

Внезапное стратосферное потепление в январе 2021 г. по микроволновым измерениям со спутника «Метеор-М» № 2-2

Л. М. Митник^{1,2}, В. П. Кулешов^{1,2}, М. Л. Митник¹

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН
Владивосток, 690041, Россия
E-mail: mitnik@poi.dvo.ru

² Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия

В работе приведены результаты микроволновых (МВ) измерений возникновения и развития внезапного стратосферного потепления (ВСП) над Северным полушарием. Измерения, выполненные в диапазоне частот $\nu = 52,8\text{--}57,6$ ГГц сканирующим температурно-влажностным зондировщиком атмосферы МТВЗА-ГЯ в декабре 2020 г. – феврале 2021 г., дают представление о пространственно-временной изменчивости температуры различных слоёв стратосферы над высокими и умеренными широтами. Анализ временных рядов яркостной температуры $T_{\text{я}}(\nu)$ на 10 частотах выявил быстрый (на несколько десятков градусов за неделю) рост температуры средней и нижней стратосферы во время ВСП в январе 2021 г. Рост температуры воздуха $T(h)$ зарегистрирован радиозондами, выпущенными со станций 03005, 04320, 04220, 10113 и 71822, максимальная высота подъёма которых $h_{\text{макс}}$ достигала 30–36 км. По профилям температуры и давления атмосферы от поверхности до $h_{\text{макс}} = 70$ км, усреднённым в широтном поясе 60–70° с.ш. для зимнего периода (декабрь – февраль), рассчитаны яркостные температуры $T_{\text{я}}(\nu)$ и весовые функции на частотах 52,8 ГГц; 53,3; 53,8; 54,64 и 55,63 ГГц и на 5 частотах в области линии поглощения кислорода, центрированной на $\nu_0 = 57,2903$ ГГц. Значения $T_{\text{я}}(\nu)$ найдены численным интегрированием уравнения переноса МВ-излучения. По временным рядам полей $T_{\text{я}}(\nu)$ прослежена эволюция ВСП над Северной полярной областью с 24 декабря 2020 г. по 10 февраля 2021 г. Потепление началось на высотах примерно 30–40 км, а затем распространилось в нижележащие слои стратосферы. Из анализа измерений МТВЗА-ГЯ, сопутствующей оперативной информации о погоде и литературных данных следует, что потепление сопровождалось ослаблением и смещением полярного вихря, резкими отрицательными и положительными аномалиями температуры воздуха у земной поверхности.

Ключевые слова: микроволновый радиометр МТВЗА-ГЯ, «Метеор-М» № 2-2, внезапное стратосферное потепление, январь 2021 г., яркостная температура, пространственно-временная изменчивость, радиозонды

Одобрена к печати: 28.04.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-288-297

Введение

Внезапное стратосферное потепление (ВСП) представляет собой явление, при котором температура полярной стратосферы (атмосферы на высоте h от 10 до 50 км) возрастает на десятки градусов (вплоть до 50 °С) за несколько дней (Butler et al., 2017). Влияние потепления на процессы в нижней и верхней атмосфере и на масштабные аномалии погоды стимулировало их детальное исследование различными методами и разработку классификации типов потепления (Baldwin et al., 2020; Butler et al., 2017).

Два основных вида ВСП: «малые» (*англ.* minor), когда температура зимней полярной стратосферы за неделю или менее возрастает по крайней мере на 25 К, и «главные» (*англ.* major), когда на геопотенциальной поверхности 10 гПа (30–32 км) средний зональный поток в полярных широтах меняет направление на противоположное. Среднее за зиму количество главных ВСП составляет ~0,6 в Северном полушарии (Butler et al., 2015). В Южном полушарии они происходят существенно реже: ВСП были зарегистрированы в сентябре 2002 г. и в августе – сентябре 2019 г. (Митник и др., 2020; Baldwin et al., 2021; Yamazaki et al., 2020). В обоих полушариях выявлены прочные связи ВСП с изменениями в атмосфере от поверхности

до термосферы, проявляющиеся в распределении температуры воздуха, ветра, скорости химических реакций, плотности электронов и других характеристик (Domeisen, Butler, 2020; Hall et al., 2021; Pedatella et al., 2018 и цитируемая в публикациях литература). Из результатов анализа ВСП и погодных явлений за 40 лет следует, что ВСП могут служить надёжным предиктором крупномасштабных явлений у поверхности Земли, в том числе и экстремальных.

Редкая сеть и ограниченная высота подъёма радиозондов дают отрывочное и неполное представление о температурном режиме стратосферы. С 1979 г. изменчивость температуры атмосферы изучается по спутниковым микроволновым (МВ) измерениям. В настоящее время восстановление профиля $T(h)$ выполняется по данным радиометра ATMS (англ. Advanced Technology Microwave Sounder) со спутников NOAA/NASA (англ. National Oceanic and Atmospheric Administration — Национальное управление океанических и атмосферных исследований США; National Aeronautics and Space Administration — Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства США) SNPP (англ. Suomi National Polar-orbiting Partnership) и NOAA-20 и радиометра MSL (англ. Microwave Limb Sounder) со спутника Aura.

