



*X Всероссийская конференция с  
международным участием «Обработка  
пространственных данных в задачах  
мониторинга природных и антропогенных  
процессов» (SDM-2025), посвященная памяти  
академика Ю.И. Шокина*

**«О связи квазидвухлетних колебаний и вариаций  
озона во время существования  
Антарктической озоновой аномалии»**

Серебренникова Л.М.<sup>1</sup>, Кашкин В.Б.<sup>1</sup>, Рублева Т.В.<sup>1</sup>,  
Симонов К.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Сибирский Федеральный университет, г. Красноярск*

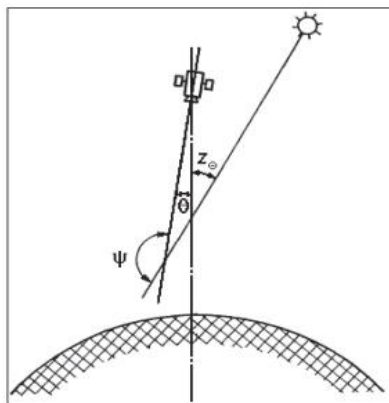
<sup>2</sup> *Институт вычислительного моделирования СО РАН,  
г. Красноярск*

Из спутниковых наблюдений установлено, что на пространственно-временную изменчивость озона в Южном полушарии (ЮП) существенно влияет циркумполярный вихрь (ЦВ), который подвержен большому волновому возмущению. На атмосферу в средних широтах также оказывают влияние и квазидвухлетние межгодовые колебания (КДК) зонального ветра. В стратосфере КДК наблюдаются в слое от  $\sim 100$  гПа ( $\sim 16$  км) до  $\sim 3$  гПа ( $\sim 40$  км) и оказывают влияние на процессы переноса и циркуляции озона в системе ОЦА (общей циркуляции атмосферы).

В последние годы количество атмосферных исследований КДК увеличивается. Однако, вопросы связи КДК с атмосферной циркуляцией и воздействием этих колебаний на озоносферу Южного полушария, где ежегодно наблюдается Антарктическая озоновая дыра (АОД), до конца не изучены.

**В данной работе изучались вариации озона в средних и полярных широтах ЮП в зимне-весенний период 1996–2024 гг. в системе ОЦА во время волновой активности по спутниковым данным TOMS/Earth probe и OMI/Aura.**

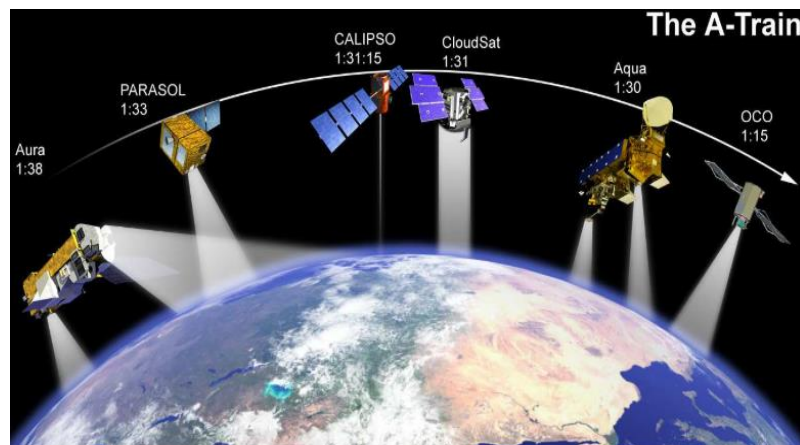
# Спутниковая технология, реализуемая на примере измерений прибором OMI/AURA



Общее содержание озона (ОСО) в вертикальном столбе атмосферы определяется из измерений уходящей солнечной УФ-радиации приборами TOMS/Earth probe и OMI/Aura. Метод основан на законе Бугера – Ламберта – Бера:

$$I_{\lambda} = I_{0,\lambda} \cdot 10^{-[\alpha_{\lambda} X(O_3)\mu + \beta_{\lambda} m + \delta_{\lambda} m']}$$

