

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 551.51

Особенности ослабления стратосферного полярного вихря, предшествующие его разрушению

В.В. Зуев, Е.С. Савельева, А.В. Павлинский*

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

Поступила в редакцию 29.10.2022 г.

Рассмотрены особенности ослабления стратосферного полярного вихря, предшествующие его разрушению. Для анализа аномальной динамики полярных вихрей использовался метод оценки основных параметров вихря при оконтуривании его границ с помощью значений геопотенциала, определенных по максимальному градиенту температуры и максимальной скорости ветра по данным реанализа ERA5. Показано, что критерии аномального ослабления полярного вихря, предшествующего его разрушению, — это сокращение площади вихря до значений < 10 млн км² и последующее уменьшение средней скорости ветра по границе вихря до значений < 30 и 45 м/с в нижней и средней стратосфере соответственно. В этом случае полярный вихрь становится небольшим циклоном (характеризующимся высокими температурами и отсутствием динамического барьера) и разрушается в пределах трех недель.

Ключевые слова: стратосферные полярные вихри, полярные стратосферные облака, граница полярного вихря, площадь полярного вихря, скорость ветра по границе вихря; stratospheric polar vortices, polar stratospheric clouds, polar vortex edge, polar vortex area, wind speed along the vortex edge.

При анализе аномальной динамики стратосферных полярных вихрей, особенно в случае их смещения относительно полюса или расщепления, актуальной остается проблема оконтуривания вихрей [1]. Существует несколько методов оконтуривания полярных вихрей. Граница полярного вихря может быть определена по максимальному градиенту потенциальной завихренности [2] или с использованием М-функции, характеризующей длину траекторий, которые проходят через узлы заданной сетки [3]. Потенциальная завихренность, будучи отношением абсолютного вихря к его эффективной глубине, хорошо описывает динамику вихря, но его границы характеризует с большой погрешностью. Преимущество М-функции по сравнению с градиентом потенциальной завихренности — ее неоднородность вдоль границы вихря, которая позволяет оценить региональные особенности массового обмена и определить область динамического барьера по границе вихря [3]. Оконтуривание полярного вихря с использованием М-функции дает возможность достаточно точно описать границу вихря, но не позволяет оценить его основные параметры, поскольку связать контур, полученный с помощью М-функции, с данными реанализа (поля зонального ветра, меридионального ветра, температуры и озона) не представляется возможным. В настоящей работе динамика полярных вихрей рассматривается с использованием метода оценки основ-

ных параметров вихря (скорости ветра по границе вихря, площади вихря, средней температуры и содержания озона внутри вихря) [1, 4] при оконтуривании его границ с помощью значений геопотенциала, определенных по максимальному градиенту температуры и максимальной скорости ветра по данным реанализа ERA5.

Геопотенциал Φ^* выражается уравнением [5]:

$$d\Phi^* = g dz, \quad (1)$$

где g — ускорение свободного падения; z — вертикальное расстояние от уровня моря. Поскольку при отсутствии атмосферных движений сила тяжести должна быть точно сбалансирована вертикальной составляющей силы градиента давления [5]:

$$dp/dz = -\rho g, \quad (2)$$

где p — давление; ρ — плотность, то

$$d\Phi^* = -\frac{RT}{p} dp = -RT d \ln p, \quad (3)$$

где R — универсальная газовая постоянная; T — температура.

Как видно из уравнения (3), геопотенциал зависит только от давления и температуры. Таким образом, геопотенциал достаточно точно описывает динамику полярного вихря, поскольку внутри последнего наблюдается существенное понижение температуры и давления, а за его пределами — повышение. Кроме того, геопотенциал не претерпевает значительных сезонных изменений в период существования вихря и, следовательно, хорошо подходит для определения его границ.