Внезапные стратосферные потепления были зарегистрированы МВ-радиометром МТВЗА-ГЯ (модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы, ГЯ — в память о Геннадии Яковлевиче Гуськове (1918–2002)) с метеорологических спутников «Метеор-М» № 2 в 2015 и 2016 гг. в Северном полушарии и «Метеор-М» № 2-2 в сентябре 2019 г. в Южном полушарии (Митник и др., 2020; Чернявский и др., 2018; Mitnik et al., 2018).

Радиометр и весовые функции

Функциональные и технические характеристики и схема сканирования МТВЗА-ГЯ приведены в работе (Чернявский и др., 2020). Оценка параметров поверхности и атмосферы выполняется по измерениям на частотах 10,65 ГГц; 18,7; 23,8; 31,5; 36,5; 42; 48; 91,6 ГГц. Для восстановления вертикальных профилей температуры и влажности атмосферы служат данные на частотах в полосе поглощения кислорода 50–70 ГГц и в области сильной линии поглощения водяного пара, центрированной на $\nu_0 = 183,31$ ГГц. Обозначения и основные технические характеристики каналов температурного зондирования атмосферы приведены в *таблице* (Чернявский и др., 2020).

Технические характеристики каналов температурного зондирования ($\nu_0 = 57,2903 \pm 0,3222$ ГГц)

| Обозначение | Центральная частота, ГГц | Чувствительность не хуже, К/пиксель | Высота максимума весовой функции, км |
|-------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| O1 | 52,80 | 0,4 | 2 |
| O2 | 53,30 | 0,4 | 4 |
| O3 | 53,80 | 0,4 | 6 |
| O4 | 54,64 | 0,4 | 10 |
| O5 | 55,63 | 0,4 | 14 |
| O6 | $\nu_0 \pm 0,1$ | 0,4 | 20 |
| O7 | $\nu_0 \pm 0,05$ | 0,7 | 25 |
| O8 | $\nu_0 \pm 0,025$ | 0,9 | 29 |
| O9 | $\nu_0 \pm 0,01$ | 1,3 | 35 |
| O10 | $\nu_0 \pm 0,005$ | 1,7 | 42 |

На частотах каналов O1–O10 полное поглощение в атмосфере на луче зрения $\tau(\nu) = \tau_0(\nu) \cdot \sec \theta$, где $\tau_0(\nu)$ — поглощение в надире; $\theta = 65^\circ$ — угол падения, превышает 4–5 Нп.

При таких значениях $\tau(\nu)$ излучение поверхности полностью поглощается в атмосфере, и яркостная температура уходящего излучения Земли $T_{\text{я}}(\nu)$ может быть записана в виде:

$$T_{\text{я}}(\nu) = T_{\text{я}}^{\uparrow}(\nu, \theta) = \int_0^H T(h)K(\nu, h, \theta) dh, \tag{1}$$

где $K(\nu, h, \theta)$ — весовая функция (ВФ), показывающая вклад различных слоёв атмосферы в $T_{\text{я}}(\nu)$,

$$K(\nu, h, \theta) = \gamma(\nu, h, \theta) \cdot \exp\left[-\int_h^{\infty} \gamma(\nu, h') \cdot \sec\theta dh'\right] \cdot \sec\theta; \tag{2}$$

$\gamma(\nu, h)$ — погонное поглощение в атмосфере, зависящее от метеопараметров атмосферы.

На *рис. 1* приведены весовые функции на частотах каналов O1–O10, рассчитанные по значениям температуры $T(h)$ и давления $P(h)$ воздуха от поверхности до $h = 70$ км зимой (декабрь – февраль) в широтном поясе $60\text{--}70^\circ$ с. ш. (ГОСТ Р 53460-2009..., 2009). Для расчёта ВФ и $T_{\text{я}}(\nu)$ могут быть также взяты данные реанализа, а для частот каналов O1–O5 — профили радиозондов (р/з) при максимальной высоте подъёма $h_{\text{макс}} = 36\text{--}37$ км.

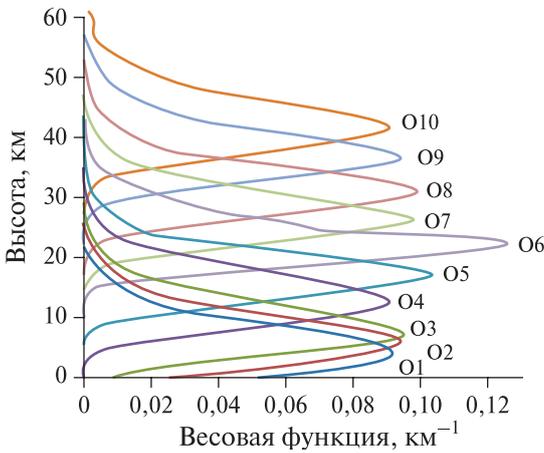


Рис. 1. Весовые функции каналов O1–O10 в диапазоне 52,8–57,6 ГГц, рассчитанные при угле падения 65° для зимних условий в широтном поясе $60\text{--}70^\circ$ с. ш.

