

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 551.51

Влияние температуры нижней субтропической стратосферы на динамику антарктического полярного вихря

В.В. Зуев¹, И.В. Боровко^{2,3,4}, В.Н. Крупчатников^{2,3,4}, Е.С. Савельева^{1*}

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

²Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6

³Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт
630099, г. Новосибирск, ул. Советская, 30

⁴Новосибирский государственный университет
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Поступила в редакцию 19.03.2020 г.

Устойчивость стратосферного полярного вихря в зимне-весенний период является одним из ключевых факторов, определяющих продолжительность и масштабы разрушения стратосферного озона в полярной области. Максимум скорости арктического полярного вихря наблюдается зимой, а антарктический вихрь, как правило, усиливается в начале весны. В результате над Антарктикой ежегодно с августа по ноябрь наблюдается масштабное разрушение озона, а над Арктикой с января по март — лишь небольшие эпизодические аномалии. В работе рассмотрена причина высокой силы и устойчивости антарктического полярного вихря в зимне-весенний период. На основе данных реанализа ERA-Interim показана высокая согласованность между внутригодовыми изменениями температуры нижней субтропической стратосферы и скорости зонального ветра в субполярной и полярной нижней стратосфере в Южном полушарии. Результаты численного моделирования с использованием модели PlaSim-ICMMG-1.0 демонстрируют усиление зонального ветра в субполярной области при повышении температуры субтропической стратосферы. Показано, что зимне-весеннее усиление антарктического полярного вихря происходит благодаря увеличению стратосферного меридионального температурного градиента в результате сезонного повышения температуры нижней субтропической стратосферы в этот период.

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

Стратосферные полярные вихри, формирующиеся над полярными областями в осенне-зимний период, являются одной из примечательных особенностей стратосферной циркуляции. Структура и динамика полярных вихрей влияет на распределение стратосферного озона, движение воздушных масс у границ вихря и температурный режим над полярной областью [1–3]. Циркуляция зимней полярной стратосферы определяется активностью полярного вихря, и ее изменения в основном связаны с вариациями формы и расположения вихря. Масштабы и глубина разрушения стратосферного озона над полярной областью зависят от силы и устойчивости полярного вихря в весенний период [4–6]. Границы полярного вихря создают ветровой барьер, препятствуя меридиональному переносу стратосферного озона из тропических и средних широт

в полярную область [7, 8]. При этом внутри вихря в стратосфере при экстремально низких температурах (ниже -78 °C) формируются полярные стратосферные облака (ПСО), на поверхности и внутри которых протекают гетерогенные реакции с высвобождением молекулярного хлора, активно вступающего в каталитический цикл разрушения озона с появлением солнечного излучения над полярным регионом [9].

Как известно, полярный вихрь формируется благодаря увеличению стратосферного меридионального температурного градиента в осенний период [2, 10]. Увеличение градиента приводит к усилению термического ветра и последующему ускорению западного стратосферного зонального течения в районе 60-х широт (формируется полярный вихрь) [2, 11]. В [12] была рассмотрена роль сезонного хода температуры нижней субтропической стратосферы в динамике антарктического полярного вихря. На рис. 1, а приведены 38-летние средние внутригодовые изменения среднеширотных значений температуры в области $0-60^\circ$ ю.ш. и зонального

* Владимир Владимирович Зуев (vzuev@list.ru); Ирина Владимировна Боровко (irina.borovko@yandex.ru); Владимир Николаевич Крупчатников (vkрупчатников@yandex.ru); Екатерина Сергеевна Савельева (p.vortices@gmail.com).

