Внезапное стратосферное потепление над Антарктидой в сентябре 2019 г. по данным радиометра МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 2-2

Л. М. Митник, В. П. Кулешов, М. Л. Митник

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН
Владивосток, 690041, Россия
E-mails: mitnik@poi.dvo.ru, 986022@mail.ru, maia@poi.dvo.ru

В работе приведены первые результаты измерений исключительно редкого крупномасштабного атмосферного явления — внезапного стратосферного потепления (ВСП) в Южном полушарии. Измерения, выполненные сканирующим микроволновым (МВ) температурно-влажностным зондировщиком атмосферы МТВЗА-ГЯ с нового метеорологического спутника России «Метеор-М» № 2-2 в диапазоне частот $\nu = 52{,}8–57{,}6$ ГГц, дают представление об изменчивости температуры стратосферы и верхней тропосферы Земли. При анализе временных рядов антенных температур $T_а(\nu)$ на 10 частотах обнаружен быстрый (на несколько десятков градусов за неделю) рост температуры средней и нижней стратосферы над Антарктидой в конце августа – сентябре 2019 г. Спутниковые данные находятся в согласии с вертикальными профилями температуры воздуха по данным радиозондов, выпущенных с Южного полюса (станция 89009) и с побережья Антарктиды (станции 89062, 89055, 89592, 89611, 89511, 89664 и 89532), максимальная высота подъёма которых $h_{max} = 28–34$ км. По радиозондовым профилям и данным реанализа рассчитаны яркостные температуры $T_я(\nu)$ и весовые функции каналов радиометра, принимающих уходящее излучение Земли на пяти частотах: 52,8; 53,3; 53,8; 54,64 и 55,63 ГГц — в широкой полосе ($\Delta\nu = 400$ МГц) и на пяти частотах в области резонансной линии кислорода, центрированной на $\nu_0 = 57{,}2903$ ГГц, с переменной шириной полосы пропускания. Значения $T_я(\nu)$ найдены путём численного интегрирования уравнения переноса МВ-излучения. По временным рядам полей $T_а(\nu)$, построенным по данным МТВЗА-ГЯ на частотах зондировщика с 6 августа по 30 сентября 2019 г., прослежена эволюция ВСП над Южной полярной областью. Из сопутствующих измерений следует, что потепление сопровождалось изменением циркуляции атмосферы в обширном регионе, засухой и сильными пожарами в Австралии, уменьшением площади озоновой дыры над Антарктидой, возмущением характеристик ионосферы.

Ключевые слова: внезапное стратосферное потепление, Южное полушарие, микроволновый радиометр МТВЗА-ГЯ, «Метеор-М» № 2-2, яркостная температура, пространственно-временная изменчивость, радиозонды, моделирование

Одобрена к печати: 02.11.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-229-242

Введение

Внезапное стратосферное потепление (ВСП) представляет собой явление, при котором температура полярной стратосферы за несколько дней возрастает на несколько десятков градусов (вплоть до 50 °C) (Butler et al., 2017). Впервые ВСП было обнаружено 27 января 1952 г. немецким метеорологом Ричардом Шерхагом (Richard Scherhag), который занимался изучением стратосферы до высоты ~30–35 км с помощью радиозондов (Baldwin et al., 2020). В последующие годы ВСП над Северным полушарием наблюдались с ноября по март. Влияние потеплений на физические и химические процессы в нижней и верхней атмосфере стимулировало их детальное исследование различными методами и разработку классификации типов потепления (Baldwin et al., 2020; Butler et al., 2017).

В соответствии с определением Всемирной метеорологической организации (McInturff, 1978) к «малым» (*англ.* minor) ВСП относятся события, когда температура зимней полярной стратосферы за неделю или менее увеличивается по крайней мере на 25 K и существенно замедляется западный поток. Явление называется «большим» (*англ.* major), если на уровне

10 гПа (30–32 км) средний зональный поток в полярных широтах меняет направление с западного на восточное. Среднее за зиму количество больших ВСП составляет в Северном полушарии ~0,6 (Butler et al., 2015; Charlton, Polvani, 2007). В Южном полушарии потепления стратосферы — независимо от того, малые они или большие, — происходят существенно реже, поскольку воздействие планетарных волн (ПВ) на стратосферу здесь значительно слабее из-за меньших различий в топографии и контрастов «суша – море». Фактически единственным главным ВСП в Антарктике было потепление в сентябре 2002 г. (Baldwin et al., 2020; Krüger et al., 2005; Lim et al., 2019; Varotsos, Kondratyev, 2003; Yamazaki et al., 2020).

Спутниковые данные используются для оценки температуры стратосферы с 1979 г. Температура тропосферы и нижней стратосферы $T(h)$ определяется по измерениям уходящего микроволнового (МВ) излучения радиометрами Microwave Sounding Unit (MSU) в трёх каналах и Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU) в 15 каналах на частотах в полосе поглощения молекулярного кислорода в диапазоне $\nu = 52–61$ ГГц. Впервые радиометр AMSU-A был установлен на спутнике NOAA-15 (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration) в 1998 г. Радиометры AMSU-A сканировали Землю в направлении поперёк траектории полёта в полосе шириной 2200 км (Kidder et al., 2000). Такое же сканирование поперёк направления полёта осуществляется и радиометром Advanced Technology Microwave Sounder (ATMS) со спутника NOAA/NASA Suomi National Polar-orbiting Partnership (SNPP), запущенного в 2011 г. (Zou et al., 2018). Восстановление $T(h)$ осуществляется также по данным зондирования лимба Земли зондировщиком Microwave Limb Sounder (MLS) со спутника Aura (Schwartz et al., 2008).

Между ВСП и изменениями в атмосфере от поверхности до термосферы существуют прочные связи в обоих полушариях, проявляющиеся в распределениях температуры воздуха, скорости и направления ветра, скорости химических реакций, плотности электронов и других характеристик (Агеева и др., 2017; Pedatella et al., 2018 и цитируемая в публикации литература).

Внезапные стратосферные потепления были обнаружены по измерениям МВ-излучения Земли сканирующим радиометром МТВЗА-ГЯ (Микроволновый сканер температурно-влажностного зондирования атмосферы, ГЯ в аббревиатуре добавлены в честь Геннадия Яковлевича Гуськова) с метеорологического спутника «Метеор-М» № 2 в 2015–2016 гг. в Северном полушарии (Mitnik et al., 2018), а в сентябре 2019 г. — со спутника «Метеор-М» № 2-2 (Чернявский и др., 2020) в Южном полушарии. Спутник «Метеор-М» № 2-2 был запущен на солнечно-синхронную послеполуденную орбиту высотой 830 км 4 июля 2019 г. Время пересечения экватора — 15:00. Радиометр МТВЗА-ГЯ сканирует Землю по конусу при угле падения 65°. Ширина полосы обзора радиометра составляет на восходящих витках 2500 км, а на нисходящих — 1500 км из-за затенения поля обзора солнечными панелями (Чернявский и др., 2020).

Радиометр

Подробные функциональные и технические параметры прибора и схема сканирования рассмотрены в работах (Барсуков и др., 2011; Болдырев и др., 2008; Чернявский и др., 2018, 2020; Cherny et al., 2010; Mitnik et al., 2017). Калибровка каналов МТВЗА-ГЯ на борту выполняется на каждом скане вне рабочего сектора путём измерения излучения от «горячего» и «холодного» источников, яркостные температуры которых $T_я$ известны. «Горячим» источником служит имитатор абсолютно чёрного тела с $T_я = 240–300$ K, а «холодным» — реликтовое космическое излучение с $T_я = 2{,}73$ K, принимаемое антенной, ориентированной в космическое пространство (Барсуков и др., 2009, 2011; Barsukov et al., 2016).

Оценка параметров поверхности (температуры и солёности воды, влажности почвы и др.) и атмосферы (её паросодержания и водозапаса облаков) выполняется по измерениям на частотах имаджера (10,65 ГГц; 18,7; 23,8; 31,5; 36,5; 42; 48 и 91,6 ГГц). Для восстановления вертикальных распределений температуры и влажности атмосферы используются измерения

в каналах зондировщика в полосе поглощения молекулярного кислорода 50–70 ГГц и в области сильной резонансной линии поглощения водяного пара, центрированной на $\nu_{0вп}$ = 183,31 ГГц (Чернявский и др., 2018, 2020).