Максимумы ВФ в каналах O1–O3 расположены на $h < 10$ км, и принимаемое излучение формируется в основном в тропосфере. Максимумы ВФ в каналах O4–O10 расположены в нижней и средней стратосфере на высотах $\sim 15\text{--}45$ км.

Измерения

В конце декабря 2020 г. температура воздуха на уровне 10 гПа (28–32 км) над Северной полярной областью составляла $\sim 185\text{--}195$ К, что следует из данных р/з на станциях 04220, 04320, 10113, 71822, 71924 и др. В последнюю неделю декабря температура стратосферы начала быстро расти, что регистрировали р/з, долетавшие до уровня 10 гПа, а иногда и 5 гПа. Максимальная температура воздуха на уровне 10 гПа $T_{\text{макс}}(10)$ достигала 255 К. Профили $T(h)$, полученные на станциях 71924 YRB Resolute ($74,70^\circ$ с. ш., $94,97^\circ$ з. д.), Baker Lake 71926 ($64,31^\circ$ с. ш., $96,00^\circ$ з. д.), 10113 Nordenrey ($53,71^\circ$ с. ш., $7,15^\circ$ в. д.) и 4320 Danmarkshavn ($76,76^\circ$ с. ш., $18,66^\circ$ з. д.) до и во время потепления, показаны на *рис. 2* (см. с. 291).

Очевидно, что за неделю рост температуры стратосферы мог составлять 40–50 К. Однако из-за малого количества радиозондов, достигающих 32–36 км, следить за развитием ВСП по профилям $T(h)$ сложно. Об изменчивости температуры различных слоёв атмосферы можно судить по временным рядам $T_{\text{я}}$ на частотах каналов O1–O10, принятых на всех витках МТВЗА-ГЯ в ноябре – декабре 2020 г. и в январе 2019 г.

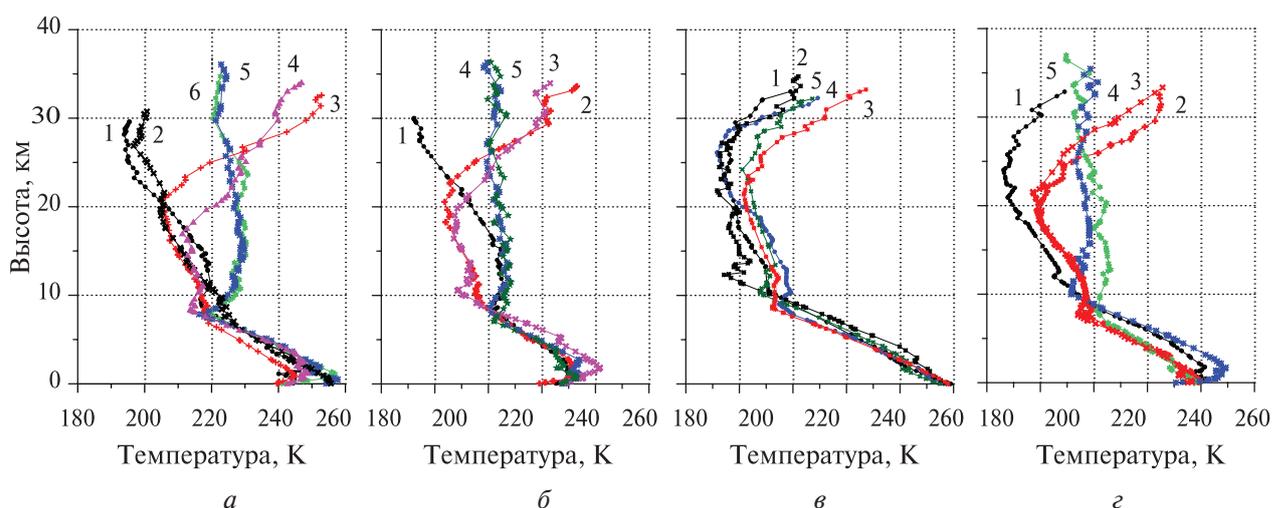


Рис. 2. Профили температуры воздуха по измерениям радиозондов на станциях: 71924 YRB Resolute Observations (а): 1 — 26 декабря, 2 — 30 декабря, 3 — 5 января, 4 — 7 января, 5 — 15 января, 6 — 16 января, все за 00:00 UTC; 71926 Baker Lake (б): 1 — 4 января, 2 — 6 января, 3 — 7 января, 4 — 15 января, 5 — 16 января, все за 00:00 UTC; 10113 Nordenrey (в): 1 — 25 декабря, 2 — 26 декабря, 3 — 30 декабря, 4 — 5 января, 5 — 15 января, все за 12:00 UTC; 4320 Danmarkshavn (г): 1 — 29 декабря 12:00 UTC, 2 — 5 января 12:00 UTC, 3 — 9 января 12:00 UTC, 4 — 15 января 00:00 UTC; 5 — 24 января 00:00 UTC

Временная и пространственная изменчивость температуры стратосферы над областью к северу от 40° с. ш. отражена на рис. 3 (см. с. 292). 25 декабря температура в каналах О5–О8, излучение на которых формируется на высотах от 15 до 35 км, составляла 180–240 К. Отчётливо выделяется холодный полярный вихрь. 5 января температура стратосферы, включая область над Северным полюсом, увеличилась. Возросла и минимальная температура в области вихря. 15 января разница между максимальными и минимальными значениями температуры во всех слоях стратосферы стала заметно меньше.

