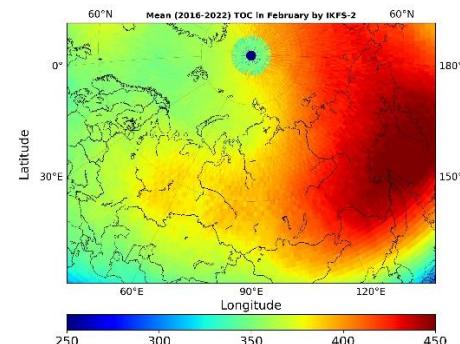
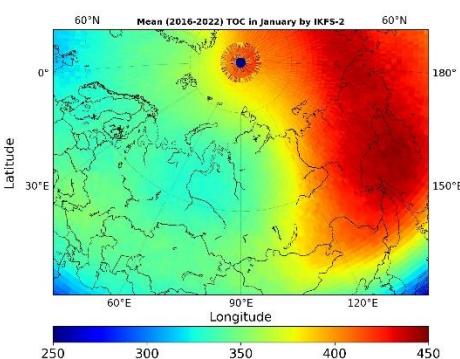
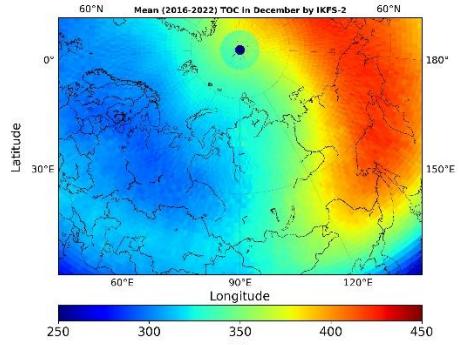
Январь



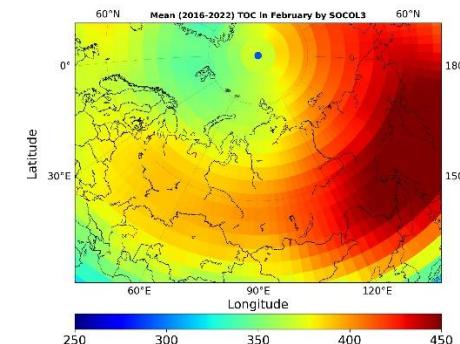
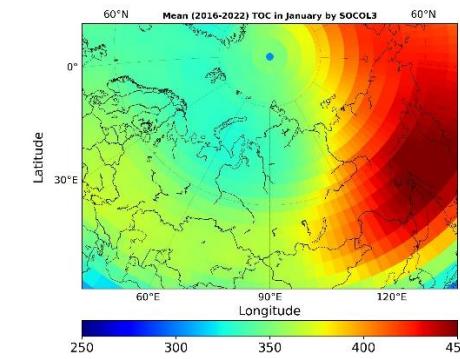
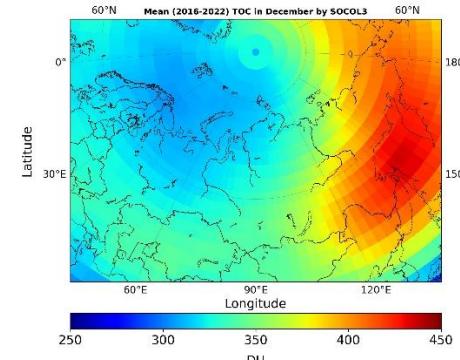
Февраль



ИКФС-2



SOCOL



В зимнее время прибор **OMI** не позволяет отслеживать изменчивость ОСО на значительной части РФ.

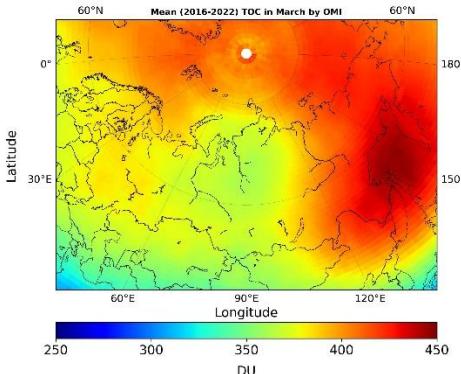
**ХКМ **SOCOLv3**** несколько завышает по сравнению с экспериментальными данными значения ОСО в средних широтах в центральной и западной частях России и занижает ОСО в декабре-январе вблизи Северного полюса.

