

Динамика стратосферного полярного вихря в 2022/23 г. по методам оконтуривания с помощью геопотенциала и потенциальной завихренности

В.В. Зуев, Е.А. Сидоровский[✉], А.В. Павлинский*

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

Поступила в редакцию 11.06.2024;
после доработки 17.07.2024;
принята к печати 16.08.2024

В работе сравниваются основные характеристики стратосферного полярного вихря (площадь, средняя скорость ветра на границе, средняя температура внутри вихря) за 2022/23 г., которые получены методами оконтуривания с помощью потенциальной завихренности (ПЗ) и геопотенциала. Оба метода используют данные реанализа ERA5. Сравнение оценок в среднем проводилось с ноября по март в Арктике и с мая по сентябрь в Антарктике на изобарических поверхностях на уровнях 475, 530 и 600 К. Площадь арктического вихря по геопотенциалу в среднем в 1,30 раза больше площади, полученной с помощью ПЗ, а антарктического — в 1,14 раз. Средние скорости ветра по двум методам очень близки: в Арктике ее значения по ПЗ в среднем на 5% больше, чем по геопотенциалу, а в Антарктике — на 3%. Средняя температура внутри вихря по ПЗ в среднем на 1% ниже, чем по геопотенциалу, и в Арктике, и в Антарктике. Наибольшее различие оценок площадей в Арктике достигло 25,52 млн км² 23.11.2022 г. на поверхности 600 К, а в Антарктике — 23,78 млн км² 14.12.2022 г. на поверхности 475 К. При этом в среднем различие оценок растет с высотой: с 4,23 млн км² на 475 К до 10,24 млн км² на 600 К в Арктике, с 4,91 млн км² на 475 К до 6,17 млн км² на 600 К в Антарктике. Значимая разница площадей говорит о необходимости тщательного выбора метода оконтуривания при исследовании полярных вихрей.

Ключевые слова: стратосферный полярный вихрь, метод оконтуривания, геопотенциал, полярная завихренность; stratospheric polar vortex, vortex delineation method, geopotential, potential vorticity.

Введение

Арктический и антарктический стратосферные полярные вихри имеют циклоническое вращение, распространяются от тропопаузы в мезосферу и существуют с осени по весну [1, 2]. При усилении полярных вихрей возможно увеличение стратосфернотропосферного обмена [3–5]. При исследовании динамики стратосферного полярного вихря используют различные методы оконтуривания. Наиболее распространенные основаны на значениях потенциальной завихренности (ПЗ) [6–10]. Наряду с ними применяют метод, в основе которого лежат значения геопотенциала [11–15]. В работе [14] показано, что метод оконтуривания с помощью геопотенциала лучше описывает границы вихря. Важными характеристиками полярных вихрей являются средняя температура внутри вихря, средняя скорость ветра по границе вихря, площадь вихря.

Цель настоящей работы — сравнить оценки характеристик полярных вихрей, полученных этими двумя методами, в 2022/23 г.

Материалы и методы

В работе используются данные реанализа ERA5 [16] с разрешением $0,5 \times 0,5^\circ$ на изобарических поверхностях на уровнях 475, 530 и 600 К. Характеристики вихря рассчитывались по зональной и меридиональной скоростям ветра, давлению и потенциальной завихренности. Для сопоставления характеристик использовался геопотенциал на изобарических поверхностях на уровнях 10–100 гПа.

На границе полярного вихря скорость ветра, как правило, максимальная. За период 1991–2021 гг. за каждый день с 01.04 по 31.10 для каждой долготы градусной сетки были получены значения ПЗ в узлах с наибольшей скоростью ветра в диапазоне 30–90° ю.ш. Усредняя значения ПЗ по всем долготам и дням, получаем оценку граничного значения ПЗ антарктического полярного вихря. Исходя из общего характера динамики вихря в Арктике и Антарктике, граничное значение ПЗ

* Владимир Владимирович Зуев (vzuev@list.ru), Егор Александрович Сидоровский (egorsidorovski@yandex.ru), Алексей Валерьевич Павлинский (wf@inbox.ru).