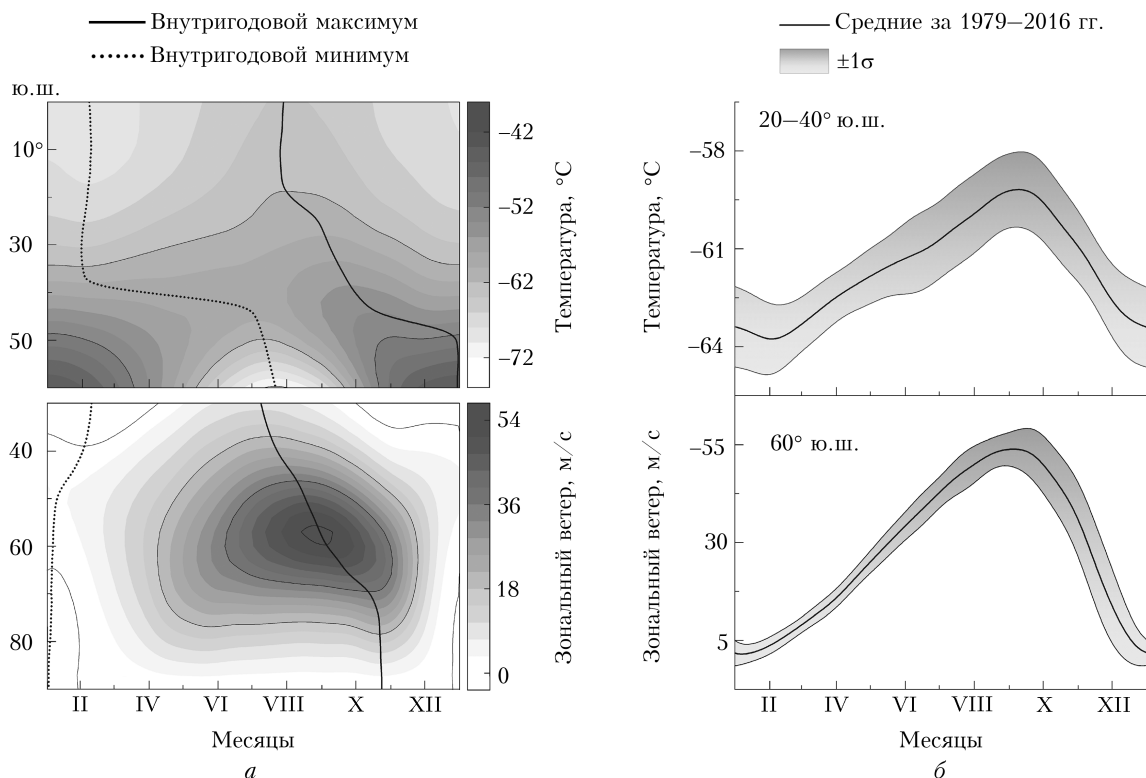


Рис. 1. Внутригодовые изменения: *a* – температуры в области 0–60° ю.ш. и зонального ветра в области 30–90° ю.ш. на высоте 50 гПа в среднем за 1979–2016 гг.; *б* – температуры в области 20–40° ю.ш. и зонального ветра вблизи 60° ю.ш. на высоте 50 гПа в среднем за 1979–2016 гг. с интервалами СКО

ветра в области 30–90° ю.ш. на высоте 50 гПа, полученные по данным реанализа ERA-Interim [13].

Как видно из рис. 1, *a*, в тропической нижней стратосфере (0–20° ю.ш.) 38-летний средний внутригодовой максимум температуры проявляется в период с 25 по 30 июля. Затем в субтропических и средних широтах Южного полушария (ЮП) наблюдается смещение максимума температуры с 1 августа по 30 сентября в область 20–40° ю.ш., а с 1 октября по 30 декабря – в область 40–50° ю.ш. При этом сезонный максимум скорости зонального ветра в интервале 30–90° ю.ш. перемещается по направлению к полюсу с июля по октябрь, проходя максимальные значения зонального ветра на 60° ю.ш. в начале сентября. Сезонные максимумы температуры и зонального ветра в широтных поясах 20–40° ю.ш. и 50–70° ю.ш. соответственно смещаются по направлению к высоким широтам с начала августа по конец сентября (начало октября). Таким образом, в ЮП наблюдается согласованность сезонных максимумов температуры нижней субтропической стратосферы и зонального ветра в нижней субполярной стратосфере.

На рис. 1, *б* приведены внутригодовые изменения температуры в области 20–40° ю.ш. и зонального ветра вблизи 60° ю.ш. на высоте 50 гПа в среднем за 38 лет со среднеквадратичными отклонениями (СКО), полученные по данным реанализа ERA-Interim [13].

