

**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. Митник<sup>1</sup>, В.П. Кулешов<sup>1</sup>, А.В. Баранюк<sup>1</sup>, М.Л. Митник<sup>1</sup>  
Г.Е. Евсеев<sup>1</sup>, А.М.Стрельцов<sup>1</sup>*

**1 Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН  
Владивосток, e-mail: [lm\\_mitnik@mail.ru](mailto:lm_mitnik@mail.ru)**

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

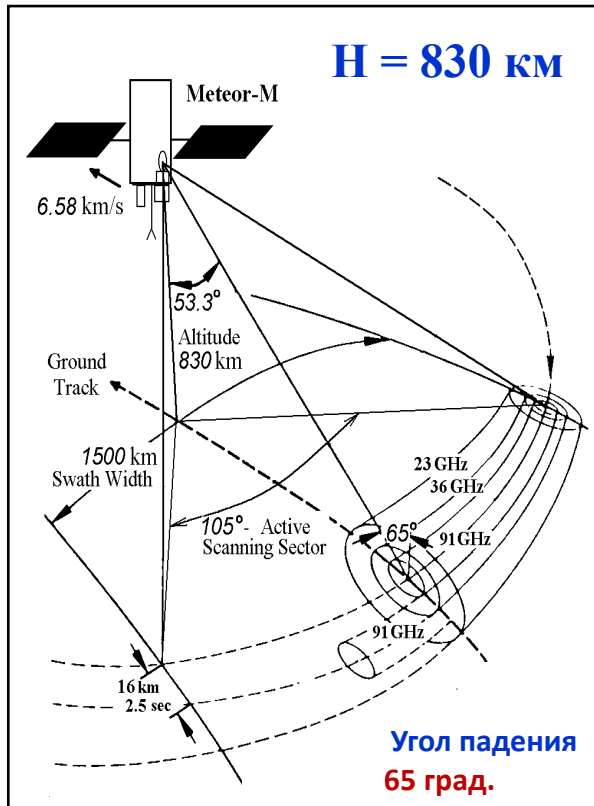
**Двадцать вторая международная конференция  
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"  
Москва, Институт космических исследований РАН  
11-15 ноября 2024**

## 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
<b>7.3</b>	<b>133 x 297</b>	<b>32 x 32</b>
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
<b>34.0</b>	<b>35 x 76</b>	<b>32 x 32</b>
36.5	35 x 76	32 x 32
42.0	26 x 60	32 x 32
<b>45.0</b>	<b>25 x 52</b>	<b>32 x 32</b>
48.0	24 x 43	32 x 32
91.65	14 x 30	16 x 16
<b>165.5</b>	<b>14 x 30</b>	<b>16 x 16</b>

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 ± 7.0/V**

**183.31 ± 4.5/V**

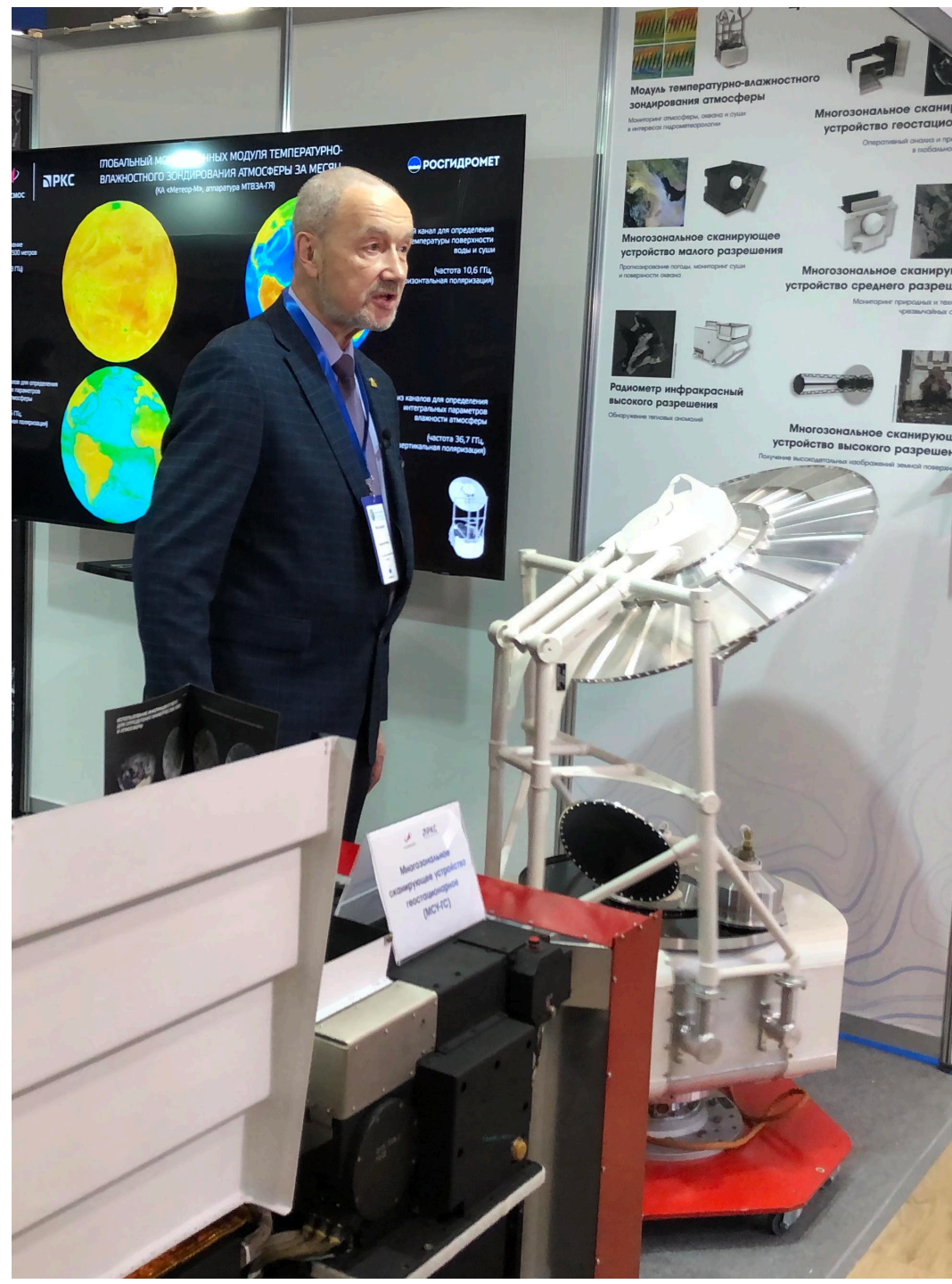
**183.31 ± 3.0/V**

**183.31 ± 1.8/V**

**183.31 ± 1.4/V**

29.02.2024 выведен на солнечно-синхронную орбиту  
Ширина полосы обзора **МТВЗА-ГЯ** 1750 км.