*Схема измерения уходящего солнечного УФ-излучения в спутниковых технологиях*

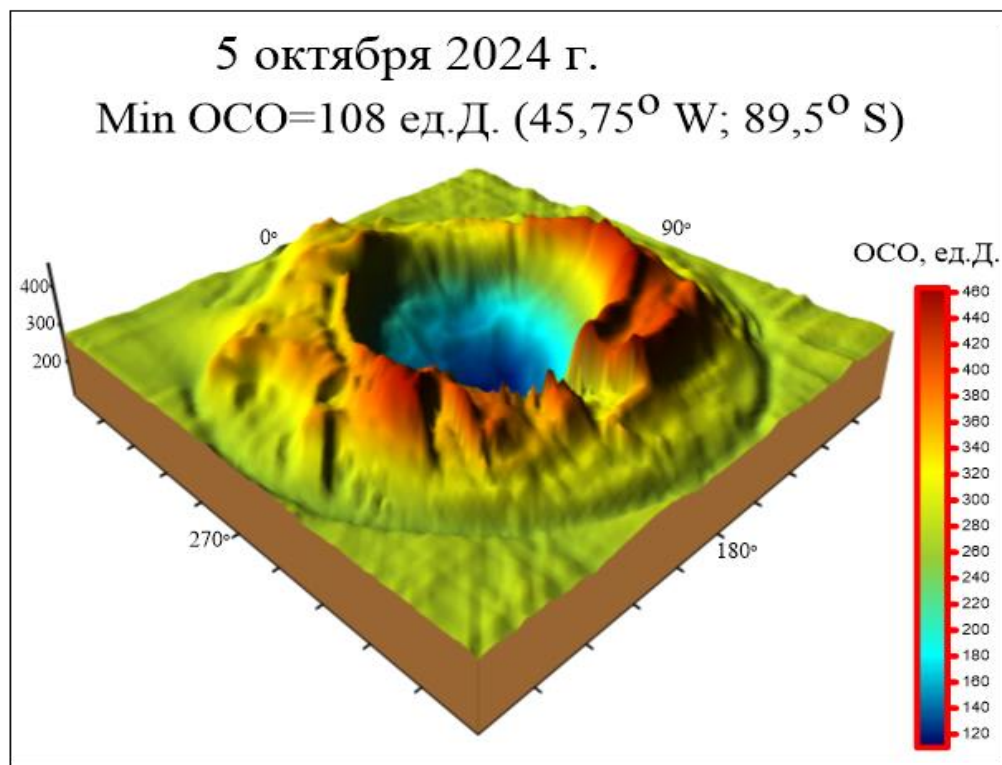


где  $I_{\lambda}$ ,  $I_{0,\lambda}$  – интенсивности УФ-излучения на высоте  $h$  и на верхней границе атмосферы, соответственно;  $X(O_3)$  – ОСО,  $\alpha_{\lambda}$  – коэффициент поглощения солнечной радиации,  $\beta_{\lambda}$  – коэффициент ослабления солнечной радиации, обусловленный молекулярным рассеянием;  $\delta_{\lambda}$  – коэффициент ослабления солнечной радиации за счет аэрозольного рассеяния; атмосферные массы для слоя озона, атмосферного и аэрозольного слоев, соответственно, –  $\mu$ ,  $m$  и  $m'$ .

Спутниковая группировка A-Train (NASA) и космический аппарат AURA

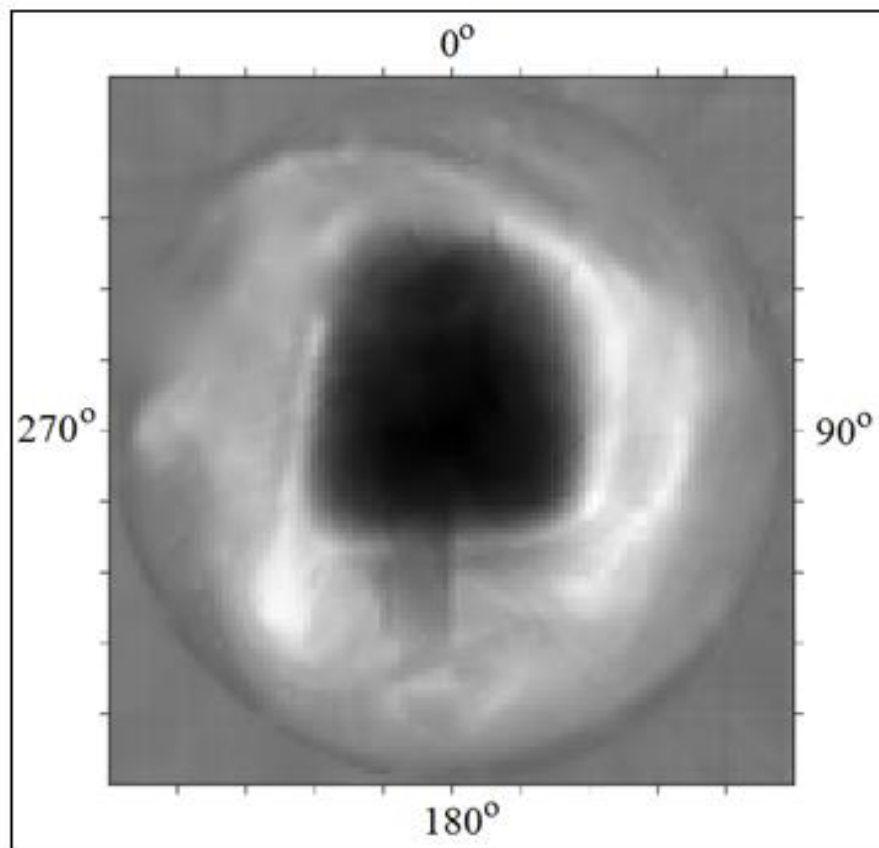
# 3D модель Антарктической озоновой дыры за 5 октября 2024 г. по спутниковым данным ОМІ/Aura (<http://gsfc.nasa.gov>)

