

**Внезапное потепление стратосферы
над Антарктидой и Южным океаном по
наблюдениям микроволнового радиометра
МТВЗА-ГЯ со спутника "Метеор-М" № 2-4
в июле-августе 2024 года**

*Л.М. Митник¹, В.П. Кулешов¹, А.В. Баранюк¹, М.Л. Митник¹
Г.Е. Евсеев¹, А.М.Стрельцов¹*

**1 Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН
Владивосток, e-mail: lm_mitnik@mail.ru**

**2 АО "Российские космические системы", 117997, г. Москва,
e-mail: EvseevGE@spacecorp.ru**

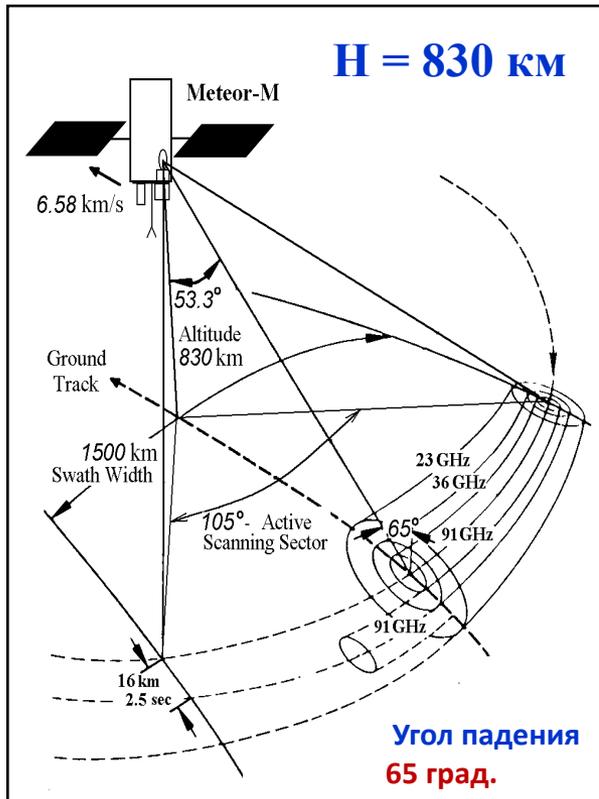
**Двадцать вторая международная конференция
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"
Москва, Институт космических исследований РАН
11-15 ноября 2024**

Южная полярная область

Детальное изучение Внезапного Потепления Стратосферы (ВСП) в Южном и Северном полушариях является важной задачей из-за многочисленных связей процессов в стратосфере с процессами в ионосфере и в тропосфере (Pedatella et al., 2018; Baldwin et al., 2020; Yamazaki et al., 2020). Опыт анализа данных, полученных микроволновым радиометром **МТВЗА-ГЯ** со спутников серии **Метеор-М** во время ВСП как в Южном, так и в Северном полушариях (Митник и др., 2020; Mitnik et al., 2018), может быть востребован вместе с измерениями других сенсоров (Zou et al., 2023) и данными моделирования.

МТВЗА-ГЯ - Микроволновый Температурно-Влажностный Зондировщик Атмосферы

Изменчивость температуры тропосферы, стратосферы и поверхности Антарктиды была прослежена по микроволновым радиометрическим измерениям со спутника **Метеор-М №2-4**.

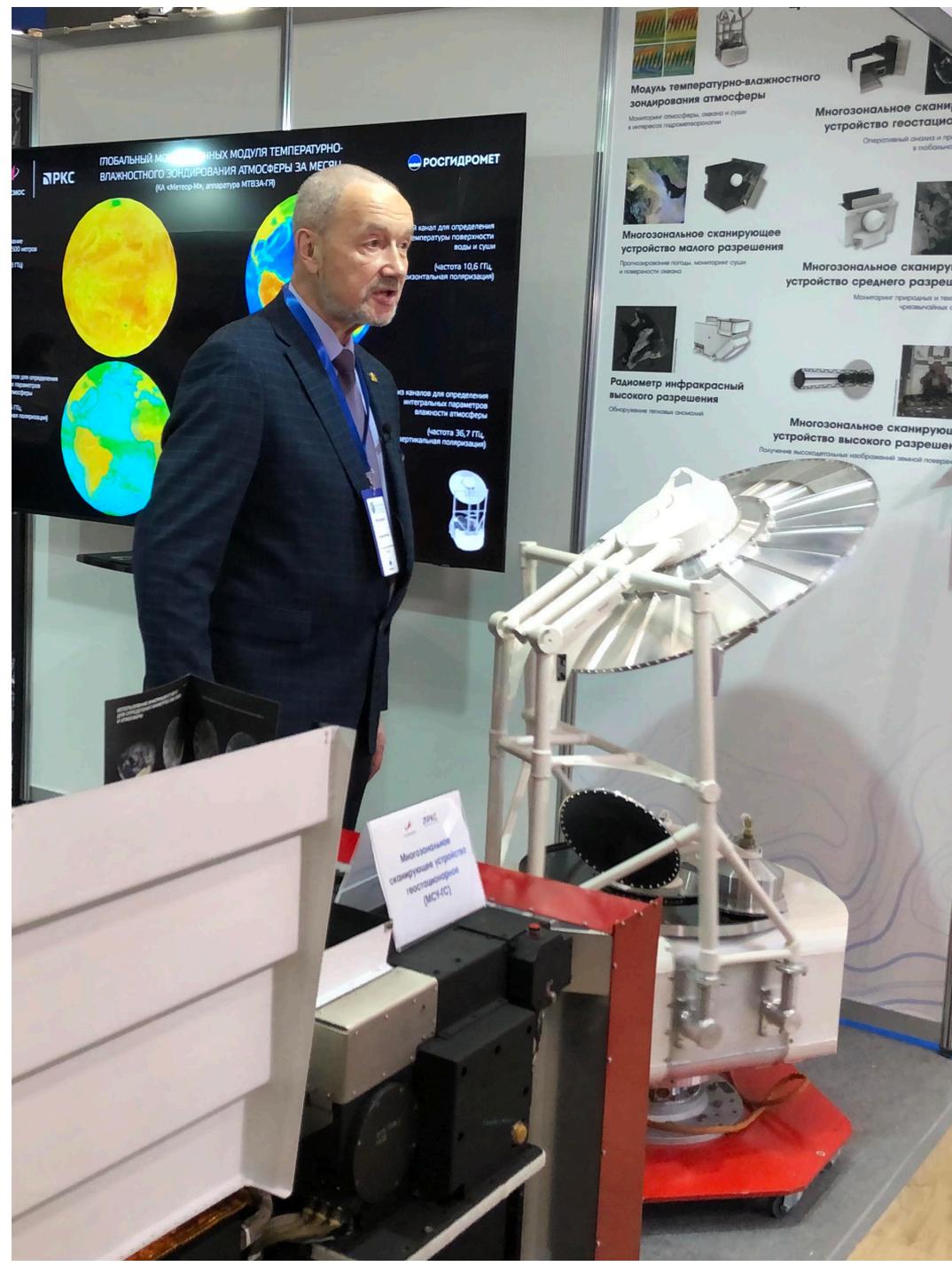


Частота, ГГц	Поле зрения, км × км	Пиксель, км × км
6.9	133 x 297	32 x 32
7.3	133 x 297	32 x 32
10.6	89 x 198	32 x 32
18.7	52 x 116	32 x 32
23.8	42 x 94	32 x 32
31.5	35 x 76	32 x 32
34.0	35 x 76	32 x 32
36.5	35 x 76	32 x 32
42.0	26 x 60	32 x 32
45.0	25 x 52	32 x 32
48.0	24 x 43	32 x 32
91.65	14 x 30	16 x 16
165.5	14 x 30	16 x 16

- 52.80/V (O1)
- 53.30/V (O2)
- 53.80/V (O3)
- 54.64/V (O4)
- 55.63/V (O5)
- $v_0 \pm 0.1/H$ (O6)
- $v_0 \pm 0.05/H$ (O7)
- $v_0 \pm 0.025/H$ (O8)
- $v_0 \pm 0.01/H$ (O9)
- $v_0 \pm 0.005/H$ (O10)

