

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.510.413.2

Особенности вертикального распределения температуры над г. Томском во время внезапного стратосферного потепления зимой 2023 г. по данным Сибирской лидарной станции

О.Ю. Антохина^{1,2}, С.М. Бобровников¹, В.И. Жарков¹,
О.С. Зоркальцева², Д.А. Трифонов^{✉ 1*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126А, а/я 291

Поступила в редакцию 20.05.2024;

после доработки 06.08.2024;

принята к печати 05.09.2024

Наблюдающиеся над территорией Сибири аномалии атмосферной температуры, связанные с внезапными стратосферными потеплениями (ВСП), требуют детального изучения. В Сибири мало инструментов, которые способны предоставить необходимую информацию о вертикальном распределении температуры атмосферы. Уникальное оборудование Сибирской лидарной станции (СЛС) Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, разработанное для регулярных лидарных измерений атмосферных параметров, позволяет получить необходимые данные о вертикальной стратификации температуры атмосферы во время ВСП. Для определения характеристик температурных аномалий атмосферы в период ВСП зимой 2023 г. над Томском были проведены сравнения значений температуры атмосферы в отдельные ночи, полученных с помощью лидара СЛС, модели Whole Atmosphere Community Climate Model (WACCM), среднеширотной зимней стандартной модели и реанализа ERA5 (ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) Reanalysis v5). Впервые показана возможность использования вертикальных профилей температуры атмосферы, полученных методом СКР, для изучения ВСП и, в том числе, анализа изменения вертикальной структуры атмосферы в период ВСП.

Ключевые слова: лидар, температура, атмосфера, спонтанное комбинационное рассеяние, внезапное стратосферное потепление; lidar, temperature, atmosphere, Raman scattering, sudden stratospheric warming.

Введение

В последние десятилетия учеными активно обсуждаются такие актуальные для человечества вопросы, как изменение климата, глобальное потепление, возникновение экстремальных погодных явлений [1]. Во многих исследованиях отмечается, что изменение климата приводит к трансформациям в динамическом взаимодействии различных слоев атмосферы. В частности, меняется вертикальное распространение атмосферных волн, что влияет

на перенос энергии и импульса из нижних слоев атмосферы в вышележащие [2, 3]. Вертикальное взаимодействие слоев атмосферы проявляется особенно ярко во время внезапных стратосферных потеплений (ВСП) [2, 4, 5] и накануне, так как увеличение амплитуд планетарных волн отмечается за 10–14 дней до ВСП. Кроме того ВСП значительно влияют на возникновение экстремально холодных эпизодов в тропосфере [6], наносящих прямой ущерб хозяйственной деятельности человека. Поэтому изучение этих явлений приобретает в последние годы все большее значение.

Зимой полярная стратосфера характеризуется сильным холодным циклоническим вихрем (далее – стратосферный полярный вихрь – СПВ). Он формируется в основном за счет радиационного охлаждения и характеризуется полосой сильных западных

* Ольга Юрьевна Антохина (antokhina@iao.ru); Сергей Михайлович Бобровников (bsm@iao.ru); Виктор Иванович Жарков (zharkov@iao.ru); Ольга Сергеевна Зоркальцева (meteorologist-ka@yandex.ru); Дмитрий Александрович Трифонов (trifonov@iao.ru).

ветров в средних и высоких широтах. Типичные температуры СПВ на высоте 30 км (~ 10 гПа) составляют примерно $-65 \div -55$ °C ($208 \div 218$ K) в Северном полушарии, но могут опускаться до -80 °C и ниже [7, 8]. Практически каждый зимний сезон [9] СПВ разрушается волнами планетарного масштаба до такой степени, что западные ветры в периоды наиболее значительных ВСП меняют направление на восточное, а температура поднимается на несколько десятков градусов [8–12]. По данным Всемирной метеорологической организации [13], стратосферное потепление можно назвать значительным, если на высоте 10 гПа средняя температура по широте (от 60 до 90° с.ш.) увеличивается, а преобладающие западные ветры сменяются восточными.