Яркостные температуры, измеренные радиометром МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 2-2 (см. рис. 3), были сопоставлены со значениями $T_{\text{я}}(v)$, найденными по формуле (1) и радиозондовым профилям $T(h)$ и $P(h)$ (см. рис. 2). Экспериментальные и расчётные значения $T_{\text{я}}(v)$ хорошо согласуются на частотах каналов О5–О7 для радиозондов с $h_{\text{макс}} > 32$ км. Для р/з с меньшими значениями $h_{\text{макс}}$ согласие, начиная с канала О7, ухудшается. Не приводит к уменьшению различий измеренных и расчётных значений $T_{\text{я}}$ доработка профилей $T(h)$ и $P(h)$ на высотах $h > h_{\text{макс}}$, для чего использовались значения температуры и давления воздуха из глобальной справочной атмосферы для зимнего периода (декабрь – февраль) и широтного пояса, в котором расположены р/з станции (ГОСТ Р 53460-2009..., 2009). Очевидно, что доработанный «стандартный» профиль резко отличался от реального профиля, определявшего значения $T_{\text{я}}$ в каналах О8–О10.

Изменения температуры в каналах О5–О8 сопровождалось изменением высоты геопотенциальной поверхности 10 гПа и циркуляции в стратосфере (рис. 4, см. с. 293) (L'Neureux, 2021). 26 декабря с ростом температуры стратосферы на уровне 10 гПа (линия 1, шкала температуры справа) скорость западных ветров уменьшилась (линия 2, средний зональный ветер на уровне 100 гПа, шкала скорости ветра слева), и полярный вихрь начал ослабевать. 5 января направление ветра сменилось на противоположное, что является основным фактором при отнесении потепления к классу «главное» (Baldwin et al., 2020; Butler et al., 2015, 2017).

