

ДОЛГОВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВНЕЗАПНЫХ СТРАТОСФЕРНЫХ ПОТЕПЛЕНИЙ И ИХ ВЗАИМОСВЯЗЬ С ПРОЦЕССАМИ В ТРОПОСФЕРЕ

¹О.С. Зоркальцева, ²О.Ю. Антохина, ²П.Н. Антохин

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
meteorologist-ka@yandex.ru

²Институт оптики атмосферы им. В.И. Зуева СО РАН, Томск, Россия

LONG-TERM VARIABILITY OF SUDDEN STRATOSPHERIC WARMINGS AND THEIR RELATIONSHIP WITH PROCESSES IN THE TROPOSPHERE

¹O.S. Zorkaltseva, ²O.Yu. Antokhina, ²P.N. Antokhin

¹Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia
meteorologist-ka@yandex.ru

²V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

Аннотация. Проведена оценка долговременной изменчивости внезапных стратосферных потеплений (ВСП) с 1980 по 2021 г. В качестве критерия оценки ВСП были использованы значения среднезональной температуры воздуха на широте 80° N и среднезональной скорости ветра на 60° N на высотах 10 гПа. На основе данных о ВСП за последние 40 лет проведен композитный анализ полей распределения температуры, скорости ветра и высот геопотенциальных поверхностей от подстилающей поверхности до 50 км.

Ключевые слова: внезапные стратосферные потепления, стратосфера, тропосфера.

Abstract. This paper deals with assessment of the long-term variability of sudden stratospheric warmings (SSW) from 1980 to 2021. As a criterion for estimating SSW, we used values of the zonally averaged air temperature at a latitude of 80° N and zonally averaged wind speed at a latitude of 60° N at a height of 10 hPa. Using SSW data obtained in the last 40 years, we made a composite analysis of the distribution fields of temperature, wind speed and heights of geopotential impacts from the underlying surface up to 50 km.

Keywords: sudden stratospheric warmings, stratosphere, troposphere.

ВВЕДЕНИЕ

Стратосферная внетропическая циркуляция в зимний период характеризуется сильными западными ветрами, оконтуривающими мощный полярный вихрь. Эта циркуляция зимой один или несколько раз нарушается распространяющимися вверх волнами из тропосферы (например, [Andrews et al., 1987]). Экстремальное проявление взаимодействия вертикально распространяющейся волны со средним потоком может привести к резкому ослаблению стратосферного полярного вихря и быстрому нагреву полярной стратосферы [Matsuno, 1971], называемому внезапным стратосферным потеплением (ВСП). ВСП являются проявлением стратосферно-тропосферной связи, а анализ распространения аномалий вниз из стратосферы в тропосферу после возникновения ВСП можно использовать для улучшения долгосрочных прогнозов погоды в зимнее время в Северном полушарии [Sigmond et al., 2013].

Всемирная метеорологическая организация (ВМО) различает события ВСП двух типов: крупные (мажорные) потепления в середине зимы, характеризующиеся обращением зональной циркуляции, и незначительные (минорные) потепления с ограниченными изменениями циркуляции [WMO/IQSY, 1964]. В последнее десятилетие предложены различные методы идентификации ВСП, основанные на морфологии полярного вихря (смещение — когда вихрь смещается от полюса; расщепление ВСП — когда полярный вихрь разделяется на две части) [Bancalá et al., 2012; Barriopedro, Calvo, 2014]. Подробно методы идентификации ВСП рассмотрены в работе [Palmeiro et al., 2015], где показано, что значитель-

ные различия между методами наблюдаются в периоды минорных потеплений, тогда как периоды мажорных потеплений идентифицируются всеми методами с небольшими временными сдвигами порядка нескольких дней. В данной работе ВСП идентифицировались на основе классификации ВМО, при этом анализировались долговременные вариации ВСП. На основе данных о ВСП за последние 40 лет проведен композитный анализ полей распределения температуры, скорости ветра и высот геопотенциальных поверхностей на разных уровнях атмосферы до ВСП, во время и после.

ДААННЫЕ И МЕТОДЫ

Для изучения динамики стратосферы использовался климатический архив ECMWF ERA5 [Hersbach et al., 2020]. В соответствии с критериями ВСП, установленными ВМО, мы используем такие параметры, как среднезональная температура воздуха вдоль 80° N и средние зональные значения зональной составляющей ветра вдоль 60° N на высоте 10 гПа на сетке 2.5°×2.5°.