Эффекты ВСП прослеживаются во всей толще атмосферы. Например, по данным ракетного зондирования были зафиксированы понижение высоты стратосферы (климатологическое положение 40–50 км) и ее потепление перед ВСП; на пике потепления произошло разрушение стратосферы, в то время как нижняя мезосфера была изотермична [14]. Потепление стратосферы при ВСП может быть резким, и температуры часто могут превышать 300 K [15]. В работе [16] представлено подробное описание ВСП 2006 г., тогда примерно через 10 дней после его пика полярный вихрь начинал восстанавливаться в верхней стратосфере. При этом стратосфера сместилась на высоту 75 км и оставалась поднятой около 20 дней, а затем опустилась до своей климатологической высоты. Такие экстремальные явления называются «событиями поднятия стратосферы». Изменение высоты стратосферы связывают как с мезосферной активностью планетарных волн и меридиональной циркуляцией после ВСП [17], так и с неорографическим сопротивлением гравитационных волн в мезосфере [18].

Внезапные стратосферные потепления сильно влияют на температуру в нижней тропосфере из-за интенсивного взаимодействия слоев атмосферы. Информация о состоянии верхних слоев атмосферы помогает точнее прогнозировать долгосрочные изменения в тропосфере [8, 19]. Поэтому сейчас пристальное внимание уделяется проблеме измерений показателей ВСП во всех слоях атмосферы. Начало спутниковой эры дало существенный толчок к улучшению понимания атмосферной динамики. Однако спутниковые измерения, хотя и обладают широким покрытием и хорошо предоставляют данные на глобальном уровне, имеют свои недостатки и не всегда удовлетворяют требованиям, предъявляемым к точности и пространственному разрешению [20]. Спутниковые данные могут быть полезны для мониторинга глобального состояния атмосферы, но для более детального анализа ее вертикальных профилей часто требуются более точные и специализированные методы измерений. Наиболее точные данные для восстановления вертикальных профилей температуры и скорости ветра в атмосфере могут быть получены с помощью лидара, радиозондирования

и самолетных измерений. Такие данные позволяют современным моделям (например, WACCM и ERA5) улучшать прогнозы и итоговые поля, делая их более надежными для научных и практических целей.

Лидар (лазерный локатор) представляет собой высокоточный инструмент, который использует лазерное излучение для измерения характеристик атмосферы, например температуры [21]. Лидарные данные обладают высоким пространственным разрешением и могут быть получены на значительной дальности/высоте, что делает их ценным источником информации для анализа вертикальных профилей в атмосфере. Радиозондирование позволяет получать данные о вертикальном распределении температуры, влажности и давления с использованием атмосферных зондов. Однако радиозондовые измерения, как правило, осуществляются до высоты 30 км и поэтому ограничены. Самолетные измерения, хотя и предоставляют высокоточные данные о вертикальных профилях атмосферных параметров, обычно дорогостоящи и требуют специального оборудования и подготовки.

Лидарные данные, полученные на Сибирской лидарной станции (СЛС) Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (Томск, Россия, 56,48° с.ш., 85,05° в.д.) могут иметь ключевое значение для анализа событий ВСП над Сибирью. Это обусловлено частым зарождением и усилением ВСП именно в этом регионе [2]. В Сибири наблюдается и «продолженный» эффект от ВСП в вышележащих слоях. Например, в работе [22] отмечено, что после ВСП (19–21-е сутки) над Восточной Сибирью заметна отрицательная аномалия давления стратосферы (высокая стратосфера). Даты начала ВСП по методу Mitchell и Seviour [22] примерно совпадают с датами по критерию ВМО [8], т.е. совпадают с моментами резкого роста среднезональной температуры высокоширотной стратосферы.

Лидар на базе приемного телескопа диаметром 2,2 м, входящий в состав СЛС, представляет собой уникальный инструмент для изучения вертикальных профилей атмосферы. Он позволяет выполнять пространственно-разрешенные прямые измерения стратосферы атмосферы на основе спектроскопии спонтанного комбинационного рассеяния. Лидар СЛС ценен еще и тем, что он обеспечивает получение данных о вертикальной стратификации температуры и других параметрах атмосферы в Сибири, где такие измерения могут быть ограничены или недоступны для других методов из-за отсутствия достаточного количества наземных измерительных систем.

Цель настоящей работы – сравнение лидарных данных во время зимнего ВСП 2022/23 г. с данными наиболее современных глобальных моделей.

Материалы и методы

Термодинамический режим в полярной стратосфере в зимний период 2022/23 г. проанализирован на основе данных реанализа ERA5 [23].

Для характеристики ВСП были использованы среднезональные значения температуры и зональной компоненты горизонтального ветра вдоль широтного круга 60° с.ш. аналогично работе [8].

