

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.51

Чувствительность антарктического полярного вихря к изменениям температуры нижней субтропической стратосферы

В.В. Зуев, Э.А. Масленникова[✉], Е.С. Савельева, А.В. Павлинский*

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3*

Поступила в редакцию 3.05.2023 г.;
после доработки 19.07.2023 г.;
принята к печати 3.10.2023 г.

Полярные вихри играют существенную роль в распределении стратосферного озона, движении воздушных масс в полярной и субполярной стратосфере и температурном режиме над полярной областью. Антарктический полярный вихрь формируется осенью, достигая пика своей устойчивости в начале весны. Поздней весной, когда он ослабевает, усиливается влияние на него нижней субтропической стратосферы. В данной работе рассмотрена роль изменений температуры нижней субтропической стратосферы в усилении антарктического полярного вихря. С помощью корреляционного анализа на основе данных реанализа ERA5 выявлено существенное увеличение влияния незначительных изменений температуры нижней субтропической стратосферы на динамику антарктического полярного вихря во второй половине ноября.

Ключевые слова: антарктический полярный вихрь, нижняя субтропическая стратосфера, полярные озоновые аномалии; Antarctic polar vortex, lower subtropical stratosphere, polar ozone depletion.

Введение

Стратосферный полярный вихрь — это сезонная область низкого давления с сильным ветровым поясом, который изолирует полярный воздух от средних и субполярных широт [1]. Понижение температуры в полярной стратосфере, связанное с уменьшением солнечной радиации в осенне-зимний период, способствует увеличению градиента температуры между полюсом и тропиками и усилению стратосферного пояса давления, характеризующегося сильным ветром [1]. Внутри вихря формируется изолированная область, где при экстремально низких температурах (ниже -78°C) образуются полярные стратосферные облака, на поверхности и в объеме которых протекают гетерогенные реакции с образованием фотохимически активных соединений хлора. Эти соединения с появлением солнечного излучения в конце зимы в Южном полушарии [2–4] вступают в каталитический цикл разрушения озона.

Ежегодно в начале весны южный полярный вихрь достигает пика своей устойчивости [5]. Усиление антарктического полярного вихря в весенний

период происходит под влиянием сезонного хода температуры нижней субтропической стратосферы. В Южном полушарии наблюдаются постепенный рост температуры (начиная с марта) и максимум в сентябре, способствующие увеличению стратосферного меридионального температурного градиента [5–7]. Это увеличение приводит к усилению термического ветра, которое проявляется в последовательном ускорении зональных ветров по направлению к полярной области, и полярного вихря. Поздней весной (октябрь–ноябрь) наблюдается более выраженная зависимость полярного вихря от изменений температуры субтропической стратосферы. При повышении температуры нижней субтропической стратосферы (относительно нормы) усиливается полярный вихрь, что впоследствии приводит к формированию озоновых аномалий. Антарктические озоновые аномалии формируются в конце зимы, с начала августа. Максимальная площадь озоновой дыры наблюдается в начале октября благодаря высокой устойчивости южного полярного вихря, который усиливается в сентябре. Масштабы и глубина разрушения стратосферного озона над полярной областью зависят от силы и устойчивости полярного вихря в весенний период [2, 7–11].

Внутригодовой ход температуры субтропической стратосферы объясняется частичной компенсацией между температурными изменениями в тропических и полярных широтах [12]. Внутригодовые изменения температуры нижней тропической

* Владимир Владимирович Зуев (vzuev@list.ru); Эрика Александровна Масленникова (maslennikovaerika@gmail.com); Екатерина Сергеевна Савельева (esav.pv@gmail.com); Алексей Валерьевич Павлинский (wf@inbox.ru).

стратосферы хорошо согласуются с сезонным ходом содержания стратосферного озона в тропиках (с задержкой на две-три недели), максимум которого наблюдается в конце августа [12, 13]. Сезонная динамика антарктического полярного вихря хорошо согласуется с внутригодовыми изменениями температуры нижней субтропической стратосферы: за постепенным ростом температуры в феврале–марте следует формирование полярного вихря в апреле, а максимум температуры в сентябре наблюдается одновременно с пиком устойчивости полярного вихря.