Обозначения и основные технические характеристики каналов температурного зондирования атмосферы радиометра МТВЗА-ГЯ приведены в *таблице*.

Технические характеристики каналов температурного зондирования

Обозначение канала	Центральная частота, ГГц	Количество полос	Ширина полосы, МГц	Чувствительность не хуже, К/пиксель	Высота максимума весовой функции, км
О1	52,80	1	400	0,4	2
О2	53,30		400		4
О3	53,80		400		6
О4	54,64		400		10
О5	55,63		400		14
О6	ν_0±0,100	4	50		20
О7	ν_0±0,050		20	0,7	25
О8	ν_0±0,025		10	0,9	29
О9	ν_0±0,010		5	1,3	35
О10	ν_0±0,005		3	1,7	42

Примечание: ν_0 = 57,2903±0,3222 ГГц.

В каналах О1–О5 ширина полосы пропускания Δν составляет 400 МГц. В каналах О6–О10, предназначенных для восстановления температуры более высоких слоёв стратосферы по измерениям в области линии с резонансом на частоте ν_0 = 57,290344 ГГц, Δν уменьшается от 50 до 3 МГц, что сопровождается снижением чувствительности от 0,4 до 1,7 К/пиксель. Высота расположения максимума весовой функции, которая характеризует вклад различных слоёв атмосферы в регистрируемую радиометром яркостную температуру, растёт с частотой (подробнее см. ниже). Пространственное разрешение всех каналов О1–О10 составляет 21×48 км, а размер приведённого пикселя изображения равен 48×48 км (Чернявский и др., 2018).

Весовые функции

Яркостная температура МВ-излучения Земли, регистрируемая на частоте ν на вертикальной (В) и горизонтальной (Г) поляризациях под углом θ к надиру, в общем случае может быть представлена в виде следующей суммы:

$$T_{я}^{В,Г}(\nu,\theta,P_i)=\chi^{В,Г}(\nu,\theta,P_i)T_0\cdot e^{-\tau(\nu)\cdot\sec\theta}+T_{я}^{\uparrow}(\nu,\theta)+T_{я}^{\downarrow}(\nu,\theta)\left[1-\chi^{В,Г}(\nu,\theta,P_i)\right]\cdot e^{-\tau(\nu)\cdot\sec\theta}+$$
$$+T_{к}\left[1-\chi^{В,Г}(\nu,\theta,P_i)\right]\cdot e^{-2\tau(\nu)\cdot\sec\theta}, \quad (1)$$

где $\chi^{В,Г}(\nu, \theta, P_i)$ — коэффициент излучения поверхности; P_i — параметры, от которых зависит коэффициент излучения (температура и солёность воды, влажность почвы, шероховатость поверхности и др.); T_0 — температура подстилающей поверхности; τ(ν) — полное поглощение в атмосфере, равное сумме поглощений в газах (кислороде, водяном паре, озоне и др.), облаках и осадках; $\tau(\nu)=\int\gamma(\nu,h)\,dh$, где γ(ν, h) — погонное поглощение в атмосфере, зависящее от температуры, давления и влажности воздуха и газового состава атмосферы, h — высота; $T_{я}^{\uparrow}(\nu,\theta)$ и $T_{я}^{\downarrow}(\nu,\theta)$ — яркостные температуры восходящего и нисходящего излучения атмосферы соответственно; $T_{к}=2{,}73$ К — яркостная температура реликтового космического излучения.

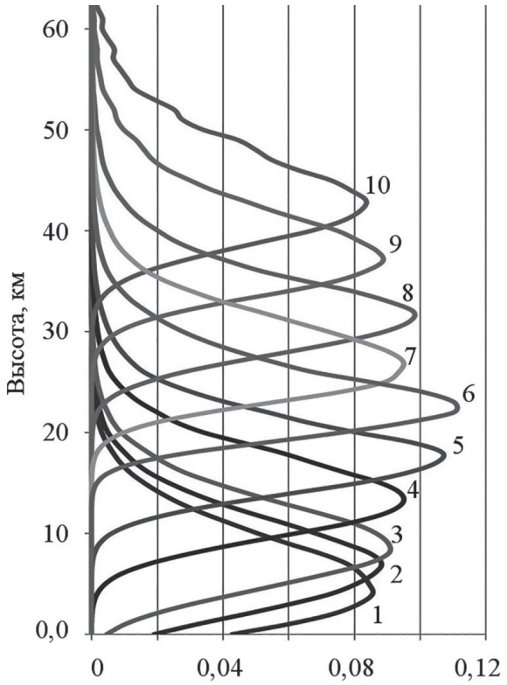

Рис. 1. Весовые функции на частотах каналов О1–О10 в диапазоне 52,8–57,6 ГГц, рассчитанные для широтного пояса 65–75° ю. ш. при угле падения 65°. Цифры у кривых соответствуют обозначениям каналов в *таблице*

Если поглощение на луче зрения $\tau(\nu)\cdot\sec\theta > 4$–5 Нп, что отмечается на $\nu = 52{,}8$–57,3 ГГц в области сильной полосы поглощения в кислороде, то при вычислении $T_я(\nu)$ первое, второе и четвёртое слагаемые в формуле (1) можно не учитывать, и яркостная температура уходящего излучения Земли может быть записана в виде:

$$T_я(\nu) = T_я^{\uparrow}(\nu,\theta) = \int_0^H T(h)K(\nu,h,\theta)\,\mathrm{d}h, \qquad (2)$$

где

$$K(\nu,h,\theta) = \gamma(\nu,h,\theta)\cdot\exp\left(-\int_h^{\infty}\gamma(\nu,h')\cdot\sec\theta\,\mathrm{d}h'\right)\sec\theta \qquad (3)$$

— весовая функция, описывающая вклад различных слоёв атмосферы в уходящее излучение.

Для расчёта коэффициентов поглощения в атмосфере, яркостных температур и весовых функций в каналах МТВЗА-ГЯ (см. *таблицу*), используемых при моделировании и интерпретации измерений и восстановлении $T(h)$, необходимо задать профили температуры, давления и влажности воздуха и водности (лёдности) облаков до высоты $h < H_{макс} \approx 70$ км для различных физико-географических условий. Максимальная высота подъёма радиозондов в большинстве случаев не превышает, однако, 30–32 км. Для моделирования переноса излучения на частотах каналов О7–О10 необходимы данные и при $h > 30$ км, что следует из графиков весовых функций, показанных на *рис. 1*.

Графики весовых функций на частотах зондировщика МТВЗА-ГЯ были рассчитаны по формуле (3) при угле падения $\theta = 65°$ по профилям температуры $T(h)$ и давления $P(h)$ атмосферы, приведённым для различных широтных поясов Северного и Южного полушарий и различных сезонов в ГОСТ Р 53460-2009 (Глобальная справочная атмосфера для высот от 0 до 120 км для аэрокосмической практики). Табличные данные охватывают диапазон высот от поверхности до 120 км. Весовые функции, показанные на *рис. 1*, были найдены по средним профилям $T(h)$ и $P(h)$ в июне – августе в широтном поясе 65–75° ю. ш. С увеличением центральной частоты канала положение максимума весовых функций (ВФ) смещается по высоте. Максимумы ВФ в каналах О1–О3 расположены на высотах $h < 10$ км, и принимаемое излучение формируется в основном в тропосфере. Максимумы ВФ в каналах О4–О10 расположены в нижней и средней стратосфере.

Измерения

В августе 2019 г. до начала потепления температура воздуха над Антарктидой на уровне 10 гПа (28–32 км) составляла примерно 185–195 К, что следует из показаний радиозондов, выпускавшихся со станции 89009 Amundsen-Scott (Южный полюс) и станций на побережье Антарктиды 89062 Rothera (67,57° ю. ш., 68.13° з. д.), 89055 Base Marambio (64,14° ю. ш., 56,70° в. д.), 89532 Syowa (69,0° ю. ш., 39,58° в. д.), 89564 Mawson (67,60° ю. ш., 62,88° в. д.), 89571 Davis (68,57° ю. ш., 77,97° в. д.), 89592 Mirnyj (66,55° ю. ш., 93,° в. д.), 89611 Casey (66,28° ю. ш., 110,52° в. д.) и 89664 McMurdo (77,85° ю. ш., 166,66° в. д.). Положение станций радиозондирования на карте Антарктиды показано на *рис. 2а* (см. с. 233), а изменчивость температуры воздуха на станциях — на *рис. 2б*, *в*.