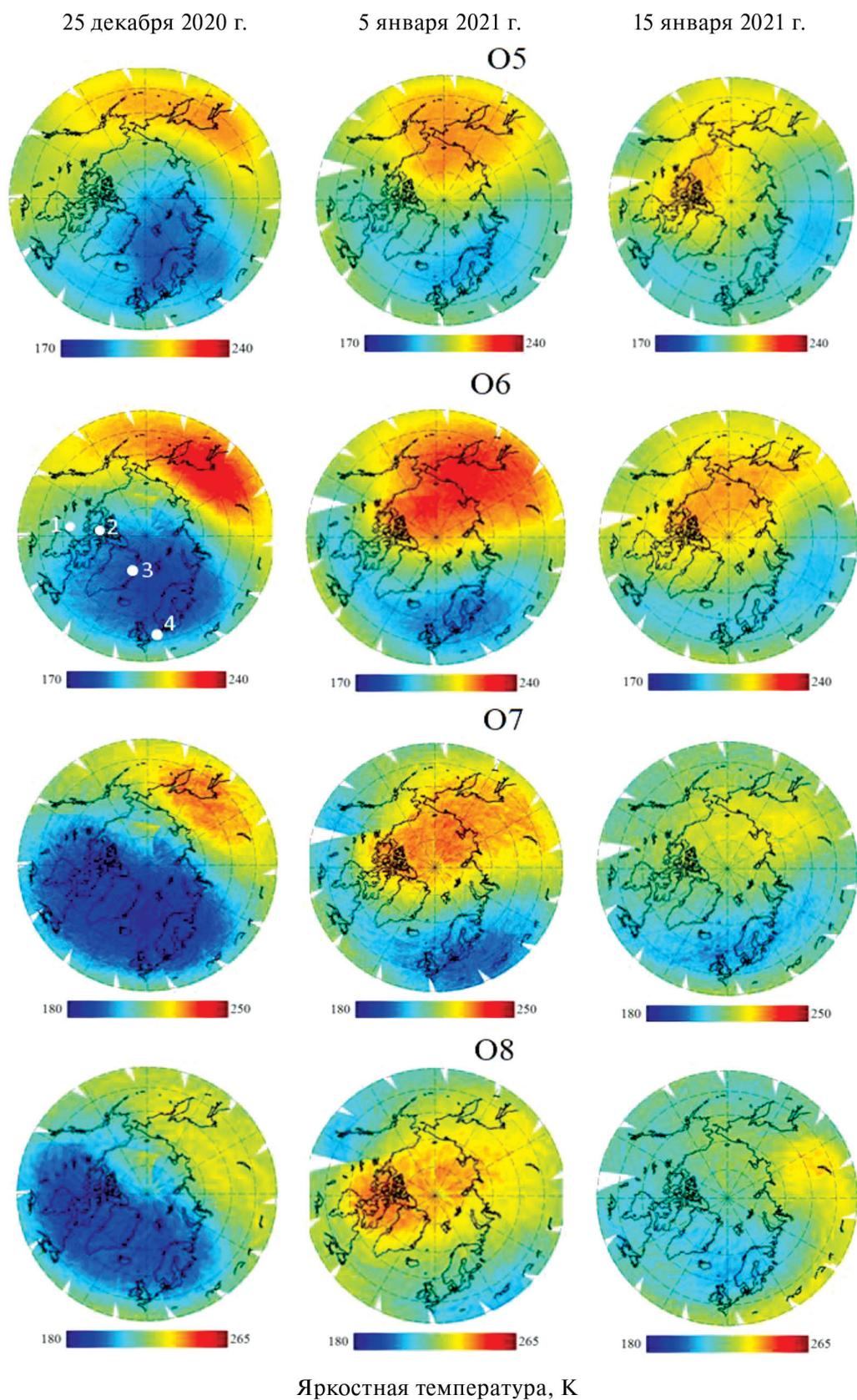


Рис. 3. Изменчивость яркостной температуры над полярной областью по данным радиометра МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 2-2 до и во время внезапного стратосферного потепления. Белые кружки на рисунке во второй строке в левом столбце показывают положение станций радиозондирования 1–4, для которых построены профили температуры воздуха на рис. 2. 1 — 71926 Baker Lake; 2 — 71924 YRB Resolute Observations; 3 — 4320 Danmarkshavn; 4 — 10113 Nordenrey

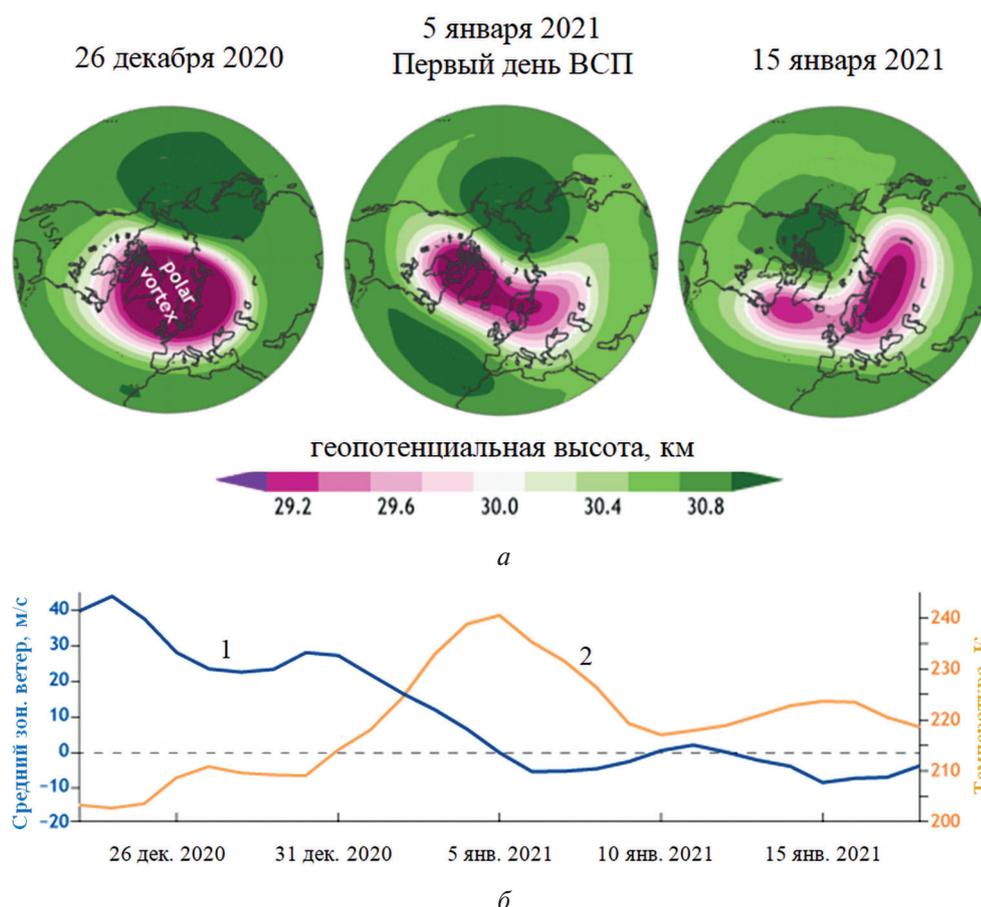


Рис. 4. Эволюция внезапного стратосферного потепления: *a* — высота геопотенциальной поверхности 10 гПа: 26 декабря 2020 г. — при ослаблении полярного вихря, 5 января 2021 г. — при изменении направления среднего зонального ветра, 15 января 2021 г. — при развитии потепления; *б* — средний зональный ветер на уровне 100 гПа на 60° с. ш. (синяя линия 1) и температура полярной шапки на уровне 10 гПа (оранжевая линия 2) с 25 декабря 2020 г. по 18 января 2021 г. (изменённый рисунок из публикации (L'Neugeux, 2021), в котором использованы данные реанализа NCEP/NCAR, предоставленные Ларой Чиасто (Laura M. Ciasto, Ph.D., NOAA Climate Prediction Center))