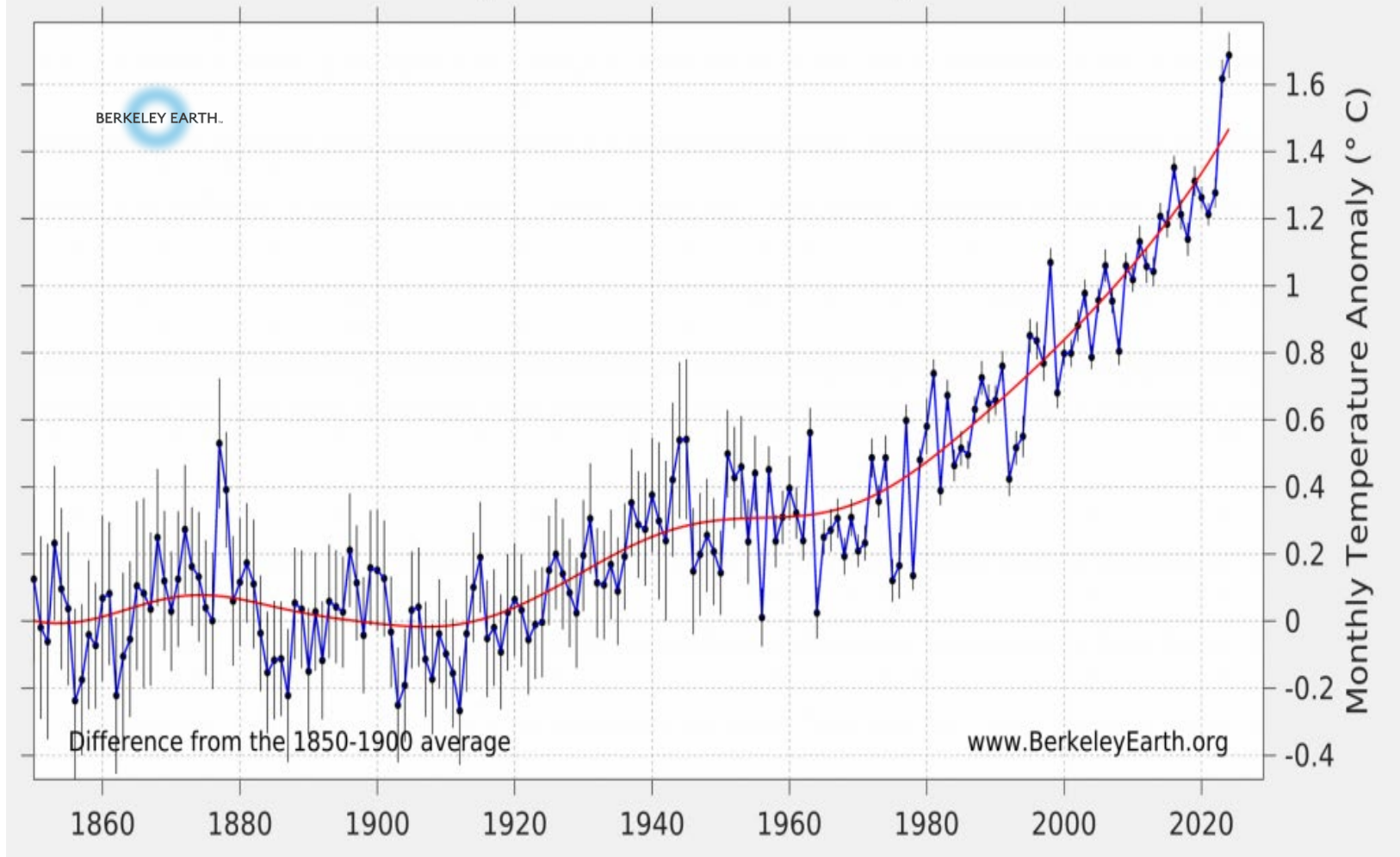
Чувствительность каналов радиометра в космосе  
≈ 0,3-0,5 К/пиксель. На частотах 6.9-48, 91.65 и 165.5 ГГц  
излучение Земли принимается на вертикальной (V) и  
горизонтальной (H) поляризациях .