В работе [5] показано влияние вариаций температуры нижней субтропической стратосферы на динамику антарктического полярного вихря. Увеличение температуры в субтропиках относительно среднего сезонного хода в поздневесенний период (октябрь–ноябрь) приводит к усилению антарктического вихря, а уменьшение — к его ослаблению [6, 14]. Ранее мы считали [7, 14], что изменения температуры нижней субтропической стратосферы влияют на динамику антарктического полярного вихря во всем широтном диапазоне 20–40° ю.ш.

Цель данной работы — исследовать влияние незначительных (наблюдающихся в узком широтном поясе) изменений температуры нижней субтропической стратосферы на динамику антарктического полярного вихря в поздневесенний период.

Данные и методы

В работе использовались ежечасные данные реанализа ERA5 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (<https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6>) [15] с мая по ноябрь за 1979–2021 гг. с горизонтальным разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$: зональный ветер в области 50–90° ю.ш. на уровне 50 гПа (далее зональный ветер) и температура в области 10–40° ю.ш. на уровне 70 гПа (далее температура). Все расчеты с температурой осуществлялись на основе температурных аномалий из-за значительной межгодовой изменчивости температуры субтропической стратосферы. Температурные аномалии получались вычитанием из среднесуточных значений среднегодовых значений с теми же параметрами. Для исследования влияния незначительных изменений температуры нижней субтропической стратосферы на динамику антарктического полярного вихря применяли корреляционный анализ. Коэффициенты корреляции рассчитывались между усредненными за пять дней (с шагом один день) максимальными зональными средними значениями скорости зонального ветра в диапазоне 50–90° ю.ш. и максимальными зональными средними значениями температуры в диапазоне 10–40° ю.ш., усредненными по широтным диапазонам шириной 4, 8, 14 и 20°. В качестве незначительных изменений температуры нижней субтропической стратосферы рассматривались максимальные значения аномалий температуры, усредненные по диапазонам шириной 4°, в области 10–40° ю.ш.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены временные изменения коэффициентов корреляции между максимальной скоростью зонального ветра и максимальными значениями аномалий температуры, усредненными для диапазонов шириной 4, 8, 14 и 20° по широте, за 1979–2021 гг. с вероятностью $P < 10^{-4}$ (вероятность характеризует возможность того, что в генеральной совокупности связь между исследуемыми параметрами отсутствует; корреляция считается статистически значимой при $P < 10^{-4}$). Выбор уровней на рис. 1 обусловлен наиболее высокой корреляцией между скоростью зонального ветра у 60° ю.ш. и аномалиями температуры в области 20–40° ю.ш. [6].

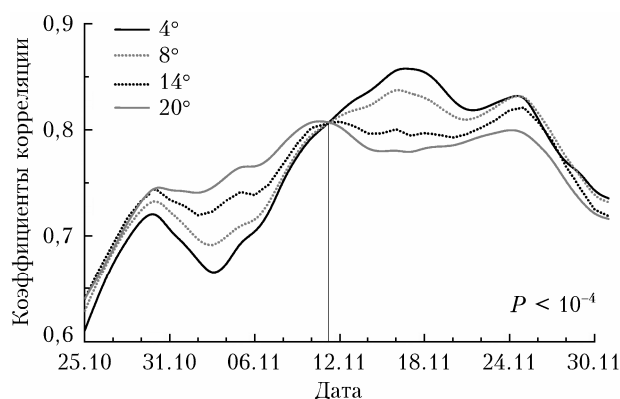


Рис. 1. Временной ход коэффициентов корреляции между максимальными среднезональными аномалиями температуры по диапазонам шириной 4, 8, 14 и 20° в области 10–40° ю.ш. на уровне 70 гПа и максимальными зональными средними значениями скорости зонального ветра в области 50–90° ю.ш. на уровне 50 гПа (1979–2021 гг.)