арктического вихря берется таким же по абсолютной величине. В результате на поверхности 475 К граничное значение ПЗ равно 31,2 PVU (potential vorticity unit) (среднеквадратичное отклонение $\sigma = 3,4$), на поверхности 530 К — 55 PVU ($\sigma = 5$), на поверхности 600 К — 101,8 PVU ($\sigma = 9,1$), где $1 \text{ PVU} = 10^{-6} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{кг}^{-1}$. По вычисленным граничным значениям проведено оконтуривание.

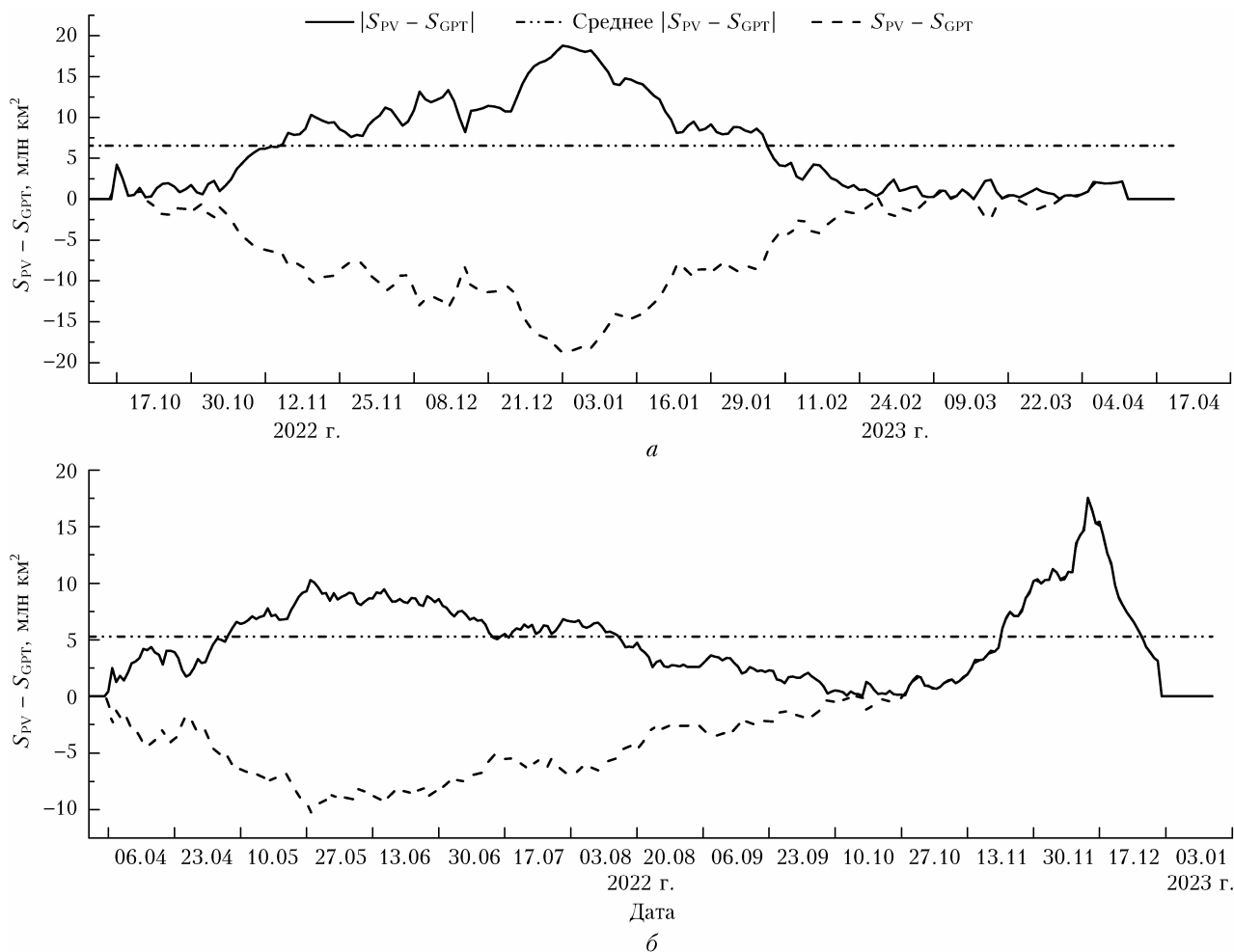
Оценки, полученные с помощью ПЗ, сравнивались с оценками по методу оконтуривания с помощью геопотенциала на изоэнтропических поверхностях. Для этого был разработан алгоритм проецирования границ вихря с изобарических поверхностей. Предварительно были получены оценки геопотенциальной высоты в узлах сетки на изоэнтропической поверхности. Вычисление геопотенциальной высоты в каждой точке изоэнтропической поверхности выполняется с помощью линейной интерполяции с изобарических поверхностей. Атмосферное давление в этой точке сравнивается с давлением в этой же точке на изобарических поверхностях. Выбираются выше- и нижележащие ближайшие по давлению поверхности и рассчитываются линейные коэффициенты (пропорционально разнице давлений), с помощью которых на изоэнтропическую поверхность интерполируется значение геопотенциала