*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.*

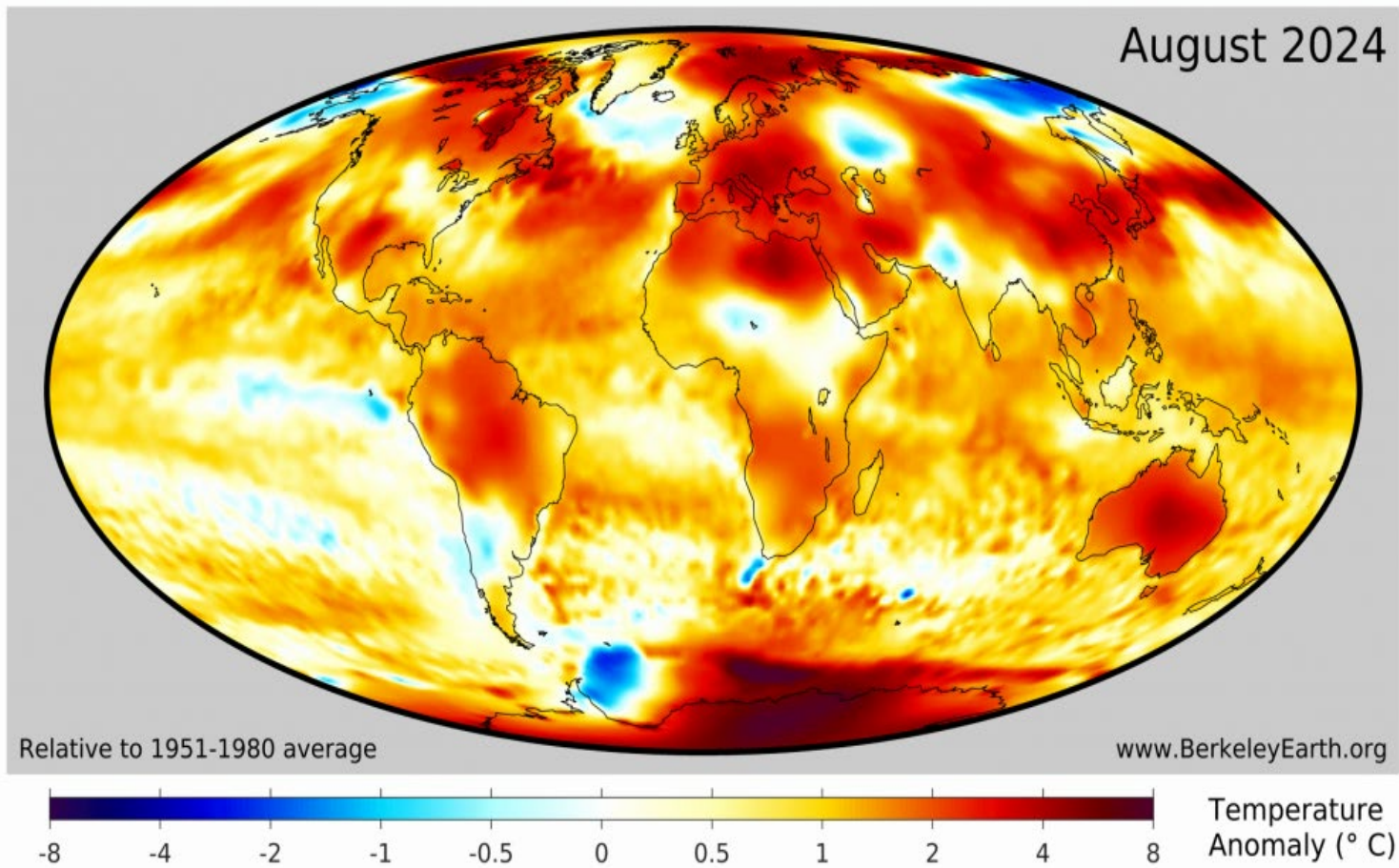


# Berkeley Earth - Global - August

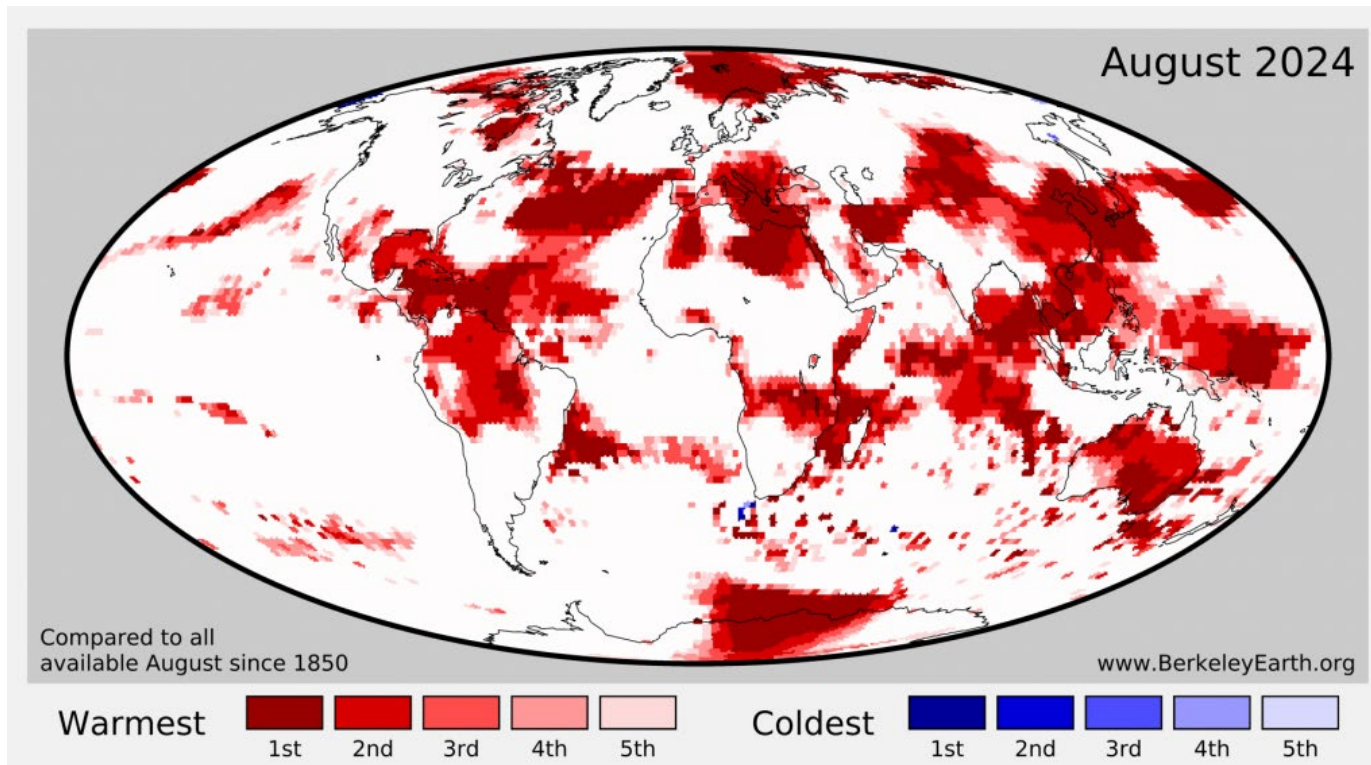


Это 15-ый месяц подряд, в котором был установлен или превышен месячный рекорд глобальной температуры, Тгл причем многие месяцы установили новые рекорды с большим отрывом. Кроме того, август 2024 года стал 14-ым месяцем подряд, когда  $T_{сл} \geq 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , чем соответствующая среднемесячная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



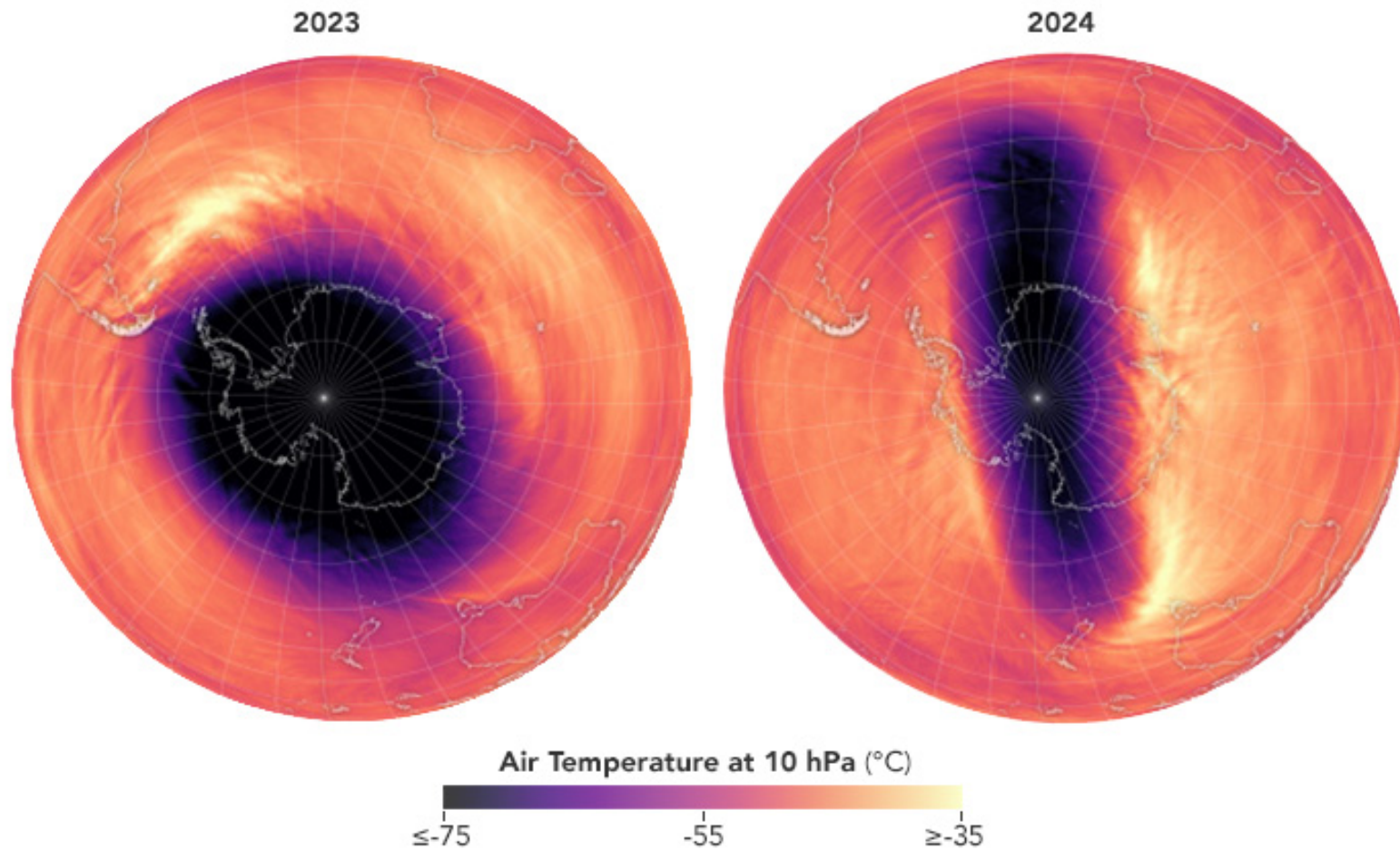
**Потепление вызвано антропогенным вкладом в увеличение концентрации в атмосфере парниковых газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , что вызывает повышение температуры воздуха, земных покровов, т-ры поверхности и уровня моря. Тенденция к потеплению почти удвоилась по сравнению с периодом 1961-1990 гг. В последние годы наблюдается заметное увеличение числа экстремальных явлений: тайфунов, наводнений, засух, волн жары и др.**