Максимум ОСО зимой приходится на Охотское море, Магаданскую область, Хабаровский и Камчатский края.

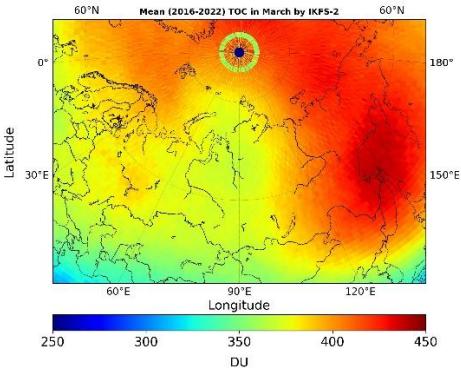
# Пространственная изменчивость ОСО весной (2016-2022)

Март

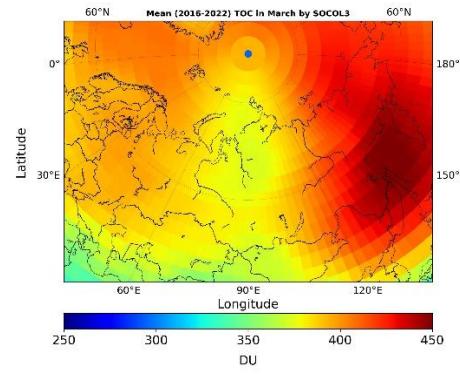
OMI



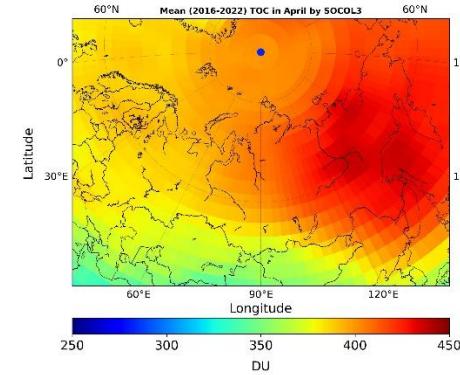
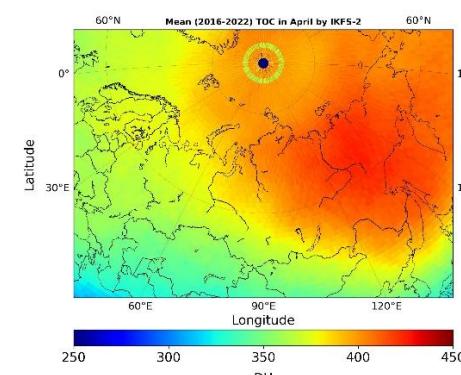
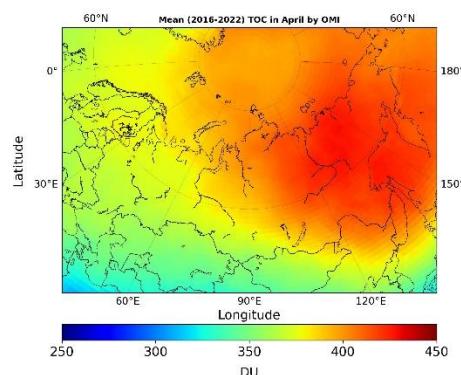
ИКФС-2