С мая по август коэффициент корреляции практически незначим ($P > 10^{-4}$), он начинает увеличиваться со второй половины сентября. В октябре и ноябре происходит уменьшение стратосферного меридионального температурного градиента в связи с потеплением в полярной области. В результате антарктический полярный вихрь становится более чувствительным к изменениям температуры нижней субтропической стратосферы. Как видно из рис. 1, начиная с 11 ноября влияние незначительных изменений температуры нижней субтропической стратосферы существенно усиливается (коэффициенты корреляции, полученные с использованием максимальной температуры, усредненной по диапазону шириной 4° по широте), превышая общее влияние температуры субтропической стратосферы (коэффициенты корреляции, полученные с использованием усреднения по диапазону шириной 20°).

На рис. 2 приведены диаграммы рассеяния максимальной скорости зонального ветра и максимальной температуры, усредненных по диапазону шириной 4°, для 1 и 15 ноября за 1979–2021 гг. В ноябре наблюдается постепенный рост коэффициента корреляции: 1 ноября он составил 0,69 ($P = 2,6 \cdot 10^{-7}$), а 15 ноября — 0,84 ($P = 9,5 \cdot 10^{-13}$). Существенное

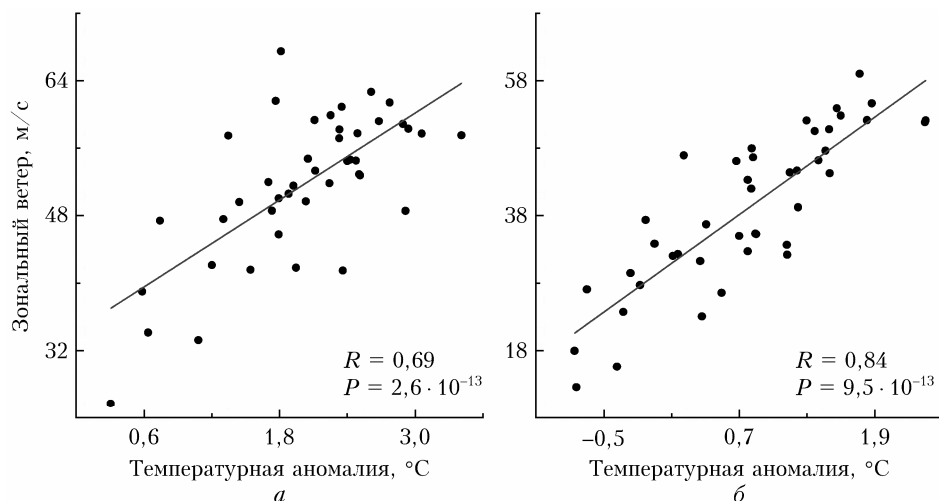


Рис. 2. Диаграмма рассеяния максимальных зональных средних значений скорости зонального ветра и максимальных зональных средних аномалий температуры, усредненных по диапазонам шириной 4° , для 1 (а) и 15 ноября (б) 1979–2021 гг.

увеличение корреляции между рассматриваемыми параметрами свидетельствует об усилении влияния незначительных изменений температуры нижней субтропической стратосферы на динамику антарктического полярного вихря в поздневесенний период.

Рис. 3 иллюстрирует влияние незначительных изменений температуры нижней субтропической стратосферы на динамику антарктического полярного вихря на примере 1994, 1999, 2016 гг. Выделены временные промежутки (17–31 октября 1994 г.,

1–16 ноября 1999 г., 16–28 октября 2016 г.), когда динамика максимальных аномалий температуры, усредненных по диапазонам шириной 4° , не была согласована с динамикой максимальных аномалий температуры, усредненных по диапазонам шириной 20° (изменения параметров асинхронны). В эти периоды наблюдалась согласованность динамики максимальной скорости зонального ветра с динамикой максимальных аномалий температуры, усредненных по диапазонам шириной 4° , но не 20° .

