

Двадцать вторая международная конференция  
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»

# **РОЛЬ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ФАКТОРА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ АНТАРКТИЧЕСКОЙ ОЗОНОВОЙ АНОМАЛИИ**

*В. Б. Кашкин, Т. В. Рублева, К. В. Симонов, Л. М. Серебренникова*



Институт вычислительного моделирования СО РАН

Москва, 2024

## Актуальность

В середине 80–х годов XX в. в нижней стратосфере Антарктиды была обнаружена озоновая дыра (озоновая аномалия), которая до сих пор ежегодно наблюдается с сентября по ноябрь. Природа образования и пространственного развития Антарктической озоновой дыры (АОД) остаётся до сих пор научной проблемой, далекой от разрешения.

Традиционно основными механизмами, влияющими на озоновый слой в полярных широтах, считаются фотохимический и динамический. К фотохимическому относятся следующие циклы деструкции озона: хлорный, сернистый, водородный и углеродный. Появление АОД было объяснено усилением хлорного каталитического цикла разрушения озона из-за техногенных хлор-фторуглеродов (фреонов). Источником газовых примесей в Антарктическую озоносферу считается вулканический шлейф стратовулкана Эребуса. К динамическому – влияние общей циркуляции атмосферы и циркумполярного вихря, препятствующего поступлению озона во внутреннюю область аномалии.

С развитием спутниковых технологий стала доступной информация о современной тектонике Антарктиды и развитии геодинамических процессов материка. В связи с этим представляет научный интерес изучение воздействия глубинной дегазации на озоносферу над пограничной зоной между кратонной Восточной и некротонной Западной Антарктидой.

# Тектонические особенности структуры Антарктиды

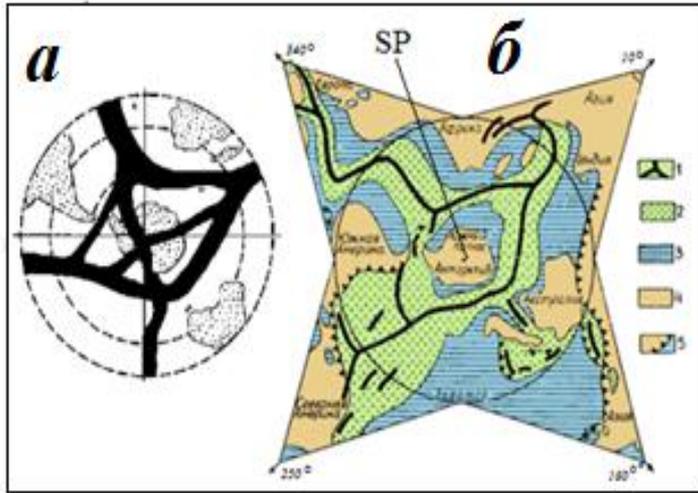


Рисунок 1 – Тектоническая структура региона

На рис. 1, *a*: соединение 3 рифтовых зон — каналов дегазации. На рис. 1, *б*: 1 — активные оси спрединга и рифтинга; 2, 3 — океаническая литосфера; 4 — континентальная литосфера; 5 — конвергентные границы, **SP** — Южный полюс.

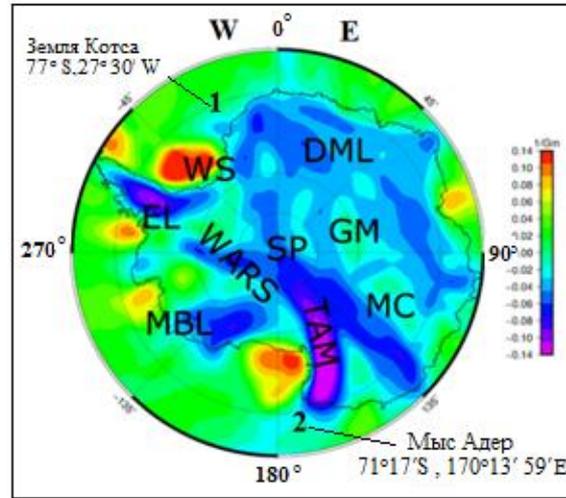


Рисунок 2 – Гравитационная карта Антарктиды по спутниковым данным GOCE

Трансантарктическая область тектономагматической активизации между Восточной кратонной (**EAC**) и Западной некратонной (**WANC**), разделенных границей (1-2) по Трансантарктическим горам (**TAM**). Длина меридионального разреза границы составляет  $\approx 100^\circ$ , а ширина  $\approx 6^\circ$ . Разрез по **EAC**, тектонической границе и **WANC** (рис. 3).