Обсуждение и выводы

Внезапное стратосферное потепление над Северным полушарием было обнаружено в январе 2021 г. микроволновым радиометром МТВЗА-ГЯ с метеорологического спутника «Метеор-М» № 2-2 (Чернявский и др., 2020). Анализ измерений, принимающих уходящее излучение Земли в 10 каналах в диапазоне частот 52–57 ГГц, позволил проследить за жизненным циклом ВСП от невозмущённой стадии в декабре 2020 г. до наиболее интенсивного развития и диссипации потепления. Возникновение главного ВСП следовало и из МВ-измерений радиометров AMSU-2 (*англ.* Advanced Microwave Sounding Unit) и ATMS со спутников SNPP и NOAA-20.

Повышение температуры различных слоёв стратосферы надёжно регистрировалось и по показаниям радиозондов, высота подъёма которых превышала 25 км, а в ряде случаев и 35 км. Редкая сеть станций и ограниченная высота подъёма радиозондов не позволяют исследовать динамику внезапного стратосферного потепления, воздействие которого на геофизические процессы прослеживается от земной поверхности до ионосферы. Связи ВСП с явлениями погоды и с климатом обобщены, в частности, в статьях (Domeisen, Butler, 2020; Hall et al., 2021; King et al., 2019; Overland et al., 2000; Pedatella et al., 2018). Как научный, так и прикладной интерес вызывают работы, начатые более 30 лет назад (Hartmann, 1981), в которых изучено влияние ВСП и процессов в стратосфере на засухи и суровые зимы, траектории шторм-

мов и струйных течений, холодные вторжения, режим погоды, морской лёд и др. (Afargan-Gerstman, Domeisen, 2020; Charlton-Perez et al., 2018; Kidston et al., 2015; Kolstad, 2017; Kolstad et al., 2010; Ridston et al., 2015; Smith et al., 2018).

Аномалии погоды, наблюдающиеся в Северной Америке, Азии и Европе после начавшегося 5 января 2021 г. ВСП, являются ярким подтверждением такого влияния и необходимости его индикации и изучения. Аномалии проявляются в резких похолоданиях, штормовых ветрах, интенсивных снегопадах, оказывающих всё возрастающее влияние на ежедневную жизнь и экономику разных стран. Сведения об аномалиях погоды и о причинах, их вызывающих, вышли на первые полосы газет и присутствуют в научных комментариях.

Очевидно, что детальное изучение ВСП и их влияния на процессы в атмосфере и ионосфере — крайне актуальная задача, при решении которой могут быть использованы данные микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ, полученные в 2015–2021 гг. (Кулешов и др., 2020; Чернявский и др., 2018, 2020; Mitnik et al., 2017, 2018), в том числе и во время потеплений в Северном и в Южном полушариях (Митник и др., 2020; Mitnik et al., 2018), данные других спутниковых инструментов, моделирования и реанализов. Запуск в 2022 г. спутника «Метеор-М» № 2-3 с усовершенствованным радиометром МТВЗА-ГЯ на борту повысит временное разрешение дистанционных данных и улучшит понимание физических процессов в различных сферах.

Сбор и обработка данных проведены в рамках госбюджетной темы Тихоокеанского океанологического института им. В. И. Ильичева ДВО РАН, регистрационный номер 121021500054-3, моделирование распространения МВ-излучения в атмосфере и анализ данных — при поддержке гранта Российского научного фонда № 20-17-00179.

Литература

1. ГОСТ Р 53460-2009. Глобальная справочная атмосфера для высот от 0 до 120 км для аэрокосмической практики. Росстандарт, 2009. 253 с.
2. Кулешов В. П., Митник Л. М., Митник М. Л. Глобальные поля яркостной температуры Земли в диапазоне частот 6–190 ГГц по измерениям со спутников «Метеор-М» № 2 и № 2-2 // Тр. Военно-космической акад. им. А. Ф. Можайского. 2020. Вып. 674. Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды. С. 223–228.
3. Митник Л. М., Кулешов В. П., Митник М. Л. Внезапное стратосферное потепление над Антарктидой в сентябре 2019 г. по данным радиометра МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 2-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 229–242. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17.
4. 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.
5. Чернявский Г. М., Митник Л. М., Кулешов В. П., Митник М. Л., Стрельцов А. М., Евсеев Г. Е., Чёрный 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. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-51-65.
6. Afargan-Gerstman H., Domeisen D. I. V. Pacific modulation of the North Atlantic storm track response to sudden stratospheric warming events // Geophysical Research Letters. 2020. V. 47. No. 2. e2019GL085007.
7. Baldwin M. P., Ayarzagüena B., Birner T., Butchart N., Butler A. H., Charlton-Perez A. J., Domeisen D. I. V., Garfinkel C. I., Garny H., Gerber E. P., Hegglin M. I., Langematz U., Pedatella N. M. Sudden stratospheric warmings // Reviews of Geophysics. 2021. V. 59. No. 1. e2020RG000708.
8. 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.
9. Butler A. H., Sjöberg 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.
10. Charlton-Perez A. J., Ferranti L., Lee R. W. The influence of the stratospheric state on North Atlantic weather regimes // Quarterly J. Royal Meteorological Society. 2018. V. 144. P. 1140–1151.