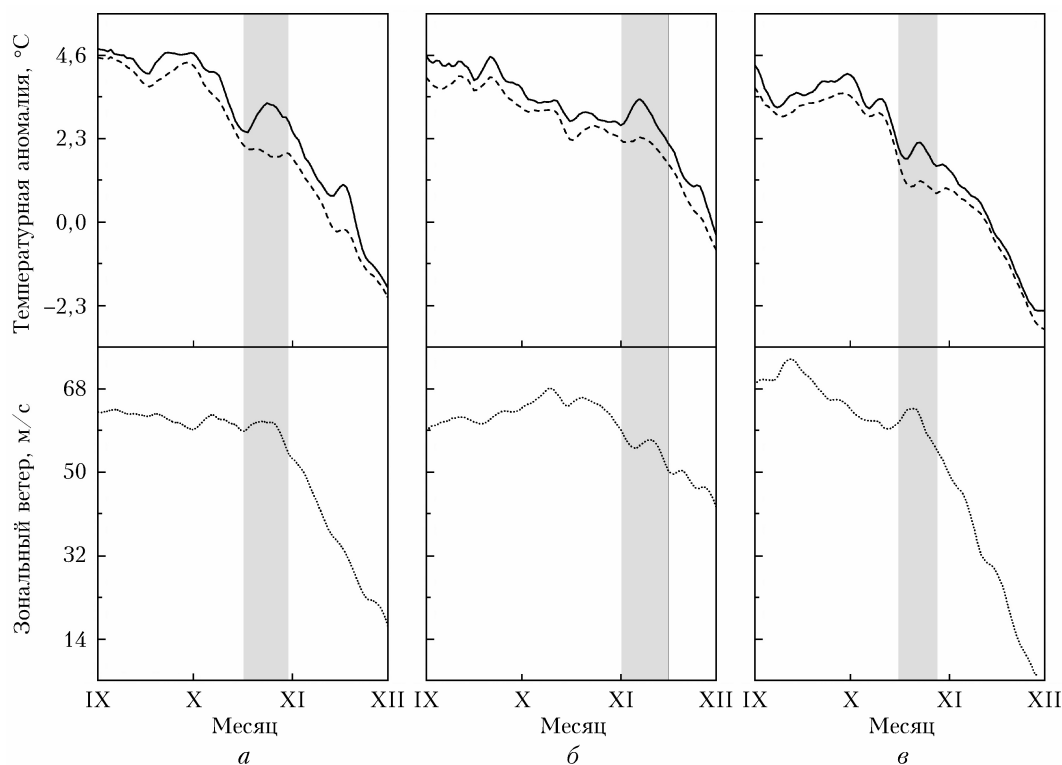


Рис. 3. Временной ход среднесуточных максимальных зональных средних аномалий температуры, усредненных по диапазонам шириной 4° (сплошная кривая) и 20° (штриховая кривая), и максимальных зональных средних значений скорости зонального ветра (пунктирная кривая) с сентября по ноябрь 1994 (а), 1999 (б), 2016 гг. (в)

Заключение

С помощью корреляционного анализа исследовано влияние изменений температуры нижней субтропической стратосферы на динамику антарктического полярного вихря в поздневесенний период. Показана определяющая роль незначительных изменений температуры нижней субтропической стратосферы в усилении антарктического полярного вихря во второй половине ноября, когда полярный вихрь ослаблен и более подвержен влиянию внеполярной стратосферы. В качестве незначительных изменений температуры нижней субтропической стратосферы рассматривались максимальные аномалии температуры, усредненные по диапазонам шириной 4° , в области $10\text{--}40^\circ$ ю.ш. В середине ноября коэффициент корреляции между максимальной скоростью зонального ветра в области $50\text{--}90^\circ$ ю.ш. и максимальными аномалиями температуры для диапазонов шириной 4° в области $10\text{--}40^\circ$ ю.ш. за 1979–2021 гг. достигает 0,84 (при $P = 9,5 \cdot 10^{-13}$). Влияние незначительных изменений температуры на динамику антарктического полярного вихря проиллюстрировано на примере изменений рассматриваемых параметров в октябре–ноябре 1994, 1999 и 2016 гг., когда наблюдалась асинхронная динамика максимальных аномалий температуры, усредненных по диапазонам шириной 4 и 20° .

Результаты исследований могут быть использованы при моделировании глобальных и региональных климатических измерений.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № 121031300156-5.