Рисунок 3 – Разрез по тектонической границе региона

# Вулканогенный источник дегазации – стратовулкан Эребус (77°32' S, 167°17'W)

Космический снимок Эребуса с открытым жерлом, вершиной с 3 кратерами и активным лавовым озером (рис. 4).

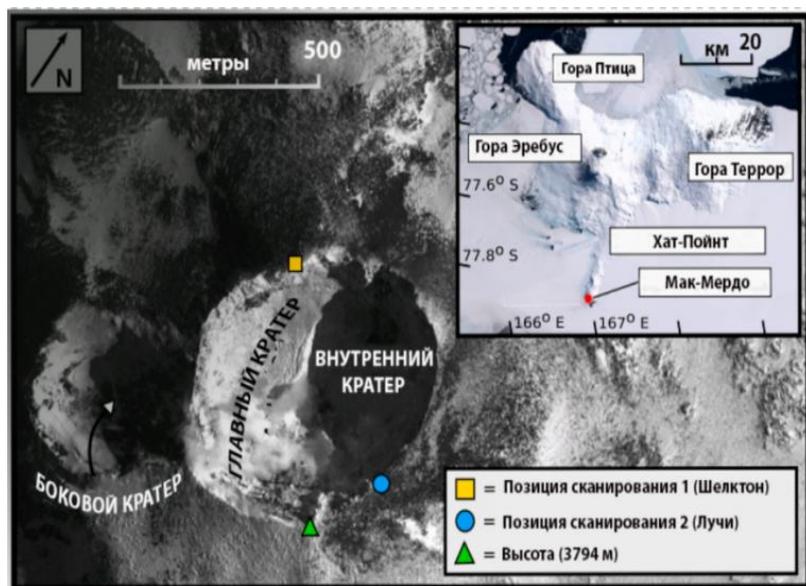


Рисунок 5

Схема магматических процессов и источников пассивной (C) и эруптивной (D) дегазации стратовулкана (рис. 5)

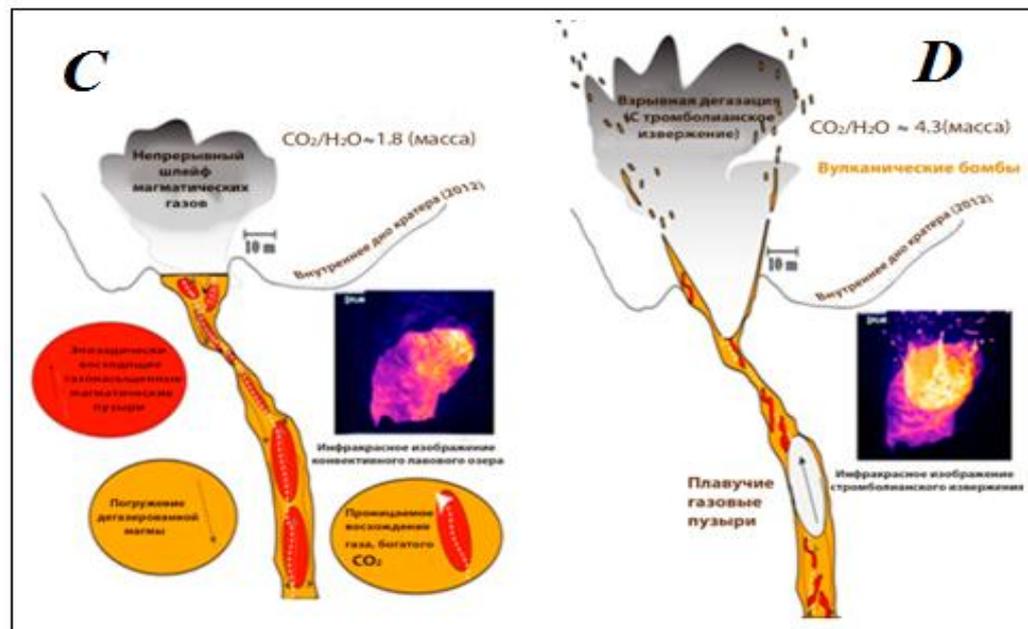


Рисунок 6

В 1985 г. зарегистрирована наибольшая вулканическая активность стратовулкана и зарегистрирована аномалия в нижней стратосфере полярных широт с минимальным общим содержанием озона 124 е.Д. (1 е.Д.=10<sup>-5</sup> м).