Антарктическая озоновая дыра (АОД) – это участок стратосферы над южной полярной областью, где общее содержание озона (ОСО) меньше климатической нормы, равной 220 ед.Д. (1 ед.Д.= $10^{-5}$ м).



Период существования озоновой аномалии составляет 3-4 месяца (август-декабрь). В отдельные годы площадь, которую может занимать АОД, достигает более 20 млн км<sup>2</sup>.

## Карта распределения общего содержания озона в области АОД и циркумполярном вихре (5 октября 2024 г.)



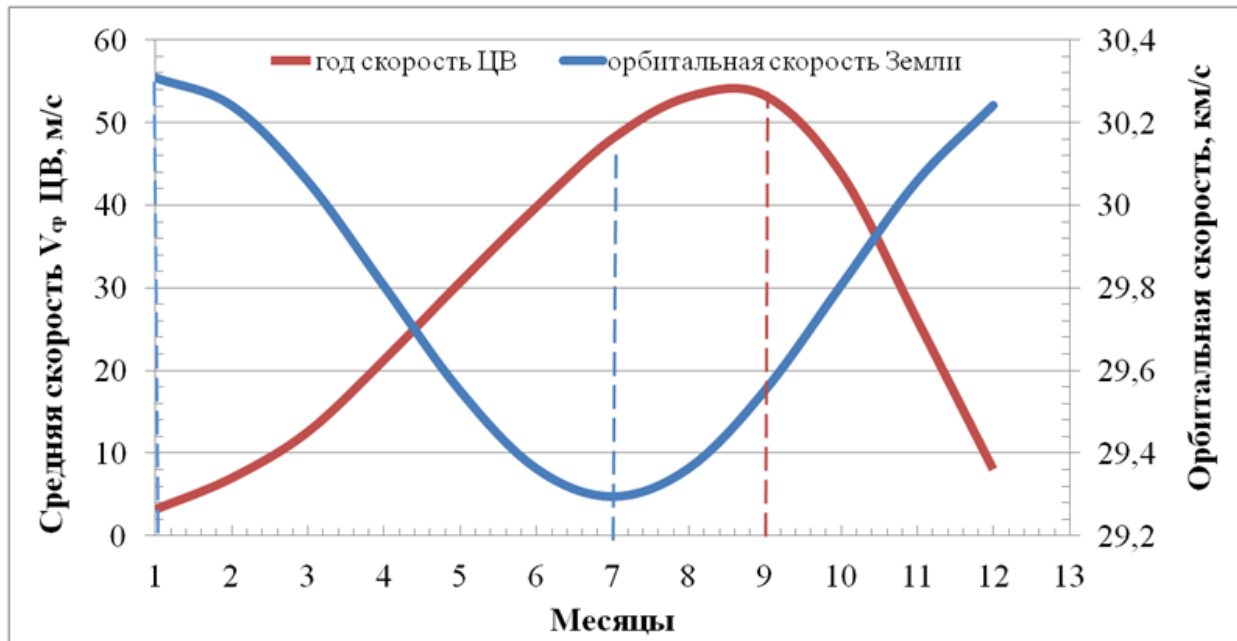
«Темная» область – это АОД, где регистрируется СО  $< 220$  ед.Д. в широтном диапазоне ( $65^{\circ}$ - $90^{\circ}$  ю.ш.).

«Белая» область – это «кольцо» с повышенными значениями СО в циркумполярном вихре (ЦВ), расположенном в широтном диапазоне ( $30^{\circ}$ -  $65^{\circ}$  ю.ш.).

По оценкам, радиус ЦВ, в среднем, составляет 4505 км.