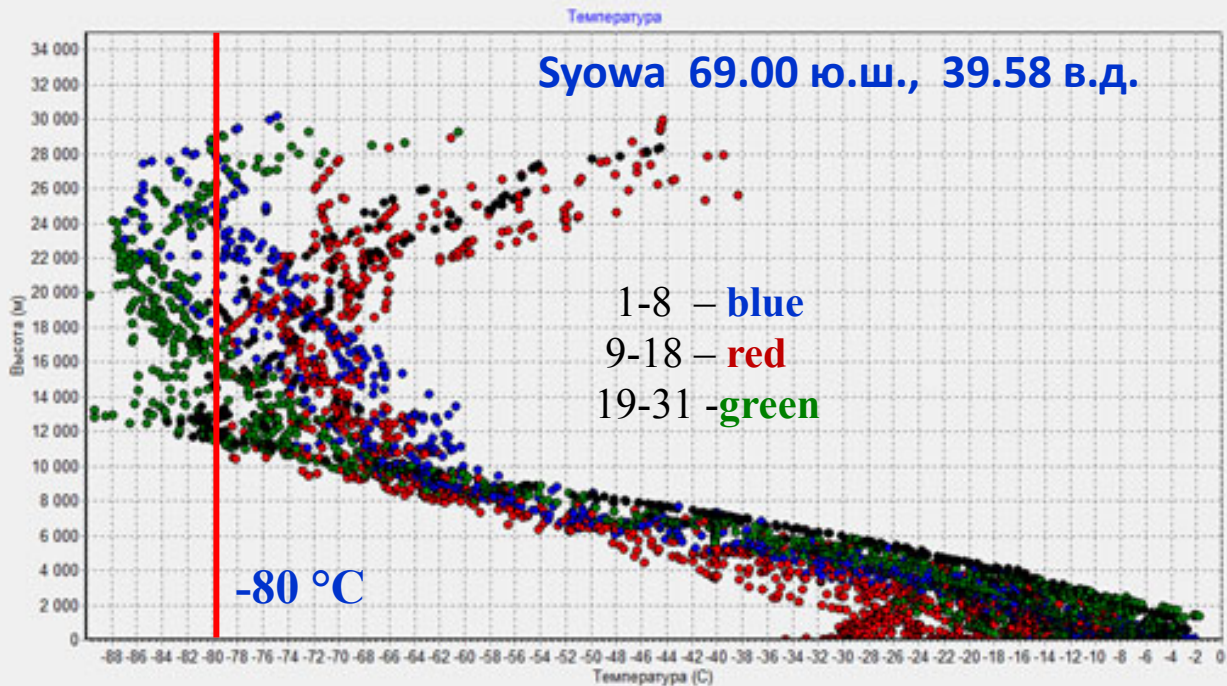
**На суше 2024 год стал самым теплым августом за всю историю наблюдений. Средняя температура на суше была на  $2,37 \pm 0,11$  °C выше средней температуры 1850-1900 гг. Это на  $0,29$  °C превысило предыдущий августовский рекорд, установленный в 2023 году.**



- 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  $60^{\circ}$  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.



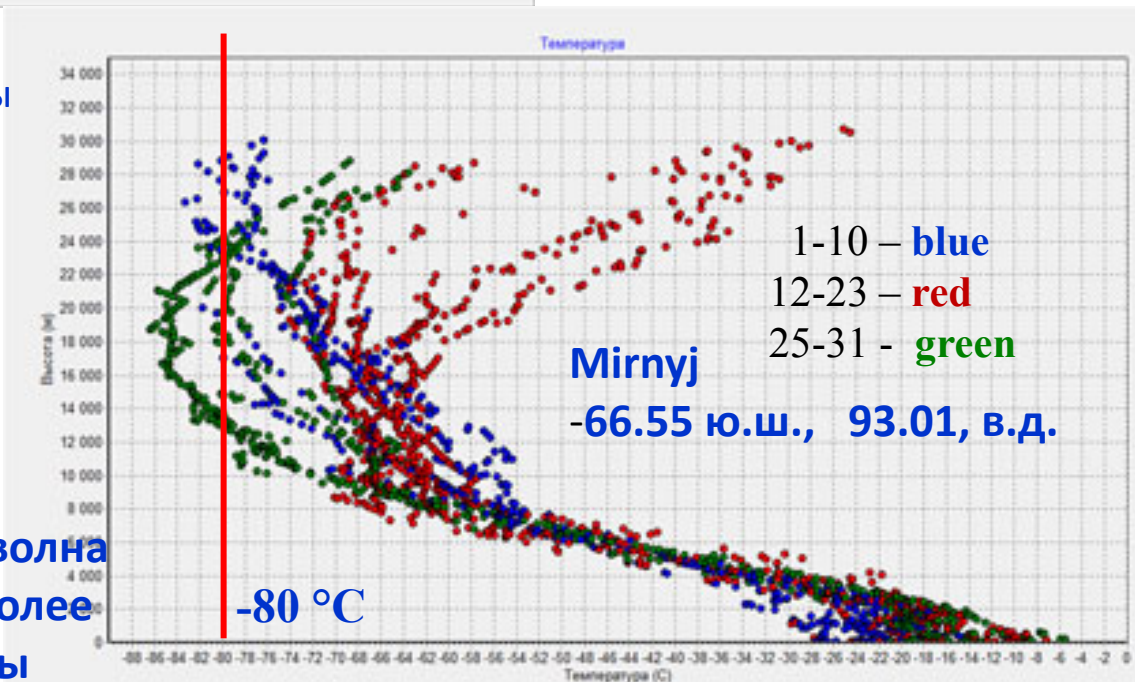
**Температуры средней стратосферы на высоте  $\approx 30$  км (давление 10 гПа) за 5 августа 2023 года (слева) и 5 августа 2024 года (справа). В 2024 г. полярный вихрь удлинён и температура вблизи от полюса выше. Поля температуры построено по модели NASA GEOS forward processing (GEOS-FP). . Модель ассимилирует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

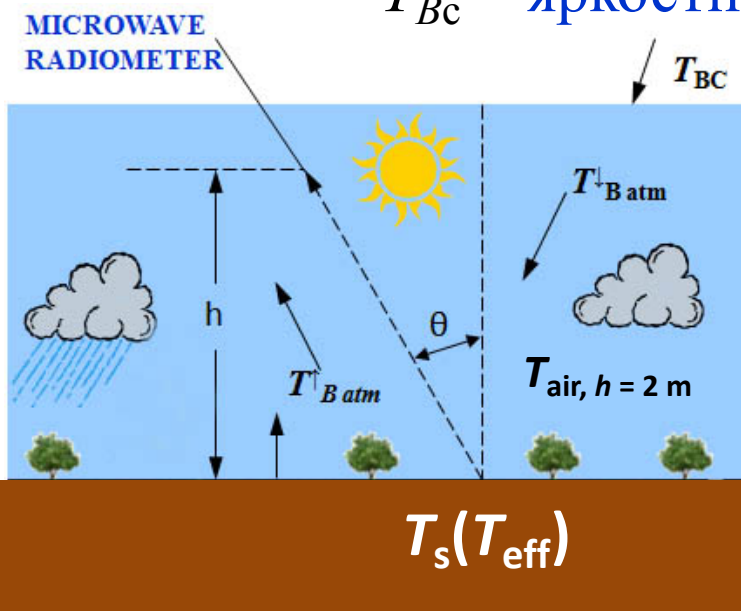
$$T_B^{V,H}(\nu, \theta) = T_{Bsurface}^{V,H}(\nu, \theta)e^{-\tau(\nu, \theta)} + T_{Batm}^{\uparrow}(\nu, \theta) + T_{Batm}^{\downarrow}(\nu, \theta)[1 - \kappa^{V,H}(\nu, \theta)]e^{-\tau(\nu, \theta)} + T_C[1 - \kappa^{V,H}(\nu, \theta)]e^{-2\tau(\nu, \theta)}$$

$T_{Bsurface}^{V,H}(\nu, \theta) = \kappa^{V,H}(\nu, \theta)T_S$  - 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  $\nu$ , поляризации (V, H), угла падения  $\theta$ , диэлектрической проницаемости, шероховатости поверхности и др.