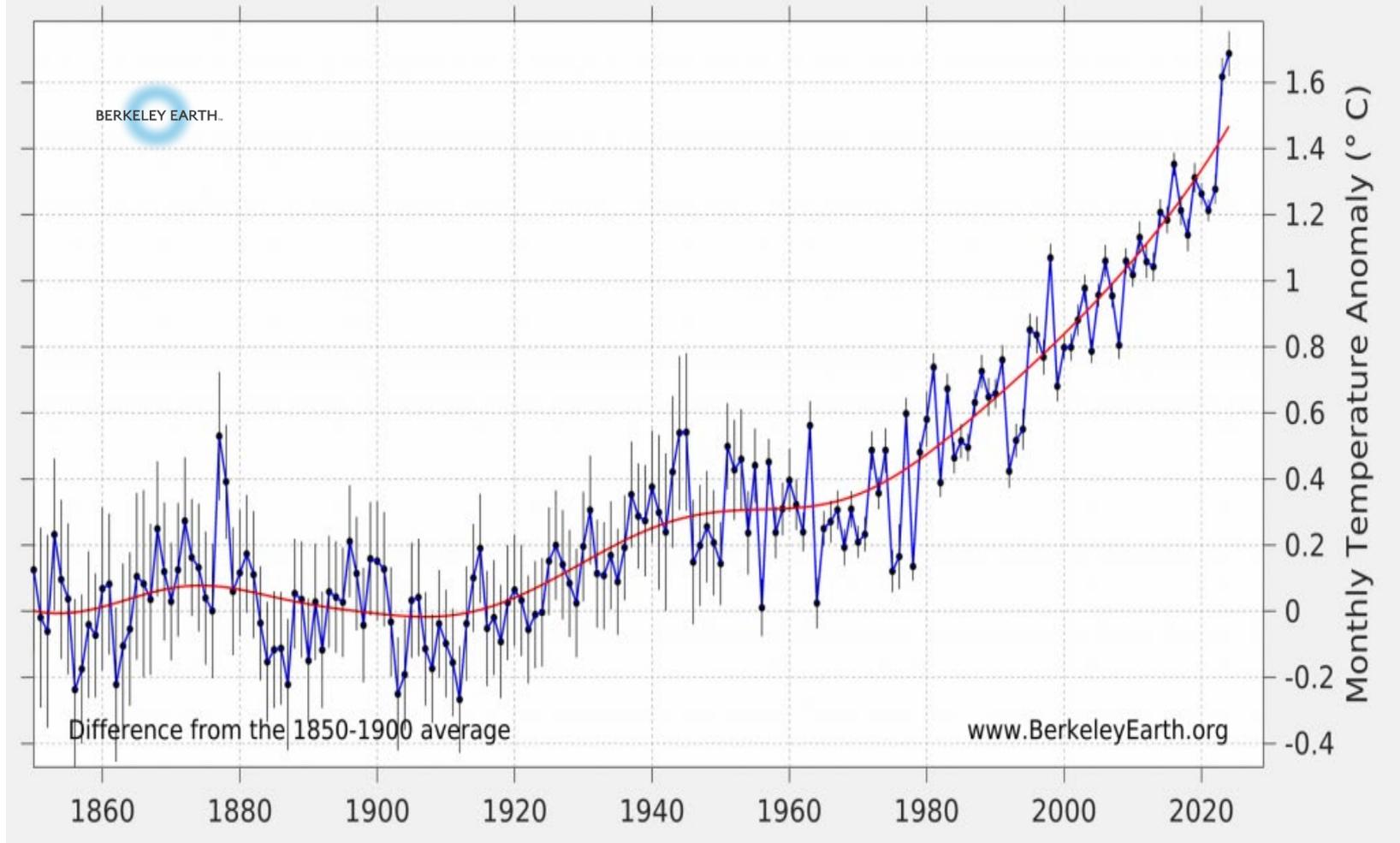
Водяной пар
$183.31 \pm 7.0/V$
$183.31 \pm 4.5/V$
$183.31 \pm 3.0/V$
$183.31 \pm 1.8/V$
$183.31 \pm 1.4/V$

29.02.2024 выведен на солнечно-синхронную орбиту
 Ширина полосы обзора **МТВЗА-ГЯ** 1750 км.
 Чувствительность каналов радиометра в космосе
 $\approx 0,3-0,5$ К/пиксель. На частотах 6.9-48, 91.65 и 165.5 ГГц
 излучение Земли принимается на вертикальной (V) и
 горизонтальной (H) поляризациях .



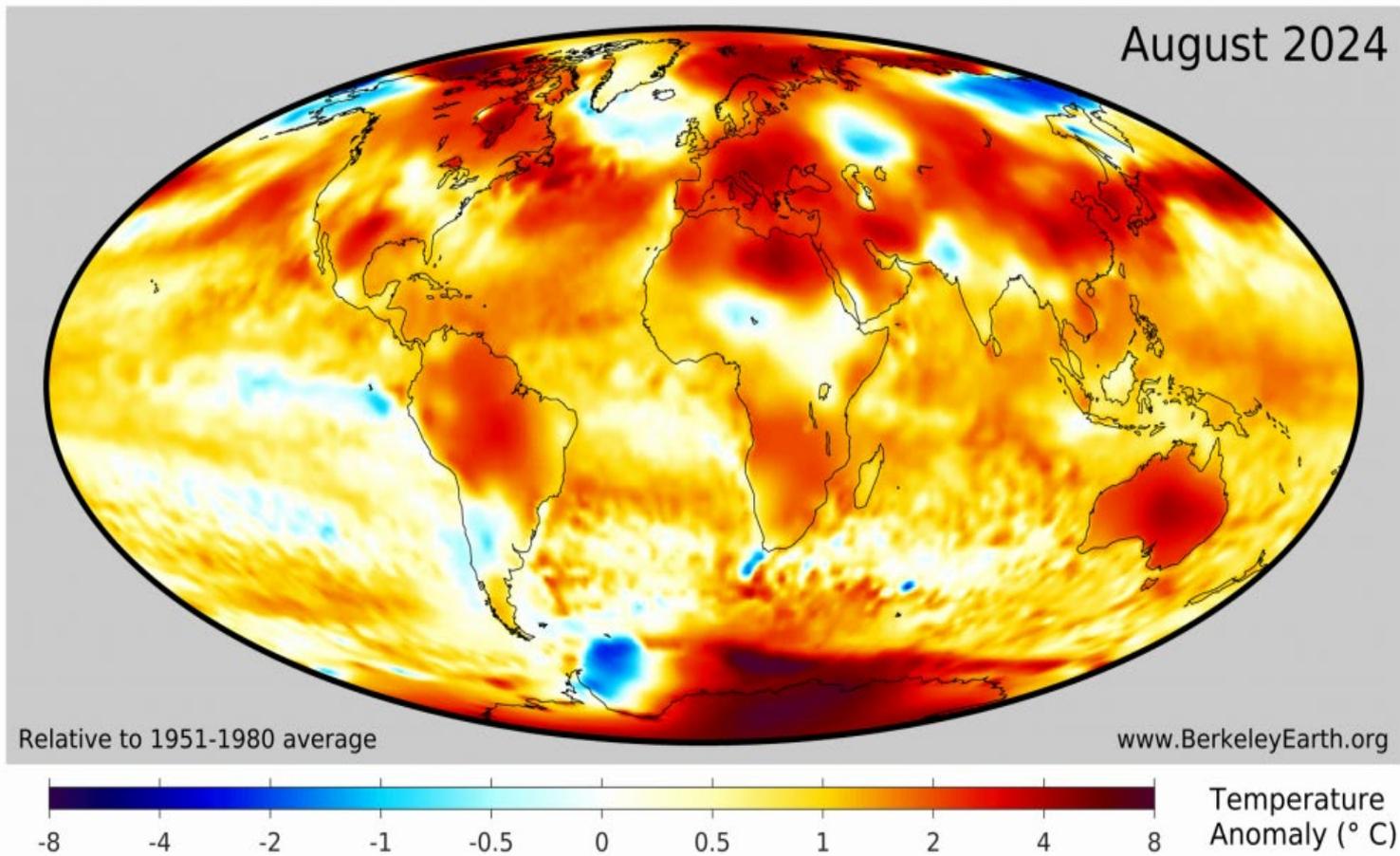
Игорь Александрович Барсуков (АО “Российские космические системы”, г. Москва) у радиометра МТВЗА-ГЯ для спутника Метеор-М №2-4 на выставке в Санкт-Петербурге 29 октября 2024 года.

Berkeley Earth - Global - August

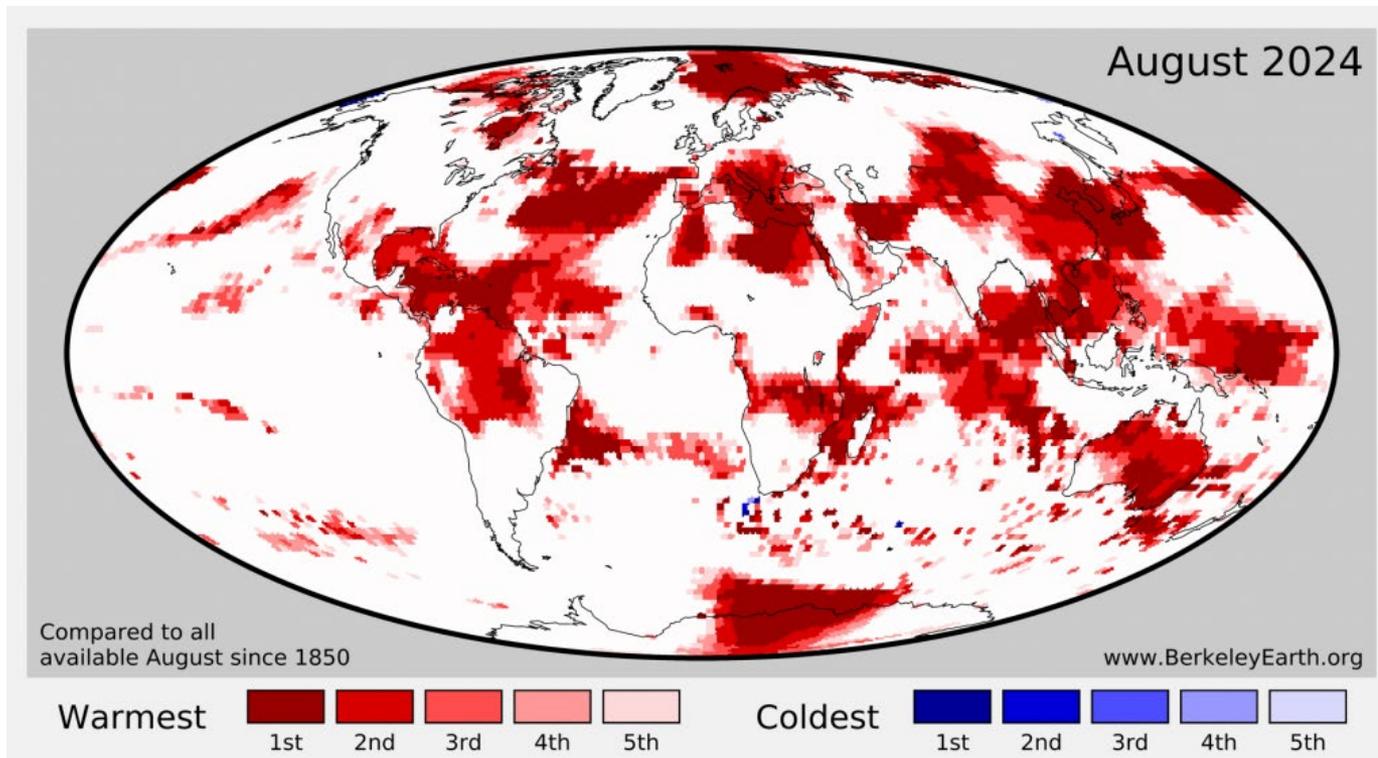


Это 15-ый месяц подряд, в котором был установлен или превышен месячный рекорд глобальной температуры, Тгл причем многие месяцы установили новые рекорды с большим отрывом. Кроме того, август 2024 года стал 14-ым месяцем подряд, когда $T_{сл} \geq 1,5$ °C, чем соответствующая среднемесячная температура 1850-1900 годов.