*Под ЦВ понимается циклоническое вращение воздуха в тропосфере и стратосфере вокруг полюса, с запада на восток в системе ОЦА (общей циркуляции атмосферы).*

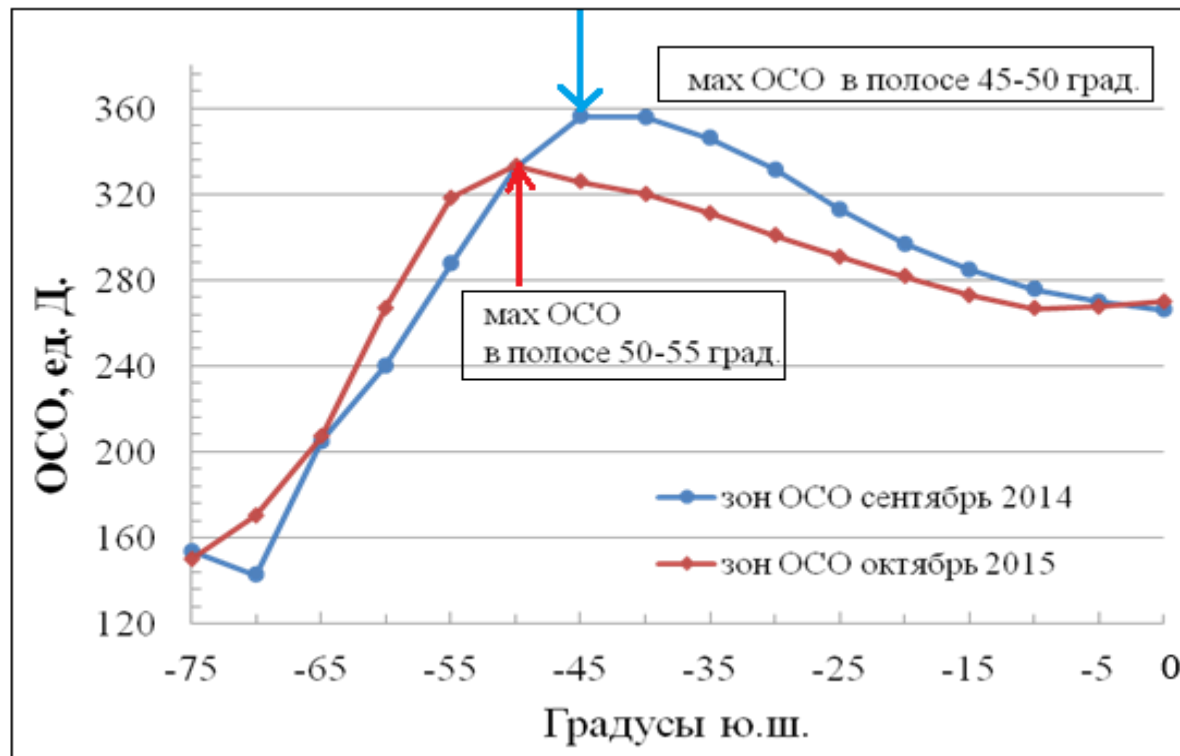
# Средняя скорость циркумполярного вихря $V_{cp}$ за 1996-2016 гг. и орбитальная скорость Земли



$V_{cp}$  определялась на южной широте  $60^\circ$  (границе полярного фронта) и изобарическом уровне 50 гПа за 1996-2016 гг. по данным базы реанализа MERRA (<http://acd-ext.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/datareq.pl>).

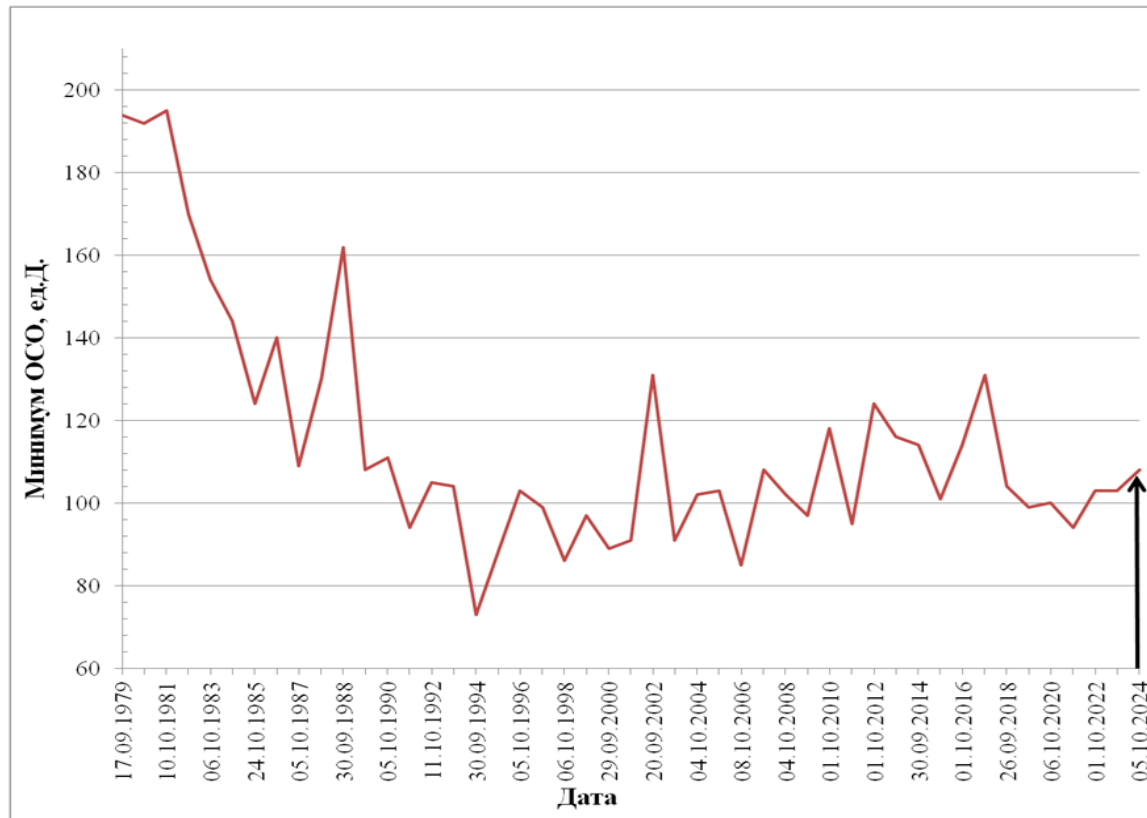
Скорость ЦВ увеличивается от февраля к сентябрю (от 6.93 до 53.34 м/с) и замедляется от октября к январю (от 43.91 до 3.12 м/с). Коэффициент корреляции между рядами  $V_{cp}$  циркумполярного вихря и орбитальной скоростью равен  $R = -0.89$ . По-видимому, изменение скорости ЦВ определяется ускорением и замедлением орбитального движения Земли. Уменьшение орбитальной скорости приводит к увеличению  $V_{cp}$