Список литературы

1. *Lecouffe A., Godin-Beekmann S., Pazmico A., Hauchecorne A.* Evolution of the intensity and duration of the Southern Hemisphere stratospheric polar vortex edge for the period 1979–2020 // *Atmos. Chem. Phys.* 2022. V. 22, N 6. P. 4187–4200.
2. *Solomon S.* Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history // *Rev. Geophys.* 1999. V. 37, N 3. P. 275–316.
3. *Finlayson-Pitts B.J., Pitts J.N.* Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments, and Applications. California: Academic Press, 2000. 942 p.
4. *Newman P.A., Kawa S.R., Nash E.R.* On the size of the Antarctic ozone hole // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31, N 21. P. L21104.
5. *Zuev V.V., Savelieva E.S.* The cause of the spring strengthening of the Antarctic polar vortex // *Dyn. Atmos. Ocean.* 2019. V. 87. P. 101097.
6. *Zuev V.V., Savelieva E.S.* The cause of the strengthening of the Antarctic polar vortex during October–November periods // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2019. V. 190. P. 1–5.
7. *Зуев В.В., Боровко И.В., Крупчатников В.Н., Савельева Е.С.* Влияние температуры нижней субтропической стратосферы на динамику антарктического полярного вихря // *Оптика атмосф. и океана.* 2020. Т. 33, № 5. С. 415–418; *Zuev V.V., Borovko I.V., Krupchatnikov V.N., Savelieva E.S.* Influence of the temperature of the lower subtropical stratosphere on antarctic polar vortex dynamics // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 6. P. 708–711.
8. *Кашкин В.Б., Рублева Т.В., Хлебопрос П.Г.* Стратосферный озон: Вид с космической орбиты. Красноярск: СФУ, 2015. 182 с.
9. *Хлебопрос П.Г., Кашкин В.Б.* Антарктическая озоновая дыра — кто виноват? // *Наука из первых рук.* 2017. Т. 73, № 1. С. 20–27.
10. *Кашкин В.Б., Рублева Т.В.* Зональное движение масс озона в нижней стратосфере по спутниковым данным // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 9. С. 826–832.
11. *Рублева Т.В., Кашкин В.Б., Мясников В.М., Селиверстов С.А.* Изменчивость полярного стратосферного озона Южного полушария по спутниковым данным (аппаратура TOMS, OMI) // *Вестн. СибГАУ.* 2011. № 2. С. 58–62.
12. *Yulaeva E., Holton J.R., Wallace J.M.* On the cause of the annual cycle in tropical lower-stratospheric temperatures // *J. Atmos. Sci.* 1994. V. 51, N 2. P. 169–174.
13. *Steinbrecht W., Hassler B., Claude H., Winkler P., Stolarski R.S.* Global distribution of total ozone and lower stratospheric temperature variations // *Atmos. Chem. Phys.* 2003. V. 3, N 5. P. 1421–1438.
14. *Савельева Е.С.* Динамика антарктического полярного вихря во время внезапного стратосферного потепления в 2002 г. // *Оптика атмосф. и океана.* 2020. Т. 33, № 1. С. 50–55.
15. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horanyi A., Mucoz-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., Hylm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N.* The ERA5 global reanalysis // *Q. J. R. Meteor. Soc.* 2020. V. 146, N 730. P. 1–51.

V.V. Zuev, E.A. Maslennikova, E.S. Savelieva, A.V. Pavlinsky. Sensitivity of the Antarctic polar vortex to temperature changes in the lower subtropical stratosphere.

The polar vortices play a significant role in the distribution of stratospheric ozone, the movement of air masses in the polar and subpolar stratosphere, and temperature changes over the polar region. The Antarctic polar vortex forms in autumn and reaches its peak intensity in early spring. In late spring, when this vortex weakens, the influence of the lower subtropical stratosphere increases. We consider the effect of temperature changes in the lower subtropical stratosphere on the Antarctic polar vortex strengthening. Using correlation analysis and ERA5 reanalysis data, we show a significant increase in the effect of minor temperature changes in the lower subtropical stratosphere on the Antarctic polar vortex dynamics in the second half of November.