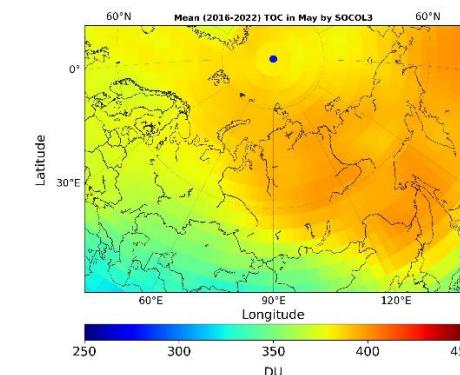
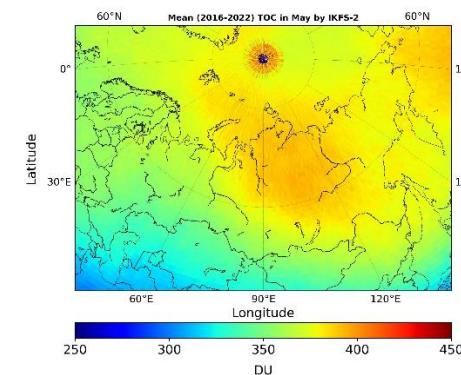
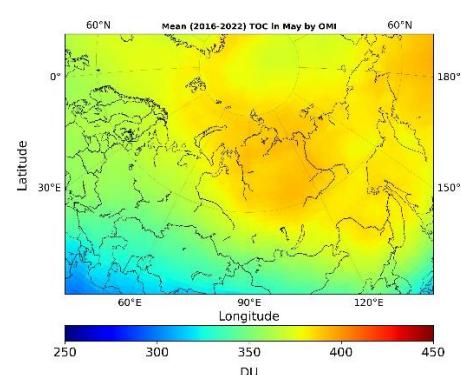
SOCOL



Апрель



Май

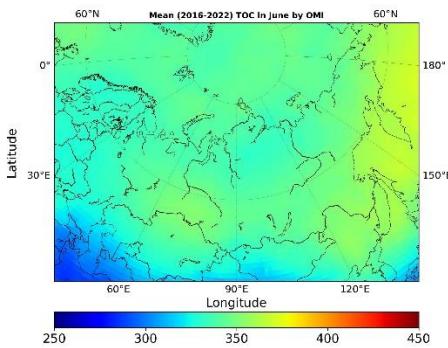


Максимум ОСО в марте приходится на Охотское море, Магаданскую область, Хабаровский и Камчатский края, в апреле он смещается к северо-востоку в республику Саха, в мае – в Красноярский край и республику Саха.

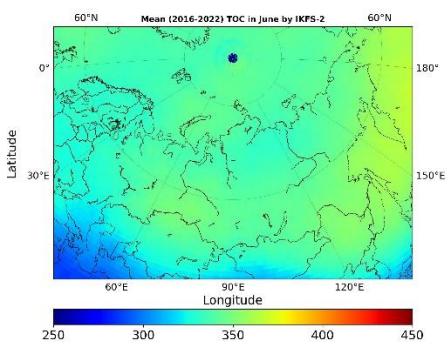
ХКМ **SOCOLv3** завышает по сравнению с экспериментальными данными значения ОСО в средних и высоких широтах, включая величину и площадь мартовского максимума над Охотским морем.

# Пространственная изменчивость ОСО летом (2016-2022)

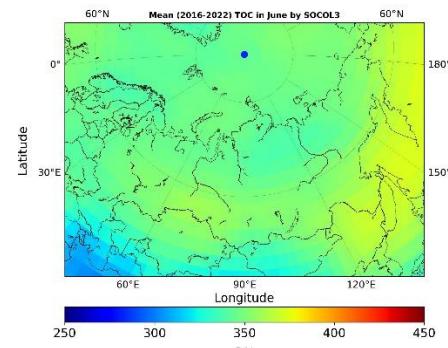
OMI



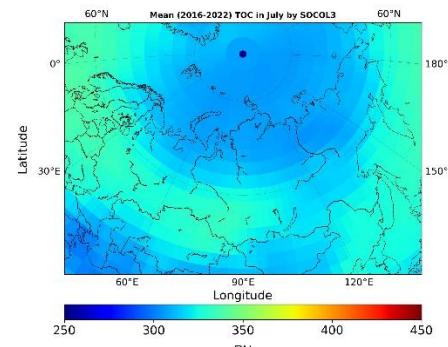
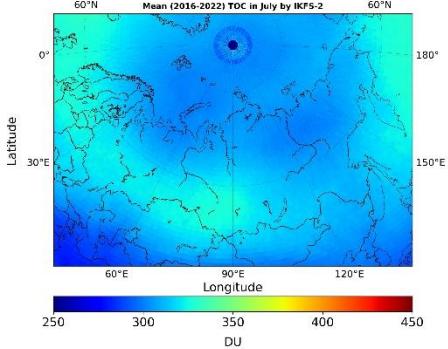
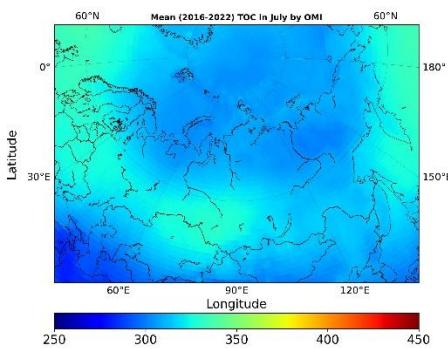
ИКФС-2