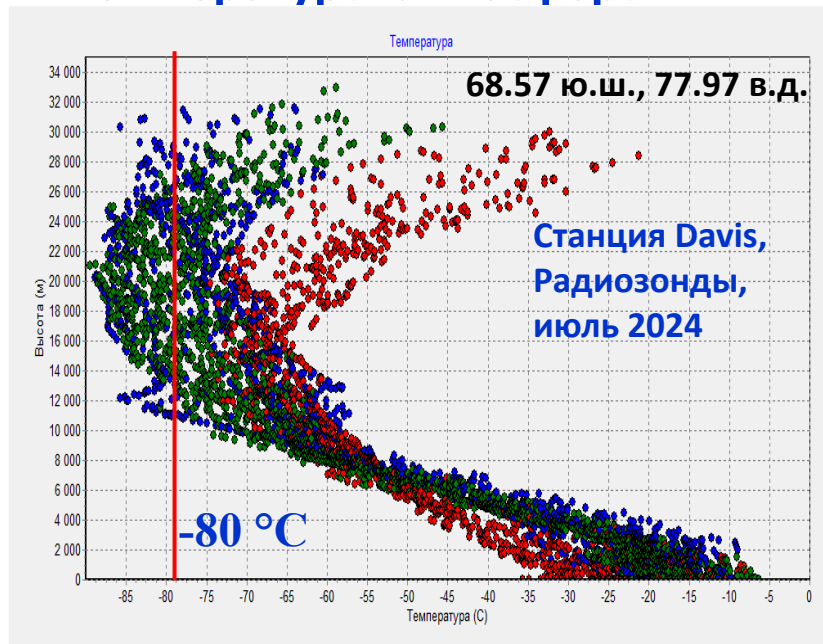
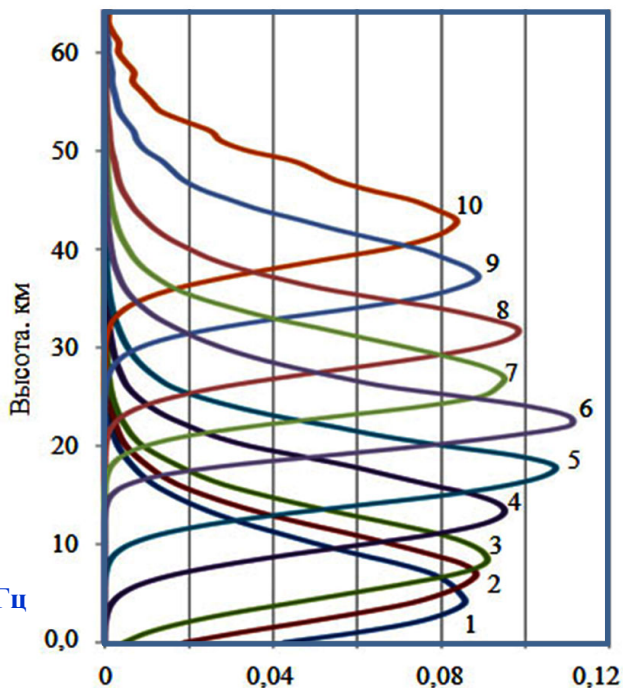
Диэлектрическая проницаемость зависит от частоты, температуры, минерального состава, размеров частиц, влажности и др.