# Газовые примеси, выделяемые при вулканической дегазации



Рисунок 7 – Общая схема эмиссии вулканических газов в нижнюю стратосферу

Таблица 1.

Основные циклы, разрушающие озон

водородный	углеродный	хлорный	сернистый
$H_2O + h\nu \rightarrow OH + +H$ $H_2O + O_c \rightarrow 2OH;$ $CH_4 + O_c \rightarrow CH_3 + +OH.$ $OH + O_3 \rightarrow HO_2 + +O_2, HO_2 + O_T \rightarrow +OH + O_2$ $O_3 + O_T \rightarrow 2O_2$	$CO + O_3 \rightarrow CO_2 + O_2$ $CO + O_3 \rightarrow CO_2 + O_2$ $CH_4 + OH \rightarrow CH_3 + +H_2O$ $CH_4 + 4O_2 \rightarrow CH_2O + +H_2O + 2O_3$	$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$ $ClO + O_T \rightarrow Cl + O_2$ $O_3 + O_T \rightarrow 2O_2$ $CFCl_3 + h\nu \rightarrow CFCl_2 + Cl.$	$H_2S + O_3 \rightarrow S + O_2 + +H_2O$ $3H_2S + 4O_3 \rightarrow 3H_2S + O_4$ $H_2S + O_3 \rightarrow SO_2 + +H_2O$ $2H_2S + 3O_2 = 2H_2O + 2SO_2$ (при избытке кислорода)

# Антарктическая озоновая аномалия в нижней стратосфере Южного полушария по спутниковым данным OMI/AURA

3D визуализация Антарктической озоновой дыры (АОД), построенная по спутниковым данным OMI/Aura (рис. 8).

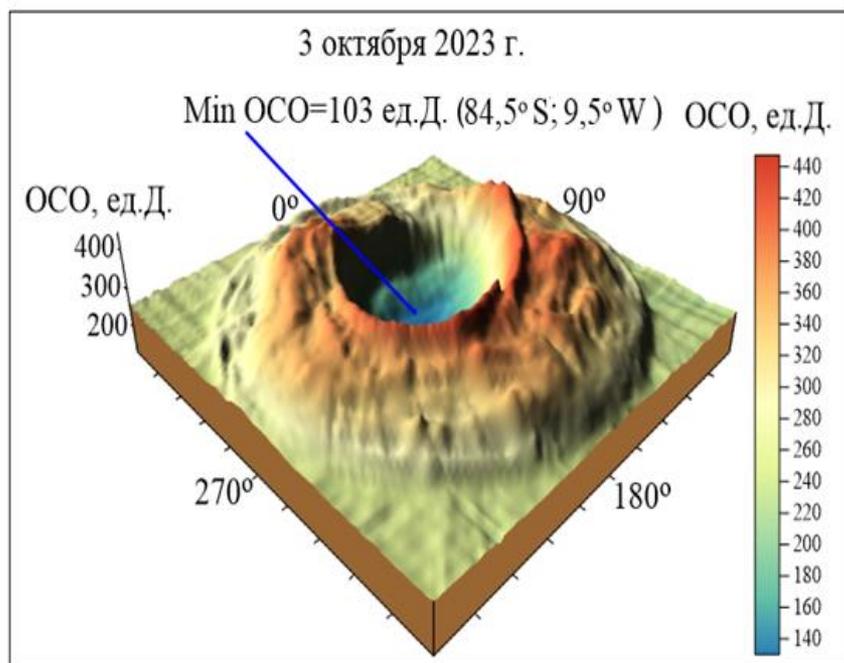


Рисунок 8

Величины, меньшие 220 е.Д., характеризуют аномальные области в озоновом слое.

Область формирования озоновой аномалии над Антарктидой находится в секторе широт (70–90° ю. ш.).

Озоновая дыра (аномалия) в Южном полушарии – это углубление в озоновом слое в стратосфере над Антарктидой ниже климатической нормы 220 е.Д..