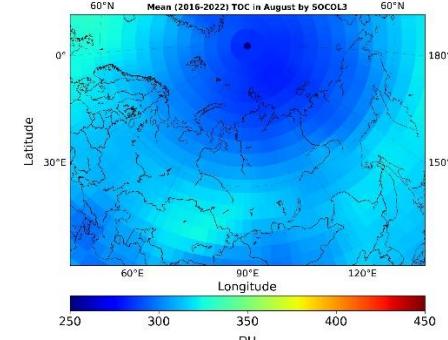
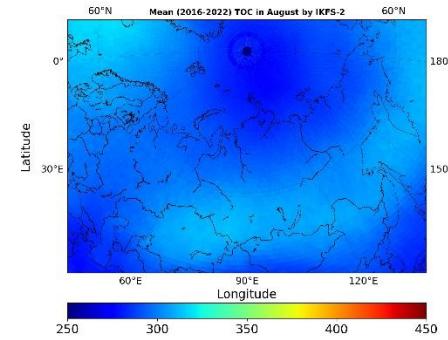
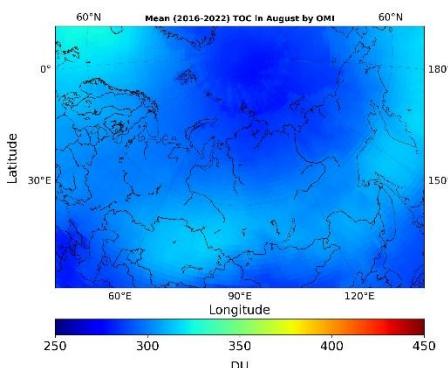
SOCOL



Июль



Август



Максимум ОСО в июне приходится на Охотское и Берингово море (Тихий океан), Камчатский край и центральную часть РФ.

Минимуму ОСО в июле-августе минимум

центрируется вокруг Северного полюса и

приходится на Субарктические и Арктические регионы РФ.

ХКМ **SOCOLv3** немного завышает по сравнению с экспериментальными данными значения ОСО в средних широтах центральной и европейской части РФ.

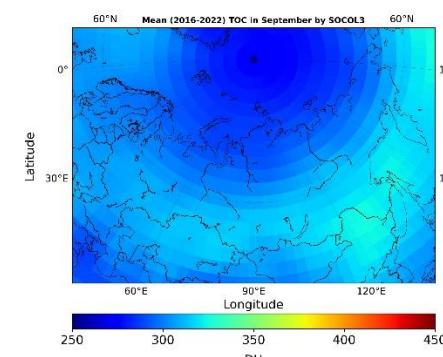
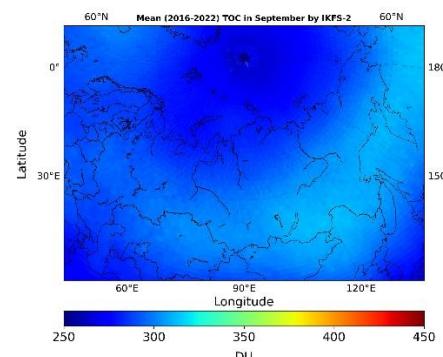
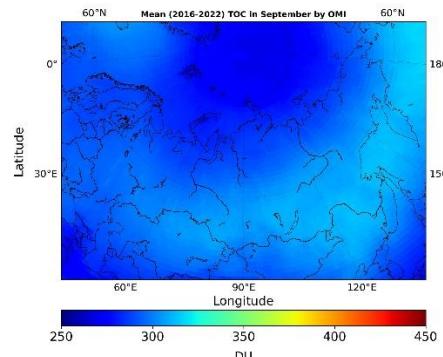
# Пространственная изменчивость ОСО осенью (2016-2022)