# Вариации максимумов ОСО в области циркумполярного вихря в 2014 и 2015 годах по спутниковым данным ОМІ/Aura (<http://gsfc.nasa.gov>)



Ранее в работе [Кашкин В.Б. и др] в «кольце» ЦВ был выполнен анализ зональных средних значений ОСО в сентябре-октябре 1996-2011 гг. Обнаружено, что в двух 5-градусных широтных кругах ( $45^{\circ}$  –  $50^{\circ}$  ю.ш.) и ( $50^{\circ}$  –  $55^{\circ}$  ю.ш.), где наиболее активен циркумполярный вихрь, наблюдаются максимальные значения ОСО с годичным чередованием.

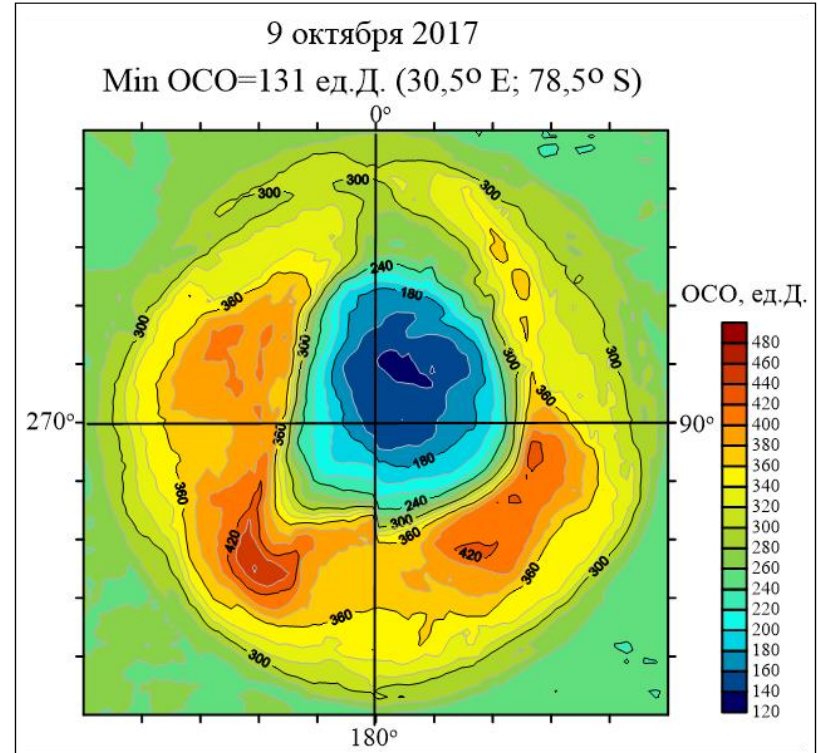
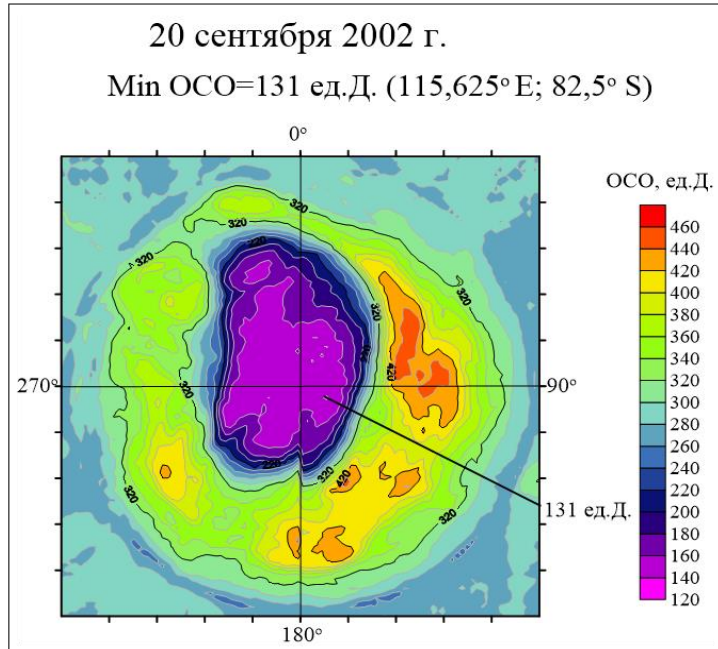
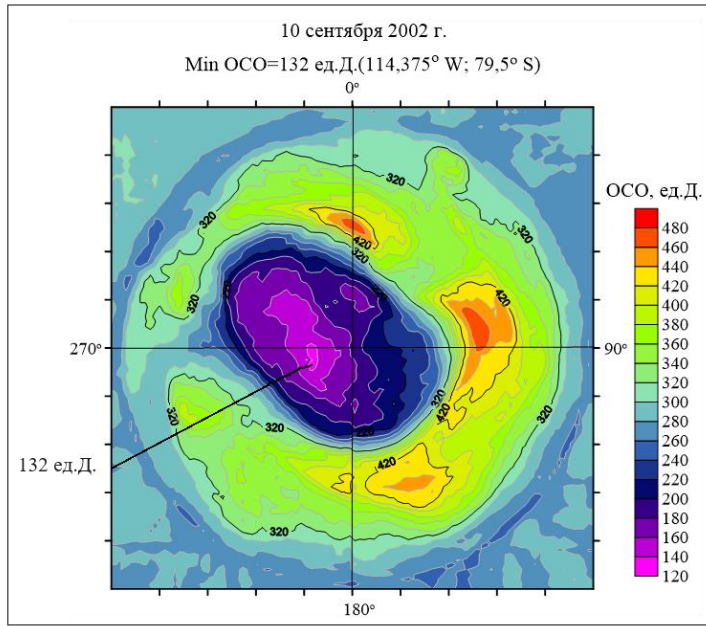
# Вариации минимумов ОСО в Антарктической озонной дыре по спутниковым данным за период 1979-2024 гг.



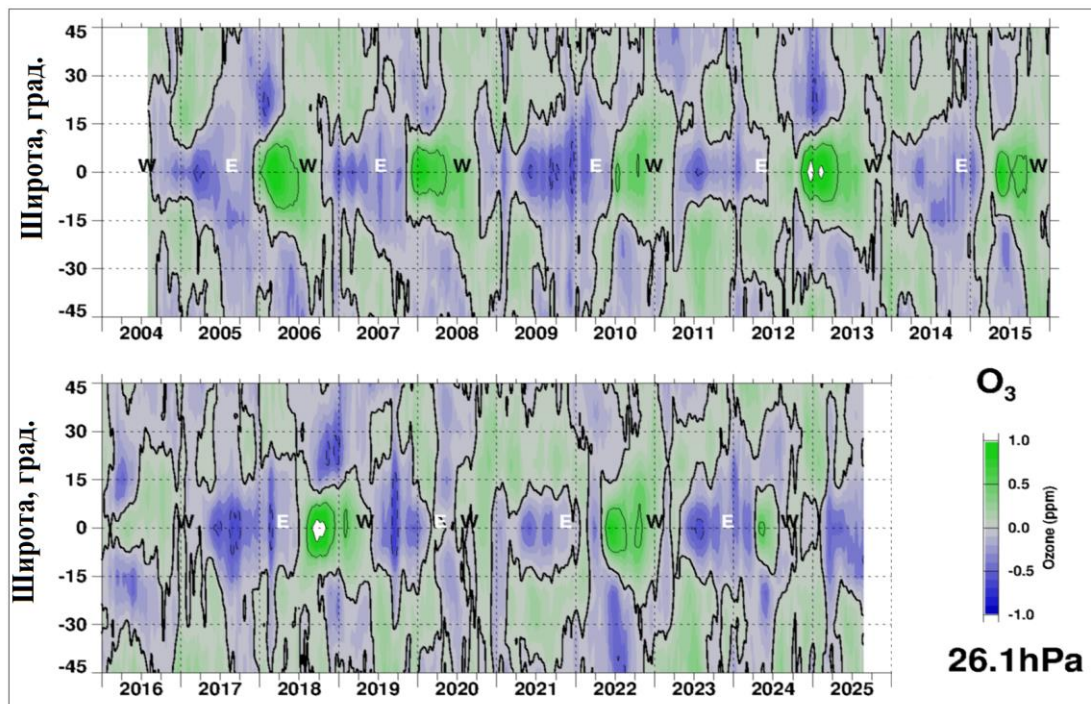
*Минимальные значения ОСО в АОД характеризуют «глубину» полярной аномалии*