- *В полярных областях Земли - особенно в Северном полушарии - потепление выражено заметнее.*
- **Северный Ледовитый и Южный океаны, Гренландия, Антарктический континент и полярная атмосфера - ключевые компоненты глобальной климатической системы.**
- **Из наблюдений в последние десятилетия следует, что климат Антарктиды, считавшийся довольно стабильным, подвержен значительным изменениям.**
- **Индикаторы изменений:** площадь морского льда, температура подстилающей поверхности, тропосферы и стратосферы, количество и интенсивность экстремальных природных явлений (атмосферные реки, внезапные стратосферные потепления и др.
- **Основа для количественных оценок геофизических параметров** временные ряды пассивных и активных спутниковых измерений в видимом, ИК и микроволновом диапазонах волн, автоматических метеостанций и данных аэрологического зондирования.

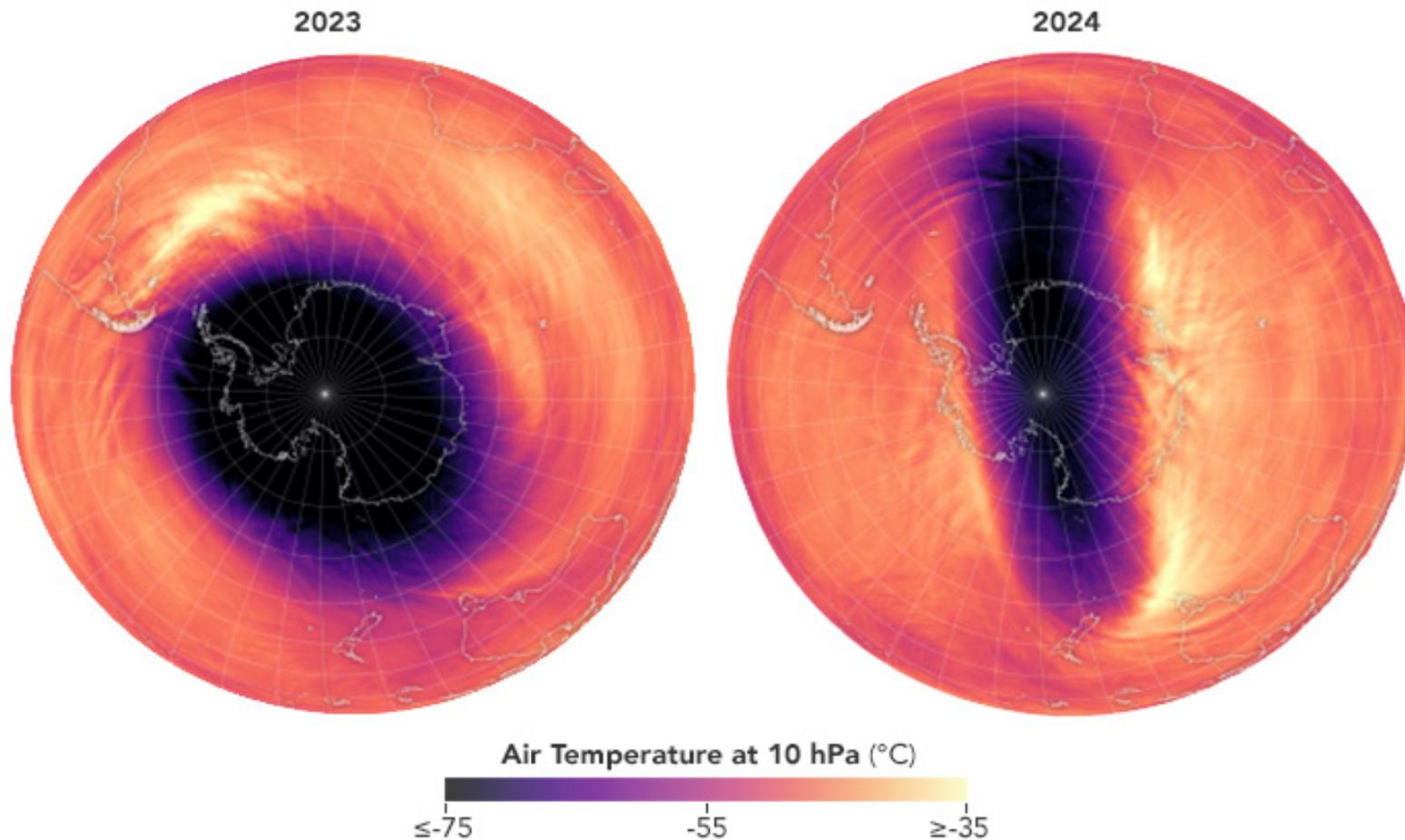


Потепление вызвано антропогенным вкладом в увеличение концентрации в атмосфере парниковых газов (CO_2 , CH_4 , что вызывает повышение температуры воздуха, земных покровов, т-ры поверхности и уровня моря. Тенденция к потеплению почти удвоилась по сравнению с периодом 1961-1990 гг. В последние годы наблюдается заметное увеличение числа экстремальных явлений: тайфунов, наводнений, засух, волн жары и др.

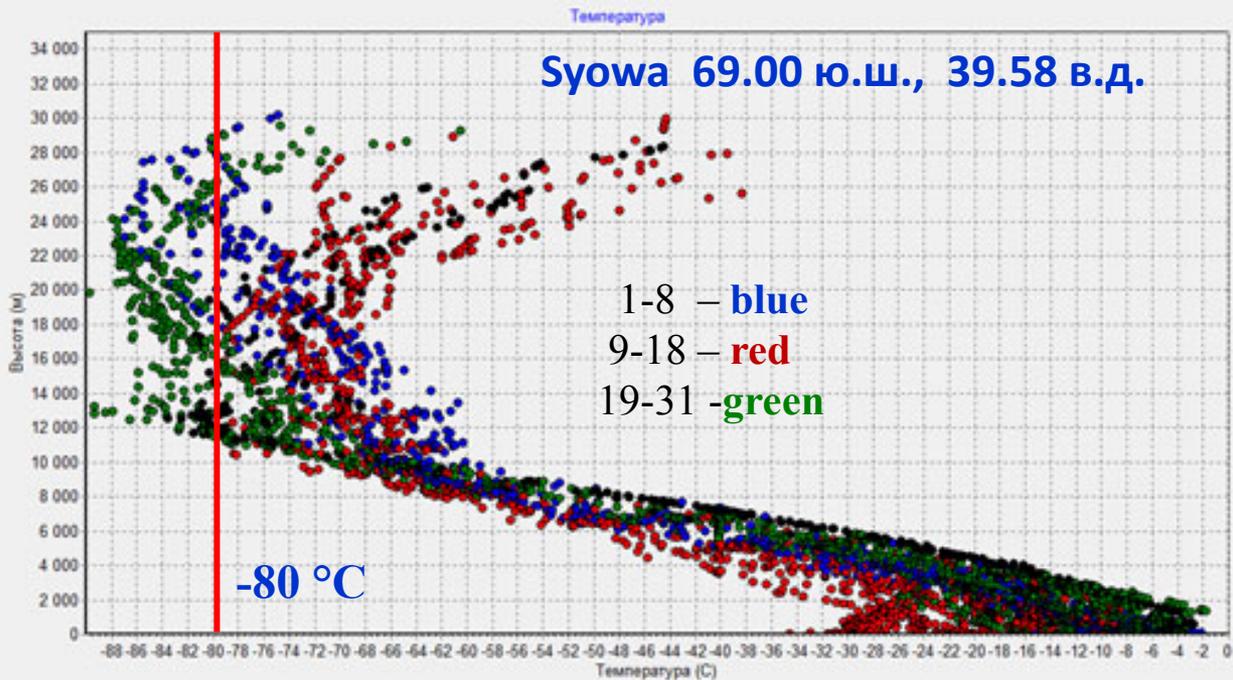


На суше 2024 год стал самым теплым августом за всю историю наблюдений. Средняя температура на суше была на $2,37 \pm 0,11$ °C выше средней температуры 1850-1900 гг. Это на $0,29$ °C превысило предыдущий августовский рекорд, установленный в 2023 году.