(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

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

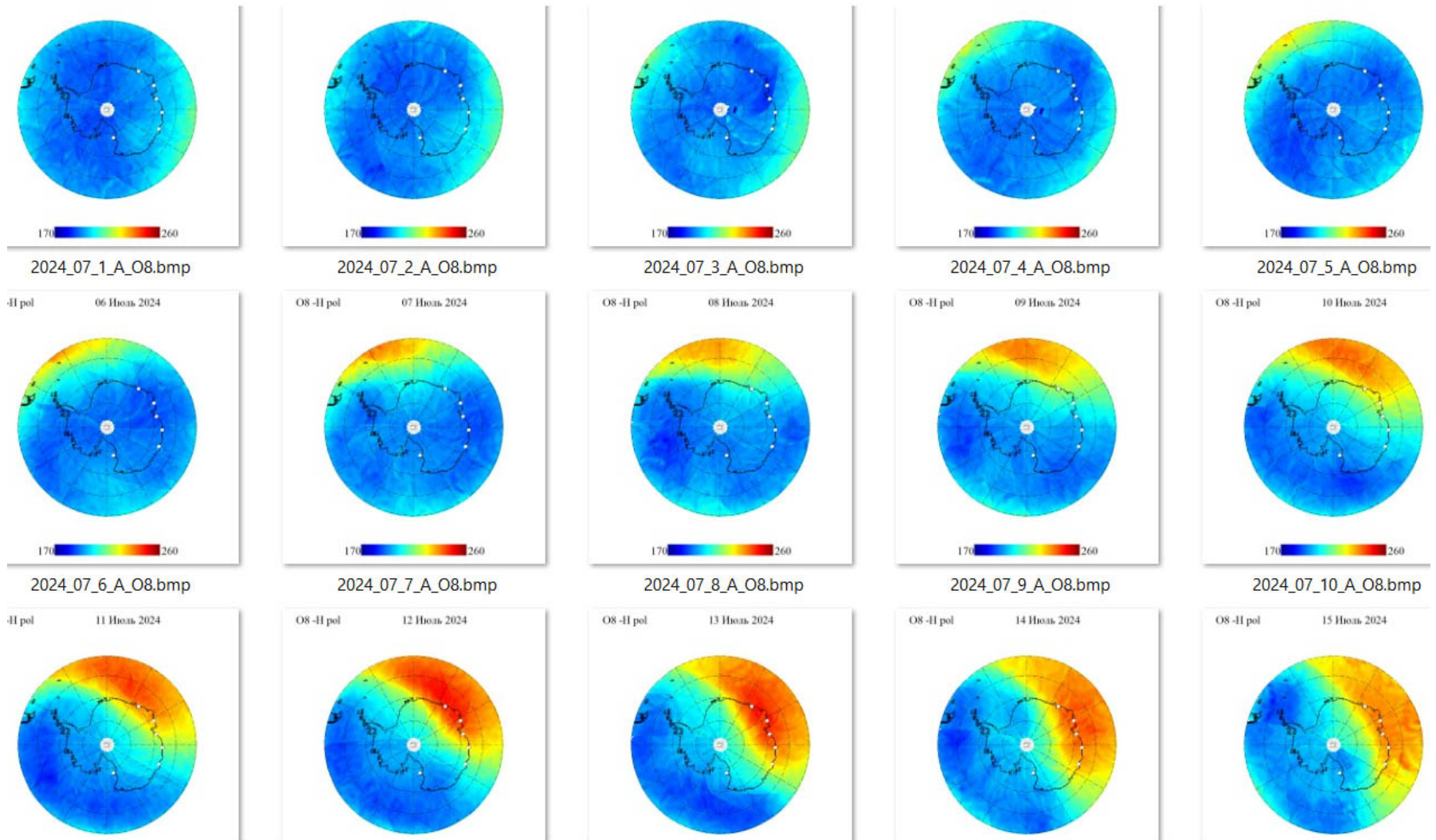
## Весовая функция

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

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



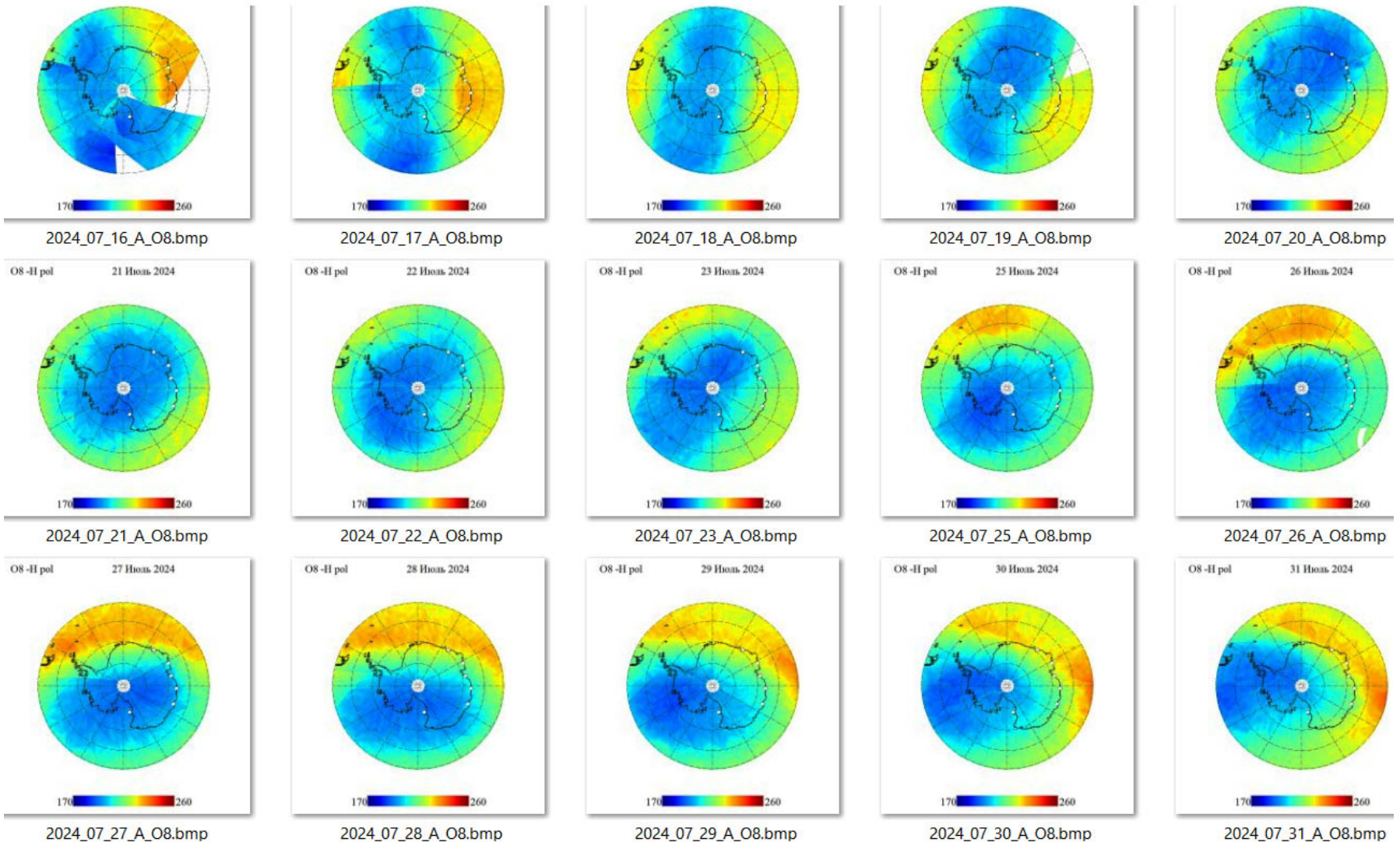
# Южная полярная область



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



# Южная полярная область

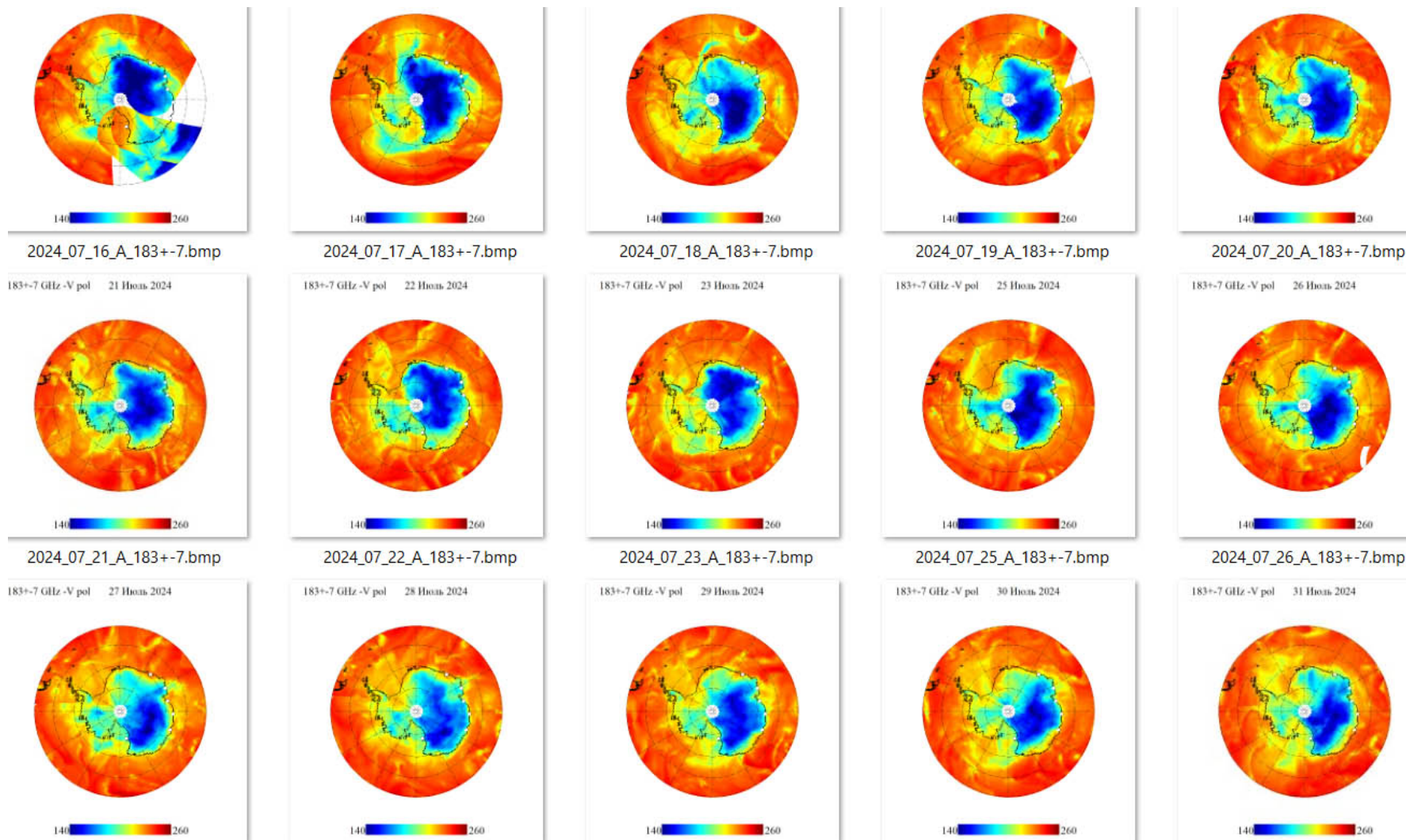


**Изменчивость температуры стратосферы на частоте  $57,290344 \pm 0,322 \pm 0,025$  ГГц года по измерениям МТВЗА-ГЯ на восходящих витках 16-31 июля 2024**