С 1979 по 2024 годы минимумы ОСО варьировались от 194 ед.Д. (1979) до 85 ед.Д. (2006). В период 1979–1987 г.г. наблюдается уменьшение минимумов ОСО с 194 ед.Д. до 108 ед.Д., т.е. в 1.8 раза. А с 1996 по 2024 годы «глубина» озонной аномалии изменялась с 85 ед.Д. (2006) до 131 ед.Д. (2017). Минимумы ОСО со значением более 131 ед.Д. регистрировались в 2002 и 2017 годах.

# Карты озонной аномалии в сентябре 2002 г. и в октябре 2017 г.



# Ежегодный широтный профиль озона по среднемесячным данным микроволнового зонда MLS/Aura (NASA)

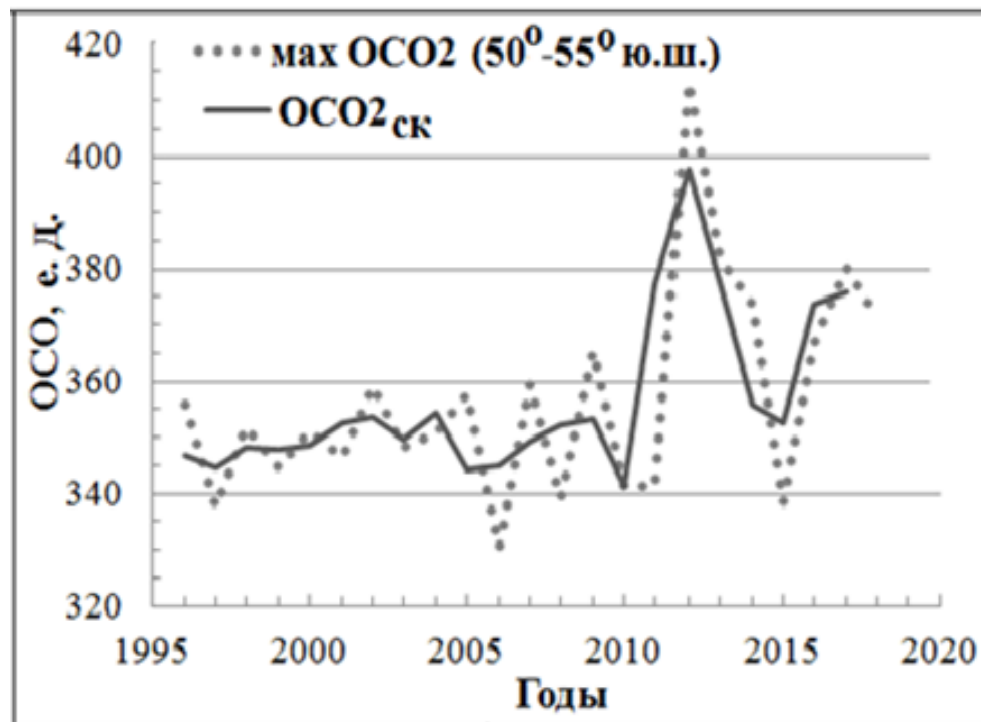


Данные распределены по пятиградусным интервалам в диапазоне 45° ю.ш. - 45° с.ш. Восточная (E) и западная (W) фазы соответствуют зональным ветрам Сингапура.

Для анализа волновой активности используются квазидвухлетние колебания (КДК) экваториального зонального ветра в широтном поясе с полушириной  $\pm 12^\circ$ . Средний период КДК  $\approx 28$  месяцев. В стратосфере данное атмосферное явление наблюдается в слое от  $\sim 100$  гПа ( $\sim 16$  км) до  $\sim 3$  гПа ( $\sim 40$  км). КДК влияют на интенсивность стратосферного полярного вихря через тропосферные процессы и распределение озона.