На рис. 1, в показаны среднесуточные зональные значения зонального ветра на 60° N (синяя линия) и температура на 80° N на высоте 10 гПа (красная линия). В качестве примера показаны ВСП двух типов — мажорное (слева) и минорное (справа). Видно, что в зимний период 2008–2009 гг. наблюдался один эпизод ВСП. За дату начала ВСП принимался день 18.01.2009 с резким (>5 К/сут) повышением температуры, за день окончания — день 06.02.2009, когда наблюдался либо реверс ветра с восточного на западный (в случае мажорных ВСП), либо

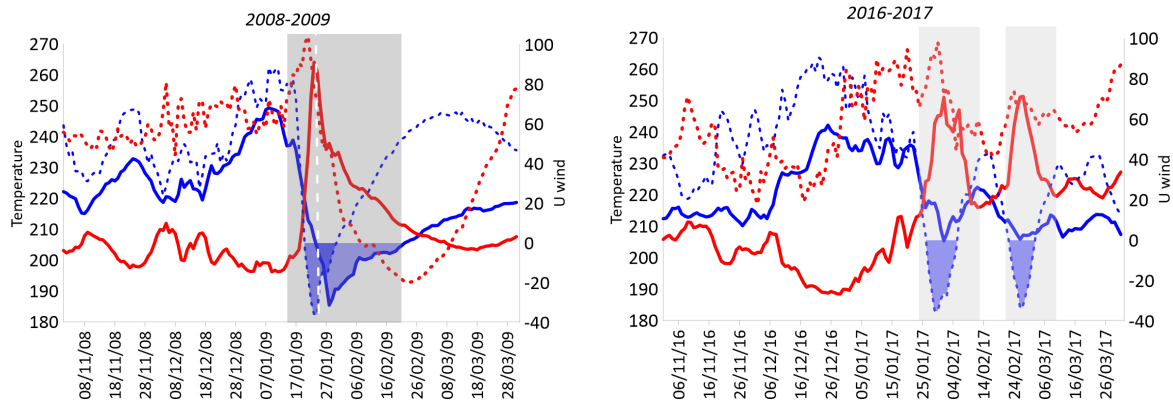


Рис. 1. Вариации среднезональной температуры воздуха вдоль 80° N на высоте 10 гПа (красная сплошная линия) и на 1 гПа (красная пунктирная линия), а также среднезональной скорости зональной компоненты ветра на 10 гПа (синяя сплошная линия) и на 1 гПа (синяя пунктирная линия) для зимнего периода 2008–2009 гг. (слева) и 2016–2017 гг. (справа)

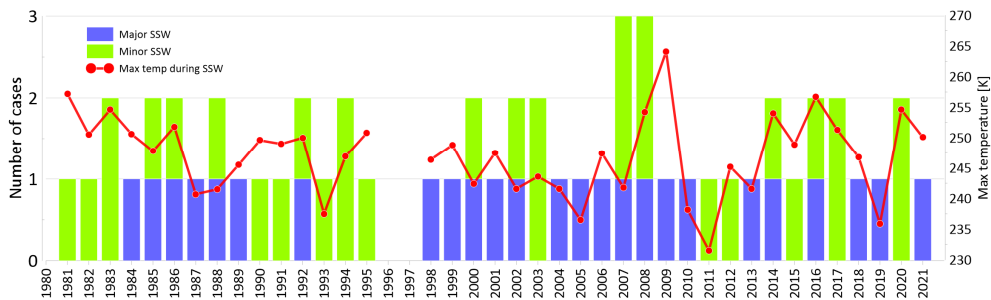


Рис. 2. Вариации количества мажорных (синие прямоугольники) и минорных (зеленые прямоугольники) ВСП и максимальной температуры во время ВСП с 1980 по 2021 г. (красная кривая — максимальная температура)

понижение температуры >3 К/сут; максимальная температура при ВСП наблюдалась 23.01.2009 и составила 264.1 К. Серыми прямоугольниками показана продолжительность ВСП. В соответствии со стандартными критериями ВМО зимой 2016–2017 г. наблюдались два минорных потепления, поскольку на высоте 10 гПа не наблюдалось обращение зональной циркуляции. Подобный анализ был проведен для каждого зимнего периода с 1980 по 2021 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Межгодовая изменчивость ВСП и максимальной температуры во время ВСП показана на рис. 2. Видно, что в среднем каждую зиму наблюдается один или два эпизода ВСП, отметим, что с 1993 по 1998 г. не наблюдалось мажорных ВСП, а в 2007 и 2008 гг. отмечалось по 3 эпизода ВСП, максимальная температура при ВСП наблюдалась в 2009 г. Также на рис. 2 видно, что с 1980 по 2021 г. не прослеживается долговременной тенденции ни в общем числе случаев ВСП, ни в максимальных температурах. Подобные выводы о динамике ВСП, в том числе регистрируемых по различным критериям, получены и другими исследователями, например [Domeisen, 2019]. Открытым остается вопрос о причинах отсутствия ВСП в 90-е гг. и о связях аномалий стратосферной циркуляции с процессами в нижележащей атмосфере.

Для оценки взаимосвязи ВСП и циркуляции атмосферы на других высотах был применен композитный анализ. Были рассчитаны композитные поля температуры, скорости ветра и высот геопотенци-

альных поверхностей от подстилающей поверхности до 50 км для периодов мажорных потеплений. В качестве реперной даты выбирался день начала (максимума и окончания) ВСП. Далее были рассчитаны аномалии усредненных метеорологических полей в реперные даты относительно среднеклиматических полей за рассматриваемый период 1980–2021 гг., который был разделен на два периода: до 2000 г. и после. Основным мотивом данного подхода является наличие Арктического усиления (Arctic Amplification) [<https://www.nasa.gov/press-release/2020-tied-for-warmest-year-on-record-nasa-analysis-shows>]. Поскольку это явление считается одним из важнейших регуляторов волновой активности в средней тропосфере умеренных широт Северного полушария, влияющим на рост амплитуды, опрокидывание длинных волн и, в свою очередь, на блокирование западного переноса, представляется уместным отдельное выделение периода Арктического усиления.