Постепенный рост температуры нижней субтропической стратосферы, происходящий с марта по сентябрь, способствует увеличению стратосферного меридионального температурного градиента и таким образом формирует благоприятные условия для усиления зонального ветра вблизи 60° ю.ш. с апреля (формируется антарктический полярный вихрь) по сентябрь (пик интенсивности полярного вихря весной обуславливает масштабное разрушение озона в стратосфере над Антарктикой). Случаи аномального разрушения стратосферного озона над Антарктикой в октябре–ноябре 1987, 1998, 1999, 2001, 2006, 2011 и 2015 гг. в результате усиления полярного вихря при повышении температуры нижней субтропической стратосферы в эти месяцы рассмотрены в [14].

Для исследования влияния повышения температуры нижней субтропической стратосферы на усиление антарктического полярного вихря был проведен численный эксперимент с помощью новой модели системы Земли PlaSim-ICMMG-1.0, которая достаточно хорошо воспроизводит основные характеристики климатической системы [15]. Модель PlaSim-ICMMG-1.0 относится к классу моделей промежуточной сложности, предназначенных для изучения отдельных процессов и обратных связей и воспроизведения базовой физики атмосферы. Модель имеет горизонтальное разрешение 2,5° по широте и долготе и 12 уровней по вертикали. Моделирование потепления в субтропической стра-

тосфере осуществлялось путем прибавления в уравнение для температуры постоянного слагаемого в поясе широт 25–40° ю.ш. на высоте 70 гПа с начала июня до конца декабря. Такая постановка позволяет увидеть реакцию климатической системы на повышение температуры нижней субтропической стратосферы без учета природы этого явления. Контрольный период составлял 30 лет модельного времени. Результаты моделирования приведены на рис. 2. Видно, что среднеширотные аномалии температуры в нижней субтропической стратосфере достигали 12 °С. В ЮП в течение всего периода моделирования (с июня по декабрь) проявляется явная положительная аномалия скорости стратосферного струйного течения (усиление антарктического полярного вихря).

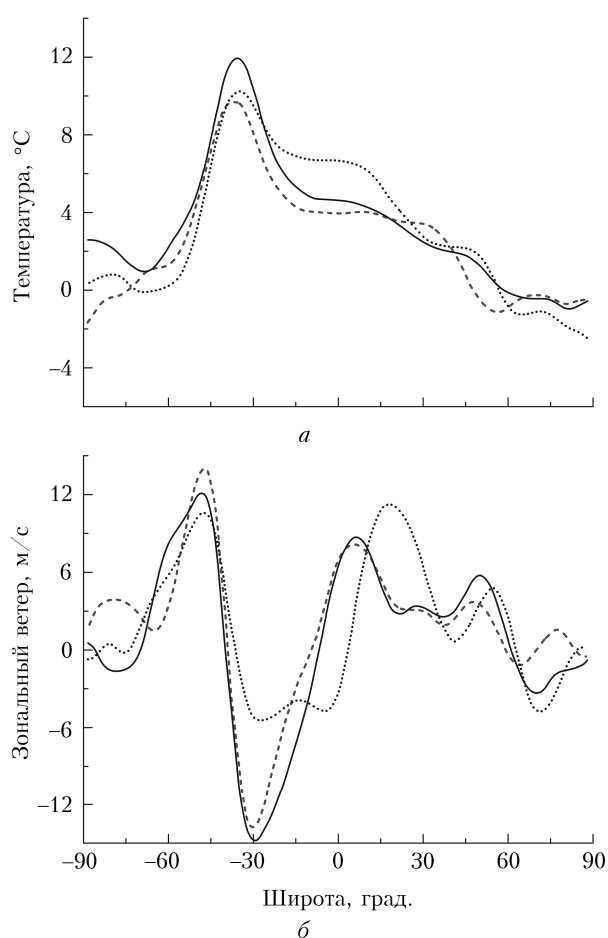


Рис. 2. Среднемесячные аномалии температуры и зонального ветра на высоте 70 гПа за июль (штриховая кривая), сентябрь (сплошная кривая) и ноябрь (пунктирная кривая)

Таким образом, на основе данных реанализа ERA-Interim и результатов численного моделирования с использованием модели промежуточной сложности PlaSim-ICMMG-1.0 показано, что высокая устойчивость и сила антарктического полярного вихря зимой и его ежегодное весеннее усиление обусловлены влиянием сезонного хода температуры

нижней субтропической стратосферы ЮП. В этом поясе широт наблюдаются постепенный рост температуры начиная с марта и ее максимум в сентябре, которые способствуют увеличению стратосферного меридионального температурного градиента и последующему усилению полярного вихря. Увеличение температуры нижней субтропической стратосферы относительно климатической нормы с июня по декабрь приводит к дополнительному усилению антарктического полярного вихря, сопровождающемуся масштабным разрушением озона с августа по ноябрь.