- В июле-августе 2024 обнаружен резкий рост температуры стратосферы (NASA). В июле обычно температура стратосферы над Антарктидой около $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако 7 июля температура на высоте $\approx 30\text{ км}$ (10 гПа) возросла на $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. К 22 июля она понизилась, а 5 августа поднялась на $17\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Внезапное стратосферное потепление (ВСП) представляет собой явление, при котором температура полярной стратосферы за несколько дней возрастает на десятков градусов (вплоть до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- ВСП называется “главным”, если на уровне 10 гПа (30–32 км) средний зональный поток в полярных широтах (к северу или к югу от 60° или ниже) меняет направление на противоположное, и “малым», если направление потока не меняется.
- В Южном полушарии потепления происходят редко. Главными ВСП были потепления в сентябре 2002 и сентябре 2019 г. При потеплении над Антарктидой полярный вихрь удлинялся и ослабевал. Рекордное потепление в стратосфере в июле 2024 года нарушило полярный вихрь и повлияло на глобальные погодные условия и уровень озона во всем Южном полушарии.



**Температуры средней стратосферы на высоте ≈ 30 км (давление 10 гПа) за 5 августа 2023 года (слева) и 5 августа 2024 года (справа).
В 2024 г. полярный вихрь удлинён и температура вблизи от полюса выше.
Поля температуры построено по модели NASA GEOS forward processing (GEOS-FP). . Модель ассимилирует спутниковые, самолетные и наземные наблюдения.**

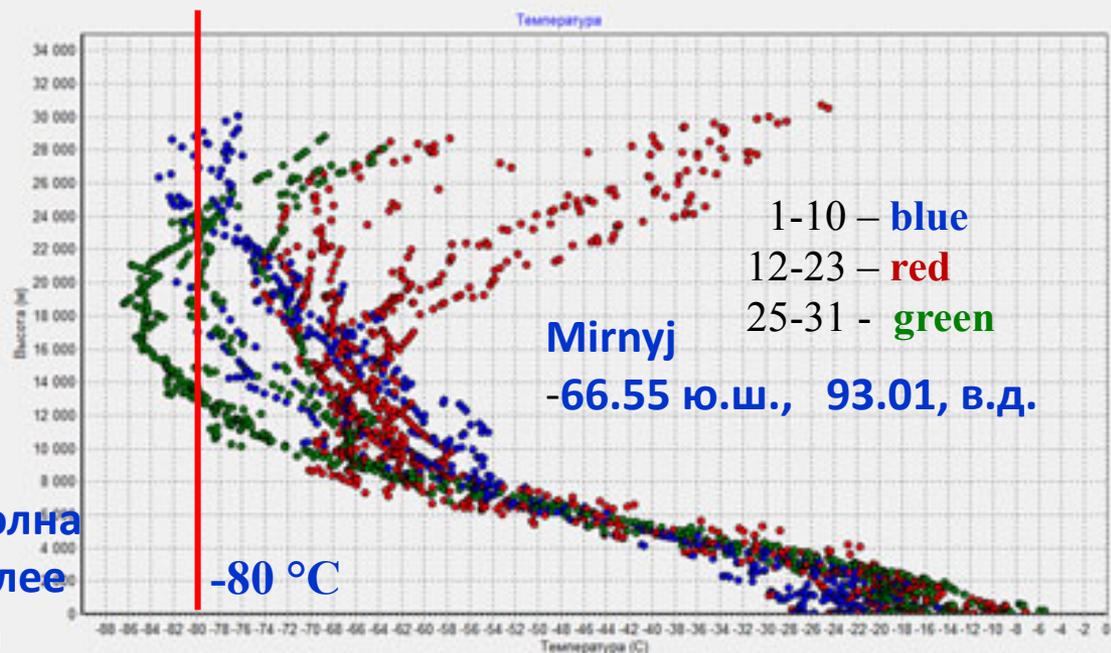


Потепление
стратосферы над
Антарктидой в
июле 2024 года
по данным
радиозондов,
выпущенных на
станциях Syowa и
Мирный

Станции радиозондирования
атмосферы на побережье Антарктиды

89532	-69.00	39.58	21	Syowa Obs
89571	-68.57	77.97	22	Davis Obs
89592	-66.55	93.01	40	Mirnyj Obs
89664	-77.85	166.66	10	McMurdo
89611	-66.28	110.52	42	Casey Obs
89009	-90.00	0.00	2835	Am-Scott Obs
89564	-67.60	62.88	16	Mawson Obs

Syowa в конце июля видна вторая волна потепления. Mirnyj и Davis в зоне более позднего наступления второй волны



Изменчивость температуры тропосферы, стратосферы и поверхности Антарктиды была прослежена по микроволновым радиометрическим измерениям со спутника **Метеор-М №2-4.**

(Спутник был выведен на солнечно-синхронную орбиту высотой 830 км 29 февраля 2024 года).

Временные ряды ежедневных изображений Южной полярной области на частотах усовершенствованного радиометра **МТВЗА-ГЯ (40 каналов в диапазоне частот от 6,9 до 190 ГГц) визуализируют изменчивость:**

- температуры различных слоев тропосферы и стратосферы,**
- содержания в атмосфере водяного пар, воды и ледяных частиц в циклонах и атмосферных реках и**
- ледяного покрова вокруг континента.**

При обработке, анализе и интерпретация спутниковых данных используется модель переноса излучения в системе атмосфера- поверхность. Яркостные температуры рассчитываются по следующему выражению

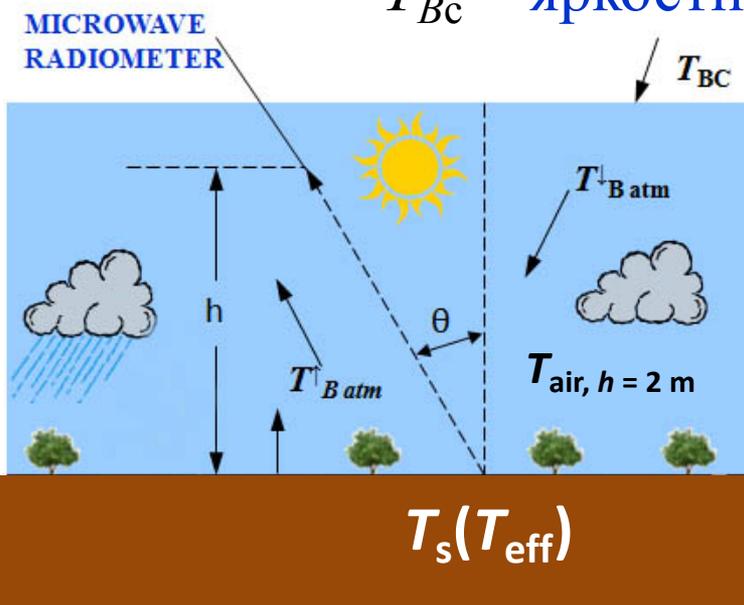
$$T_B^{V,H}(\nu, \theta) = T_{Bsurface}^{V,H}(\nu, \theta)e^{-\tau(\nu, \theta)} + T_{Batm}^{\uparrow}(\nu, \theta) + T_{Batm}^{\downarrow}(\nu, \theta)[1 - \kappa^{V,H}(\nu, \theta)]e^{-\tau(\nu, \theta)} + T_C[1 - \kappa^{V,H}(\nu, \theta)]e^{-2\tau(\nu, \theta)}$$

$T_{Bsurface}^{V,H}(\nu, \theta) = \kappa^{V,H}(\nu, \theta)T_S$ - яркостная температура поверхности

$T_{Batm}^{\uparrow}(\nu, \theta)$ - восходящая яркостная температура атмосферы

$T_{Batm}^{\downarrow}(\nu, \theta)$ - нисходящая яркостная температура атмосферы

T_{BC} - яркостная температура реликтового излучения



Коэффициент излучения поверхности $\kappa(\nu, \theta)$ – функция частоты ν , поляризации (V, H), угла падения θ , диэлектрической проницаемости, шероховатости поверхности и др.

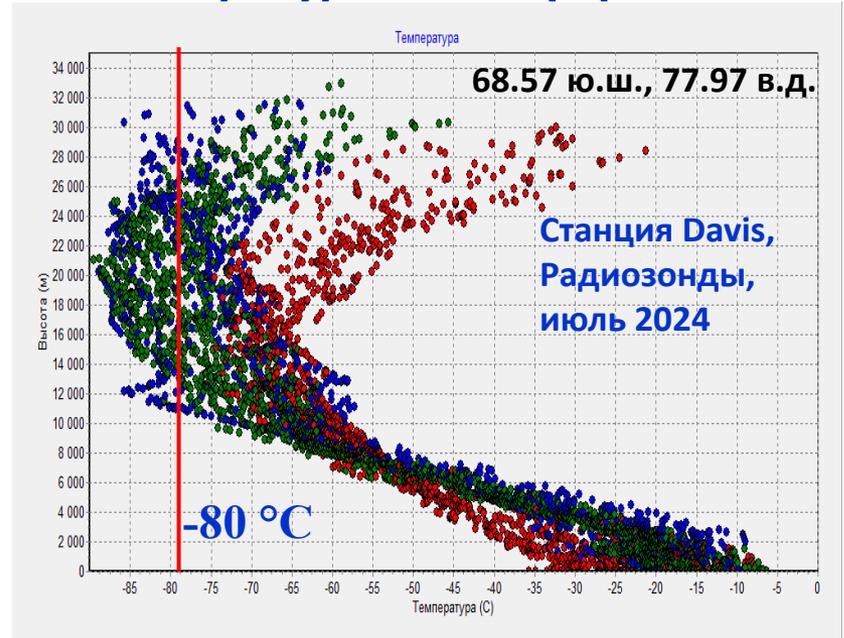
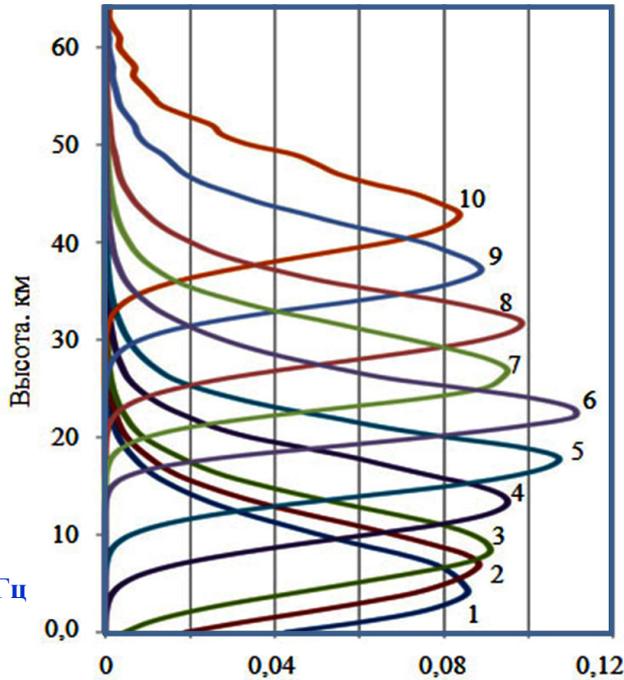
Диэлектрическая проницаемость зависит от частоты, температуры, минерального состава, размеров частиц, влажности и др.