Все известные подходы для получения информации о вертикальном распределении температуры атмосферы в период ВСП лидарным способом используют эффект молекулярного рассеяния [8, 10, 11, 24, 25]. Измерение температуры атмосферы с помощью этого эффекта – косвенный метод, который имеет недостатки в точности и пространственно-временном разрешении, а также работает некорректно при наличии аэрозоля в атмосфере. Лидарные измерения температуры атмосферы, основанные на анализе распределения интенсивности линий чисто вращательного спектра спонтанного комбинационного рассеяния (СКР) на молекулах азота и кислорода, позволяют проводить прямые измерения температуры с высокой точностью ($\pm 1^\circ$) и высоким пространственным разрешением (500 м) [12]. Однако малость сечения взаимодействия лазерного излучения с молекулами азота и кислорода в процессе СКР ограничивает потолок зондирования высотой 20–30 км для лидаров со средними характеристиками [13, 19, 26]. Для лидаров с большой апертурой приемного телескопа и мощными источ-

никами зондирующего излучения потолок зондирования может быть существенно повышен, что позволяет использовать метод СКР для более надежного определения стратификации температуры верхней атмосферы. К таким приборам относится лидар СЛС [12].

Результаты и обсуждение

В зимний сезон 2022/23 г. наблюдались два события ВСП (рис. 1): сначала незначительное (минорное) с конца января до начала февраля, затем значительное (мажорное) с середины февраля до конца марта. Как можно видеть на рис. 1, б, в стратосфере в районе лидарной станции проявились оба потепления: температура была повышена во вторую половину зимы. Однако максимальные повышения температуры в стратосфере наблюдались во время минорного потепления в конце января. Это подтверждает предположения о том, что над территорией Сибири фиксируются зарождение и начальная стадия ВСП, тогда как интенсивная стадия – в более высоких широтах.

Эволюция области потепления на высоте 30 км (10 гПа) показана на рис. 2. Видно, что район Томска оказался в области потепления в начале февраля.

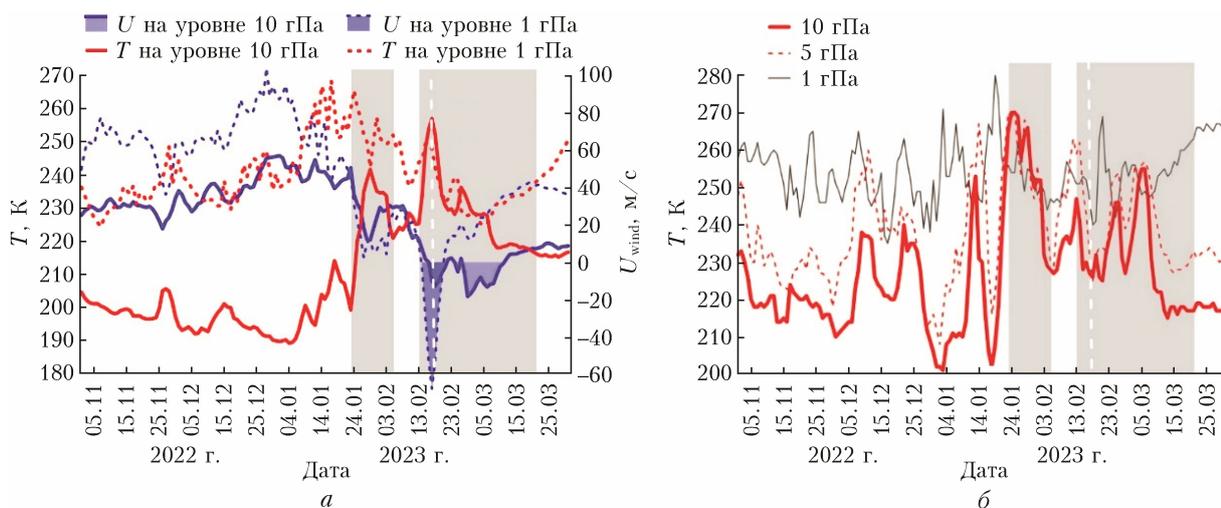


Рис. 1. Среднезональные значения температуры вдоль 80° с.ш. и зональной компоненты скорости ветра вдоль 60° с.ш. (а) и в районе Томска (55° с.ш., 85° в.д.) в 2022/23 г. (б). Серыми областями показаны периоды ВСП согласно критерию ВМО (см. цветные рисунки на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.11>)