11. Domeisen D. I. V., Butler A. H. Stratospheric drivers of extreme events at the Earth's surface // Communications Earth and Environment. 2020. V. 1. Art. No. 59. URL: <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00060-z>.
12. Hall R. J., Mitchell D. M., Seviour W. J. M., Wright C. J. Tracking the stratosphere-to-surface impact of Sudden Stratospheric Warmings // J. Geophysical Research Atmospheres. 2021. V. 126. No. 3. e2020JD033881. DOI: 10.1029/2020JD033881.
13. Hartmann D. Droughts, severe winters and sudden stratospheric warmings // Nature. 1981. V. 293. P. 97–98.
14. Kidston J., Scaife A., Hardiman S., Mitchel D. N., Butchart N., Baldwin M. P., Gray L. J. Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather // Nature Geoscience. 2015. V. 8. P. 433–440. URL: <https://doi.org/10.1038/ngeo2424>.
15. King A. D., Butler A. H., Jucker M., Earl N. O., Rudeva I. Observed relationships between Sudden Stratospheric Warmings and European climate extremes // J. Geophysical Research Atmospheres. 2019. V. 124. P. 13943–13961.
16. Kolstad E. W. Higher ocean wind speeds during marine cold air outbreaks // Quarterly J. Royal Meteorological Society. 2017. V. 143. P. 2084–2092.
17. Kolstad E. W., Breiteig T., Scaife A. A. The association between stratospheric weak polar vortex events and cold air outbreaks in the Northern Hemisphere // Quarterly J. Royal Meteorological Society. 2010. V. 136. P. 886–893. DOI: 10.1002/qj.620.
18. L'Heureux M. On the sudden stratospheric warming and polar vortex of early 2021 // Climate.gov. 28.01.2021. URL: <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/sudden-stratospheric-warming-and-polar-vortex-early-2021>.
19. 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.
20. 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. 2018. P. 5560–5563. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8517495.
21. Overland J., Hall R., Hanna E., Karpechko A., Vihma T., Wang M., Zhang X. The polar vortex and extreme weather: The beast from the East in winter 2018 // Atmosphere. 2020. V. 11(6). Art. No. 664. URL: <https://doi.org/10.3390/atmos11060664>.
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 // Eos. 2018. V. 99. URL: <https://doi.org/10.1029/2018EO092441>.
23. Smith K. L., Polyani L. M., Tremblay L. B. The impact of stratospheric circulation extremes on minimum Arctic Sea ice extent // J. Climate. 2018. V. 31. P. 7169–7183.
24. 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>.

Sudden stratospheric warming in January 2021 from microwave measurements of Meteor-M No. 2-2 satellite

L. M. Mitnik^{1,2}, V. P. Kuleshov^{1,2}, M. L. Mitnik¹

¹ V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia
E-mail: mitnik@poi.dvo.ru

² Institute of Applied Physics, Nizhny Novgorod 603950, Russia

This paper presents the results of microwave (MW) measurements of the occurrence and development of sudden stratospheric warming (SSW) over the Northern Hemisphere. The measurements performed in the frequency range $\nu = 52.8\text{--}57.6$ GHz by the scanning temperature and humidity atmospheric sounder MTVZA-GY in December 2020–February 2021, give an idea of the spatial and temporal

temperature variability of different stratospheric layers over high and temperate latitudes. The analysis of the time series of the brightness temperature $T_b(\nu)$ at 10 frequencies revealed a rapid (by several tens of degrees per week) growth of temperature of the middle and lower stratosphere during the SSW in January 2021. The air temperature increase was registered by radiosonde released from stations 03005, 04320, 04220, 10113 and 71822. The maximum altitude of the radiosonde's ascent reached 30–36 km. The brightness temperatures $T_b(\nu)$ and weighting functions at frequencies 52.8 GHz; 53.3; 53.8; 54.64 and 55.63 GHz and at 5 frequencies in the oxygen absorption line region centered at $\nu_0 = 57.2903$ GHz were computed according to the averaged atmospheric temperature and pressure profiles from the surface to $h_{\max} = 70$ km in the latitude belt of 60–70° N for the winter period (December–February). The $T_b(\nu)$ values were found by numerical integration of the MW radiative transfer equation. Based on the time series of the $T_b(\nu)$ fields, the evolution of the SSW over the Northern Polar Area from December 24, 2020 to February 10, 2021 was traced. The warming began at heights of about 30–40 km and then spread to the lower stratospheric layers. It follows from the analysis of MTZA-GY measurements, operational weather information and literature data that the warming was accompanied by weakening and displacement of the polar vortex as well as by sharp negative and positive air temperature anomalies near the Earth's surface.