с изобарических поверхностей. В результате были получены поля геопотенциальной высоты на изоэнтропических поверхностях. На изобарических поверхностях вихрь был оконтурен с помощью геопотенциала [12–14]. Далее границы вихря с изобарических поверхностей были спроецированы на изоэнтропические. В итоге были получены оценки границы вихря по геопотенциалу на рассматриваемых изоэнтропических поверхностях.

Результаты и обсуждение

На рисунке приведена внутригодовая разность оценок площади вихря по ПЗ (S_{PV}) и по геопотенциалу (S_{GPT}), ее модуль и среднее модуля на уровне 530 К в Арктике и аналогично в Антарктике. Видно, что зимой площадь, вычисленная по геопотенциалу, больше, чем по ПЗ. Однако весной, когда вихрь слабеет и разрушается, площадь по ПЗ больше — это особенно хорошо видно для Антарктики.

В табл. 1 указаны максимум и среднее модуля разности на разных уровнях. Наибольшее различие оценок площадей в Арктике достигло 25,52 млн км² 23.11.2022 г. на поверхности 600 К, а в Антарктике — 23,78 млн км² 14.12.2022 г. на поверхности 475 К.



Разности оценок площади вихря по ПЗ и геопотенциалу на поверхности 530 К в Арктике (а) и Антарктике (б)

Таблица 1

**Параметры модуля разности площадей
вихря по ПЗ и геопотенциалу на разных уровнях**

Уровень, К	Максимум, млн км ²	Среднее, млн км ²
<i>Арктика</i>		
475	12,98	4,23
530	18,79	6,53
600	25,52	10,24
<i>Антарктика</i>		
475	23,78	4,91
530	17,54	5,28
600	12,68	6,17

При этом в среднем различие оценок растет с высотой: с 4,23 млн км² на 475 К до 10,24 млн км² на 600 К в Арктике; с 4,91 млн км² на 475 К до 6,17 млн км² на 600 К в Антарктике.

В табл. 2 приведены средние характеристики полярных вихрей, полученные с помощью двух методов оконтуривания, на уровне 530 К. По данным таблицы можно видеть, что в среднем за рассматриваемый период скорости ветра на границе и температура внутри вихря по двум методам различаются незначительно. Однако оценки площади вихря сильно различаются. По всем уровням за период, указанный в таблице, площадь арктического вихря по геопотенциалу в среднем в 1,3 раза больше, чем по ПЗ, а антарктического – в 1,14 раз. Методы дали близкие значения средней скорости ветра на границе вихря – в Арктике ее значения по ПЗ в среднем на 5% больше, чем по геопотенциалу, а в Антарктике – на 3%. Похожая ситуация со средней температурой внутри вихря: по ПЗ температура в среднем на 1% ниже, чем по геопотенциалу, и в Арктике, и в Антарктике.

