

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 551.51

Динамика арктического полярного вихря по данным метода оконтуривания с помощью геопотенциала

В.В. Зуев[✉], Е.С. Савельева, Е.А. Сидоровский*

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

Поступила в редакцию 20.12.2022 г.;
после доработки 13.03.2023 г.;
принята к печати 15.03.2023 г.

Приводится сравнение основных характеристик арктического полярного вихря, полученных по данным GSFC NASA (средняя скорость зонального ветра на 60° с.ш., средняя температура в области 60–90° с.ш.) и методом оконтуривания вихрей с помощью геопотенциала (средняя скорость ветра по границе вихря, средняя температура внутри вихря), на примере трех крупнейших арктических озоновых аномалий и в среднем за 1979–2021 гг. Средняя скорость ветра по границе вихря согласно методу оконтуривания в среднем в два раза выше средней скорости зонального ветра на 60° с.ш. и составляет в январе $37,3 \pm 5,6$ и $58,9 \pm 13,1$ м/с на уровнях 50 и 10 гПа соответственно. Средняя температура внутри вихря, согласно методу оконтуривания, в целом на 5 °С ниже средней температуры в области 60–90° с.ш. в нижней стратосфере. Полученные количественные характеристики расширяют представление о динамике арктического полярного вихря в нижней стратосфере.

Ключевые слова: стратосферный полярный вихрь, метод оконтуривания, геопотенциал; stratospheric polar vortice, delineation method, geopotential.

Арктический и антарктический стратосферные полярные вихри характеризуются циклоническим вращением, распространяются от тропопаузы в мезосферу и существуют с осени по весну [1, 2]. Разрушение озона наблюдается в результате протекания цикла гетерогенных и фотохимических реакций внутри полярного вихря. Полярные вихри играют важную роль в движении воздушных масс и температурном режиме полярной стратосферы, определяют масштабы и интенсивность разрушения стратосферного озона над полярной областью с конца зимы по весну. Для исследования стратосферных полярных вихрей часто используются усредненные значения зонального ветра на 60 или 70° с.ш./ю.ш. и минимальные/средние значения температуры в области 50–90 или 60–90° с.ш./ю.ш. [3–6]. Однако такой подход не всегда позволяет точно оценить скорость ветра по границе вихря и среднюю температуру внутри вихря, особенно в случае арктического полярного вихря, характеризующегося значительной изменчивостью. Для более точной оценки рассматриваемых параметров при исследовании динамики вихря необходимо его оконтуривание. В работе проводится сравнение основных характеристик арктического полярного вихря, полученных по данным GSFC NASA и методом оконтуривания вихрей

с помощью геопотенциала, на примере трех крупнейших арктических озоновых аномалий и в среднем за 1979–2021 гг.

Среднесуточные данные о скорости зонального и меридионального ветра, геопотенциале, температуре воздуха и массовом отношении смеси озона в области 40–90° с.ш. с горизонтальным разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ на уровнях 50 и 10 гПа за рассматриваемый период получены по данным реанализа ERA5 [7]. В работе использовался метод оконтуривания вихрей с помощью геопотенциала, согласно которому в среднем за 1979–2021 гг. значение геопотенциала в районе максимального градиента температуры по границе арктического полярного вихря $\Phi^* = (19,50 \pm 0,15) \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$ на уровне 50 гПа и $\Phi^* = (29,50 \pm 0,30) \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$ на уровне 10 гПа [8–10]. Для сравнения использовались спутниковые данные Goddard Space Flight Center (GSFC) NASA о средней скорости зонального ветра на 60° с.ш., средней температуре и среднем массовом отношении смеси озона в области 60–90° с.ш. для уровней 50 и 10 гПа за период с 1979 по 2021 г. (<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/NH.html>), взятые из архива Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications 2 (MERRA-2), созданного Goddard Earth Observing System Data Assimilation System (GEOS DAS) [11].