OMI

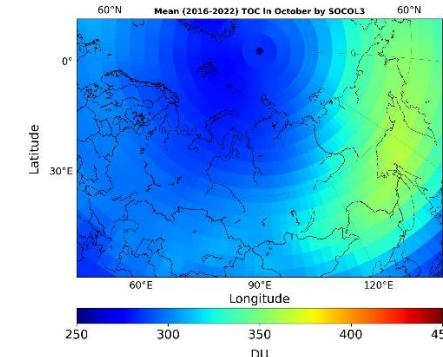
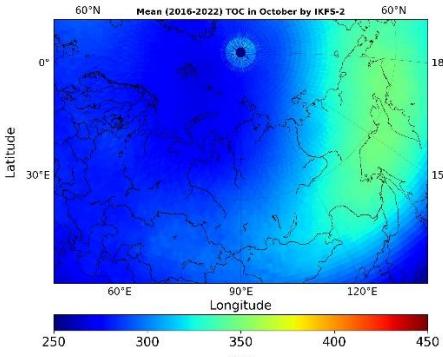
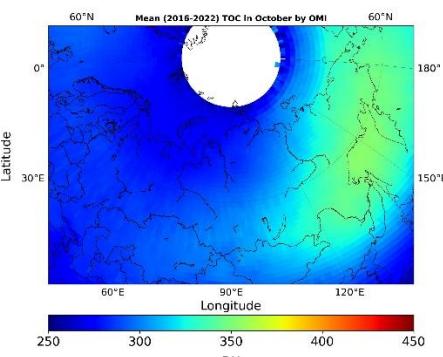
ИКФС-2

SOCOL

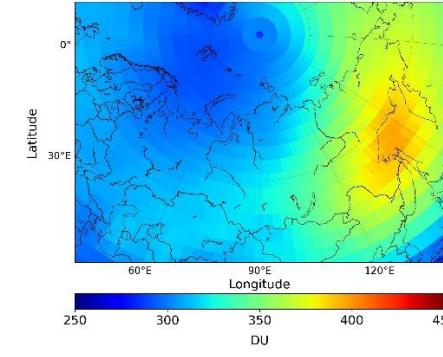
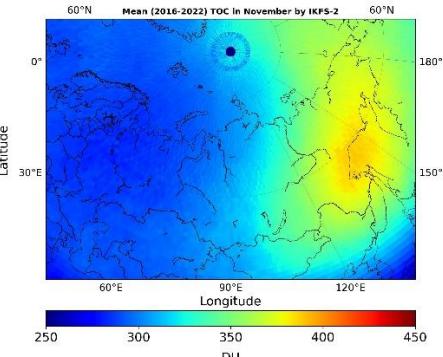
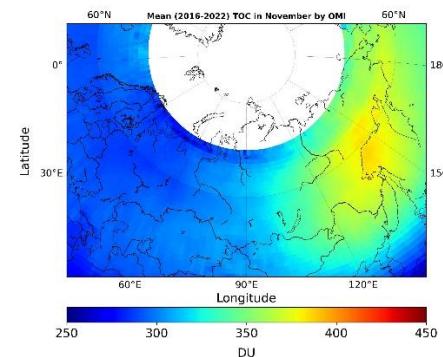
Сентябрь



Октябрь



Ноябрь



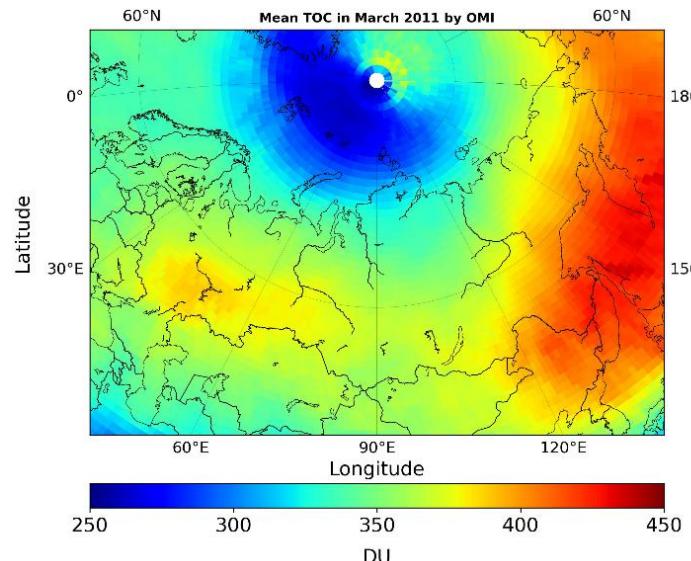
В ноябре прибор **OMI** не позволяет отслеживать изменчивость ОСО в Арктических регионах РФ.