(океан, лед, земные покровы, растительность)

Восстановление распределения температуры атмосферы

- 52.80/V (O1)
- 53.30/V (O2)
- 53.80/V (O3)
- 54.64/V (O4)
- 55.63/V (O5)
- $\nu_0 \pm 0.1/H$ (O6)
- $\nu_0 \pm 0.05/H$ (O7)
- $\nu_0 \pm 0.025/H$ (O8)
- $\nu_0 \pm 0.01/H$ (O9)
- $\nu_0 \pm 0.005/H$ (O10)

$$\nu_0 = 57,290344 \pm 0,322 \text{ ГГц}$$



Вертикальные профили температуры атмосферы. 1-12 июля – синие точки, 13-20 июля – красные и 21-31 июля - зеленые точки

Яркостная температура уходящего излучения атмосферы

$$T_{\text{Batm}}^{\uparrow}(\nu, \theta) = \int T(h) K(\nu, h, \theta) dh$$

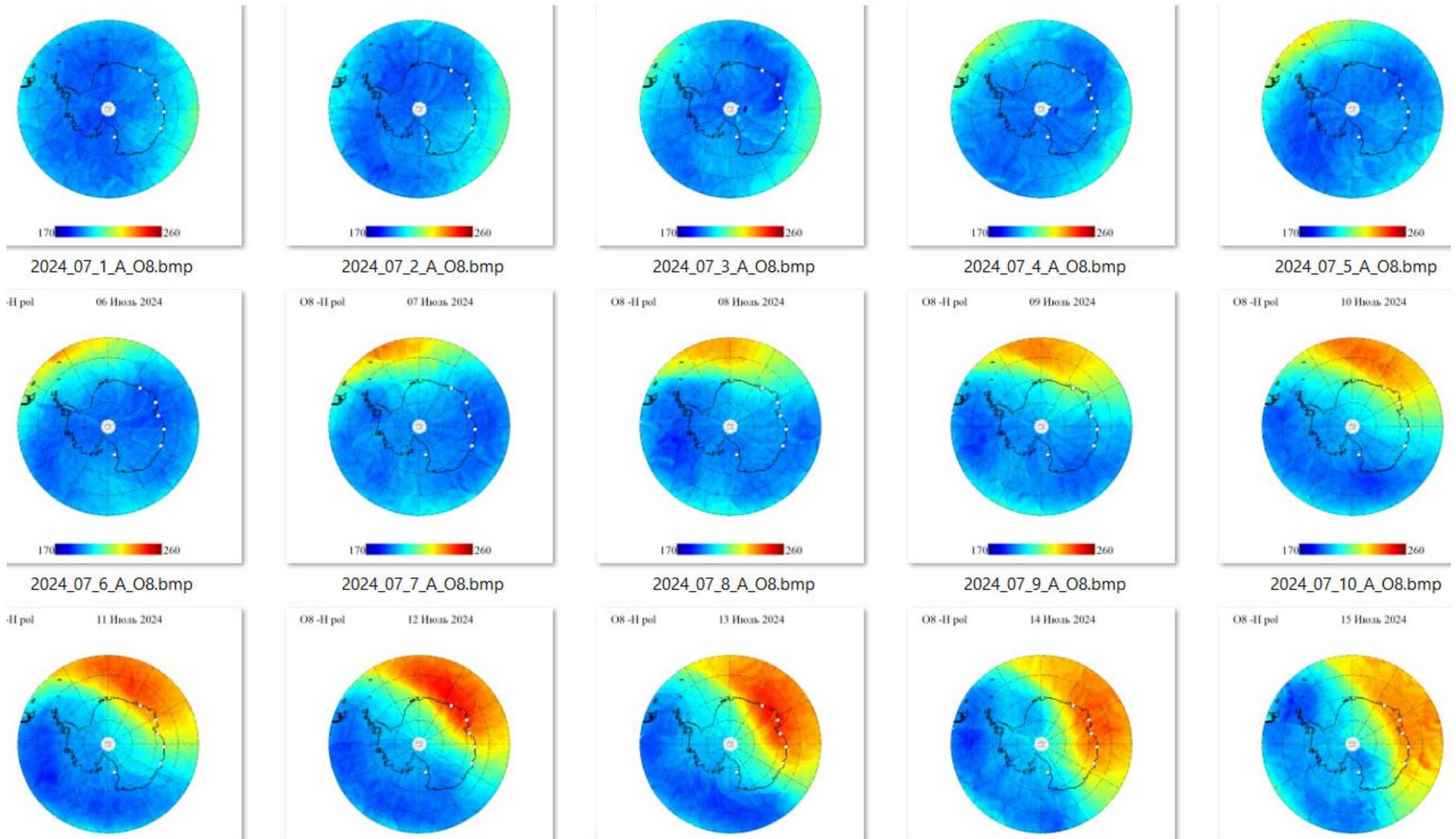
Весовая функция

$$K(\nu, h, \theta) = \gamma(\nu, h, \theta) e^{-\int_h^{\infty} \gamma(\nu, h') \sec \theta dh'} \sec \theta$$

$$T_B^{V,H}(\nu, \theta) = T_{B\text{surface}}^{V,H}(\nu, \theta) e^{-\tau(\nu, \theta)} + T_{\text{Batm}}^{\uparrow}(\nu, \theta) + T_{\text{Batm}}^{\downarrow}(\nu, \theta) [1 - \kappa^{V,H}(\nu, \theta)] e^{-\tau(\nu, \theta)} + T_C [1 - \kappa^{V,H}(\nu, \theta)] e^{-2\tau(\nu, \theta)}$$