На рис. 1 приведены внутригодовые изменения характеристик арктического полярного вихря по данным метода оконтуривания вихрей и по спутниковым

* Владимир Владимирович Зуев (vzuev@list.ru); Екатерина Сергеевна Савельева (esav.pv@gmail.com); Егор Александрович Сидоровский (egorsidorovski@yandex.ru).

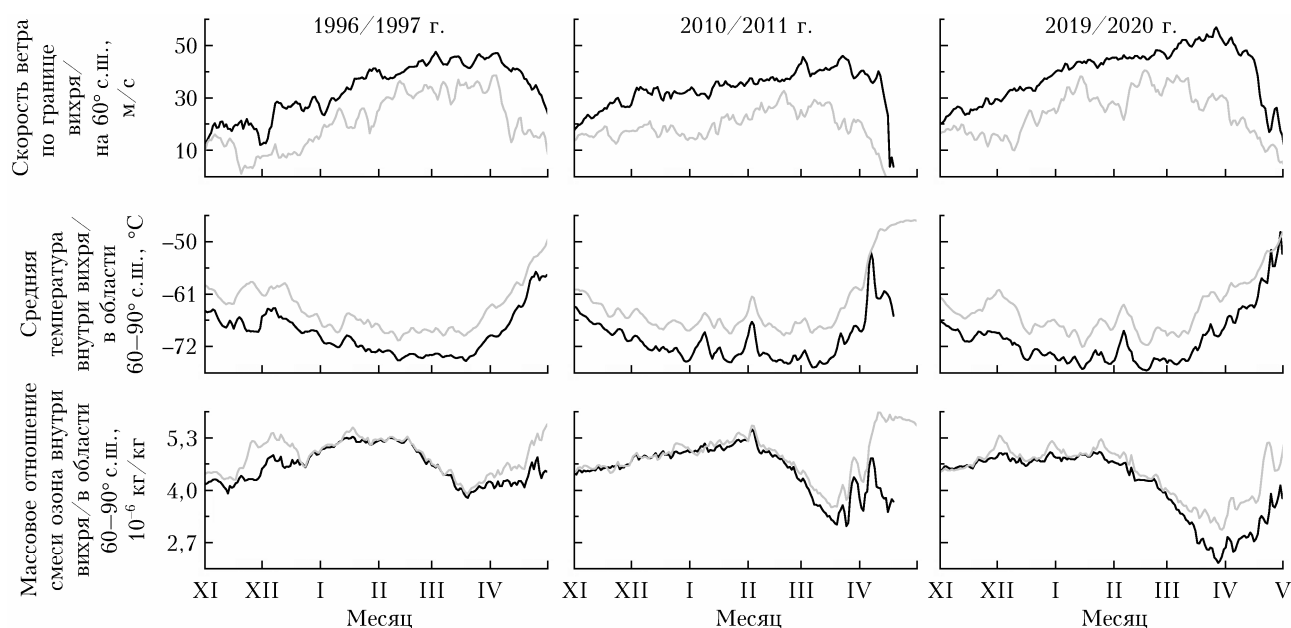


Рис. 1. Временной ход средней скорости ветра по границе вихря и на 60° с.ш., средней температуры и среднего массового отношения смеси озона внутри вихря и в области $60-90^\circ$ с.ш., полученных методом оконтуривания вихрей (черная кривая) и по спутниковым данным GSFC NASA (серая кривая) за 1996/1997, 2010/2011 и 2019/2020 г.

данным GSFC NASA для случаев наиболее сильных арктических полярных вихрей и, как следствие, крупнейших арктических озоновых аномалий в 1997, 2011 и 2020 гг. [12–15].