ХКМ **SOCOLv3** несколько завышает по сравнению с экспериментальными данными значения ОСО в средних широтах в центральной и западной частях России, а также максимум ОСО над Охотским морем.

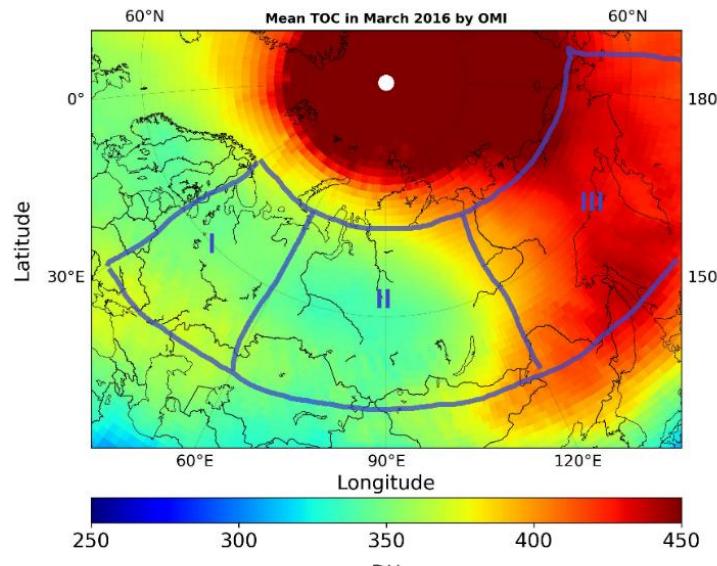
Максимум озона в октябре-ноябре приходится на Охотское море и Хабаровский край.

# Пространственное распределение ОСО в марте различных лет (OMI)

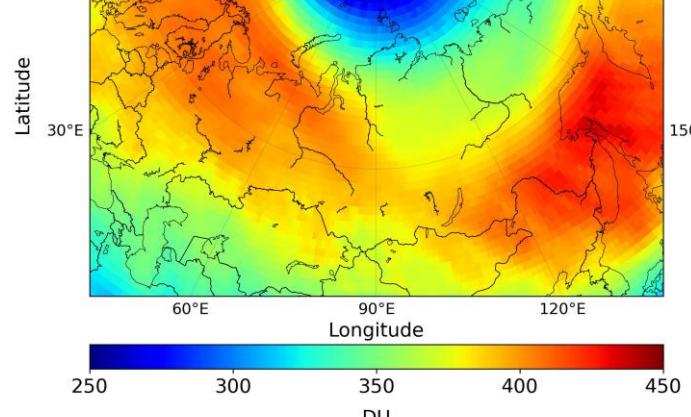
2011



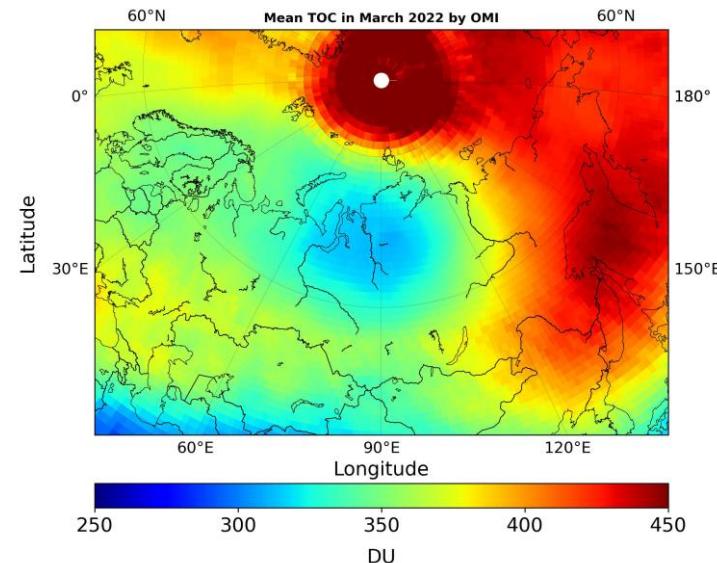
2016



2020



2022



Арктические зимы 2011, 2016 и 2020 гг. были очень холодными с образованием сильных полярных стратосферных вихрей (ПСВ) с большими потерями озона, достигающими 25-30 %.