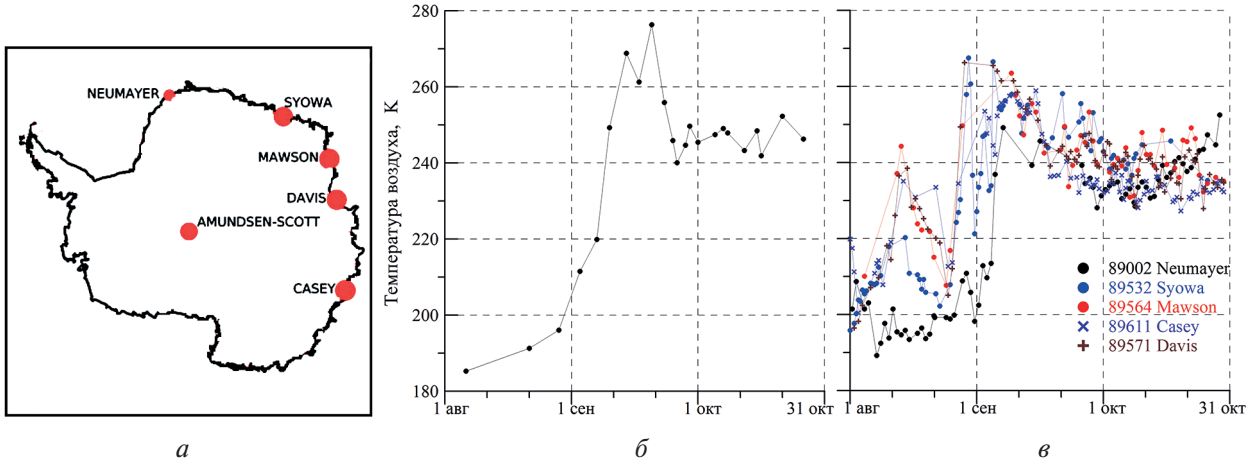

Рис. 2. Положение станций радиозондирования атмосферы в Антарктиде (*а*) и изменчивость температуры воздуха на уровне 10 гПа на станциях 89009 Amundsen-Scott (*б*) и на станциях 89002, 89532, 89564, 89611 и 89571 на побережье (*в*)

В конце августа температура стратосферы по данным радиозондов, которые вели измерения до уровня 10 гПа, а иногда и до 5 гПа, начала быстро расти. Максимальная температура воздуха на уровне 10 гПа $T_{макс}(10)$ достигала 260–275 К. Значения $T_{макс}(10)$ менялись от станции к станции и регистрировались в различные даты, что видно из *рис. 2б*, *в*, на которых суммированы результаты, полученные с 1 августа по 31 октября на станции Amundsen-Scott и на пяти других станциях. Так как лишь отдельные радиозонды достигали высоты в 28–32 км, временной ход потепления отображается не полностью. Рост температуры стратосферы мог, однако, достигать 50–80 К за неделю, что следует из сравнения профилей $T(h)$ на станциях 89532 и 89009 за отдельные даты в сентябре (*рис. 3*). Так, например, температура на высоте 28 км на станции Syowa за трое суток увеличилась на 30 К, а на h = 24 км с 00:00 до 12:00 GMT 5 сентября — примерно на 40 К (см. *рис. 3а*).

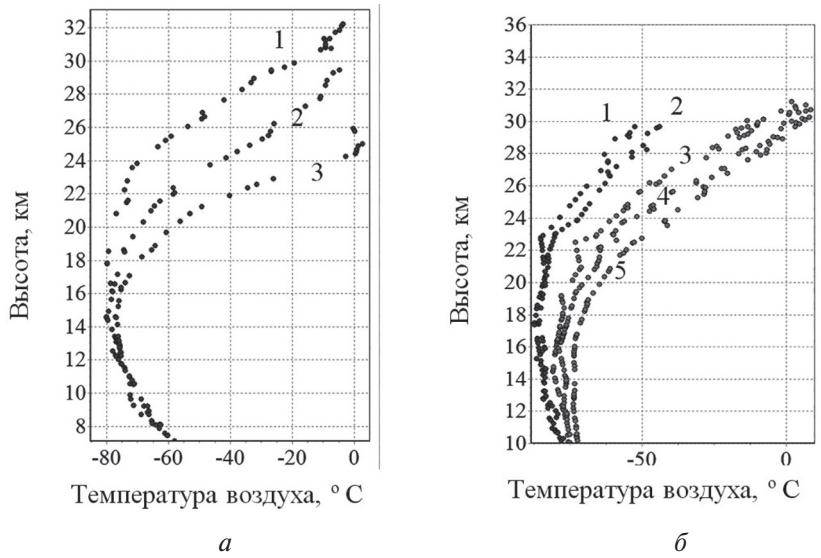

Рис. 3. Вертикальные профили температуры воздуха по данным радиозондов, выпущенных: *а* — со станции 89532 Syowa 2 сентября в 00:00 GMT (1) и 5 сентября в 00:00 GMT (2) и в 12:00 GMT (3); *б* — со станции 89009 Amundsen-Scott 2 сентября (1), 6 (2), 9 (3), 13 (4) и 19 (5) сентября

Данные реанализа Merra-2 (*рис. 4*, см. с. 234) иллюстрируют изменение температуры над Южным полюсом на уровне 10 гПа в августе – октябре 1980–2019 гг. Графики за отдельные

годы отмечены тонкими фиолетовыми линиями, а средняя климатическая зависимость выделена красной пунктирной кривой. Чёрная кривая показывает изменения за 2019 г., когда с 5 по 11 сентября во время ВСП температура увеличилась на 50,8 К — максимальное приращение за неделю за 40-летний период начиная с января 1980 г. В сентябре 2002 г. температура во время ВСП выросла на 38,5 К (зелёная кривая).

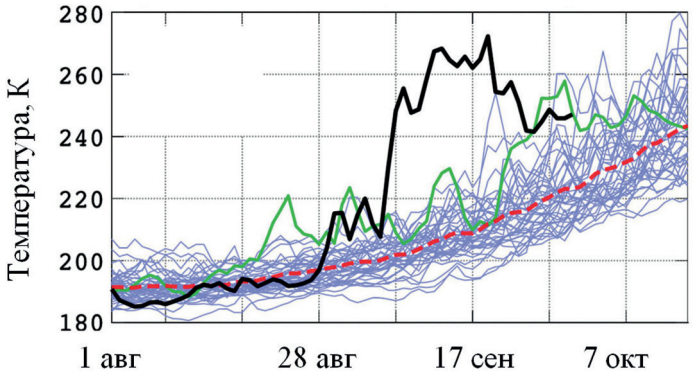

Рис. 4. Температура стратосферы на уровне 10 гПа над Антарктидой в 1980–2019 гг. по данным реанализа Merra-2. Чёрная кривая — ВСП в 2019 г.; зелёная — ВСП в 2002 г.; красная пунктирная кривая — средняя климатическая зависимость (рис. 1а из статьи (Yamazaki et al., 2020); изменён)

Из анализа временных рядов радиозондовых данных и сопутствующей геофизической информации следует ярко выраженная изменчивость температуры тропосферы и стратосферы над Антарктидой на различных пространственно-временных масштабах. Редкая сеть станций радиозондирования (см. *рис. 2а*) и ограниченная высота подъёма радиозондов (см. *рис. 2б*, *в*) дают, однако, неполное представление о динамике и механизмах атмосферных процессов, в частности при ВСП и об их связях с процессами у земной поверхности и в космосе. При ограниченности контактных данных повышается роль спутниковых МВ-измерений, которые регистрируют вариации температуры воздуха в верхней тропосфере – стратосфере не в отдельных точках, а на больших площадях.