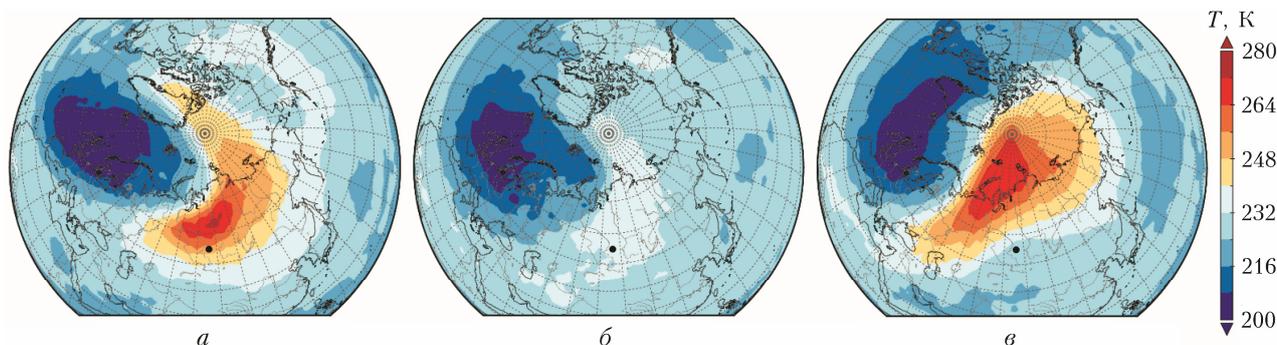


Рис. 2. Температура воздуха на высоте 30 км (10 гПа) по данным ERA5: 01.02 (а); 11.02 (б); 15.02.2023 г. (в). Точкой показано расположение СЛС

Центр области повышения температур при мажорном потеплении находился северо-западнее Томска (15.02.2023 г.).

В феврале 2023 г. были выполнены три измерения вертикальных профилей температуры атмосферы с помощью лидара СЛС. На рис. 3–5 приведены лидарные данные о вертикальном распределении температуры атмосферы в сравнении с вертикальными профилями температуры воздуха, полученными на основании модели WACCM [27] и среднеширотной зимней стандартной модели [28].

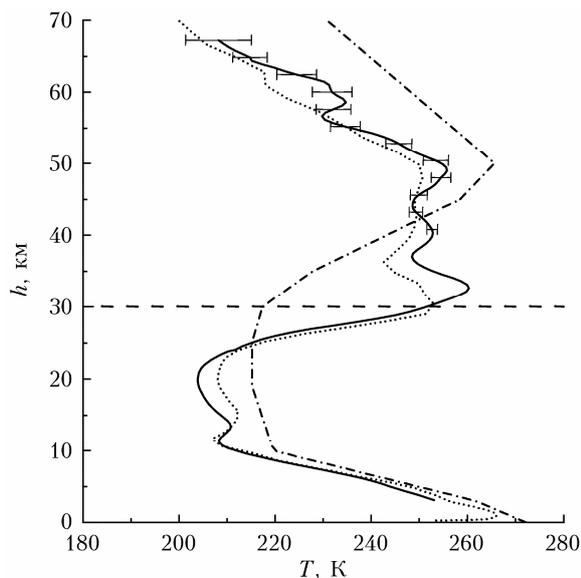


Рис. 3. Вертикальные распределения температуры, полученные 01.02.2023 г. (сплошная кривая) (пространственное разрешение 384 м в диапазоне 3–24 км, 480 м в диапазоне 24–65 км, время накопления сигнала 240 мин) на СЛС; с помощью модели WACCM (пространственное разрешение 1 км в диапазоне 0–25 км, 5 км в диапазоне 25–70 км) (пунктирная кривая) и среднеширотной зимней стандартной модели (пространственное разрешение 100–3000 м в диапазоне 0–70 км) (штрихпунктирная кривая)

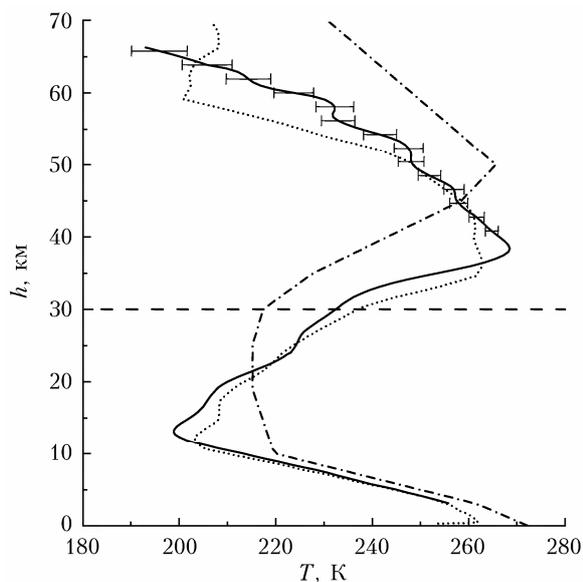


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, для 11.02.2023 г.