В качестве примера на рис. 3 приведены распределения высот геопотенциальной поверхности 500 гПа и температуры на 1 гПа в начале ВСП, максимуме и после за 2000–2021 гг.

В день начала ВСП в поле геопотенциала на 500 гПа прослеживаются значительные аномалии в районе Тихого и Атлантического океана, что может свидетельствовать об усилении волновой активности в тропосфере. В периоды максимума и окончания ВСП наблюдается положительная аномалия над полюсом, что возможно является следствием ослабления полярного вихря в тропосфере во время ВСП. На высоте 1 гПа распределение температуры позволяет предпо-

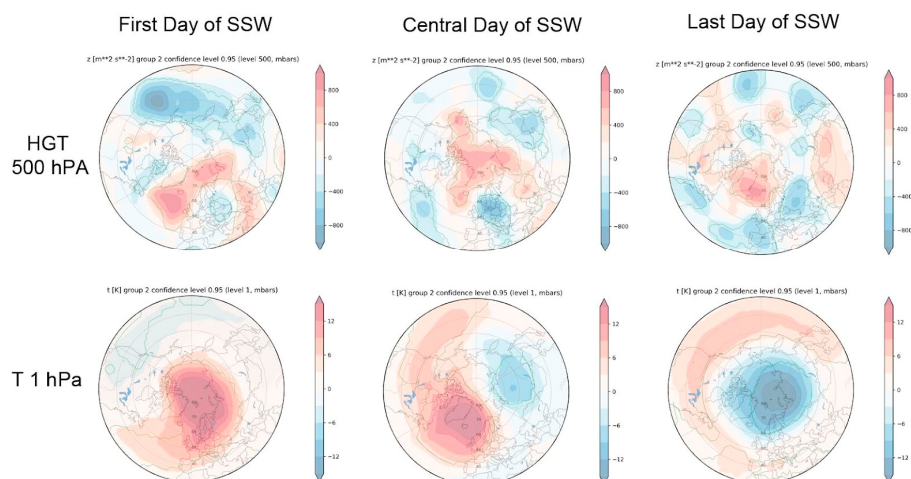


Рис. 3. Композитные поля высот геопотенциальной поверхности 500 гПа и температуры на 1 гПа до ВСП, в максимуме и после

ложить, что ВСП начинается и заканчивается на этой высоте раньше, чем на 10 гПа.

К сожалению, ограниченный объем статьи не позволяет нам привести композитные распределения метеополей за период до 2000 г. на других высотах. Все особенности, полученные в результате композитного анализа, будут рассмотрены подробно в докладе.

Работа выполнена в рамках проекта РФФ №22-77-10008.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Andrews D.G., Holton J.R., Leovy C.B. Middle atmosphere dynamics. *International Geophys. Ser.* 1987. Vol. 40. 489 p.

Bancalá S., Krüger K., Giorgetta M. The preconditioning of major sudden stratospheric warmings. *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117. D04101. P. 1–12. DOI: [10.1029/2011JD016769](https://doi.org/10.1029/2011JD016769).

Barriopedro D., Calvo N. On the relationship between ENSO, stratospheric sudden warmings, and blocking. *J. Climate.* 2014. Vol. 27. P. 4704–4720. DOI: [10.1175/JCLI-D-13-00770.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00770.1).

Domeisen D.I. Estimating the frequency of sudden stratospheric warming events from surface observations of the North Atlantic Oscillation. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2019. Vol. 124 (6). P. 3180–3194. DOI: [10.1029/2018jd030077](https://doi.org/10.1029/2018jd030077).

Matsuno T. A dynamical model of the stratospheric sudden warming. *J. Atmos. Sci.* 1971. Vol. 28. P. 1479–1494. DOI: [10.1175/1520-0469\(1971\)028<1479:ADMOTS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1971)028<1479:ADMOTS>2.0.CO;2).

Palmeiro F.M., Barriopedro D., García-Herrera R., Calvo N. Comparing sudden stratospheric warming definitions in Reanalysis data. *J. Climate.* 2015. Vol. 28. P. 6823–6840. DOI: [10.1175/JCLI-D-15-0004.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0004.1).

Sigmond M., Scinocca J.F., Kharin V.V., Shepherd T.G. Enhanced seasonal forecast skill following stratospheric sudden warmings. *National Geoscience.* 2013. Vol. 6. P. 98–102. DOI: [10.1038/ngeo1698](https://doi.org/10.1038/ngeo1698).

URL: <https://www.nasa.gov/press-release/2020-tied-for-warmest-year-on-record-nasa-analysis-shows>.