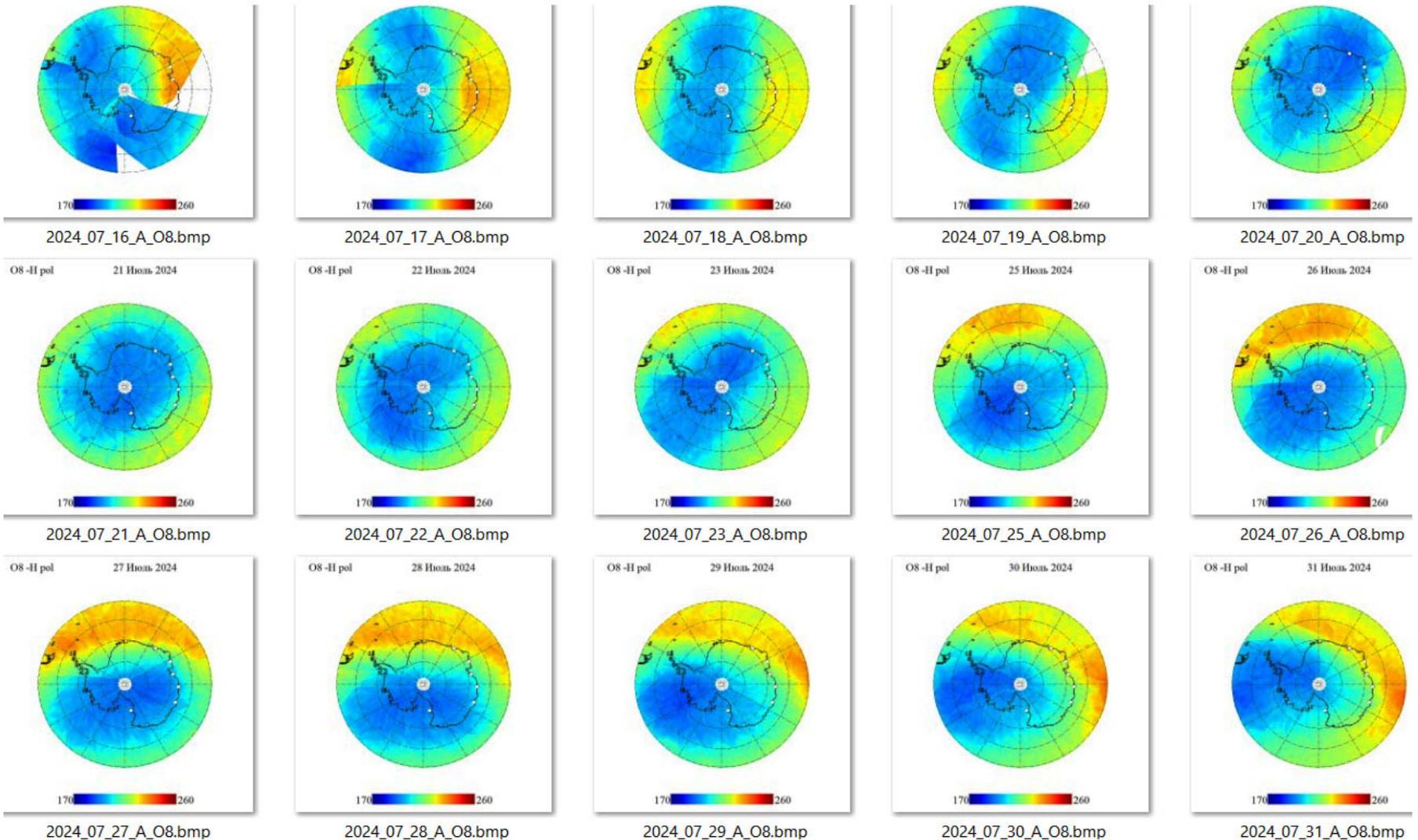


Южная полярная область



Изменчивость температуры стратосферы на частоте $57,290344 \pm 0,322 \pm 0,025$ ГГц по измерениям МТВЗА-ГЯ на восходящих витках 1-15 июля 2024 года

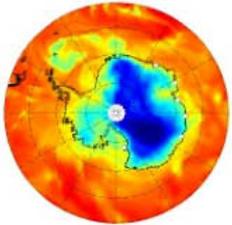
Южная полярная область



Изменчивость температуры стратосферы на частоте $57,290344 \pm 0,322 \pm 0,025$ ГГц года по измерениям МТВЗА-ГЯ на восходящих витках 16-31 июля 2024