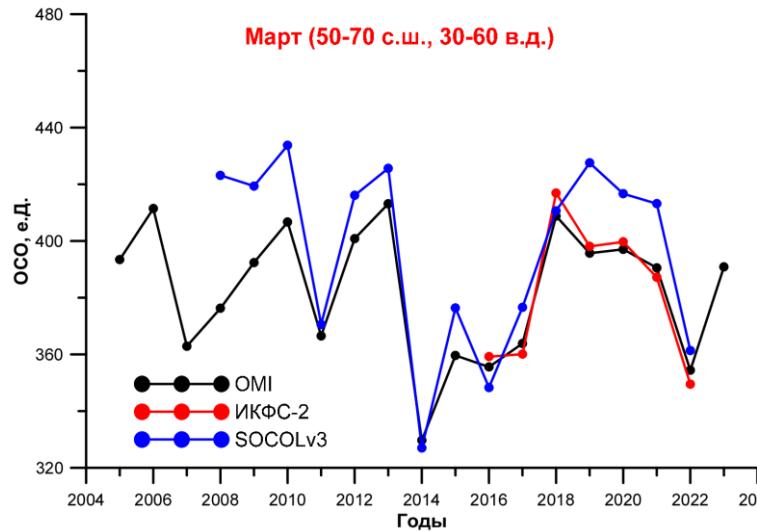
В 2016 г. мажорное внезапное стратосферное потепление в марте разрушило ПСВ, поэтому в марте над Северным полюсом ОСО пришло в норму.

Весной 2020 г. в Арктике наблюдались признаки озоновой дыры, схожие с Антарктическими.

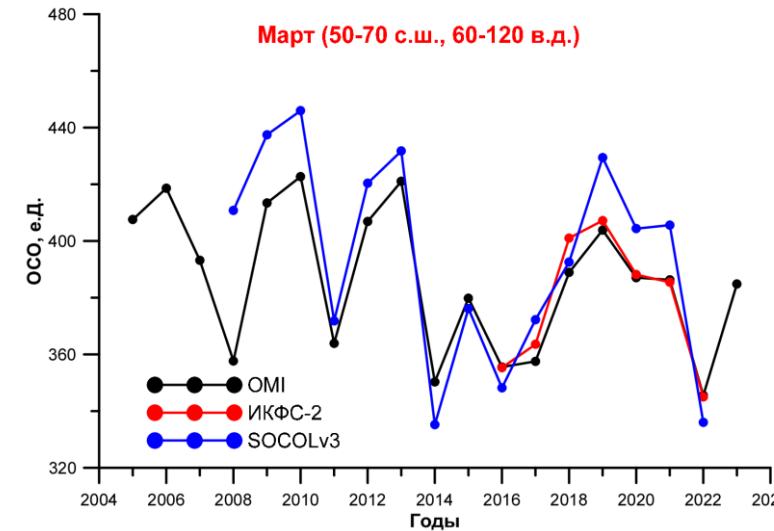
В 2022 г. конец зимы отличался пониженным содержанием ОСО над Арктическими территориями.