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

Для определения значений геопотенциала, наилучшим образом характеризующих границы арктического и антарктического полярных вихрей в нижней и средней стратосфере (на уровнях 50 и 10 гПа), использовались данные о скорости зонального и меридионального ветра, температуре воздуха и геопотенциале реанализа ERA5 (<https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6>) [6]. По границе полярного вихря наблюдается максимальный градиент температуры и, как правило, максимальные значения скорости ветра. На основе ежечасных данных с разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ для уровней 50 и 10 гПа за 1979–2020 гг. были получены значения температуры в точке максимального градиента по широте в диапазоне $40\text{--}90^\circ$ с.ш./ю.ш. для каждого значения долготы градусной сетки, геопотенциала в точках максимального градиента температуры, максимальной скорости ветра в диапазоне $40\text{--}90^\circ$ ю.ш. для каждого значения долготы градусной сетки. Скорость ветра определялась как векторная сумма зональной и меридиональной скоростей. В среднем за 1979–2020 гг. значения геопотенциала Φ^* в районе максимального градиента температуры по границе вихря на уровне 50 гПа составили $(19,50 \pm 0,15) \cdot 10^4$ над Арктикой и $(19,30 \pm 0,17) \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$ над Антарктикой, а на уровне 10 гПа – $(29,50 \pm 0,30) \cdot 10^4$ над Арктикой и $(29,30 \pm 0,33) \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$ над Антарктикой. Таким образом, основные параметры рассчитывались на основе данных реанализа ERA5 с опорой на то, что граница арктического полярного вихря на уровнях 50 и 10 гПа определяется значениями геопотенциала $19,5 \cdot 10^4$ и $29,5 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$, а граница антарктического полярного вихря – значениями геопотенциала $19,3 \cdot 10^4$ и $29,3 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$.

На рис. 1, а (цв. вкладка) показаны изменения средней температуры воздуха внутри арктического полярного вихря на уровне 50 гПа в зависимости от скорости ветра по границе вихря в зимний период (результат применения метода гистограмм к рядам данных, полученным по предложенному методу). В каждом из случаев на рис. 1, а выполнялось только одно из представленных в «шапке» условий. Видно, что во всех случаях, когда происходило локальное уменьшение скорости ветра по границе вихря ниже 20 м/с (на участке границы, занимающем более 1%), наблюдался значительный рост температуры, сопровождающийся полным разрушением частиц ПСО (объем ПСО $V_{\text{PSC}} = 0$). При этом распределение температуры внутри вихря при скорости ветра ≥ 20 м/с ($> 99\%$) во всех случаях ($[20\text{--}25) > 40\%$, $[25\text{--}30) > 40\%$, $[30\text{--}45) > 40\%$ и $[45\text{--}\infty) > 40\%$) находилось примерно в одном диапазоне и сопровождалось формированием ПСО в зимний период. Таким образом, показано, что полярный вихрь со скоростью ветра по границе не менее 20 м/с характеризуется наличием динамического барьера, препятствующего проникновению воздушных масс внутрь полярного вихря и способствующего сохранению низких температур внутри него [7].

В отличие от арктического полярного вихря, локальные уменьшения скорости ветра по границе антарктического вихря ниже 20 м/с крайне редки, в частности, в период с июня по октябрь они практически не наблюдаются (чаще встречаются в апреле и мае – на этапе формирования вихря). На рис. 1, б (цв. вкладка) приведены внутригодовые изменения площади антарктического полярного вихря на уровне 50 гПа в зависимости от скорости ветра по границе вихря (результат применения метода гистограмм к рядам данных, полученным по предложенному методу). Динамический барьер является одной из характеристик полярного вихря. Видно, что при уменьшении площади вихря до значений < 10 млн км^2 во всех случаях происходило значительное ослабление вихря, сопровождающееся локальным уменьшением скорости ветра по границе ниже 20 м/с, т.е. ослаблением динамического барьера и ростом температуры. Закономерность протекающих изменений позволяет сделать вывод о том, что площадь вихря более 10 млн км^2 – одна из динамических характеристик полярного вихря. Анализ динамики арктического и антарктического полярных вихрей показал, что при снижении площади до значений < 10 млн км^2 как в нижней, так и в средней стратосфере в зимне-весенний период во всех случаях происходило последующее необратимое разрушение вихря в пределах трех недель [1].