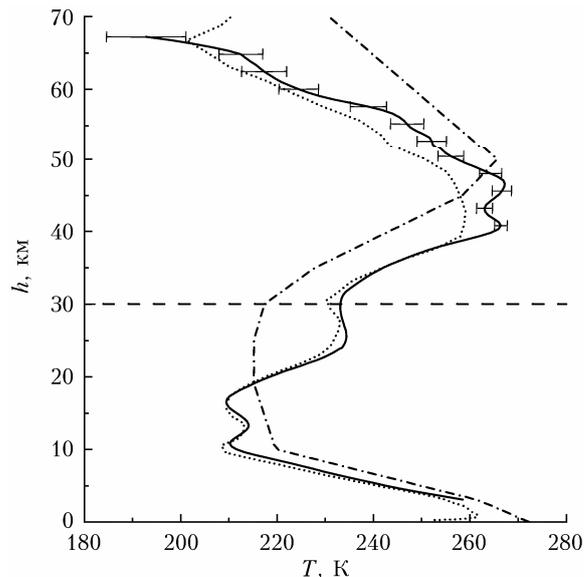


Рис. 5. То же, что и на рис. 3, для 15.02.2023 г.

В таблице приведены температуры атмосферы на высоте 30 км в феврале 2023 г., полученные с помощью лидара и моделей WACCM и ERA5.

Температура (К) атмосферы на высоте 30 км

| Тип данных | 01.02.23 г. | 11.02.23 г. | 15.02.23 г. |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|
| Лидар СЛС | 251 | 232 | 233 |
| Модель ERA5 | 252 | 237 | 230 |
| Модель WACCM | 252 | 235 | 228 |
| Стандартная модель | 216 | 216 | 216 |

ВСП принято анализировать на основе значений температуры воздуха на высоте 30 км, что соответствует уровню 10 гПа. Область атмосферы над СЛС 01.02.2023 г. находилась максимально близко к центру области потепления в стратосфере. В этот период температура в районе 30 км превышала среднесезонную на 35°, а 11 и 15.02.2023 г. отличие составило ~15°.

Выразительная черта ВСП – трансформация области стратопавзы, которая обычно находится на высоте 40–50 км. Примером является профиль, полученный 01.02.2023 г. (рис. 3). Отметим, что в этот день, когда область теплого воздуха в стратосфере находилась непосредственно над Томском, лидарный профиль демонстрирует не только раздвоение тропопавзы, но и трехпиковую структуру стратопавзы. По данным WACCM профиль на уровне стратопавзы более сглажен и инверсионный слой на высоте 40 км не прослеживается. Мажорное ВСП наблюдалось 15.02.2023 г., районы Томска находились на периферии области потепления, однако лидарные данные, в отличии от данных WACCM, за счет прямых измерений температуры с более высоким пространственным разрешением по высоте демонстрируют не только раздвоение тропопавзы, но и появление двухпиковой структуры в области стратопавзы (рис. 5), что является характерной чертой ВСП [22]. Все это еще раз подчеркивает

важность наземных наблюдений, позволяющих воспроизводить более тонкую структуру атмосферы.

На рис. 3 и 4 видно, что тропопауза значительно деформирована: происходит дублирование ее области, что характерно для ВСП (см., например, [29]). Этот эффект виден в данных, полученных как с помощью лидара СЛС, так и WACCM. Однако все наборы данных имеют свою специфику, что свидетельствует о необходимости комплексного анализа динамики температуры в стратосфере и в более высоких слоях. Интересная особенность всех измеренных профилей – более холодная область высот от 40 до 65 км по сравнению со среднеширотными зимними профилями температуры атмосферы. Вероятные причины этого – вертикальный обмен и существенное охлаждение мезосферы в период ВСП [30].

Рис. 3–5 демонстрируют, что данные лидарных измерений вертикального распределения температуры атмосферы и модели WACCM практически идентичны до высоты 30 км. Выше этой отметки присутствует небольшое различие, которое можно отнести к возрастающей неопределенности данных, используемых в модели WACCM. Этот вопрос требует более тщательного изучения.