*P. A. Newman, N. Kramarova (NASA/GSFC) [https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data\\_services/met/qbo/o3\\_MLS\\_vLAT\\_tap\\_45S-45N\\_26.1hPa.pdf](https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/met/qbo/o3_MLS_vLAT_tap_45S-45N_26.1hPa.pdf)*

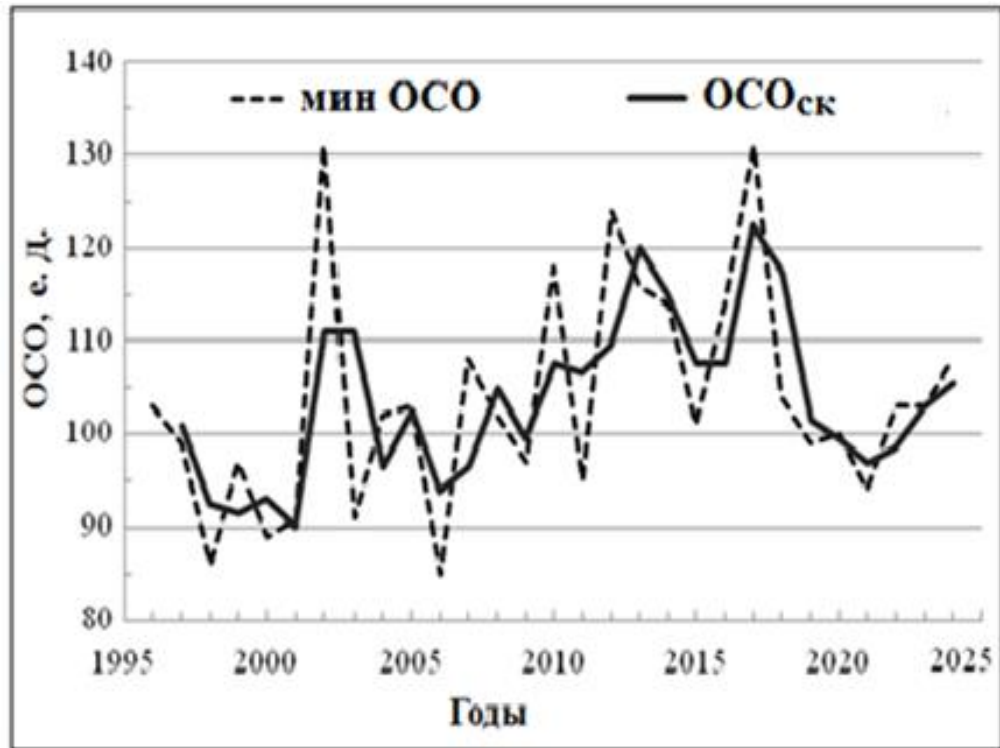
# Межгодовые вариации максимальных значений ОСО в сентябре-октябре 1996-2018 гг.



На графике исходные данные с 1996-2018 гг. — это вариации в ряде максимумов ОСО. Для сглаживания ряда максимальных значений в полосе (50°-55° ю.ш.) рассчитывалось скользящее среднее с окном 2. Сглаженный график ряда обозначен как ОСО<sub>ск</sub>.

Коэффициент корреляции между рядами максимумов ОСО и ОСО<sub>ск</sub> составил  $R_2=0,76$ . Полученный результат характеризует существенную корреляционную связь между исследуемыми рядами в 5-градусной зоне ЦВ (50°–55° ю.ш.). Вероятно, это указывает на проявление квазидвухлетней цикличности в распределении озона в изучаемой широтной зоне «кольца» циркумполярного вихря.

## Межгодовые вариации минимумов ОСО за период 1996-2024 гг.



Для сглаживания колебаний минимумов ОСО (ряд мин ОСО) и выявления закономерностей в пространственно-временной изменчивости озона в нижней стратосфере Антарктиды рассчитывалось скользящее среднее с окном 2 (ряд ОСО<sub>ск</sub>).

Максимальный коэффициент корреляции  $R_1$  между рядами минимумов ОСО и ОСО<sub>ск</sub> (сглаженного с периодом 2 года) составил 0,71. Полученный результат указывает на наличие существенной корреляционной связи между исследуемыми рядами. Таким образом, период изменения «глубины» АОД характеризуется квазидвухлетней цикличностью. И, вероятно, обусловлен воздействием квазирегулярных атмосферных колебаний (КДК).

## Заключение

При анализе значений ОСО в Южном полушарии во время существования Антарктической озоновой аномалии по спутниковым данным во временных рядах минимумов и максимумов ОСО были обнаружены квазидвухлетние колебания, модулируемые квазирегулярной периодичностью зонального ветра. Уменьшение общего содержания озона внутри АОД сопровождается увеличением количества озона в ЦВ.

Выявлены существенные колебания максимальных и минимальных значений ОСО в исследуемый период. Полагаем, что они связаны с волновой активностью в стратосфере и сменой фаз КДК, которые являются высокочастотными квазирегулярными изменениями атмосферы. При восточной фазе ОСО возрастает, а при западной – понижается. Полученные результаты позволяют анализировать процессы в системе общей циркуляции в Южном полушарии во время существования АОД на межгодовых масштабах.

**Спасибо за внимание!**