# Межгодовая изменчивость ОСО в марте для разных регионов

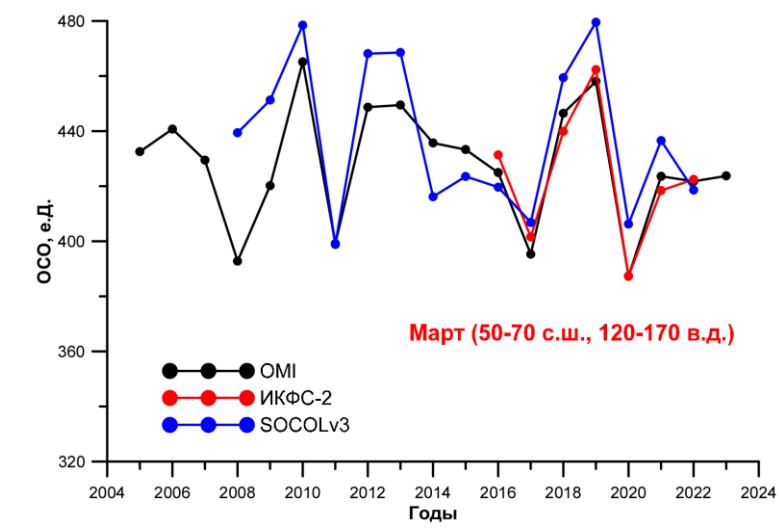
Европейская часть России



Западная и Центральная Сибирь



Восточная Сибирь и Дальний Восток



На весеннюю межгодовую изменчивость ОСО над территорией РФ в первую очередь влияет Арктическое колебание (АК) и Квази-двуухлетние осцилляции (КДО). Перенос богатого озоном воздуха из низких в высокие широты в зимнее время ослабевает при **положительных значениях индекса АК** (2008, 2011, 2014, 2017, 2020) **и западной фазе КДО** (2008, 2011 и 2014), когда за счет усиления западного переноса образуется устойчивый и холодный ПСВ, из-за чего наблюдаются весенние **отрицательные озоновые аномалии**.

ХКМ **SOCOLv3**, как правило, корректно описывает наблюдаемые минимумы ОСО, но завышает ОСО в максимумах по сравнению с экспериментальными данными.

# Тенденции в изменениях ОСО для разных регионов

## Статистически значимые оценки линейных трендов изменчивости ОСО в ноябре (% в год)

	Период	30-60 в.д.	60-120 в.д.
OMI	2008-2022	+1.55±1.36	+1.72±0.91
SOCOL3		+1.1±1.62	+1.13±1.02
OMI	2005-2023	+1.03±1.02	+1.28±0.58

Получены оценки трендов изменений как среднемесячных величин ОСО для трех регионов РФ, так и среднегодовых значений.

Статистически значимое увеличение ОСО получено только для ноября для региона Европейской части России (по данным **OMI** за период 2008-2022 и 2005-2023) и для региона Западной и Центральной Сибири (по данным **OMI** за период 2008-2022 и 2005-2023 и по данным ХКМ **SOCOLv3** за период 2008-2022).

Для других регионов и сезонов статистически значимых трендов за рассмотренные периоды не наблюдается.

## **Заключение и выводы**

1. Исследована пространственно-временная изменчивость ОСО над территорией России по данным спутниковых измерений (ИКФС-2 и OMI), а также данным моделирования (ХКМ SOCOLv3).
2. С конца осени до середины весны максимум ОСО приходится на регионы вокруг Охотского моря – Хабаровский и Камчатский край. В летний и осенний период минимум ОСО приходится на Арктические области, центрированные вокруг Северного полюса.
3. ХКМ SOCOLv3 корректно количественно описывает поля распределения ОСО в периоды отрицательных озоновых аномалий. В то же время модель завышает ОСО по сравнению с наблюдениями в периоды умеренных и высоких значений ОСО.
4. Рассмотрена межгодовая изменчивость ОСО для различных регионов РФ в весенний период. Выявлена связь между знаком индекса АК и фазой КДО. Озоновые аномалии в весенний период наблюдаются, как правило при положительных значениях индекса АК и западной фазе КДО.
5. Получены оценки линейных трендов в ОСО для различных регионов РФ. Обнаружено статистически значимое увеличение ОСО для ноября для Европейской части России и для Центральной и Западной Сибири за период с 2005 по 2023 гг.

## **Благодарности**

- Благодарим НИЦ «Планета» за предоставление доступа к результатам спектральных измерений ИКФС-2.
- Данные OMI были предоставлены Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC).
- Благодарим авторов программ из библиотеки программ МГУ за предоставление свободного доступа к исходным текстам программ.
- Исследование выполнено при поддержке Санкт-Петербургского университета (шифр проекта 124032000025-1)

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**