Заключение

В зимний сезон 2022/23 г. над территорией Сибири наблюдались два события ВСП: минорное и мажорное, которые отразились на вертикальных профилях температуры в стратосфере. Впервые были оценены вертикальные профили атмосферы в период ВСП над Северным полушарием с помощью лидара на основе чисто вращательного спектра СКР. Показано, что 01.02.2023 г. температура на высоте 30 км была выше среднесезонной на 35°, а 11 и 15.02.2023 г. отличие составило 16 и 17°.

Сравнение данных лидарных измерений с моделями WACCM и ERA5 показало высокую точность и согласованность до высоты 30 км с небольшими отличиями в более высоких слоях, что может быть связано с особенностями данных моделей.

Выявленные особенности, связанные с деформацией стратопаузы, оказались сильно сглажены в модели по сравнению с лидарными данными и подчеркивают важность наземных наблюдений для более точного и детального анализа атмосферных процессов. Комплексный анализ данных, полученных различными методами, позволяет получить более полное представление о динамике стратосферы и высших слоев атмосферы в период ВСП, что является ключевым для улучшения научного понимания механизмов возникновения ВСП.

В дальнейшем планируется проводить лидарные измерения температуры на СЛС в период непосредственно перед, в течение и после ВСП для более подробного анализа особенностей температурных аномалий атмосферы, включая верхнюю стратосферу вплоть до 65 км.

Финансирование. Получение и обработка лидарных данных выполнены в рамках госзадания

ИОА СО РАН. Анализ характеристик ВСП на основе данных реанализа выполнен при поддержке РФФИ (грант № 22-77-10008 «Исследования крупномасштабных явлений в нижней и средней атмосфере и оценка их локального проявления на высотах мезосферы – нижней термосферы»).

Список литературы

1. Arias P.A., Bellouin N., Coppola E., Jones R.G., Krinner G., Marotzke J., Naik V., Palmer M.D., Plattner G.-K., Rogelj J., Rojas M., Sillmann J., Storelvmo T., Thorne P.W., Trewin B., Achuta Rao K., Adhikary B., Allan R.P., Armour K., Bala G., Barimalala R., Berger S., Canadell J.G., Cassou C., Cherchi A., Collins W., Collins W.D., Connors S.L., Corti S., Cruz F., Dentener F.J., Dereczynski C., Di Luca A., Diongue Niang A., Doblas-Reyes F.J., Dosio A., Drouville H., Engelbrecht F., Eyring V., Fischer E., Forster P., Fox-Kemper B., Fuglestad J.S., Fyfe J.C., Gillett N.P., Goldfarb L., Gorodetskaya I., Gutierrez J.M., Hamdi R., Hawkins E., Hewitt H.T., Hope P., Islam A.S., Jones C., Kaufman D.S., Kopp R.E., Kosaka Y., Kossin J., Krakovska S., Lee J.-Y., Li J., Mauritsen T., Maycock T.K., Meinshausen M., Min S.-K., Monteiro P.M.S., Ngo-Duc T., Otto F., Pinto I., Pirani A., Raghavan K., Ranasinghe R., Ruane A.C., Ruiz L., Sallée J.-B., Samset B.H., Sathyendranath S., Seneviratne S.I., Sörensson A.A., Szopa S., Takayabu I., Tréguier A.-M., van den Hurk B., Vautard R., von Schuckmann K., Zaehle S., Zhang X., Zickfeld K. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Technical summary // Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2023. P. 35–144. DOI: 10.1017/9781009157896.002.
2. Zorkaltseva O.S., Vasilyev R.V. Stratospheric influence on the mesosphere–lower thermosphere over mid latitudes in winter observed by a Fabry–Perot interferometer // *Annal. Geophys.* 2021. V. 39, N 1. P. 267–276. DOI: 10.5194/angeo-39-267-2021.
3. Yigit E., Medvedev A.S. Internal wave coupling processes in Earth's atmosphere // *Adv. Space Res.* 2015. V. 55, N 4. P. 983–1003. DOI: 10.1016/j.asr.2014.11.020.
4. Dowdy A.J., Vincent R.A., Tsutsumi M., Igarashi K., Murayama Y., Singer W., Murphy D.J., Riggin D.M. Polar mesosphere and lower thermosphere dynamics: 2. Response to sudden stratospheric warmings // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2007. V. 112, N D17. DOI: 10.1029/2006JD008127.
5. Jacobi C., Hoffmann P., Liu R.Q., Krizan P., Lastovicka J., Merzlyakov E.G., Solovjova T.V., Portnyagin Y.I. Midlatitude mesopause region winds and waves and comparison with stratospheric variability // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2009. V. 71, N 14–15. P. 1540–1546. DOI: 10.1016/j.jastp.2009.05.004.
6. Kretschmer M., Coumou D., Agel L., Barlow M., Tziperman E., Cohen J. More-persistent weak stratospheric polar vortex states linked to cold extremes // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2018. V. 99, N 1. P. 49–60. DOI: 10.1175/bams-d-16-0259.1.
7. *Meteorological Conditions & Ozone in the Polar Stratosphere.* URL: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/polar/polar.shtml#plot1> (last access: 10.12.2024).