Южная полярная область

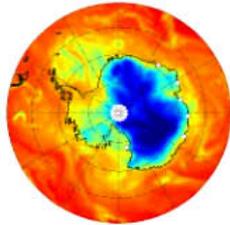
183±7 GHz -V pol 01 Июль 2024



140 260

2024_07_1_A_183+-7.bmp

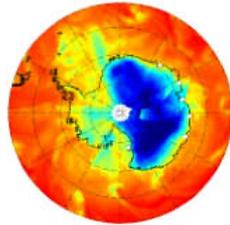
183±7 GHz -V pol 02 Июль 2024



140 260

2024_07_2_A_183+-7.bmp

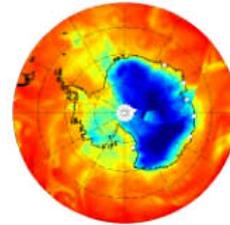
183±7 GHz -V pol 03 Июль 2024



140 260

2024_07_3_A_183+-7.bmp

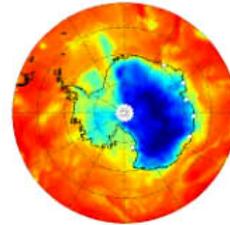
183±7 GHz -V pol 04 Июль 2024



140 260

2024_07_4_A_183+-7.bmp

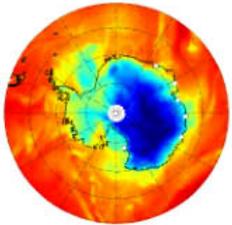
183±7 GHz -V pol 05 Июль 2024



140 260

2024_07_5_A_183+-7.bmp

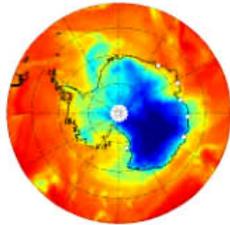
183±7 GHz -V pol 06 Июль 2024



140 260

2024_07_6_A_183+-7.bmp

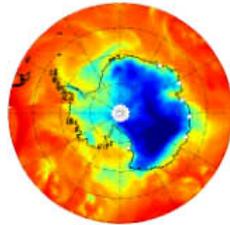
183±7 GHz -V pol 07 Июль 2024



140 260

2024_07_7_A_183+-7.bmp

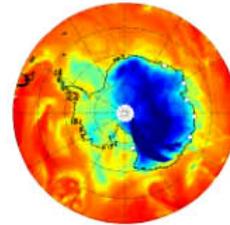
183±7 GHz -V pol 08 Июль 2024



140 260

2024_07_8_A_183+-7.bmp

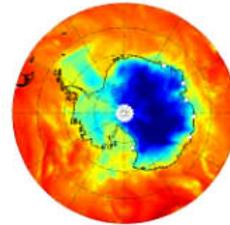
183±7 GHz -V pol 09 Июль 2024



140 260

2024_07_9_A_183+-7.bmp

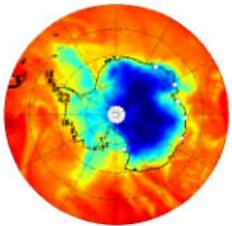
183±7 GHz -V pol 10 Июль 2024



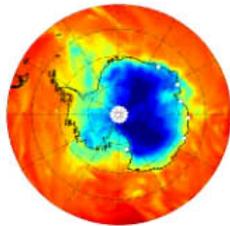
140 260

2024_07_10_A_183+-7.bmp

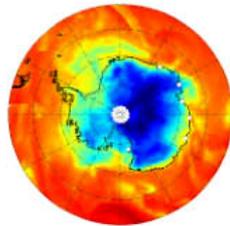
183±7 GHz -V pol 11 Июль 2024



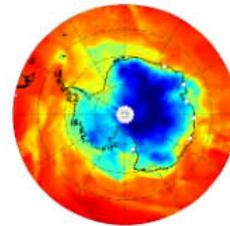
183±7 GHz -V pol 12 Июль 2024



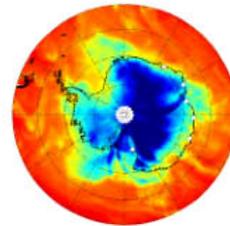
183±7 GHz -V pol 13 Июль 2024



183±7 GHz -V pol 14 Июль 2024

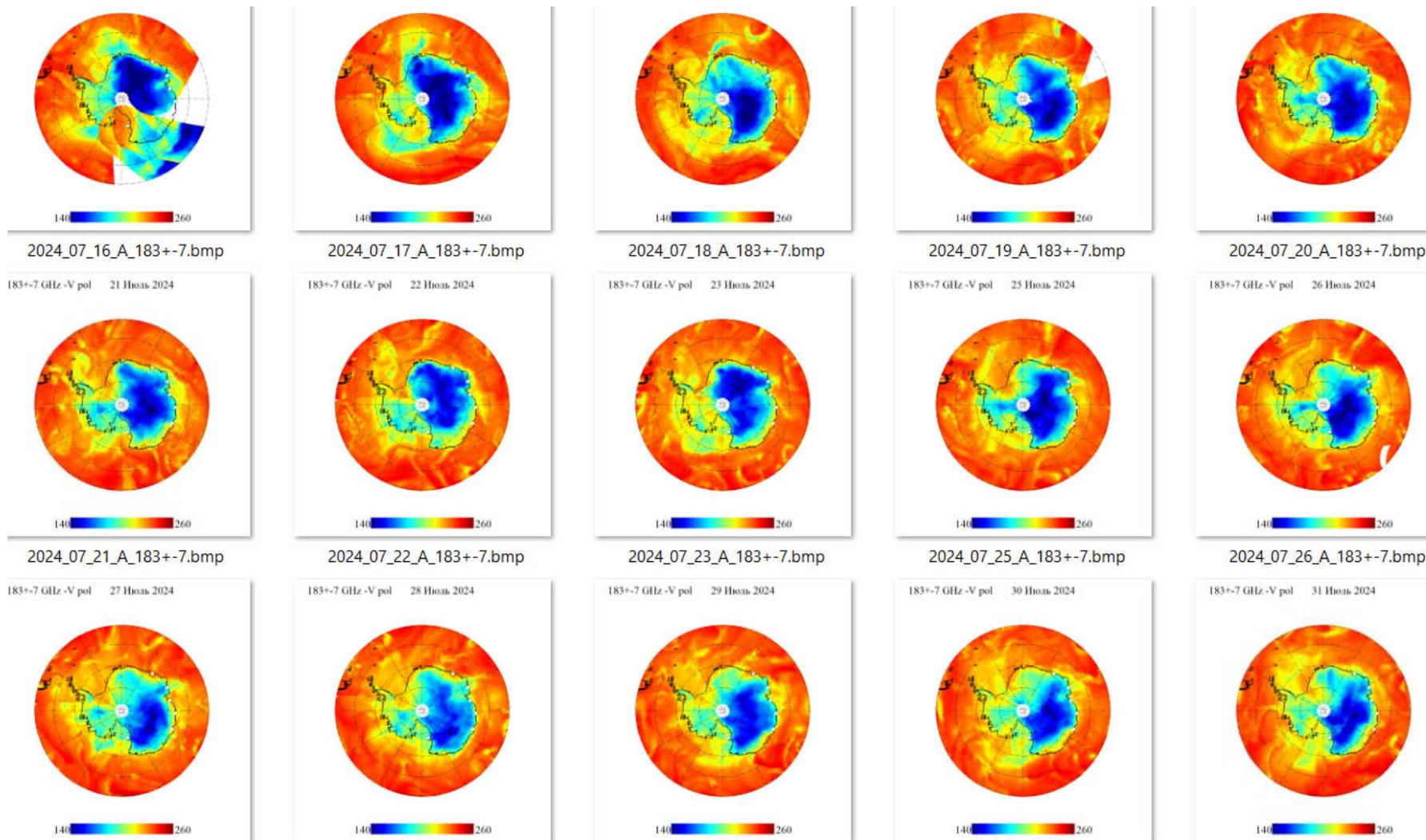


183±7 GHz -V pol 15 Июль 2024



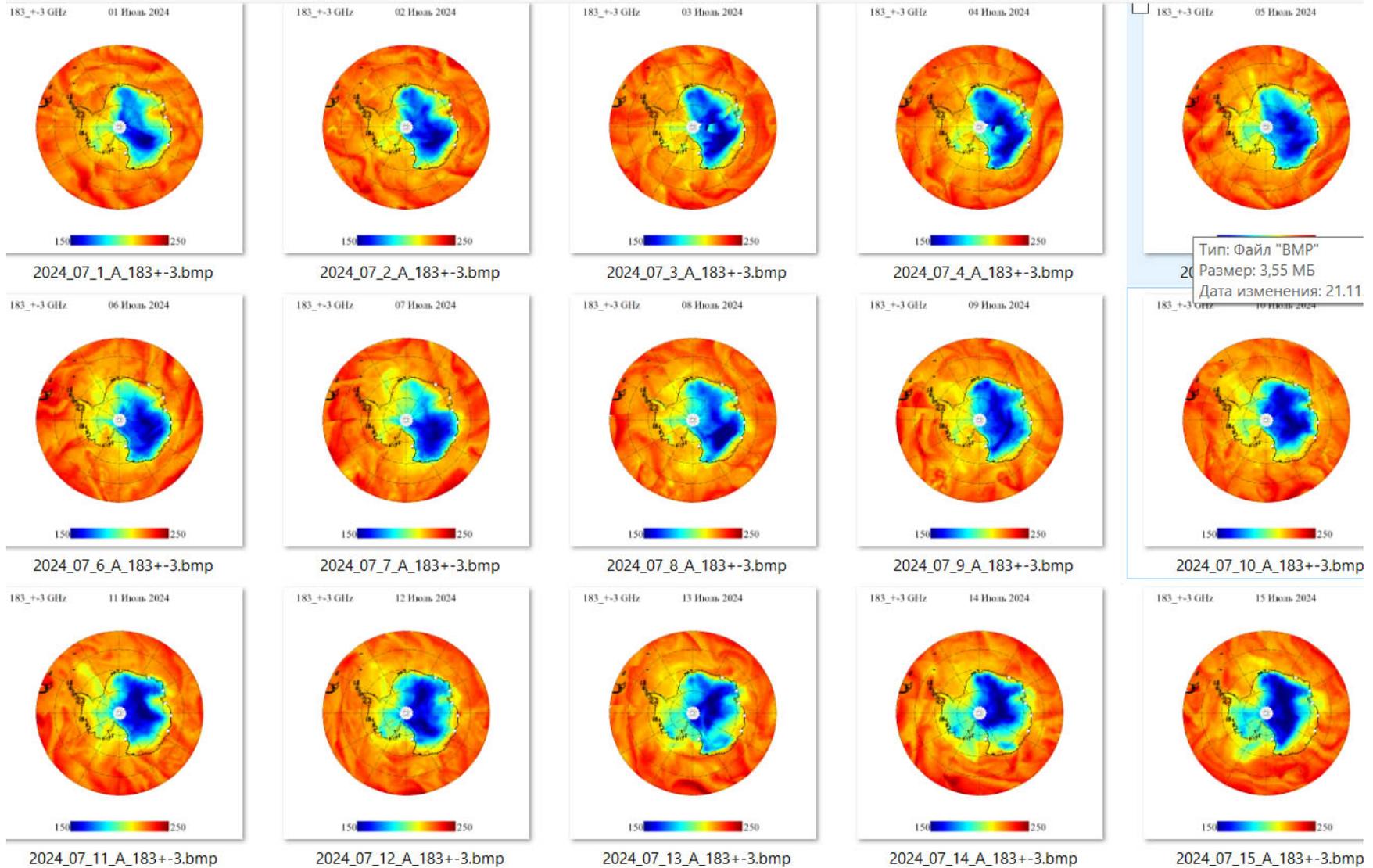
Изменчивость яркостной температуры системы поверхность-атмосфера на частоте $183,3 \pm 7$ ГГц по измерениям МТВЗА-ГЯ 1-15 июля 2024 года на восходящих витках

Южная полярная область



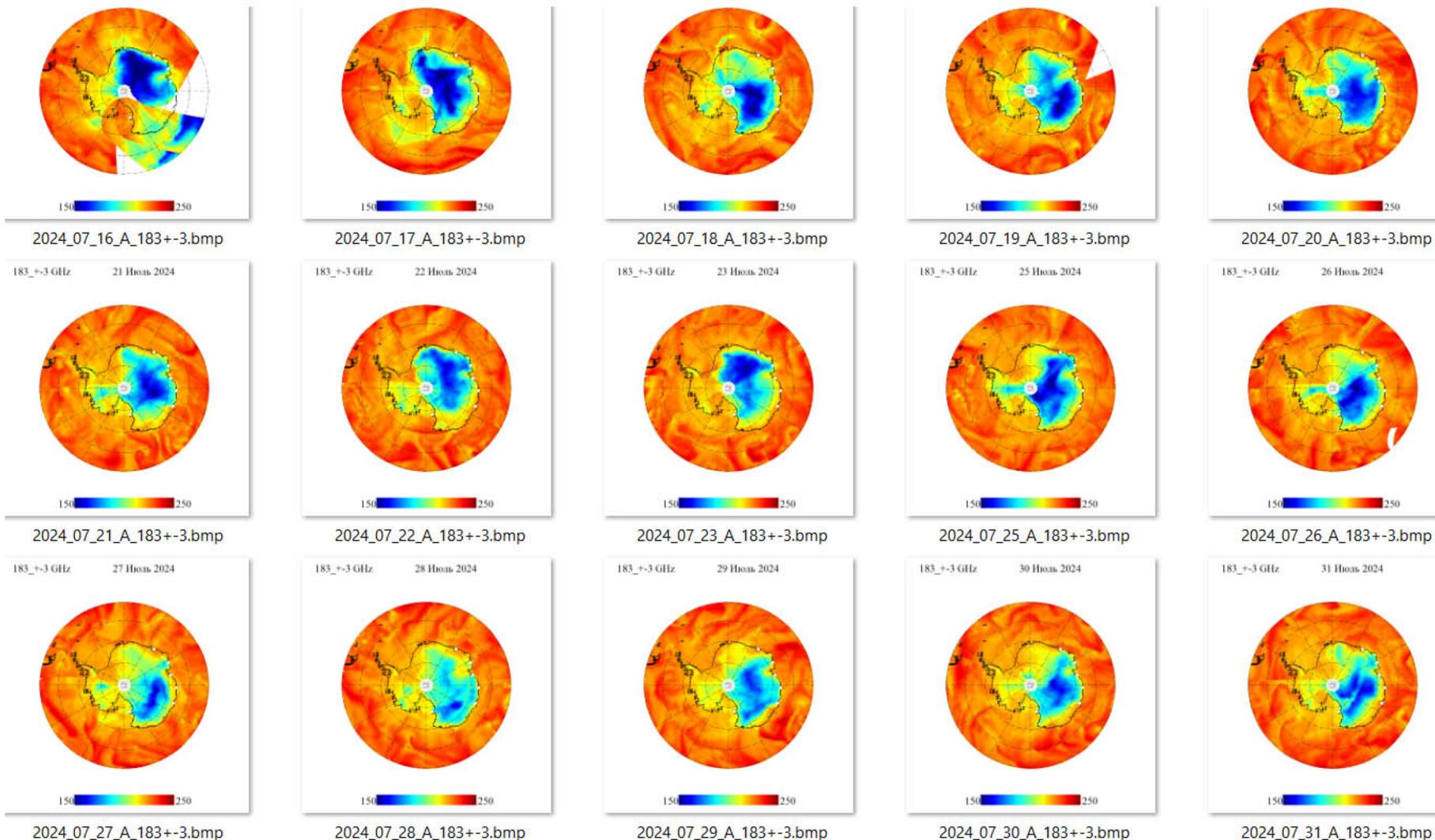
Изменчивость яркостной температуры системы поверхность-атмосфера на $183,3 \pm 7$ ГГц 16-31 июля 2024 года по измерениям МТВЗА-ГЯ на восходящих витках

Южная полярная область



Изменчивость яркостной температуры системы поверхность-атмосфера на $183,3 \pm 3$ ГГц 1-15 июля 2024 года по измерениям МТВЗА-ГЯ на восходящих витках

Южная полярная область

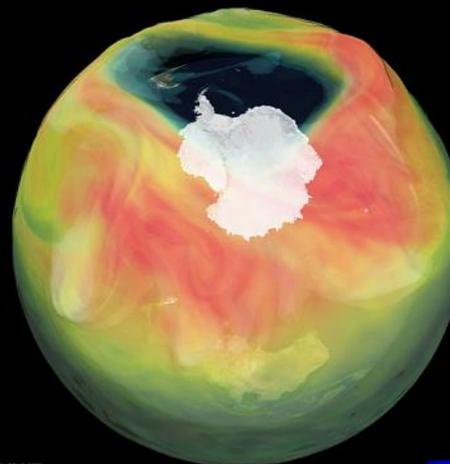
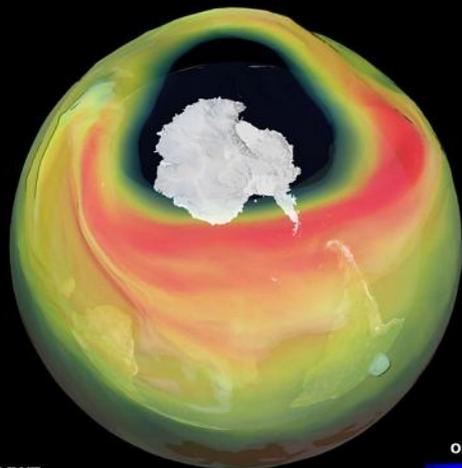