Об изменчивости температуры различных слоёв атмосферы над Южной полярной областью на начальной стадии потепления стратосферы свидетельствуют поля уходящего МВ-излучения на частотах каналов О5–О10 (см. *таблицу*), максимумы весовых функций которых расположены в диапазоне высот $h \approx 17$–45 км (см. *рис. 1*). Измерения выполнены радиометром МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 2-2 (Чернявский и др., 2020). На *рис. 5* (см. с. 235) приведены поля яркостных температур $T_я$, построенные путём объединения данных МТВЗА-ГЯ, полученных за отдельные даты с 24 августа по 7 сентября на всех восходящих и нисходящих витках, проходивших над областью к югу от 45° ю. ш. Цифры у цветовых шкал показывают диапазон изменения $T_я$ на конкретных каналах.

На частотах $\nu \geqslant 53{,}8$ ГГц (канал О3 и выше) излучение, принимаемое главным и ближайшими к нему боковыми лепестками диаграммы направленности антенны (ДНА) в передней полусфере, можно обоснованно считать не антенной, а яркостной температурой $T_я$, поскольку оно образуется в стратосфере, изменчивостью характеристик которой на масштабах десятки – сотни километров можно пренебречь. Вклад излучения поверхности в $T_я$ из-за большого поглощения в атмосфере пренебрежимо мал. Также мал и вклад в $T_я$ излучения, принимаемого из задней полусферы ДНА. Оценки показывают, что он меньше 0,5 К даже при коэффициенте рассеяния 0,05. Высокую стабильность измерений обеспечивает калибровка на борту спутника (Чернявский и др., 2020).

Рассмотрим временную и пространственную изменчивость температуры различных слоёв атмосферы над полярной областью, охватывающей Антарктиду и Южный океан. 24 августа температура атмосферы, измеряемая в каналах О5–О7, составляла 170–200 К. Основная часть излучения в этих каналах формируется на высотах от ~17 до ~25–27 км.

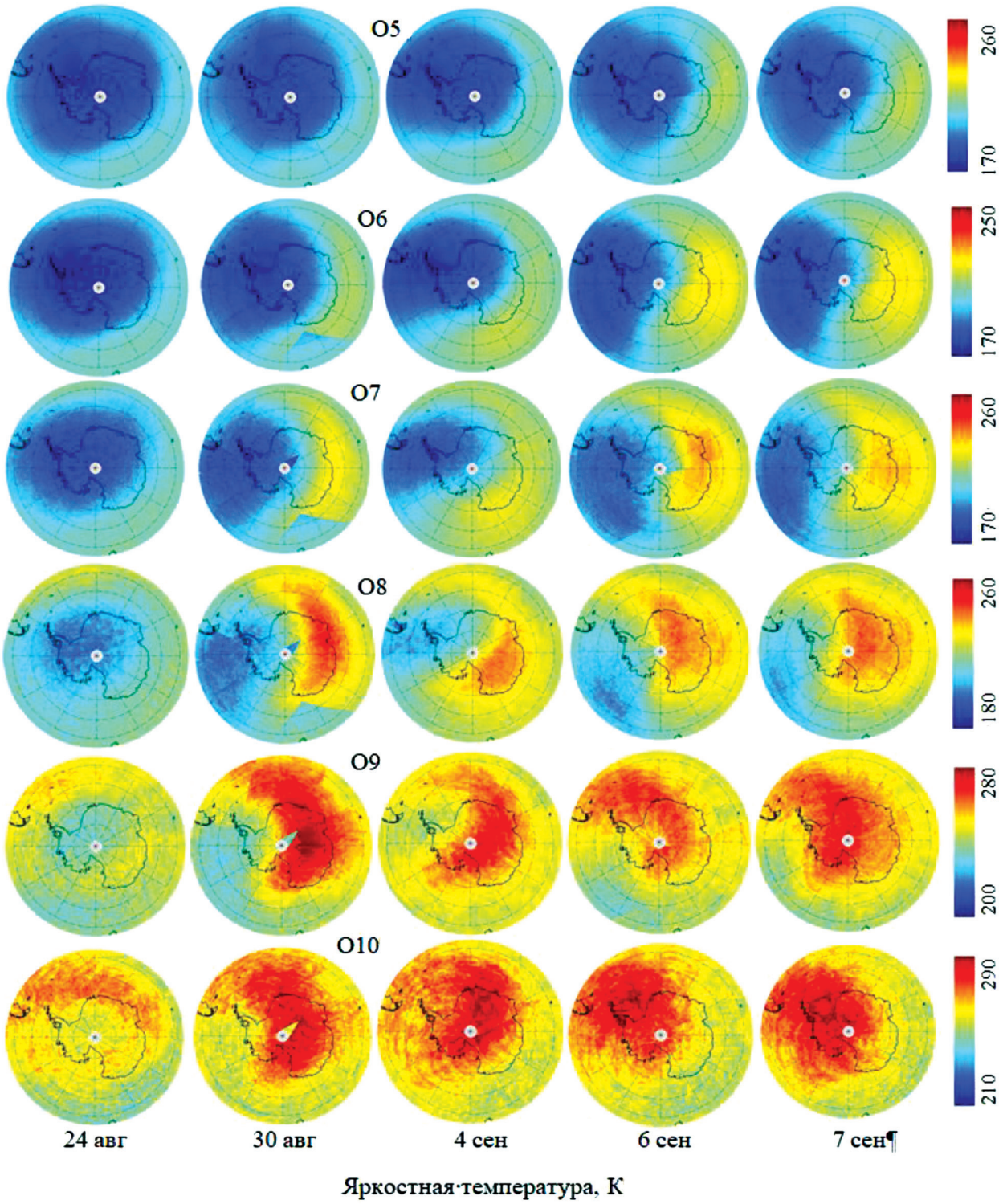

Рис. 5. Изменчивость яркостной температуры над Южной полярной областью по измерениям радиометра МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 2-2 до и во время внезапного стратосферного потепления в конце августа – начале сентября 2019 г.

В каналах O8–O10 яркостная температура, пропорциональная температуре воздуха на высотах $h > 25–27$ км, была больше (210–260 K) и повышалась с номером канала. Одновременно возрастала и площадь районов с более высокой температурой атмосферы. Над Южным полюсом температура была ниже (~190–230 K), чем в кольцевой области вокруг него (~200–250 K).