OCO – (общее содержание озона) - толщина слоя озона в вертикальном столбе атмосферы, выделенного при нормальных условиях:  $T=0^{\circ}\text{C}$  и  $P=1013\text{ гПа}$ .

# Вариации минимумов ОСО в нижней стратосфере Антарктиды за период 2000–2024 гг. по спутниковым данным

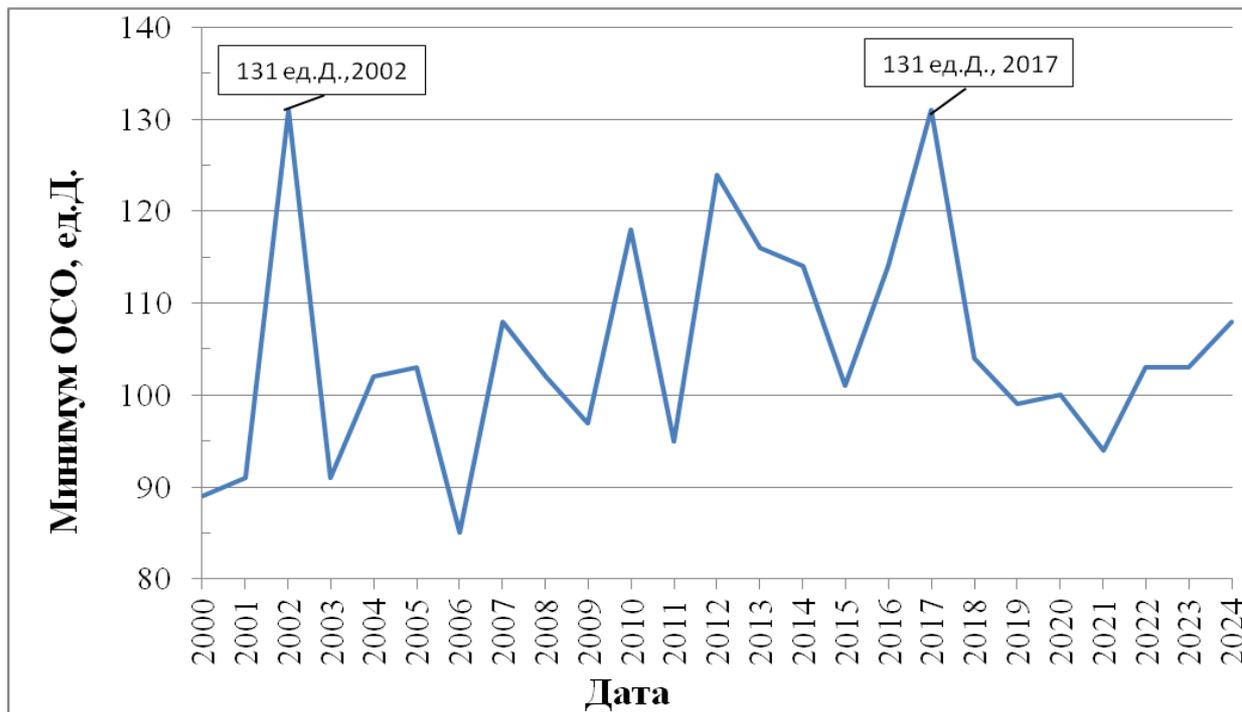
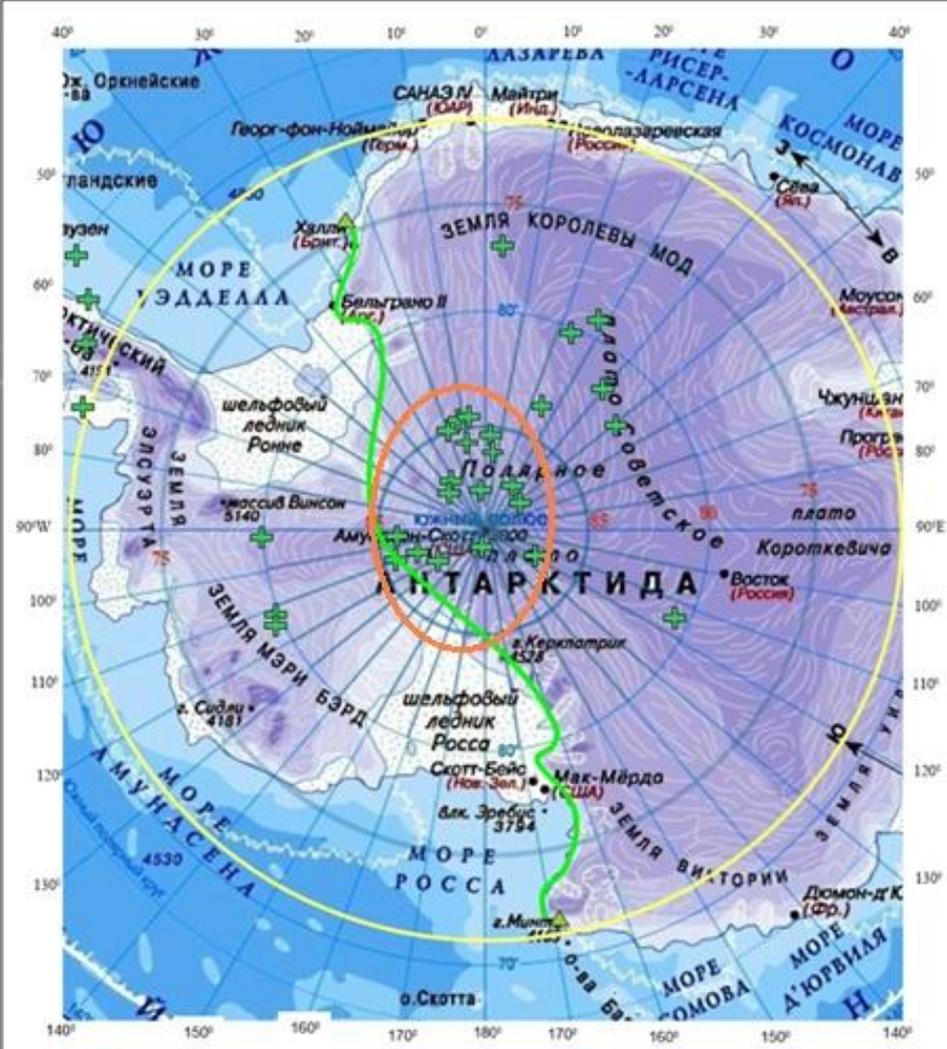