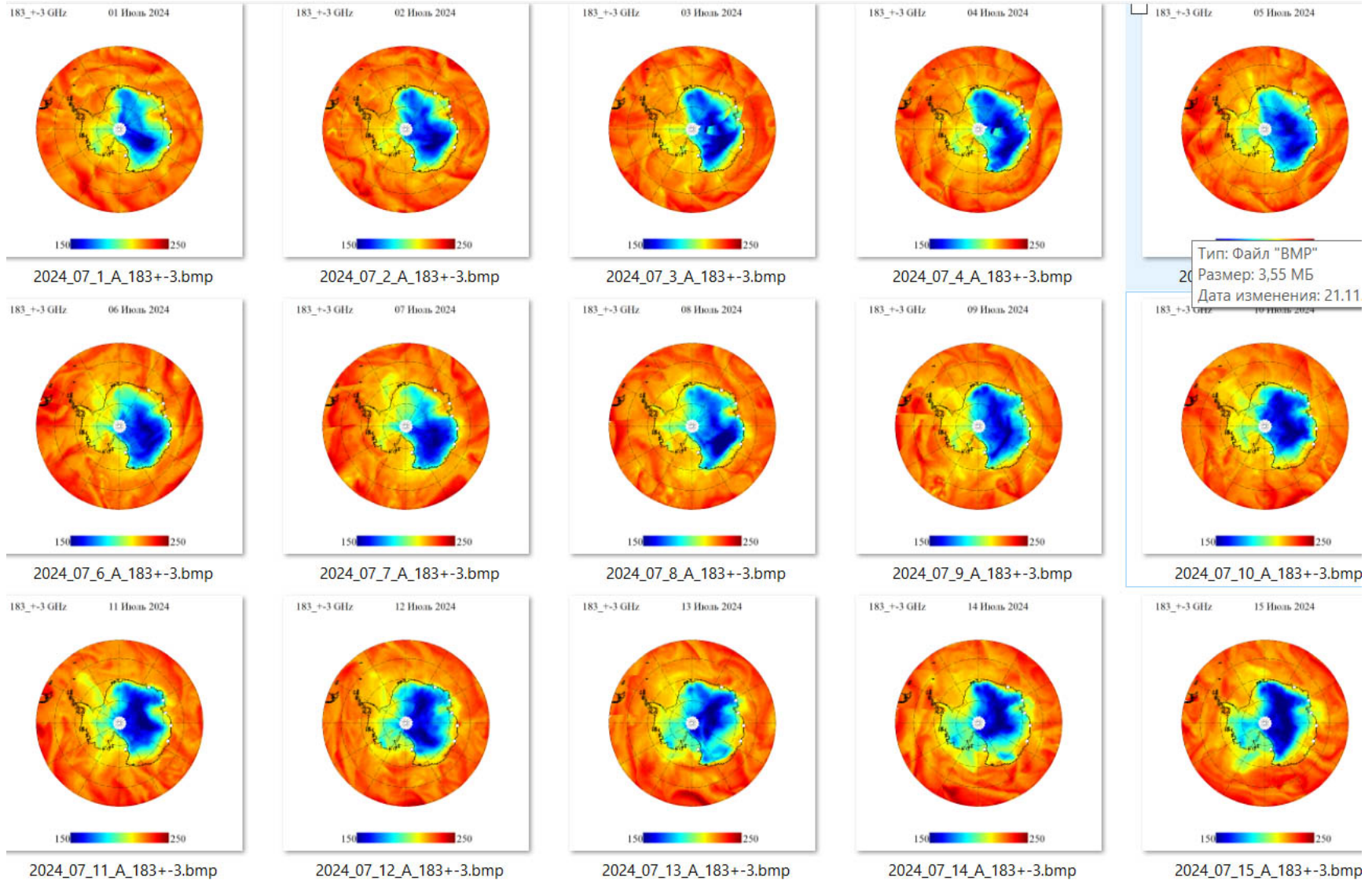
# Южная полярная область



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

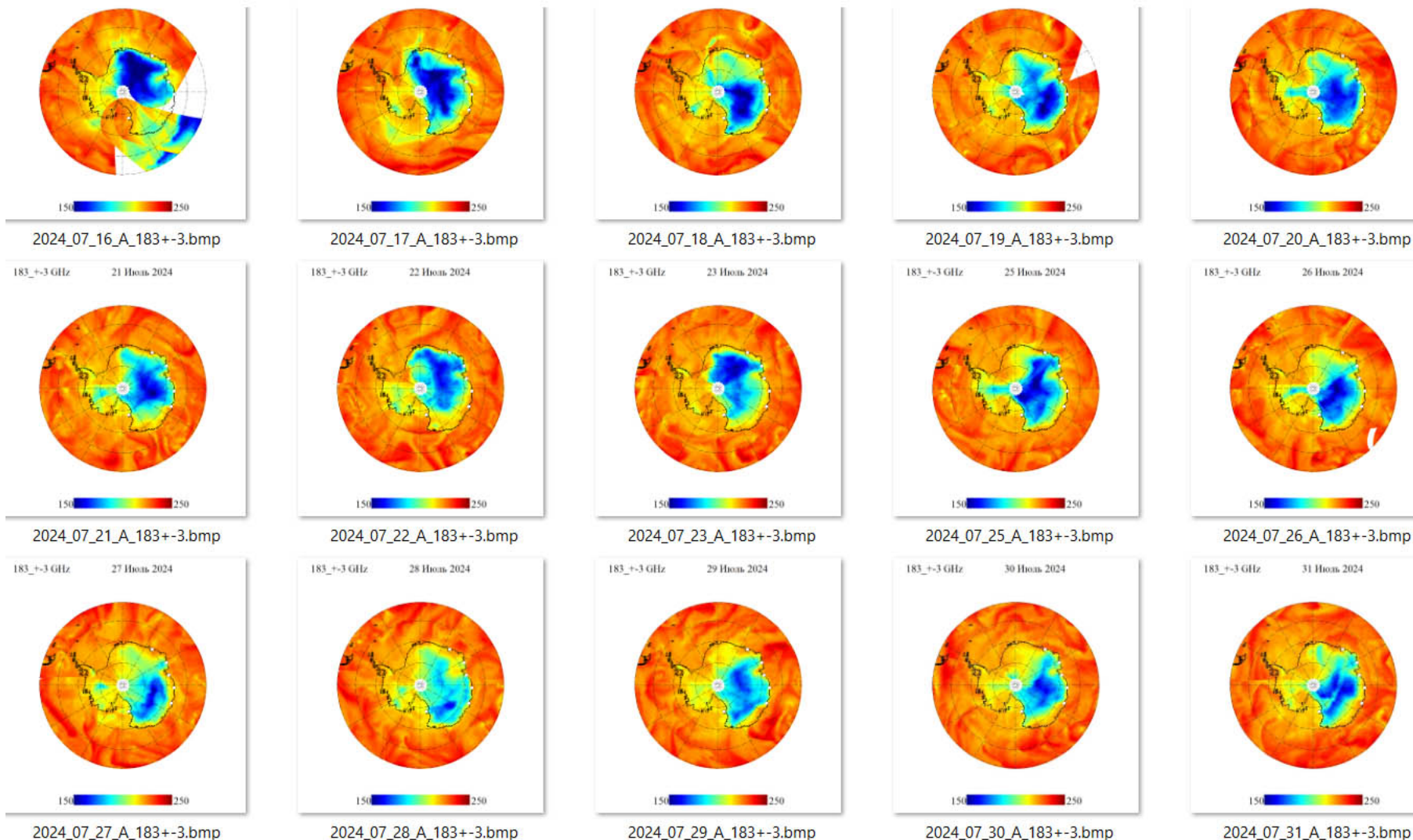


# Южная полярная область



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



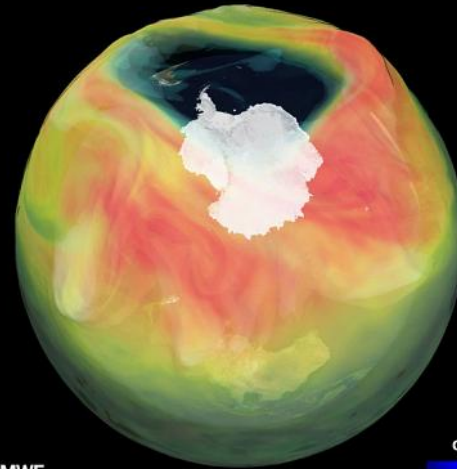
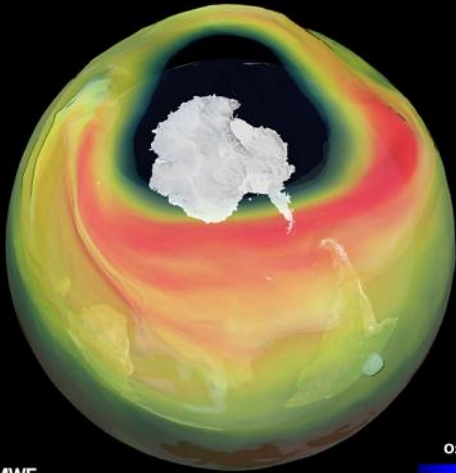
**Изменчивость яркостной температуры системы поверхность-атмосфера на  $183,3\pm 3$  ГГц 16-31 июля 2024 года по измерениям МТВЗА-ГЯ на восходящих витках**