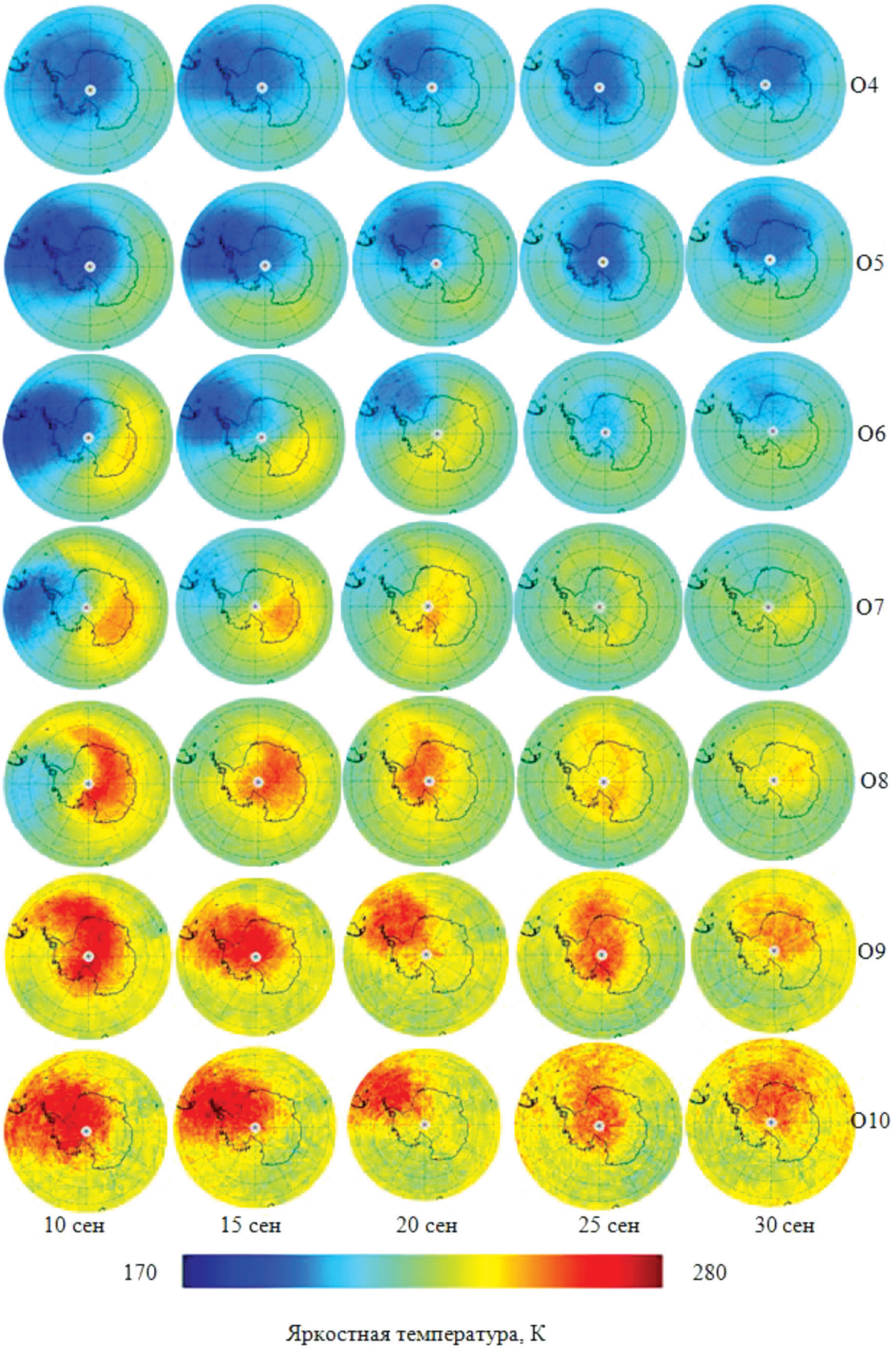

Рис. 6. Изменчивость яркостной температуры над Южной полярной областью с 10 по 30 сентября 2019 г. по измерениям МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 2-2

30 августа температура увеличилась во всех каналах, но особенно в O8–O10, где приращения температуры составили: 30 K — в O8, 50 K — в O9 и 40 K — в O10. Над Южным полюсом температура достигла 270 K (канал O10). Область минимальных температур располагалась на запад и север от центра. В каналах O5 и O6 температура воздуха росла на восток от центра в полосе между ~50 и 70° ю. ш., а над полюсом, как и раньше, отмечалась низкая температура (~180–190 K).

4, 6 и 7 сентября высокая температура (~240–270 K) в каналах O8–O10 отмечалась над обширной областью, в том числе и над Южным полюсом. По данным в каналах O5–O7 и показаниям радиозондов температура воздуха в верхней тропосфере – нижней стратосфере выросла до 210–220 K. Холодный воздух отмечался преимущественно в западном секторе антарктической области. Температура здесь составляла ~190–210 K.

Рассмотрим развитие ВСП с 10 сентября с шагом 5 сут. На *рис. 6* (см. с. 236) приведены поля яркостных температур нижней и средней стратосферы над полярной областью за 10, 15, 20, 25 и 30 сентября, построенные по данным МТВЗА-ГЯ в каналах O4–O10. Измерения в этих каналах дают наглядное представление о пространственно-временной изменчивости температуры воздуха на высотах от ~12–15 до 45–50 км.

10 сентября минимальная температура воздуха (190–210 K) отмечалась в обширном районе к западу от центра на высоте $h \approx 18$–28 км, а максимальная (240–260 K) — в хорошо выраженной вихреобразной структуре на высотах $h \approx 27$–45 км (каналы O8–O9) и в обширной области к западу от центра на высотах 38–50 км (канал O10). Температура в нижней стратосфере ($h \approx 17$–25 км, канал O4) составляла 220–230 K.

15 сентября основные особенности вертикального распределения температуры сохранились, однако минимальная температура на высоте ~27–32 км (канал O6) возросла, а максимальная — уменьшилась. В каналах O7 и O8 различие между максимальным и минимальным значениями температуры также уменьшилось. В канале O10 максимальная температура (~270 K) отмечалась над Антарктическим п-овом, а над Южным полюсом температура воздуха понизилась.

20 сентября продолжался рост минимальной температуры воздуха в каналах O4–O7 и изменилось положение областей с максимальной температурой в каналах O8–O10. 25 сентября центр холодного вихря в каналах O4–O7 снова располагался над Южным полюсом. Минимальная температура воздуха (~210 K) наблюдалась при этом в канале 5 ($h \approx 15$–23 км). В то же время над Южным полюсом температура воздуха (каналы O9 и O10) была максимальна.

30 сентября область с минимальной температурой воздуха на высотах $h < 25$ км (каналы O4–O6) была ориентирована в направлении нулевого меридиана. В средней стратосфере (каналы O9–O10) такую же ориентацию имела область с максимальной температурой. Очевидно, что наблюдения радиометра МТВЗА-ГЯ могут быть применены для анализа процессов с более высоким временным разрешением и с лучшим пространственным разрешением по сравнению с радиозондовыми данными и со спутниковыми измерениями с меньшей шириной полосы обзора, что важно для совершенствования моделирования процессов в стратосфере.

Обсуждение и выводы

Внезапное стратосферное потепление над Антарктидой — редкий крупномасштабный процесс в атмосфере Южного полушария — было зарегистрировано в августе – сентябре 2019 г. многоканальным микроволновым радиометром МТВЗА-ГЯ с метеорологического спутника «Метеор-М» № 2-2 вскоре после его запуска (Чернявский и др., 2020). Анализ измерений в 10 каналах, принимающих уходящее излучение атмосферы в области сильного поглощения молекулярного кислорода в диапазоне частот 52,8–57,6 ГГц, позволил оценить пространственно-временную изменчивость процесса от невозмущённой стадии до наиболее интенсивного развития потепления и его диссипации. При ВСП температура стратосферы менее чем за неделю увеличилась на 50 K и больше.

Из анализа спутниковых данных следует, что потепление началось в последнюю неделю августа 2019 г. на высотах 35–50 км и было зарегистрировано в каналах O9 и O10. В сентябре оно распространилось на нижнюю стратосферу – верхнюю тропосферу (каналы O4–O7), причём область с высокой температурой сместилась в северо-западном направлении, а Южный полюс оказался на периферии этой области (см. *рис. 5* и *6*). Повышение температуры охватывало значительный по высоте слой атмосферы. Полуширина весовых функций стратосферных каналов O4–O10 составляет ~10–13 км (см. *рис. 1*), и яркостная температура является, таким образом, взвешенным значением значительного по толщине слоя атмосферы, температура которого быстро меняется во время ВСП.

Явление ВСП было также зарегистрировано аэрологическими станциями, расположенными на Южном полюсе и на побережье континента. Редкая сеть станций и ограниченная высота подъёма радиозондов не позволяют, однако, исследовать динамику внезапного стратосферного потепления, влияние которого на геофизические процессы отмечается от земной поверхности до ионосферы. Развитие ВСП в конце августа – сентябре 2019 г. над Южным полюсом уверенно прослеживается по данным реанализа Merra-5 (Yamazaki et al., 2020). Из анализа этих данных следует, что возникновение ВСП над Антарктидой было вызвано квазишестидневной волной Россби, сформировавшейся в полярной стратосфере на высотах 30–40 км, где атмосфера нестабильна из-за сильного вертикального сдвига ветра, связанного с обрушением планетарных волн (Yamazaki et al., 2020).