8. Зоркальцева О.С., Антохина О.Ю., Антохин П.Н. Долговременная изменчивость параметров внезапных стратосферных потеплений по данным реанализа ERA5 // Оптика атмосфер. и океана. 2023. Т. 36, № 3. С. 200–208. DOI: 10.15372/АОО20230306; Zorkaltseva O.S., Antokhina O.Yu., Antokhin P.N. Long-term variations in parameters of sudden stratospheric warmings according to ERA5 reanalysis data // Atmos. Ocean. Opt. 2023. V. 36, N 4. P. 370–378.
9. 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., Langgematz U., Pedatella N.M. Sudden stratospheric warmings // Rev. Geophys. 2021. V. 59, N 1. DOI: 10.1029/2020RG000708.
10. Варгин П.Н., Кирюшов Б.М. Внезапное стратосферное потепление в Арктике в феврале 2018 г. и его влияние на тропосферу, мезосферу и озоновый слой // Метеорол. и гидрол. 2019. № 2. С. 41–56.
11. Antokhina O.Y., Antokhin P.N., Zorkaltseva O.S., Bobrovnikov S.M., Zharkov V.I., Trifonov D.A. Characteristics of the dynamics and relationships of the troposphere and stratosphere in the winter period 2022–2023 // Proc. SPIE. 2023. V. 12780. P. 925–930. DOI: 10.1117/12.2688249.
12. Sigmond M., Scinocca J., Kharin V., Shepherd T. Enhanced seasonal forecast skill following stratospheric sudden warmings // Nat. Geosci. 2013. V. 6, N 2. P. 98–102. DOI: 10.1038/ngeo1698.
13. WMO: Implementation of the WMO-IQSY STRATWARM PROGRAMME. 1964. V. 13, N 4. P. 200–205. URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=6525 (last access: 13.11.2023).
14. Labitzke K. Stratospheric-mesospheric midwinter disturbances: A summary of observed characteristics // J. Geophys. Res.: Ocean. 1981. V. 86, N C10. P. 9665–9678. DOI: 10.1029/JC086iC10p09665.
15. Braesicke P., Langematz U. On the occurrence and evolution of extremely high temperatures at the polar winter stratopause – a GCM study // Geophys. Res. Lett. 2000. V. 27, N 10. P. 1467–1470. DOI: 10.1029/2000GL011431.
16. Manney G.L., Krüger K., Paterson S., Minschwaner K., Schwartz M., Daffer W.H., Livesey N., Mlynczac M.G., Remsberg E.E., Russell J.III, Waters J. The evolution of the stratopause during the 2006 major warming: Satellite data and assimilated meteorological analyses // J. Geophys. Res.: Atmos. 2008. V. 113, N D11. DOI: 10.1029/2007JD009097.
17. Limpasuvan V., Richter J.H., Orsolini Y.J., Stordal F., Kvissel O. The roles of planetary and gravity waves during a major stratospheric sudden warming as characterized in WACCM // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2012. V. 78, P. 84–98. DOI: 10.1016/j.jastp.2011.03.004.
18. Chandran A., Collins R., Garcia R., Marsh D. A case study of an elevated stratopause generated in the Whole Atmosphere Community Climate Model // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38, N 8. DOI: 10.1029/2010GL046566.
19. King A.D., Butler A.H., Jucker M., Earl N.O., Rudeva I. Observed relationships between sudden stratospheric warmings and European climate extremes // J. Geophys. Res.: Atmos. 2019. V. 124, N 24. P. 13943–13961. DOI: 10.1029/2019JD030480.
20. Бобровников С.М., Жарков В.И., Зайцев Н.Г., Трифонов Д.А. Применение комбинированного метода фоторегистрации в лидарных измерениях температуры атмосферы на главном зеркале Сибирской лидарной станции // Оптика атмосфер. и океана. 2023. Т. 36, № 10. С. 839–845. DOI: 10.15372/АОО20231008; Bobrovnikov S.M., Zharkov V.I., Zaitsev N.G., Trifonov D.A. Combined lidar signal registration technique for atmospheric temperature measurements with the primary mirror of the Siberian Lidar Station // Atmos. Ocean. Opt. 2024. V. 37, N 1. P. 24–30.
21. Бобровников С.М., Жарков В.И., Зайцев Н.Г., Надеев А.И., Трифонов Д.А. Анализ корректности восстановления вертикального распределения температуры атмосферы из лидарных сигналов молекулярного рассеяния на главном лидаре Сибирской лидарной станции // Оптика атмосфер. и океана. 2022. Т. 35, № 7. С. 524–531. DOI: 10.15372/АОО20220702; Bobrovnikov S.M., Zharkov V.I., Zaitsev N.G., Nadeev A.I., Trifonov D.A. Analysis of the correctness of retrieving the vertical atmospheric temperature distribution from lidar signals of molecular scattering at the main lidar of the Siberian Lidar Station // Atmos. Ocean. Opt. 2022. V. 35, N 6. P. 704–712.
22. Vignon E., Mitchell D.M. The stratopause evolution during different types of sudden stratospheric warming event // Clim. Dyn. 2015. V. 44. P. 3323–3337. DOI: 10.1007/s00382-014-2292-4.
23. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara Sh., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., de Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez Ph., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N. The ERA5 Global Reanalysis // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2020. V. 146. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
24. Коршунов В.А., Зубачев Д.С. Увеличение обратного аэрозольного рассеяния в нижней мезосфере в 2019–2021 гг. и его влияние на измерения температуры рэлеевским методом // Оптика атмосфер. и океана. 2022. Т. 35, № 1. С. 32–36. DOI: 10.15372/АОО20220105; Korshunov V.A., Zubachev D.S. Increase in the aerosol backscattering ratio in the lower mesosphere in 2019–2021 and its effect on temperature measurements with the Rayleigh Method // Atmos. Ocean. Opt. 2022. V. 35, N 4. P. 366–370.
25. Маричев В.Н. Комбинированный метод оптического зондирования нижней и средней атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 3. С. 210–215. DOI: 10.15372/АОО20160307; Marichev V.N. Combined method for optical sensing of the lower and middle atmosphere // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 4. P. 348–352.
26. Waccm download subset. URL: <https://www.acom.ucar.edu/waccm/download.shtml> (дата обращения: 20.01.2024).
27. Butchart N. The stratosphere: A review of the dynamics and variability // Weather Clim. Dyn. 2022. V. 3, N 4. P. 1237–1272. DOI: 10.5194/wcd-3-1237-2022.