Рисунок 9 – В период 2000-2024 гг. ежегодные значения минимумов ОСО варьируются от 85 до 131 е.Д.

Выявлены особенности в формировании озоновой аномалии. Весной 2002 г. атмосферная ситуация в Антарктической озоносфере отличалась от ежегодно наблюдаемой. В 2002 г. зафиксированы 2 озоновые дыры (10 и 20 сентября) с  $\min \text{ОСО} = 131$  е.Д. С 9 по 12 октября 2018 г. регистрировались мин.значения ОСО равные 106 ед.Д. В 2019 г. озоновая дыра образовалась значительно раньше, чем в предыдущие годы, 3.09.2019 г.  $\min \text{ОСО} = 112$  е.Д.

# Цифровая карта расположения минимумов ОСО за 2000-2023 гг.

Таблица 2. Даты и координаты минимумов ОСО



№	Дата	min ОСО, е.Д	Долгота, град.	Широта, град.
1	2	3	4	5
1	29.09.2000	89	5.625E	85.5 S
2	22.09.2001	91	25.625 E	83.5 S
3	10.09.2002	132	114.375 W	79.5 S
4	26.09.2003	91	19.375 W	85.5 S
5	04.10.2004	102	94.375W	86.5 S
6	30.09.2005	103	4.500E	77.5 S
7	08.10.2006	85	52.500 E	83.5 S
8	24.09.2007	108	56.500 W	64.5 S
9	04.10.2008	102	11.500 W	87.5 S
10	26.09.2009	97	109.500 W	85.5 S
11	01.10.2010	118	42.500 W	87.5 S
12	08.10.2011	95	127.500 W	88.5 S
13	01.10.2012	124	110.500 W	79.5 S
14	29.09.2013	116	73.500 W	71.5 S
15	30.09.2014	114	16.500 E	87.5 S
16	04.10.2015	101	39.500 E	82.5 S
17	01.10.2016	114	45.500 W	87.5 S
18	09.10.2017	131	30.500 E	78.5 S
19	26.09.2018	104	59.500 W	65.5 S
20	18.08.2019	99	65.500 W	69.5 S
21	06.10.2020	100	126.500 E	87.5 S
22	30.09.2021	94	106.500 W	87.5 S
23	01.10.2022	103	43.500 E	87.5 S
24	03.10.2023	103	9.500 W	84.5 S
25	05.10.2024	108	72.500W	89.5S

Большая часть минимумов ОСО расположена вблизи Западной рифтовой зоны (WARS) в районе отрицательной гравитационной аномалии.