Другой динамической характеристикой полярного вихря является средняя скорость ветра по границе вихря. На рис. 2 приведены распределения значений средней скорости ветра по границе арктического и антарктического полярных вихрей на уровнях 50 и 10 гПа при площади полярного вихря ~ 10 млн км^2 (предшествующей его разрушению) в зимне-весенний период (на основе данных, полученных предложенным методом; при анализе антарктического вихря был исключен аномальный 2002 г. [8–10]). На этапе разрушения полярного вихря, когда оно уже необратимо, уменьшение площади вихря и средней скорости ветра по границе вихря становятся синхронными (в норме при небольшом уменьшении площади происходит небольшое увеличение средней скорости). Как видно из рис. 2, при снижении площади вихря до ~ 10 млн км^2 средняя скорость по границе вихря на уровне 50 гПа достигала в среднем $30,10 \pm 0,50$ м/с над Арктикой и $30,11 \pm 0,59$ м/с над Антарктикой, а на уровне 10 гПа – в среднем $45,08 \pm 0,69$ м/с над Арктикой и $45,08 \pm 0,62$ м/с над Антарктикой. Следовательно, среднюю скорость по границе вихря выше ~ 30 и 45 м/с в нижней и средней стратосфере соответственно можно считать еще одной динамической характеристикой полярного вихря.

Таким образом, в настоящей работе исследованы особенности ослабления полярных вихрей, предшествующие их разрушению. С использованием метода, основанного на оконтуривании полярных вихрей, получены их динамические характеристики: площадь вихря более 10 млн км^2 и средняя

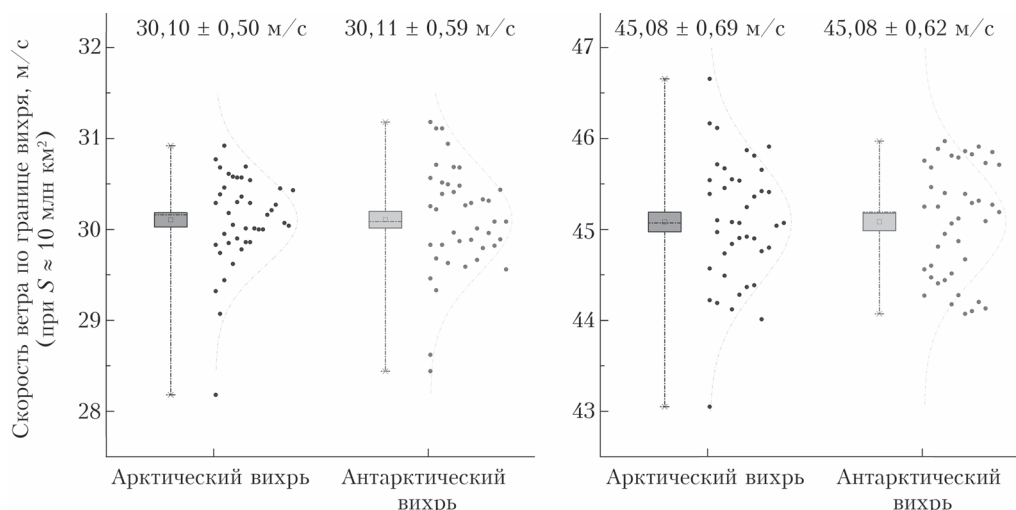


Рис. 2. Распределение значений средней скорости ветра по границе арктического и антарктического полярных вихрей на уровнях 50 (слева) и 10 гПа (справа) при площади полярного вихря ~ 10 млн км² (т.е. перед разрушением вихря) в зимне-весенний период за 1979–2019 гг. В верхней части рисунка указаны средние значения $\pm \sigma$

скорость ветра по границе вихря более 30 и 45 м/с в нижней и средней стратосфере соответственно, при этом динамический барьер полярного вихря в нижней стратосфере (способствующий сохранению низких температур и ПСО внутри вихря зимний период) наблюдается при значениях скорости ветра по границе вихря ≥ 20 м/с. При снижении площади вихря до 10 млн км² и последующем уменьшении средней скорости ветра по границе вихря до 30 и 45 м/с в нижней и средней стратосфере соответственно полярный вихрь становится небольшим циклоном (характеризующимся высокими температурами и отсутствием динамического барьера) и разрушается в пределах трех недель.