На рис. 2 приведены поля геопотенциала и скорости ветра в зимне-весенний период 1997, 2011 и 2020 гг. Границы полярного вихря, характеризующиеся значением геопотенциала $19,5 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$,

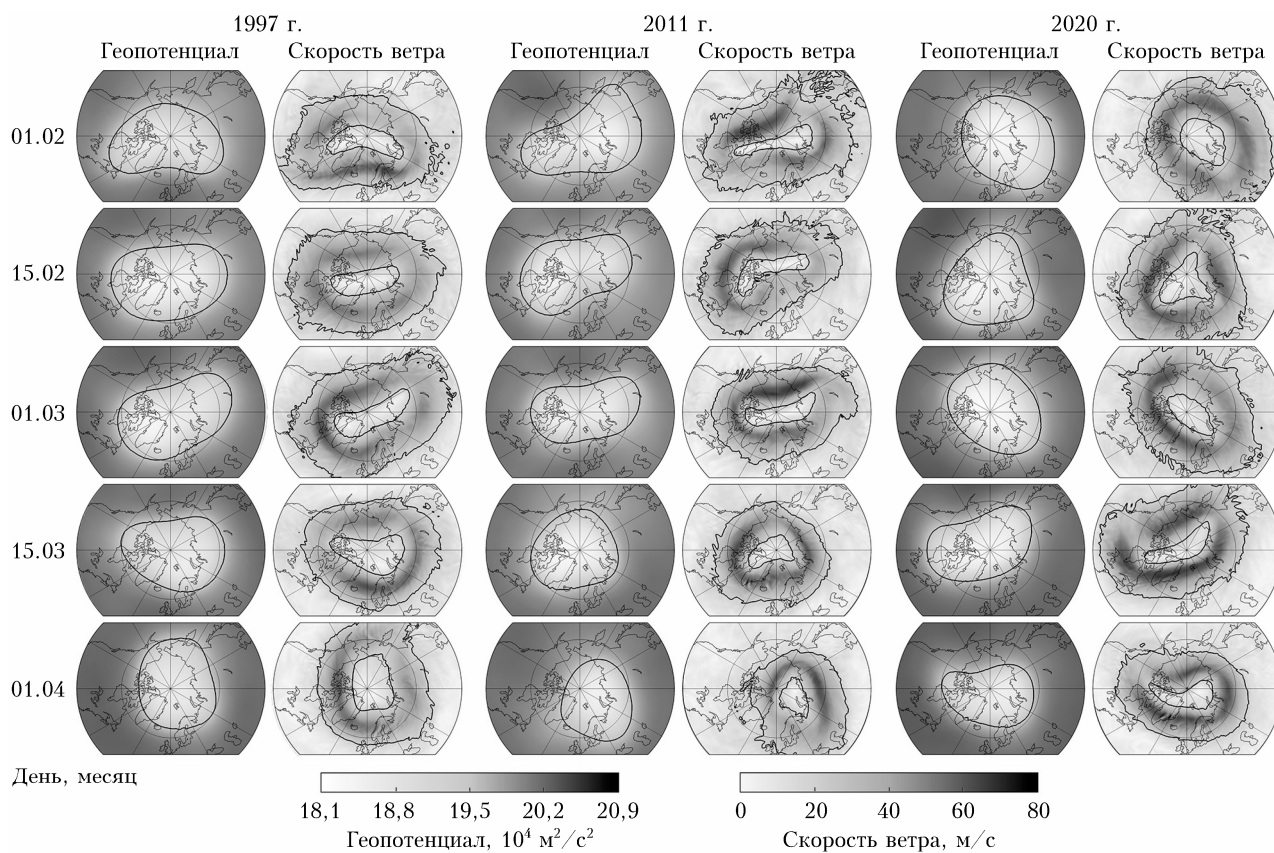


Рис. 2. Поля геопотенциала и скорости ветра на уровне 50 гПа над Арктикой в период с 1 февраля по 1 апреля 1997, 2011 и 2020 гг.

показаны на рис. 2 контуром. На полях скорости ветра контур соответствует значениям 20 м/с, при которых граница вихря становится динамическим барьером [10]. Как видно, значение геопотенциала $19,5 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$ достаточно точно описывает границы арктического полярного вихря в нижней стратосфере, поскольку соответствует максимальной скорости ветра.