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № АААА-А17-117013050038-7 и программы ФНИ № 0315-2019-0003.

1. Waugh D.W., Randel W.J. Climatology of Arctic and Antarctic polar vortices using elliptical diagnostics // *J. Atmos. Sci.* 1999. V. 56, N 11. P. 1594–1613.
2. Waugh D.W., Polvani L.M. Stratospheric polar vortices // *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry. Geophysical Monograph Series.* 2010. V. 190. P. 43–57.
3. Newman P.A. Chemistry and dynamics of the Antarctic ozone hole // *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry.* 2010. V. 190. P. 157–171.
4. Solomon S., Garcia R.R., Rowland F.S., Wuebbles D.J. On the depletion of Antarctic ozone // *Nature.* 1986. V. 321. P. 755–758.
5. 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.
6. Solomon S. Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history // *Rev. Geophys.* 1999. V. 37, N 3. P. 275–316.
7. Manney G.L., Zurek R.W. On the motion of air through the stratospheric polar vortex // *J. Atmos. Sci.* 1994. V. 51, N 20. P. 2973–2994.
8. Sobel A.H., Plumb R.A., Waugh D.W. Methods of calculating transport across the polar vortex edge // *J. Atmos. Sci.* 1997. V. 54, N 18. P. 2241–2260.
9. Finlayson-Pitts B.J., Pitts J.N. *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments, and Applications.* California: Academic Press, 2000. 969 p.
10. Waugh D.W., Sobel A.H., Polvani L.M. What is the polar vortex and how does it influence weather? // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2017. V. 98, N 1. P. 37–44.
11. Driscoll S., Bozzo A., Gray L.J., Robock A., Stenchikov G. Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5) simulations of climate following volcanic eruptions // *J. Geophys. Res. D.* 2012. V. 117, N 17. P. D17105.
12. Zuev V.V., Savelieva E. The cause of the spring strengthening of the Antarctic polar vortex // *Dynam. Atmos. Oceans.* 2019. V. 87. P. 101097.
13. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hylm E.V., Isaksen L., Kellberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: Configuration

- and performance of the data assimilation system // Q. J. Roy. Meteor. Soc. 2011. V. 137, N 656. P. 553–597.
14. Zuev V.V., Savelieva E. 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.
15. Platov G., Krupchatnikov V., Martynova Yu., Borovko I., Golubeva E. A new earth's climate system model of intermediate complexity, PlaSim-ICMMG-1.0: Description and performance // IOP Conf. Series: Earth Env. Sci. 2017. V. 96. P. 12005.

V.V. Zuev, I.V. Borovko, V.N. Krupchatnikov, E.S. Savelieva. **Influence of the temperature of the lower subtropical stratosphere on the Antarctic polar vortex dynamics.**

The stratospheric polar vortex persistence in the winter-spring period is one of key factors of the duration and extent of stratospheric ozone depletion in a polar region. The Arctic polar vortex reaches its peak intensity in winter, whereas the Antarctic vortex usually strengthens in early spring. As a result, the strong ozone depletion is observed every year from August to November over the Antarctic, while short-term ozone loss occasionally occurs over the Arctic from January to March. In this work, we examine the reason for the high strength and persistence of the Antarctic polar vortex in the winter-spring period. Based on the ERA-Interim reanalysis data, we show a high agreement between the seasonal variations in the temperature in the lower subtropical stratosphere and zonal wind in the subpolar and polar lower stratosphere in the Southern Hemisphere. The results of numerical simulations using PlaSim–ICMMG–1.0 show acceleration of zonal wind in the subpolar region with an increase in the temperature of the subtropical stratosphere. Thus, the winter-spring strengthening of the Antarctic polar vortex occurs due to an increase in the stratospheric equator-to-pole temperature gradient as a result of the seasonal temperature growth in the lower subtropical stratosphere in this period.