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № 121031300156-5.

1. Зув В.В., Савельева Е.С., Павлинский А.В. Анализ динамики арктического полярного вихря во время внезапного стратосферного потепления в январе 2009 г. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67, № 2. С. 134–146.
2. Lawrence Z.D., Manney G.L., Wargan K. Reanalysis intercomparisons of stratospheric polar processing diagnostics // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18, N 18. P. 13547–13579.
3. Smith M.L., McDonald A.J. A quantitative measure of polar vortex strength using the function M // J. Geophys. Res. 2014. V. 119, N 10. P. 5966–5985.

4. Зув В.В., Савельева Е.С., Павлинский А.В. Беспрецедентная озоновая аномалия в арктической стратосфере в зимне-весенний период 2020 г. // Докл. АН. Науки о Земле. 2020. Т. 495, № 2. С. 36–40.
5. Holton J. An Introduction to Dynamic Meteorology. California: Academic Press, 2004. 535 p.
6. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., 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., 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 // Quant. J. R. Meteorol. Soc. 2020. V. 146, N 729. P. 1–51.
7. Zuev V.V., Savelieva E. Arctic polar vortex dynamics during winter 2006/2007 // Polar Sci. 2020. V. 25. P. 100532.
8. Newman P.A., Nash E.R. The unusual Southern Hemisphere stratosphere winter of 2002 // J. Atmos. Sci. 2005. V. 62, N 3. P. 614–628.
9. Charlton A.J., O'Neill A., Lahoz W.A., Berrisford P. The splitting of the stratospheric polar vortex in the Southern Hemisphere, September 2002: Dynamical evolution // J. Atmos. Sci. 2005. V. 62, N 3. P. 590–602.
10. Stolarski R.S., McPeters R.D., Newman P.A. The ozone hole of 2002 as measured by TOMS // J. Atmos. Sci. 2005. V. 62, N 3. P. 716–720.

V.V. Zuev, E.S. Savelieva, A.V. Pavlinsky. Features of the stratospheric polar vortex weakening prior to breakdown.

We consider the features of the weakening of the stratospheric polar vortex that precede its breakdown. To analyze the abnormal dynamics of the polar vortices, we used the method of estimating the main parameters of the vortex by delineating its edges using the geopotential values determined from the maximum temperature gradient and maximum wind speed according to the ERA5 reanalysis data. As a result, we showed that the criteria for the abnormal weakening of the polar vortex preceding its breakdown is a decrease in the vortex area to less than 10 million km² and a subsequent decrease in the average wind speed along the vortex edge below 30 and 45 m/s in the lower and middle stratosphere, respectively. In this case, the polar vortex becomes a small cyclone (characterized by high temperatures and the absence of a dynamic barrier) and collapses within three weeks.