Средняя скорость зонального ветра на 60° с.ш. в целом хорошо описывает динамику полярного вихря, но характеризуется более низкими значениями, чем средняя скорость ветра согласно методу оконтуривания (рис. 1), поскольку арктический полярный вихрь, как правило, имеет немного искаженную форму (рис. 2). Средняя температура в области $60\text{--}90^\circ$ с.ш. выше, чем средняя температура внутри вихря, полученная по методу оконтуривания, при очень схожих временных изменениях обеих характеристик (см. рис. 1). Временные изменения значений среднего массового отношения смеси озона в области $60\text{--}90^\circ$ с.ш. и внутри вихря достаточно схожи зимой.

В таблице приведены характеристики арктического полярного вихря в нижней и средней стратосфере по данным метода оконтуривания вихрей с помощью геопотенциала и по данным GSFC NASA, усредненные за период 1979–2021 гг., со среднеквадратичными отклонениями (СКО). Средняя скорость ветра по границе вихря согласно методу оконтуривания в среднем в два раза выше средней скорости зонального ветра на 60° с.ш. и составляет в январе $37,3 \pm 5,6$ и $58,9 \pm 13,1$ м/с на уровнях 50 и 10 гПа соответственно. Средняя температура внутри вихря согласно методу оконтуривания в среднем на 5°C ниже средней температуры в области $60\text{--}90^\circ$ с.ш. в нижней стратосфере.

Средняя скорость ветра и средняя температура $\pm$ СКО на уровнях 50 и 10 гПа по данным метода оконтуривания вихрей и GSFC NASA с 1979 по 2021 г.

Месяц	Средняя скорость ветра, м/с		Средняя температура, $^\circ\text{C}$	
	по границе вихря	по 60° с.ш.	внутри вихря	в области $60\text{--}90^\circ$ с.ш.
<i>50 гПа</i>				
Ноябрь	$24,0 \pm 2,9$	$15,8 \pm 3,3$	$-67,7 \pm 1,3$	$-63,0 \pm 1,7$
Декабрь	$33,0 \pm 3,5$	$20,3 \pm 5,7$	$-70,8 \pm 2,8$	$-65,9 \pm 3,0$
Январь	$37,3 \pm 5,6$	$21,3 \pm 8,1$	$-70,2 \pm 4,4$	$-64,9 \pm 4,7$
Февраль	$36,5 \pm 8,8$	$17,3 \pm 8,8$	$-66,4 \pm 5,3$	$-60,7 \pm 4,6$
Март	$31,4 \pm 9,9$	$13,4 \pm 7,1$	$-62,5 \pm 5,0$	$-57,0 \pm 4,2$
Ноябрь–март	$32,4 \pm 8,2$	$17,6 \pm 7,4$	$-67,5 \pm 5,0$	$-62,3 \pm 5,0$
<i>10 гПа</i>				
Ноябрь	$44,5 \pm 3,2$	$28,6 \pm 6,6$	$-69,4 \pm 1,3$	$-65,4 \pm 2,0$
Декабрь	$55,8 \pm 7,3$	$35,4 \pm 11,1$	$-68,9 \pm 4,0$	$-65,0 \pm 5,5$
Январь	$58,9 \pm 13,1$	$32,3 \pm 16,7$	$-61,0 \pm 6,7$	$-57,3 \pm 6,4$
Февраль	$51,6 \pm 14,8$	$22,2 \pm 13,9$	$-55,5 \pm 7,7$	$-52,8 \pm 7,0$
Март	$39,7 \pm 11,3$	$14,3 \pm 12,0$	$-51,7 \pm 8,4$	$-50,9 \pm 6,7$
Ноябрь–март	$50,1 \pm 12,9$	$26,6 \pm 14,5$	$-61,3 \pm 9,4$	$-58,3 \pm 8,4$