Изменчивость яркостной температуры системы поверхность-атмосфера на $183,3 \pm 3$ ГГц 16-31 июля 2024 года по измерениям МТВЗА-ГЯ на восходящих витках

ВСП в сентябре 2019 года, озоновая дыра

26.10.2018

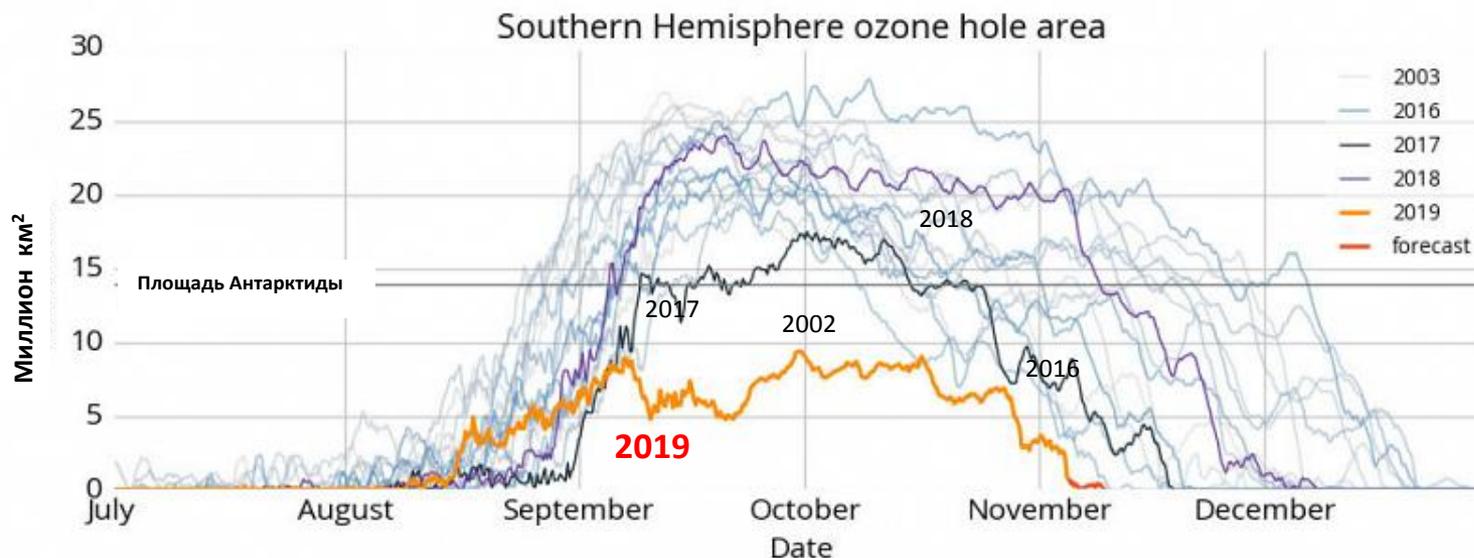
26. Oct 2019



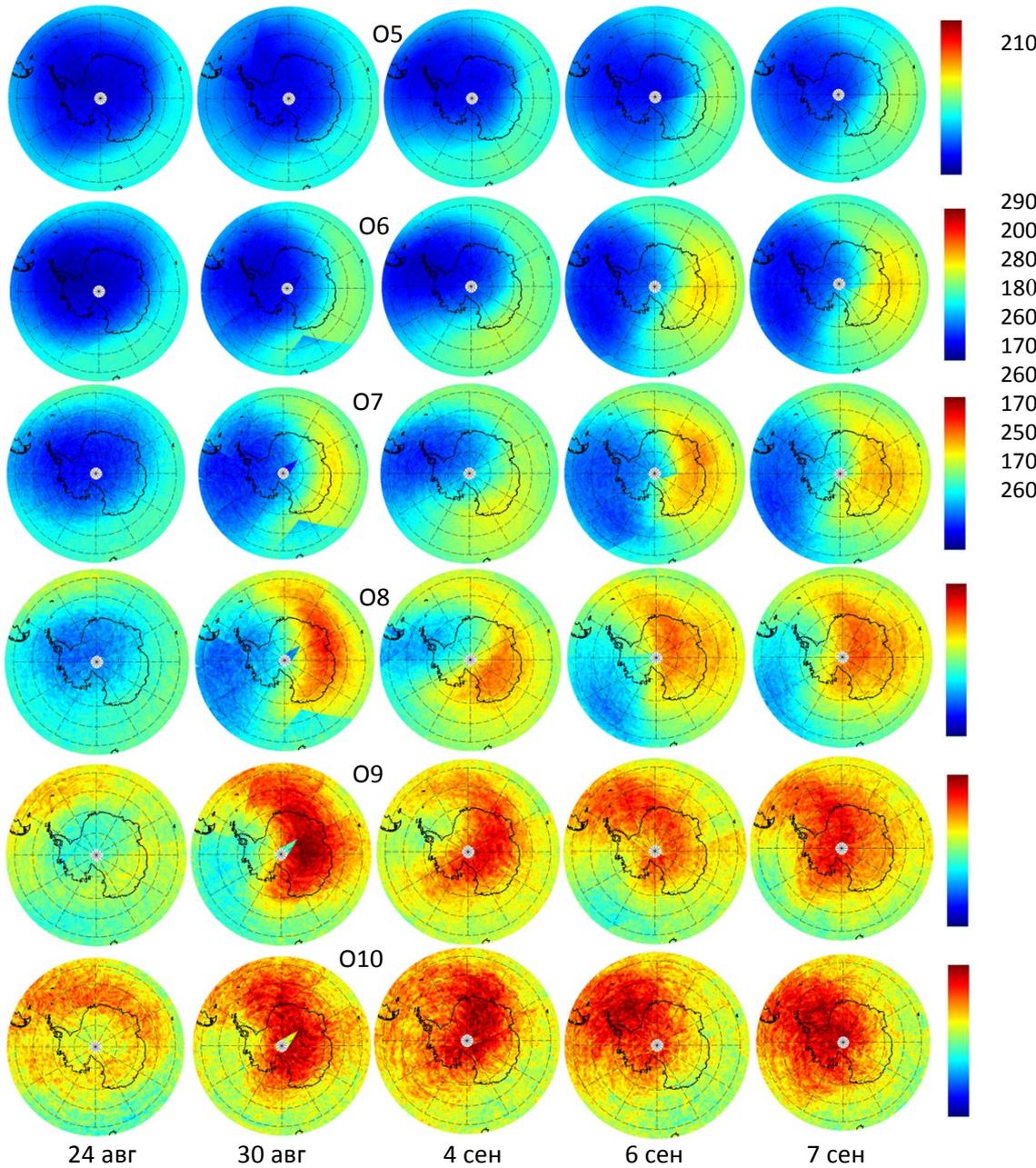
Ozone Partial Pressure (mPa)
2 6 10 14 18
values below 1 mPa appear transparent



Ozone Partial Pressure (mPa)
2 6 10 14 18
values below 1 mPa appear transparent



Озоновая дыра над Антарктидой снизилась до рекордно низкого значения 9,3 млн км²
В конце августа 2019 г. температура стратосферы была на 40° С выше среднего значения



Изменчивость
 яркостной
 температуры
 над Южной
 полярной
 областью по
 измерениям
 радиометра
МТВЗА-ГЯ
 со спутника
"Метеор-М" № 2-2
 до и во время
 внезапного
 стратосферного
потепления
 в конце августа –
 начале сентября
 2019 года

Яркостная температура, К

Выводы

По пассивным радиометрическим измерениям со спутника **Метеор-М №2-4** была прослежена изменчивость температуры тропосферы, стратосферы и поверхности Антарктиды. В июле-сентябре 2024 года зарегистрировано редкое явление – внезапное стратосферное потепление, состоявшее из трех последовательных волн. Потепление изменило форму полярного вихря, повлияло на глобальную погоду и уровень озона во всем Южном полушарии.

Временные ряды ежедневных изображений Южной полярной области на частотах усовершенствованного радиометра **МТВЗА-ГЯ** визуализируют изменчивость: температуры различных слоев тропосферы и стратосферы, циклонов и атмосферных рек, позволяют оценивать содержание в толще атмосферы водяного пара, капельной воды в облаках, наличие ледяных частиц в атмосферных образованиях.

Измерения радиометра **МТВЗА-ГЯ** (40 каналов в диапазоне от 6,9 до 183,3 ГГц) со спутника **Метеор-М № 2-4** и последующих могут стать важным дополнением к существующим спутникам ДЗЗ, что может быть реализовано в рамках целевых программ, ориентированных на калибровку каналов радиометра, обработку и коррекцию первичных данных, разработку алгоритмов восстановления геофизических параметров, архивацию данных и продуктов и предоставление открытого доступа к продуктам различного уровня.

Авторы благодарят РКС за предоставление данных **МТВЗА-ГЯ**.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы рег. номер АААА-А17-117030110037-8.