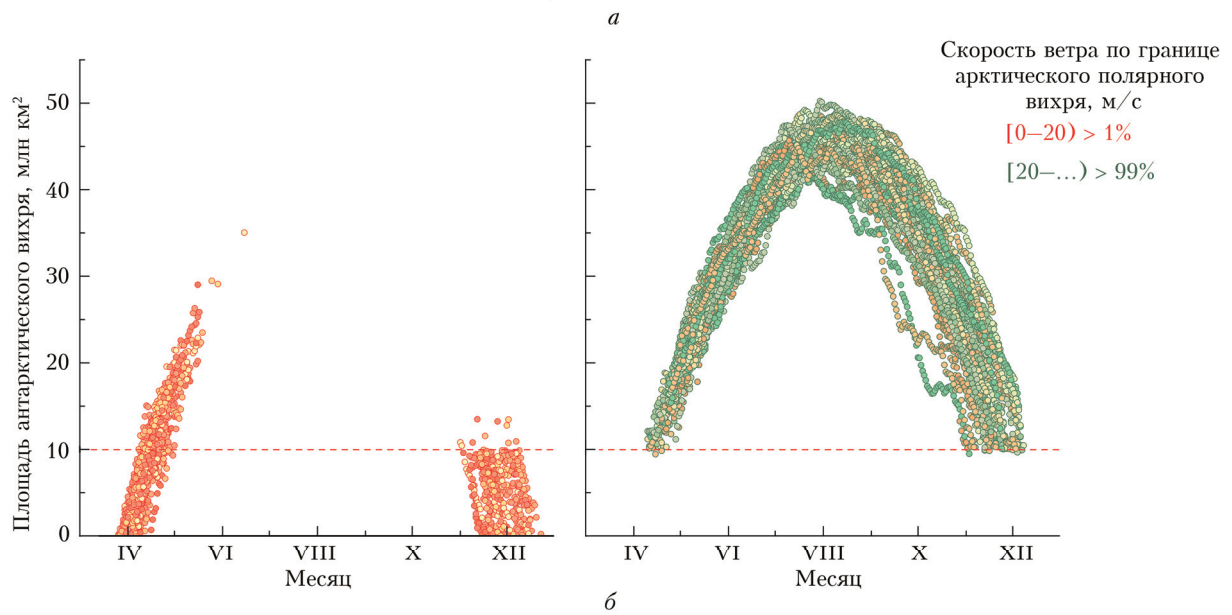
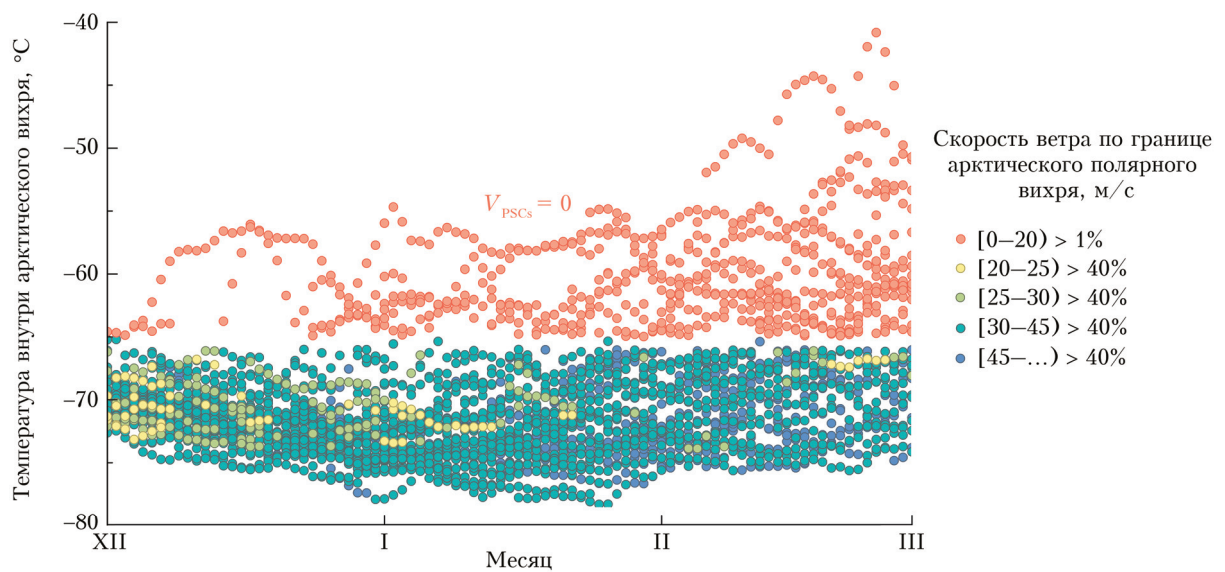


Рис. 1. Внутригодовые изменения: *a* – средней температуры воздуха внутри арктического полярного вихря на уровне 50 гПа в зависимости от скорости ветра по границе вихря с декабря по февраль за 1979–2019 гг.; *б* – площади антарктического полярного вихря на уровне 50 гПа в зависимости от скорости ветра по границе вихря с марта по декабрь за 1979–2019 гг.