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

Список литературы

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., Sobel A.H., Polvani L.M. What is the polar vortex and how does it influence weather? // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2017. V. 98, N 1. P. 37–44.
3. Zhang X., Forbes J.M. Lunar tide in the thermosphere and weakening of the northern polar vortex // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 41, N 23. P. 8201–8207.
4. Matthias V., Dörnbrack A., Stober G. The extraordinarily strong and cold polar vortex in the early northern winter 2015/2016 // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43, N 23. P. 12287–12294.
5. Akiyoshi H., Zhou L.B., Yamashita Y., Sakamoto K., Yoshiki M., Nagashima T., Takahashi M., Kurokawa J., Takigawa M., Imamura T. A CCM simulation of the breakup of the Antarctic polar vortex in the years 1980–2004 under the CCMVal scenarios // J. Geophys. Res. 2009. V. 114, N 3. P. D03103.
6. Zuev V.V., Savelieva E. The cause of the spring strengthening of the Antarctic polar vortex // Dynam. Atmos. Oceans. 2019. V. 87. P. 101097.
7. 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., Biais 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. Roy. Meteor. Soc. 2020. V. 146, N 729. P. 1–51. DOI: 10.24381/cds.bd0915c6.
8. 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.
9. Zuev V.V., Savelieva E. Antarctic polar vortex dynamics during spring 2002 // J. Earth Syst. Sci. 2022. V. 131, N 2. P. 119.
10. Zuev V.V., Savelieva E. Antarctic polar vortex dynamics depending on wind speed along the vortex edge // Pure Appl. Geophys. 2022. V. 179, N 6–7. P. 2609–2616.
11. Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A.M., Gu W., Kim G.-K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J.E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S.D., Sienkiewicz M., Zhao B. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // J. Clim. 2017. V. 30, N 14. P. 5419–5454.
12. Newman P.A., Gleason J.F., McPeters R.D., Stolarski R.S. Anomalous low ozone over the Arctic // Geophys. Res. Lett. 1997. V. 24, N 22. P. 2689–2692.
13. Kuttippurath J., Godin-Beekmann S., Lefevre F., Nikulin G., Santee M.L., Froidevaux L. Record-breaking ozone loss in the Arctic winter 2010/2011: Comparison with 1996/1997 // Atmos. Chem. Phys. 2012. V. 12, N 15. P. 7073–7085.

14. *Manney G.L., Santee M.L., Rex M., Livesey N.J., Pitts M.C., Veeckind P., Nash E.R., Wohltmann I., Lehmann R., Froidevaux L., Poole L.R., Schoeberl M.R., Haffner D.P., Davies J., Dorokhov V., Gernandt H., Johnson B., Kivi R., Kyro E., Larsen N., Levelt P.F., Makshtas A., McElroy C.T., Nakajima H., Parrondo M.C., Tarasick D.W., von der Gathen P., Walker K.A., Zinoviev N.S.* Unprecedented Arctic ozone loss in 2011 // *Nature*. 2011. V. 478, N 7370. P. 469–475.
15. *Rao J., Garfinkel C.I.* The strong stratospheric polar vortex in March 2020 in sub-seasonal to seasonal models: Implications for empirical prediction of the low Arctic total ozone extreme // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 126, N 9. P. e2020JD034190.

V.V. Zuev, E.S. Savelieva, E.A. Sidorovski. Arctic polar vortex dynamics according to the delineation method using geopotential.

We compare the main characteristics of the Arctic polar vortex obtained from the NASA GSFC data (zonal mean wind at 60° N, mean temperature in the region 60–90° N) and by the vortex delineation method using geopotential (mean wind speed along the vortex edge, mean temperature inside the vortex) on the example of three largest Arctic ozone depletion events and on average over 1979–2021. The mean wind speed along the vortex edge according to the delineation method is on average two times higher than the zonal mean wind at 60° N and is 37.3 ± 5.6 and 58.9 ± 13.1 m/s in January at the 50 and 10 hPa levels, respectively. The mean temperature inside the vortex according to the delineation method is on average 5 °C lower than the mean temperature in the region 60–90° N in the lower stratosphere. The quantitative characteristics obtained expand the understanding of the Arctic polar vortex dynamics in the lower stratosphere.