Образование ВСП в сентябре 2019 г. следовало и из результатов моделирования, опубликованных в журнале Nature Geoscience до начала потепления (Lim et al., 2019), что является убедительным свидетельством высокого уровня современных стратосферных моделей, использование которых позволит выпускать более точные краткосрочные прогнозы погодных условий (Lewis, 2019). В работе (Lim et al., 2019), в частности, был предсказан длительный период засушливой жаркой погоды в Австралии. В Специальном заявлении о климате, выпущенном в ноябре Бюро метеорологии в Австралии (*англ.* Bureau of Meteorology) (Special..., 2019), приведены сведения о резком увеличении количества и площади пожаров на континенте в октябре – ноябре 2019 г., вызванных высокой температурой воздуха и отсутствием дождей. Подчёркнуто, что аномалии температуры и осадков являются следствием ВСП над Антарктидой. Указанные процессы были также зафиксированы на частотах имаджера 36,5; 42,0 и 91,6 ГГц, измерения на которых служат основой для оценки температуры поверхности (температуры воздуха у поверхности) и индикации мощной облачности и осадков (Митник и др., 2019; Чернявский и др., 2020).

Следствием роста температуры стратосферы стало и уменьшение площади озоновой дыры, определяемое со спутников NASA и NOAA Aura, SNPP и NOAA-20 (Gray, Stain, 2019). В октябре 2019 г. площадь дыры составила 16,4 млн км^2 — минимальное значение с 1982 г., когда она впервые была обнаружена. На высоте ~20 км температура в сентябре была на 16 °C выше средней (самый тёплый сентябрь за 40 лет), что показали данные со станций радиозондирования (см. *рис. 2б*, *в*). При ВСП над Антарктидой в 2002 г. площадь дыры также снизилась, и она разделилась на две (Varotsos, Kondratyev, 2003). Из-за ВСП центр антарктического полярного вихря сместился с обычного положения над полюсом, а сам вихрь ослабел. Скорость ветра в потоке вокруг Антарктиды снизилась со среднего значения 266 км/ч до 110, и воздух стал опускаться в нижнюю стратосферу. При этом температура нижней стратосферы над Антарктикой возросла, и холодные полярные стратосферные облака, влияющие на разрушение озона, не смогли образоваться. Количество озона увеличилось и благодаря интенсивным погодным системам, которые приносят в область антарктической озоновой дыры воздух с высоким содержанием озона из других районов Южного полушария. Эти системы видны в полях $T_я$ на частотах имаджера и в каналах зондировщика МТВЗА-ГЯ в области резонансной линии водяного пара на $\nu = 183{,}31$ ГГц. Оба эффекта привели к гораздо более высоким, чем обычно, уровням озона над Антарктидой по сравнению с условиями, типичными для озоновой дыры, наблюдавшимися с середины 1980-х гг. (Gray, Stain, 2019).

Очевидно, что опыт анализа данных, полученных МТВЗА-ГЯ во время ВСП как в Южном полушарии, так и в Северном (Mitnik et al., 2018), может быть востребован вместе

с измерениями других МВ-сенсоров (Zou et al., 2018) и данными моделирования. Актуальность детального изучения ВСП в Южном и Северном полушариях обусловлена многочисленностью связей процессов в стратосфере с процессами в ионосфере и в тропосфере (Агеева и др., 2017; Baldwin et al., 2020; Pedatella et al., 2018; Yamazaki et al., 2020).

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Российского научного фонда 20-17-00179. Авторы благодарят И. В. Чёрного за предоставление данных измерений радиометра МТВЗА-ГЯ, а также признательны рецензенту за внимательное чтение рукописи и сделанные замечания.

Литература

1. *Агеева В. Ю.*, *Груздев А. Н.*, *Елохов А. С.*, *Мохов И. И.*, *Зуева Н. Е.* Внезапные стратосферные потепления: статистические характеристики и влияние на общее содержание NO_2 и O_3 // Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 5. С. 545–555.
2. *Барсуков И. А.*, *Болдырев В. В.*, *Ильгасов П. А.*, *Никитин О. В.*, *Панцов В. Ю.*, *Прохоров Ю. Н.*, *Стрельников Н. И.*, *Стрельцов А.М*, *Черный И. В.*, *Чернявский Г. М.*, *Яковлев В. В.* СВЧ-радиометр МТВЗА-ГЯ спутника «Метеор-М» № 1 // Всероссийская научно-техн. конф. «Актуальные проблемы ракетно-космичю приборостроения и информац. технологий»: сб. тр. М.: Физматлит, 2009. С. 99–107.
3. *Барсуков И. А.*, *Никитин О. В.*, *Стрельцов А. М.*, *Черный И. В.*, *Чернявский Г. М.* Предварительная обработка данных СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ КА «Метеор-М» № 1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 257–264.
4. *Болдырев В. В.*, *Ильгасов П. А.*, *Панцов В. Ю.*, *Прохоров Ю. Н.*, *Стрельников Н. И.*, *Черный И. В.*, *Чернявский Г. М.*, *Яковлев В. В.* Спутниковый микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. № 1. С. 243–248.
5. *Митник Л. М.*, *Кулешов В. П.*, *Митник М. Л.* Микроволновое дистанционное зондирование аридных и полуаридных земель. Пустыня Такла-Макан (аналогия с морскими процессами) // Материалы Семнадцатой Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 11–15 нояб. 2019. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 303.
6. *Чернявский Г. М.*, *Митник Л. М.*, *Кулешов В. П.*, *Митник М. Л.*, *Чёрный И. В.* Микроволновое зондирование океана, атмосферы и земных покровов по данным спутника «Метеор-М» № 2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 78–100. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-78-100.
7. *Чернявский Г. М.*, *Митник Л. М.*, *Кулешов В. П.*, *Митник М. Л.*, *Стрельцов А. М.*, *Евсеев Г. Е.*, *Черный И. В.* Моделирование яркостных температур и первые результаты, полученные микроволновым радиометром МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 2-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 51–65.
8. *Baldwin M. P.*, *Ayarzaguena B.*, *Birner T.*, *Butchart N.*, *Charlton-Perez A. J.*, *Butler A. H.*, *Domeisen D. I. V.*, *Garfinkel C. I.*, *Garny H.*, *Gerber E. P.*, *Hegglin M. I.*, *Langematz U.*, *Pedatella N. M.* Sudden stratospheric warmings // Earth and Space Science Open Archive. 2020. 49 p. DOI: 10.1002/essoar.10502884.1.
9. *Barsukov I.*, *Cherniavsky G.*, *Cherny I.*, *Mitnik L.*, *Kuleshov V.*, *Mitnik M.* New Russian meteorological satellite Meteor-M N 2: Sensing of the subsurface, surface and atmospheric characteristics by MTVZA-GY microwave imager/sounder // Proc. IGARSS. 2016. P. 5528–5531.
10. *Butler A. H.*, *Seidel D. J.*, *Hardiman S. C.*, *Butchart N.*, *Birner T.*, *Match A.* Defining sudden stratospheric warmings // Bull. American Meteorological Society. 2015. V. 96. No. 11. P. 1913–1928.
11. *Butler A. H.*, *Sjoberg J. P.*, *Seidel D. J.*, *Rosenlof K. H.* A sudden stratospheric warming compendium // Earth System Science Data. 2017. V. 9. No. 1. P. 63–76.
12. *Charlton A. J.*, *Polvani L. M.* A new look at stratospheric sudden warmings. Pt. I: Climatology and modeling benchmarks // J. Climate. 2007. V. 20. No. 3. P. 449–469.
13. *Cherny I. V.*, *Mitnik L. M.*, *Mitnik M. L.*, *Uspensky A. B.*, *Streltsov A. M.* On-orbit calibration of the "Meteor-M" Microwave Imager/Sounder // Proc. IGARSS. 2010. P. 558–561.
14. *Gray E.*, *Stain T.* 2019 Ozone Hole is the Smallest on Record Since Its Discovery // Nasa.gov. 21 Oct. 2019. URL: https://www.nasa.gov/feature/goddard/2019/2019-ozone-hole-is-the-smallest-on-record-since-its-discovery.
15. *Kidder S. Q.*, *Goldberg M. D.*, *Zehr R. M.*, *DeMaria M.*, *Purdom J. F. W.*, *Velden C. S.*, *Grody N. C.*, *Kusselson S. J.* Satellite analysis of tropical cyclones using the Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU) // Bull. American Meteorological Society. 2000. V. 81. No. 6. P. 1241–1259.