Keywords: microwave radiometer MTVZA-GYa, Meteor-M No. 2-2, sudden stratospheric warming, January 2021, brightness temperature, spatial and temporal variability, radiosondes

Accepted: 28.04.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-288-297

References

1. GOST R 53460-2009. *Global'naya spravocnaya atmosfera dlya vysot ot 0 DO 120 km dlya aerokosmicheskoi praktiki* (GOST P 53460-2009. Global reference atmosphere for altitudes from 0 to 120 km for aerospace practice), Rosstandart, 2009, 253 p. (in Russian).
2. Kuleshov V. P., Mitnik L. M., Mitnik M. L., Global fields of the Earth's brightness temperature in the frequency range 6–190 GHz as measured from satellites "Meteor-M" No. 2 and No. 2-2, *Trudy Voenno-kosmicheskoi akademii imeni A. F. Mozhaiskogo*, Vyp. 674, *Problemy voenno-prikladnoi geofiziki i kontrolya sostoyaniya prirodnoi sredy*, 2020, pp. 223–228 (in Russian).
3. Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Sudden stratospheric warming over Antarctica in September 2019 from the data of the MTVZA-GYa radiometer on the Meteor-M No. 2-2 satellite, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 7, pp. 229–242 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17.
4. Chernyavsky G. M., Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Cherny I. V., 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 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-78-100.
5. Chernyavsky G. M., Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Streltsov A. M., Evseev G. E., Cherny I. V., 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 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-51-65.
6. Afargan-Gerstman H., Domeisen D. I. V., Pacific modulation of the North Atlantic storm track response to sudden stratospheric warming events, *Geophysical Research Letters*, 2020, Vol. 47, No. 2, e2019GL085007.
7. Baldwin M. P., Ayarzagüena B., Birner T., Butchart N., Butler A. H., Charlton-Perez A. J., Domeisen D. I. V., Garfinkel C. I., Garny H., Gerber E. P., Hegglin M. I., Langematz U., Pedatella N. M., Sudden stratospheric warmings, *Reviews of Geophysics*, 2021, Vol. 59, No. 1, e2020RG000708.
8. 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.
9. 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.
10. Charlton-Perez A. J., Ferranti L., Lee R. W., The influence of the stratospheric state on North Atlantic weather regimes, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2018, Vol. 144, pp. 1140–1151.
11. Domeisen D. I. V., Butler A. H., Stratospheric drivers of extreme events at the Earth's surface, *Communications Earth and Environment*, 2020, Vol. 1, Art. No. 59, available at: <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00060-z>.
12. Hall R. J., Mitchell D. M., Seviour W. J. M., Wright C. J., Tracking the stratosphere-to-surface impact of Sudden Stratospheric Warmings, *J. Geophysical Research Atmospheres*, 2021, Vol. 126, No. 3, e2020JD033881, available at: <https://doi.org/10.1029/2020JD033881>.

13. Hartmann D., Droughts, severe winters and sudden stratospheric warmings, *Nature*, 1981, Vol. 293, pp. 97–98.
14. Kidston J., Scaife A., Hardiman S., Mitchel D. N., Butchart N., Baldwin M. P., Gray L. J., Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather, *Nature Geoscience*, 2015, Vol. 8, pp. 433–440, available at: <https://doi.org/10.1038/ngeo2424>.
15. King A. D., Butler A. H., Jucker M., Earl N. O., Rudeva I., Observed relationships between Sudden Stratospheric Warmings and European climate extremes, *J. Geophysical Research Atmospheres*. 2019, Vol. 124, pp. 13943–13961.
16. Kolstad E. W., Higher ocean wind speeds during marine cold air outbreaks, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2017. Vol. 143, pp. 2084–2092.
17. Kolstad E. W., Breiteig T., Scaife A. A., The association between stratospheric weak polar vortex events and cold air outbreaks in the Northern Hemisphere, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2010, Vol. 136, pp. 886–893, DOI: 10.1002/qj.620.
18. L'Heureux M., On the sudden stratospheric warming and polar vortex of early 2021, *Climate.gov*, 28.01.2021, available at: <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/sudden-stratospheric-warming-and-polar-vortex-early-2021>.
19. 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.
20. 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*, 2018, pp. 5560–5563, DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8517495.
21. Overland J., Hall R., Hanna E., Karpechko A., Vihma T., Wang M., Zhang X., The polar vortex and extreme weather: The beast from the East in winter 2018, *Atmosphere*, 2020, Vol. 11(6), Art. No. 664, available at: <https://doi.org/10.3390/atmos11060664>.
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, *Eos*, 2018, Vol. 99, available at: <https://doi.org/10.1029/2018EO092441>.
23. Smith K. L., Polvani L. M., Tremblay L. B., The impact of stratospheric circulation extremes on minimum Arctic Sea ice extent, *J. Climate*, 2018, Vol. 31, pp 7169–7183.
24. 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>.