28. *McClatchey R.A.* Optical properties of the atmosphere. Air Force Cambridge Research Laboratories. Office of Aerospace Research. United States Air Force, 1972. P. 108.
29. *Wargan K., Coy L.* Strengthening of the tropopause inversion layer during the 2009 sudden stratospheric warming: A MERRA-2 study // *J. Atmos. Sci.* 2016. V. 73, N 5. P. 1871–1887. DOI: 10.1175/JAS-D-15-0333.1.
30. *Zülicke C., Becker E.* The structure of the mesosphere during sudden stratospheric warmings in a global circulation model // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2013. V. 118, N 5. P. 2255–2271. DOI: 10.1002/jgrd.50219.

O.Yu. Antokhina, S.M. Bobrovnikov, V.I. Zharkov, O.S. Zorkaltseva, D.A. Trifonov. **Features of the vertical distribution of temperature over Tomsk during sudden stratospheric warming in winter 2023 according to data from the Siberian lidar station.**

Atmospheric temperature anomalies associated with sudden stratospheric warmings (SSWs) observed over the territory of Siberia require detailed study. In Siberia, there are few instruments that can provide the necessary information on the vertical distribution of atmospheric temperature. Unique lidar of the Siberian Lidar Station (SLS) of V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia (56.48° N, 85.05° E), developed for regular lidar measurements of atmospheric parameters, is one of few ground-based devices in Siberia which provide necessary data on the vertical stratification of atmospheric temperature during a SSW event. To determine the characteristics of atmospheric temperature anomalies during the SSW period in winter 2023 over Tomsk, data on atmospheric temperature in individual nights obtained by the SLS lidar, the WACCM model, the standard mid-latitude winter model, and the ERA5 reanalysis were compared. For the first time, the possibility of using vertical atmospheric temperature profiles obtained by the Raman scattering method to study the SSW effect is shown. Use of lidar air temperature profiles to analyze changes in the vertical structure of the atmosphere during sudden stratospheric warmings is demonstrated.