16. *Krüger R.*, *Naujokat B.*, *Labitzke K.* The unusual midwinter warming in the Southern hemisphere stratosphere 2002: A comparison to Northern hemisphere phenomena // J. Atmospheric Sciences. 2005. V. 62. P. 603–613.
17. *Lewis D.* Rare warming over Antarctica reveals power of stratospheric models // Nature. 2019. V. 574. P. 160–161.
18. *Lim E.-P.*, *Hendon H. H.*, *Boschat G.*, *Hudson D.*, *Thompson D. W. J.*, *Dowdy A. J.*, *Arblaster J. M.* Australian hot and dry extremes induced by weakenings of the stratospheric polar vortex // Nature Geoscience. 2019. V. 12. P. 896–901. URL: https://doi.org/10.1038/s41561-019-0456-x.
19. *McInturff R. M.* Stratospheric warmings: Synoptic, dynamic and general-circulation aspects: NASA-RP-1017 // NTRS — NASA Technical Reports Server. 1978. Document ID 19780010687. 175 p. URL: https://ntrs.nasa.gov/citations/19780010687.
20. *Mitnik L.*, *Kuleshov V.*, *Mitnik M.*, *Streltsov A. M.*, *Cherniavsky G.*, *Cherny I.* Microwave scanner sounder MTVZA-GY on new Russian meteorological satellite Meteor-M N 2: modeling, calibration and measurements // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2017. V. 10. No. 7. P. 3036–3045.
21. *Mitnik L. M.*, *Kuleshov V. P.*, *Pichugin M. K.*, *Mitnik M. L.* Sudden stratospheric warming in 2015–2016: Study with satellite passive microwave data and reanalysis // Proc. IGARSS. 23–27 July 2018, Valencia, Spain. 2018. P. 5560–5563. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8517495.
22. *Pedatella N. M.*, *Chau J. L.*, *Schmidt H.*, *Goncharenko L. P.*, *Stolle C.*, *Hocke K.*, *Harvey V. L.*, *Funke B.*, *Siddiqui T. A.* How sudden stratospheric warming affects the whole atmosphere // Earth and Space Science News. 2018. V. 99. URL: https://doi.org/10.1029/2018EO092441.
23. *Schwartz M. J.*, *Lambert A.*, *Manney G. L.*, *Read W. G.*, *Livesey N. J.*, *Froidevaux L.*, *Ao C. O.*, *Bernath P. F.*, *Boone C. D.*, *Cofield R. E.*, *Daffer W. H.*, *Drouin B. J.*, *Fetzer E. J.*, *Fuller R. A.*, *Jarnot R. F.*, *Jiang Y. B.*, *Knosp B. W.*, *Krüger K.*, *Li J.-L. F.*, *Mlynczak M. G.*, *Pawson S.*, *Russell J. M.*, *Santee M. L.*, *Snyder W. V.*, *Stek P. C.*, *Thurstans R. P.*, *Tompkins A. M.*, *Wagner P. A.*, *Walker K. A.*, *Waters J. W.*, *Wu D. L.* Validation of the Aura Microwave Limb Sounder temperature and geopotential height measurements // J. Geophysical Research. 2008. V. 113. D15S11. DOI: 10.1029/2007JD008783.
24. *Special Climate Statement 72 — dangerous bushfire weather in spring 2019.* Bureau of Meteorology. 18 Dec. 2019, 28 p. URL: http://www.bom.gov.au/climate/current/statements/scs72.pdf.
25. *Varotsos C.*, *Kondratyev K. Ya.* The unusual split in the Antarctic ozone hole in September 2002 // Studying the Earth from Space. 2003. No. 1. P. 92–93.
26. *Yamazaki Y.*, *Matthias V.*, *Miyoshi Y.*, *Stolle C.*, *Siddiqui T.*, *Kervalishvili G.*, *Laštovička J.*, *Kozubek M.*, *Ward W.*, *Themens D. R.*, *Kristoffersen S.*, *Alken P.* September 2019 Antarctic sudden stratospheric warming: Quasi-6-day wave burst and ionospheric effects // Geophysical Research Letters 2020. V. 47. e2019GL086577. URL: https://doi.org/10.1029/2019GL086577.
27. *Zou C. Z.*, *Goldberg M. D.*, *Hao X.* New generation of U. S. satellite microwave sounder achieves high radiometric stability performance for reliable climate change detection // Science Advances. 2018. V. 4. No. 10. eaau0049. DOI: 10.1126/sciadv.aau0049.

Sudden stratospheric warming over Antarctica in September 2019 from the data of the MTVZA-GYa radiometer on the Meteor-M No. 2-2 satellite

L. M. Mitnik, V. P. Kuleshov, M. L. Mitnik

V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia
E-mails: mitnik@poi.dvo.ru, 986022@mail.ru, maia@poi.dvo.ru

This paper presents the first results of measurements of an exceptionally rare large-scale atmospheric phenomenon — Sudden Stratospheric Warming (SSW) in the Southern Hemisphere. Measurements made with the MTVZA-GYa scanning microwave (MW) temperature and humidity sounder of the atmosphere on the Meteor-M No. 2-2 new Russian meteorological satellite in the frequency range $\nu = 52.8 - 57.6$ GHz give an idea of the variability of the Earth's stratosphere and the upper troposphere temperature. When analyzing the time series of antenna temperatures $T_a(\nu)$ at 10 frequencies, a rapid (by several tens of degrees per a week) increase in the temperature of the middle and lower

stratosphere over Antarctica in late August – September 2019 was detected. Satellite data are in agreement with the vertical profiles of air temperature according to radiosondes released from the South Pole (station 89009) and from the coast of Antarctica (stations 89062, 89055, 89592, 89611, 89511, 89664 and 89532), the maximum lifting height of which is h_{max} = 28–34 km. The radiosonde profiles and reanalysis data were used to calculate brightness temperatures $T_b(\nu)$ and weighting functions of radiometer channels receiving outgoing Earth radiation at 5 frequencies of 52.8, 53.3, 53.8, 54.64 and 55.63 GHz, in a wide band ($\Delta\nu$ = 400 MHz) and at 5 frequencies in the region of the oxygen resonance line centered at ν_0 = 57.2903 GHz, with a variable bandwidth. $T_b(\nu)$ was found by numerical integration of the microwave radiation transfer equation. The evolution of the SSW over the south polar region was traced using the time series of $T_b(\nu)$ fields constructed from MTVZA-GYa data from Augus 6 to September 30, 2019. From the accompanying measurements, it follows that the warming was accompanied by changes in atmospheric circulation in a vast region, drought and severe fires in Australia, a decrease in the area of the ozone hole over Antarctica, and a disturbance in the characteristics of the ionosphere.

Keywords: MTVZA-GYa microwave radiometer, Meteor-M No. 2-2, Sudden Stratospheric Warming, Southern Hemisphere, September 2019, brightness temperature, space-time variability, radiosondes, modeling