Рисунок 10 – Тектоническая граница между EAC и WANC схематично показана зеленой линией

# Пример аномальной динамики озоновой аномалии в сентябре 2002 г.

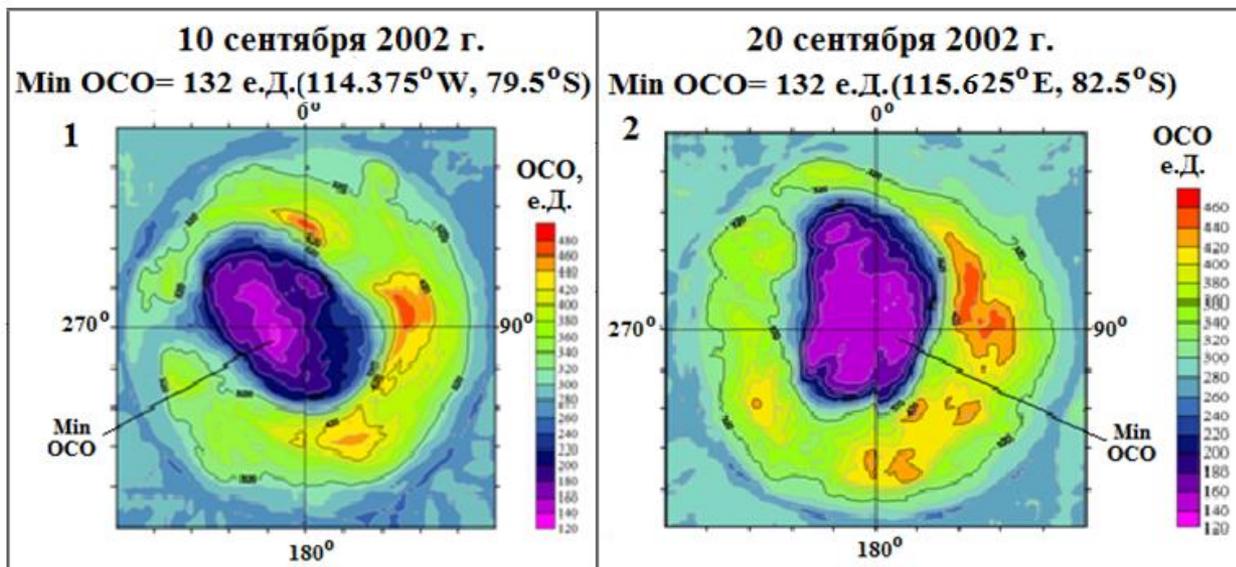


Рисунок 11 – Карты (1) и (2) озоновой аномалии, за 10 и 20 сентября соответственно.