# ВСП в сентябре 2019 года, озоновая дыра

26.10.2018

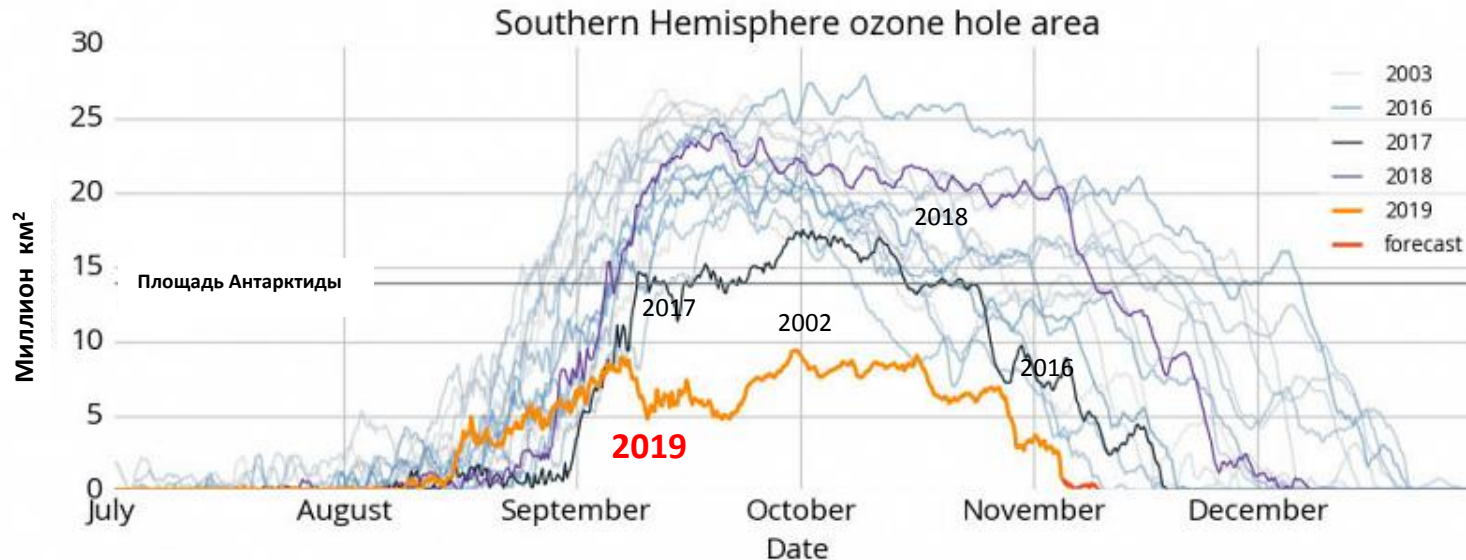
26. Oct 2019



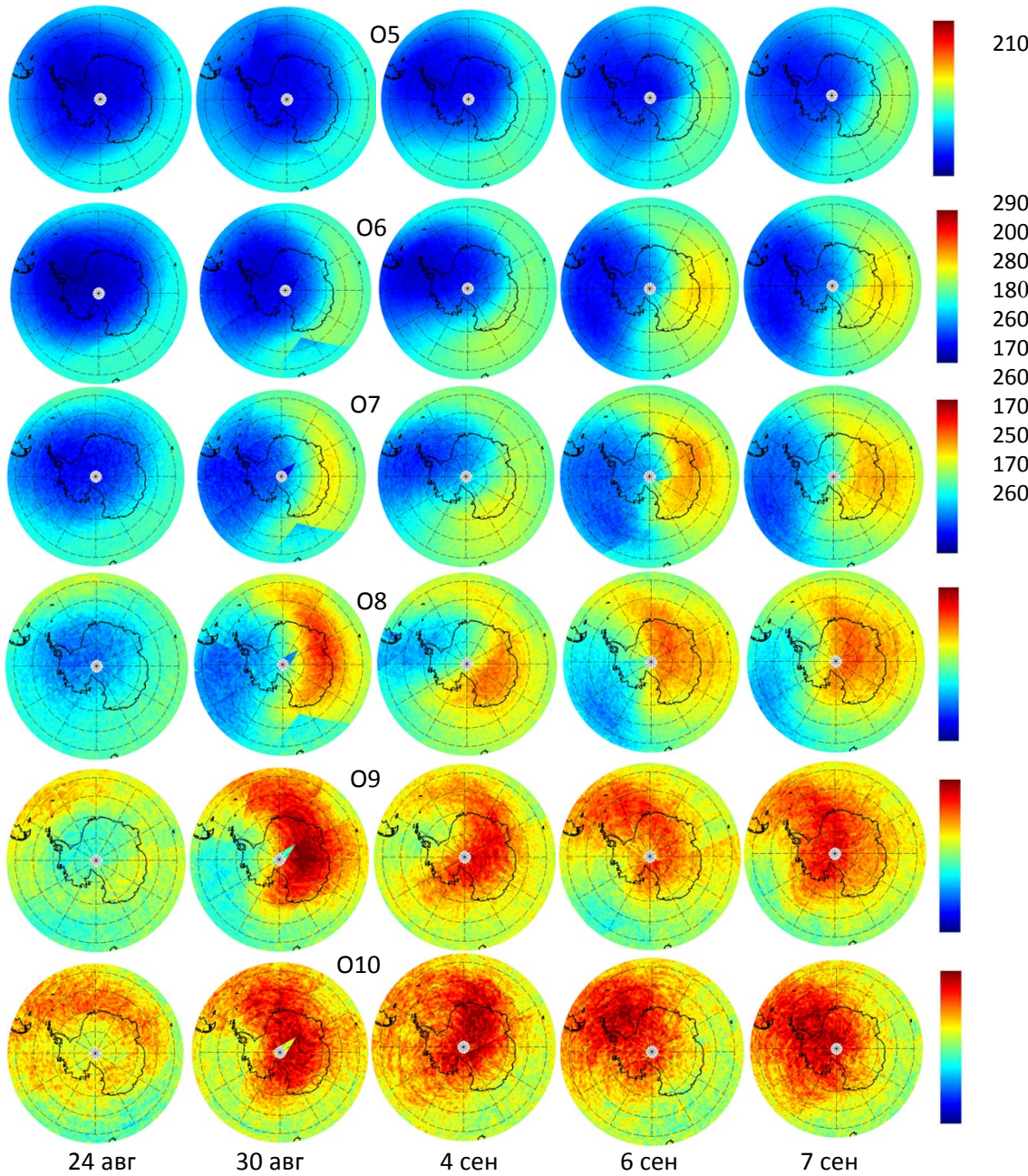
Ozone Partial Pressure (mPa)  
2 6 10 14 18  
values below 1 mPa appear transparent



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 км<sup>2</sup>  
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.