Accepted: 02.11.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-229-242

References

1. Ageeva V. Yu., Gruzdev A. N., Elokhov A. S., Mokhov I. I., Zueva N. E., Vnezapnye stratosphernye poteplenya: statisticheskie kharakteristiki i vliyanie na obshchee soderzhanie NO_2 i O_3 (Sudden stratospheric warmings: Statistical characteristics and influence on NO_2 and O_3 total contents), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmospheri i okeana*, 2017, Vol. 53, No. 5, pp. 477–486, DOI: 10.1134/S0001433817050036.
2. Barsukov I. A., Boldyrev V. V., Ilgasov P. A., Nikitin O. V., Pantsov V. Yu., Prokhorov Yu. N., Strelnikov N. I., Streltsov A. M., Chernyi I. V., Chernyavskii G. M., Yakovlev V. V., SVCh-radiometer MTVZA-GYa sputnika Meteor-M No. 1 (Microwave radiometer MTVZA-GY onboard Meteor-M No. 1 satellite), *Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Aktual'nye problemy raketno-kosmicheskogo priborostroeniya i informatsionnykh tekhnologii"* (All-Russia Scientific and Technological Conf. "Current problems of rocket and space instrument development and information technology"), Proc. conf., Moscow: Fizmatlit, 2009, pp. 99–107.
3. Barsukov I. A., Nikitin O. V., Streltsov A. M., Chernyi I. V., Chernyavskii G. M., Predvaritel'naya obrabotka dannykh SVCh-radiometra MTVZA-GYa KA "Meteor-M" No. 1 (Preliminary data processing of microwave radiometer MTVZA-GY based on spacecraft Meteor-M No 1), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 2, pp. 257–264.
4. Boldyrev V. V., Ilgasov P. A., Pantsov V. Yu., Prokhorov Yu. N., Strelnikov N. I., Chernyi I. V., Chernyavskii G. M., Yakovlev V. V., Sputnikovyi mikrovolnovyi skaner/zondirovshchik MTVZA-GYa (Satellite Microwave Scanner/Sounder MTVZA-GY), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 1, No. 1, pp. 243–248.
5. Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Mikrovolnovoe distantsionnoe zondirovanie aridnykh i poluaridnykh zemel'. Pustynya Takla-Makan (analogiya s morskimi protsessami) (Microwave remote sensing of arid and semi-arid lands. Takla-Makan Desert (analogous to marine processes)), *Materialy Semnadtsatoi Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 17th Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), 11–15 Nov. 2019, Moscow: IKI RAN, 2019, p. 303.
6. Chernyavskii G. M., Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Chernyi I. V., Mikrovolnovoe zondirovanie okeana, atmosfery i zemnykh pokrovov po dannym sputnika "Meteor-M" No. 2 (Microwave sensing of the ocean, atmosphere and land surface from Meteor-M No. 2 data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 78–100, DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-78-100.
7. Chernyavskii G. M., Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Streltsov A. M., Evseev G. E., Chernyi I. V., Modelirovanie yarkostnykh temperatur i pervye rezul'taty, poluchennye mikrovolnovym radiometrom MTVZA-GYa so sputnika "Meteor-M" No. 2-2 (Brightness temperature modeling and first results derived from the MTVZA-GY radiometer of the Meteor-M No. 2-2 satellite), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 51–65.

8. Baldwin M. P., Ayarzaguena B., Birner T., Butchart N., Charlton-Perez A. J., Butler A. H., Domeisen D. I. V., Garfinkel C. I., Garny H., Gerber E. P., Hegglin M. I., Langematz U., Pedatella N. M., Sudden stratospheric warmings, *Earth and Space Science Open Archive*, 2020, 49 p., DOI: 10.1002/essoar.10502884.1.
9. Barsukov I., Cherniavsky G., Cherny I., Mitnik L., Kuleshov V., Mitnik M., New Russian meteorological satellite Meteor-M No. 2: Sensing of the subsurface, surface and atmospheric characteristics by MTVZA-GY microwave imager/sounder, *Proc. IGARSS*, 2016, pp. 5528–5531.
10. Butler A. H., Seidel D. J., Hardiman S. C., Butchart N., Birner T., Match A., Defining sudden stratospheric warmings, *Bull. American Meteorological Society*, 2015, Vol. 96, No. 11, pp. 1913–1928.
11. Butler A. H., Sjoberg J. P., Seidel D. J., Rosenlof K. H., A sudden stratospheric warming compendium, *Earth System Science Data*, 2017, Vol. 9, No. 1, pp. 63–76.
12. Charlton A. J., Polvani L. M., A new look at stratospheric sudden warmings, Part I: Climatology and modeling benchmarks, *J. Climate*, 2007, Vol. 20, No. 3, pp. 449–469.
13. Cherny I. V., Mitnik L. M., Mitnik M. L., Uspensky A. B., Streltsov A. M., On-orbit calibration of the "Meteor-M" Microwave Imager/Sounder, *Proc. IGARSS*, 2010, pp. 558–561.
14. Gray E., Stain T., 2019 ozone hole is the smallest on record since its discovery, *Nasa.gov*, Oct. 21, 2019, available at: https://www.nasa.gov/feature/goddard/2019/2019-ozone-hole-is-the-smallest-on-record-since-its-discovery.
15. Kidder S. Q., Goldberg M. D., Zehr R. M., DeMaria M., Purdom J. F. W., Velden C. S., Grody N. C., Kusselson S. J., Satellite analysis of tropical cyclones using the Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU), *Bull. American Meteorological Society*, 2000, Vol. 81, No. 6, pp. 1241–1259.
16. Krüger R., Naujokat B., Labitzke K., The unusual midwinter warming in the Southern hemisphere stratosphere 2002: A comparison to Northern hemisphere phenomena, *J. Atmospheric Sciences*, 2005, Vol. 62, pp. 603–613.
17. Lewis D., Rare warming over Antarctica reveals power of stratospheric models, *Nature*, 2019, Vol. 574, pp. 160–161.
18. Lim E., Hendon H. H., Boschat G., Hudson D., Thompson D. W. J., Dowdy A. J., Arblaster J. M., Australian hot and dry extremes induced by weakenings of the stratospheric polar vortex, *Nature Geoscience*, 2019, Vol. 12, pp. 896–901, available at: https://doi.org/10.1038/s41561-019-0456-x.
19. McInturff R. M., Stratospheric warmings: Synoptic, dynamic and general circulation aspects: NASA-RP-1017, *NTRS — NASA Technical Reports Server*, 1978, Document ID 19780010687, 175 p., available at: https://ntrs.nasa.gov/citations/19780010687.
20. Mitnik L., Kuleshov V., Mitnik M., Streltsov A. M., Cherniavsky G., Cherny I., Microwave scanner sounder MTVZA-GY on new Russian meteorological satellite Meteor-M N 2: modeling, calibration and measurements, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, Vol. 10, No. 7, pp. 3036–3045.
21. Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Pichugin M. K., Mitnik M. L., Sudden stratospheric warming in 2015–2016: Study with satellite passive microwave data and reanalysis, *Proc. IGARSS*, 23–27 July 2018, Valencia, Spain, 2018, pp. 5560–5563, DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8517495.
22. Pedatella N. M., Chau J. L., Schmidt H., Goncharenko L. P., Stolle C., Hocke K., Harvey V. L., Funke B., Siddiqui T. A., How sudden stratospheric warming affects the whole atmosphere, *Earth and Space Science News*, 2018, Vol. 99, available at: https://doi.org/10.1029/2018EO092441.
23. Schwartz M. J., Lambert A., Manney G. L., Read W. G., Livesey N. J., Froidevaux L., Ao C. O., Bernath P. F., Boone C. D., Cofield R. E., Daffer W. H., Drouin B. J., Fetzer E. J., Fuller R. A., Jarnot R. F., Jiang Y. B., Knosp B. W., Krüger K., Li J.-L. F., Mlynczak M. G., Pawson S., Russell J. M., Santee M. L., Snyder W. V., Stek P. C., Thurstans R. P., Tompkins A. M., Wagner P. A., Walker K. A., Waters J. W., Wu D. L., Validation of the Aura Microwave Limb Sounder temperature and geopotential height measurements, *J. Geophysical Research*, 2008, Vol. 113, D15S11, DOI: 10.1029/2007JD008783.
24. *Special Climate Statement 72 — dangerous bushfire weather in spring 2019*, Bureau of Meteorology, 18 Dec. 2019, 28 p., available at: http://www.bom.gov.au/climate/current/statements/scs72.pdf.
25. Varotsos C., Kondratyev K. Ya., The unusual split in the Antarctic ozone hole in September 2002, *Studying the Earth from Space*, 2003, No. 1, pp. 92–93.
26. Yamazaki Y., Matthias V., Miyoshi Y., Stolle C., Siddiqui T., Kervalishvili G., Laštovička J., Kozubek M., Ward W., Themens D. R., Kristoffersen S., Alken P., September 2019 Antarctic sudden stratospheric warming: Quasi-6-day wave burst and ionospheric effects, *Geophysical Research Letters*, 2020, Vol. 47, e2019GL086577, available at: https://doi.org/10.1029/2019GL086577.
27. Zou C. Z., Goldberg M. D., Hao X., New generation of U. S. satellite microwave sounder achieves high radiometric stability performance for reliable climate change detection, *Science Advances*, 2018, Vol. 4, No. 10, eaau0049, DOI: 10.1126/sciadv.aau0049.