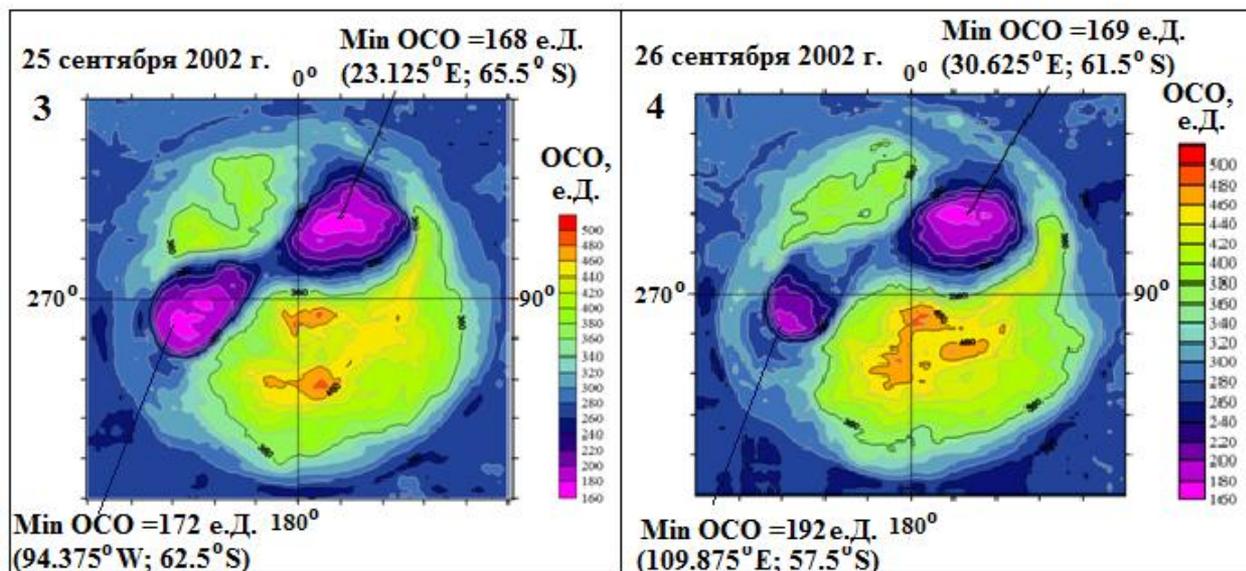


Рисунок 12 – 25 сентября наблюдается разделение АОД на 2 части по тектонической границе (3); 26 сентября – смещение частей АОД от тектонической границы в Восточную и Западную часть полярного континента (4)

# Заключение

Выполнен анализ вариаций озона в нижней стратосфере Антарктики за период 2000–2024 гг. Проведен анализ исходных озоновых данных с августа по октябрь за период 2000–2023 гг. Анализ спутниковых данных позволил выделить годы (2002, 2018, 2019) с нетипичными атмосферными сценариями развития Антарктической озоновой дыры. Например, в 2002 г. зафиксированы 2 озоновые дыры (10 и 20 сентября). Площадь первой дыры составила 17,72 млн. км<sup>2</sup>, а второй – 21,57 млн. км<sup>2</sup>. Минимальные значения ОСО составили 132 ед.Д. и 131 ед.Д., соответственно. Анализ цифровых карт показал, что 25 сентября 2002 г. произошло разделение АОД на 2 аномальных объекта по тектонической границе. Первый с большей площадью и минимумом ОСО, равным 169 ед.Д., оказался расположенным над кратонной частью, а второй с меньшей площадью и минимумом ОСО, равным 172 ед.Д., расположен в WARS и вблизи Земли Мари-Берд.

Важно отметить, что исследование влияния геодинамических процессов на развитие Антарктической озоновой дыры, особенно в годы ее аномальной динамики, не проводилось. Считаем, что это изучение необходимо для повышения точности оценок озоновой аномалии в полярных широтах Южного полушария.

# Список литературы

1. Кашкин В. Б., Рублева Т. В., Хлебопрос Р. Г. Стратосферный озон: вид с космической орбиты. – Красноярск: СФУ, 2015. 221 с.
2. Савельева Е. С., Зуев В. В., Зуева Н. Е. Вулкан Эребус – ключевой фактор усиления антарктической озоновой дыры // Химия в интересах устойчивого развития. 2014. Т. 22. № 5. С. 541–547.
3. Ebbing J., Haas P., Ferraccioli F., Pappa F., Szwillus W., Bouman J. Earth tectonics as seen by GOCE – Enhanced satellite gravity gradient imaging // Scientific reports. 2018. V. 8. No 1. 16356. 9 pp. doi: 10.1038/s41598-018-34733-9
4. Goodge J. W. Geological and tectonic evolution of the Transantarctic Mountains, from ancient craton to recent enigma // Gondwana Research. 2020. V. 80. P. 50-122.
5. An M., Wiens D.A., Zhao Y., Feng M., Nyblad, A., Kanao M., and et all. Temperature, lithosphere-asthenosphere boundary, and heat flux beneath the Antarctic Plate inferred from seismic velocities // Journal of Geophysical Research. 2015. V. 120. No 12. P. 8720-8742.
6. Добрецов Н. Л. Взаимодействие тектоники плит и тектоники плюмов: вероятные модели и типичные примеры // Геология и геофизика. 2020. Т. 61. № 5–6. С. 617–647.
7. <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>

**Спасибо за внимание!**