Таблица 2

**Средние значения параметров, рассчитанные на уровне
530 К методами оконтуривания с помощью ПЗ
и геопотенциала**

Месяц	Параметр					
	S, млн км ²		V, м/с		T, °C	
	PV	GPT	PV	GPT	PV	GPT
<i>Арктика</i>						
XI	17,72	24,08	25,66	27,19	-71,06	-70,58
XII	24,05	35,89	34,37	31,27	-76,63	-74,73
I	28,23	41,67	43,45	38,19	-77,38	-74,56
II	23,32	27,47	38,71	37,42	-63,40	-62,49
III	8,58	9,10	22,73	24,19	-55,41	-54,52
XI–III	20,34	27,67	32,92	31,57	-68,87	-67,45
<i>Антарктика</i>						
V	25,59	32,59	39,97	38,96	-78,39	-77,15
VI	36,20	44,85	49,92	49,09	-84,02	-82,62
VII	43,79	50,10	64,84	63,57	-85,66	-84,61
VIII	45,91	50,74	70,66	68,41	-84,09	-83,30
IX	42,19	44,69	72,48	70,92	-77,93	-77,48
V–IX	38,73	44,59	59,55	58,17	-82,03	-81,04

Примечание. S – площадь вихря; V – средняя скорость ветра на границе вихря; T – средняя температура внутри вихря.

Заключение

Оба метода показывают схожие значения средней скорости ветра на границе вихря и средней температуры внутри вихря, но имеют значительные отличия по площади. Это связано с тем, что пограничный слой между телом вихря и внешней средой имеет большую ширину. В то время как граница по геопотенциалу лежит ближе к внешнему краю слоя, контур по ПЗ получается ближе к телу вихря. Оценки площади вихря более корректные при оконтуривании с помощью геопотенциала, чем при оконтуривании с помощью потенциальной завихренности, что согласуется с результатами работы [14].

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. DOI: 10.1175/1520-0469(1999)056<1594:COAAP>2.0.CO;2.
2. 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. DOI: 10.1175/BAMS-D-15-00212.1.
3. Holton J.R., Haynes P.H., McIntyre M.E., Douglass A.R., Rood R.B., Pfister L. Stratosphere-troposphere exchange // Rev. Geophys. 1995. V. 33, N 4. P. 403–439. DOI: 10.1029/95RG02097.
4. Hsu J., Prather M.J. Is the residual vertical velocity a good proxy for stratosphere-troposphere exchange of ozone? // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 41, N 24. P. 9024–9032. DOI: 10.1002/2014GL061994.
5. Gray L.J., Brown M.J., Knight J., M. Andrews Lu H., O'Reilly C., Anstey J. Forecasting extreme stratospheric polar vortex events // Nat. Commun. 2020. V. 11, N 1. P. 4630. DOI: 10.1038/s41467-020-18299-7.
6. Lu Y., Tian W., Zhang J., Huang J., Zhang R., Wang T., Xu M. The impact of the stratospheric polar vortex shift on the Arctic Oscillation // J. Climate. 2021. V. 34, N 10. P. 4129–4143. DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0536.1.
7. Nash E.R., Newman P.A., Rosenfeld J.E., Schoeberl M.R. An objective determination of the polar vortex using Ertel's potential vorticity // J. Geophys. Res.: Atmos. 1996. V. 101, N D5. P. 9471–9478. DOI: 10.1029/96JD00066.
8. Zhang Y., Li J., Zhou L. The relationship between polar vortex and ozone depletion in the Antarctic stratosphere during the period 1979–2016 // Adv. Meteorol. 2017. V. 2017. DOI: 10.1155/2017/3078079.
9. 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. DOI: 10.5194/acp-18-13547-2018.
10. Lecouffe A., Godin-Beekmann S., Pazmiño 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. DOI: 10.5194/acp-22-4187-2022.
11. Holton J.R., Hakim G.J. An introduction to dynamic meteorology. 5th Edition. Cambridge: Academic press, 2013. 552 p. DOI: 10.1016/C2009-0-63394-8.
12. Zuev V.V., Savelieva E.S. Antarctic polar vortex dynamics depending on wind speed along the vortex edge //

- Pure Appl. Geophys. 2022. V. 179, N 6–7. P. 2609–2616. DOI: 10.1007/s00024-022-03054-4.
13. Зуев В.В., Савельева Е.С., Павлинский А.В. Особенности ослабления стратосферного полярного вихря, предшествующие его разрушению // Оптика атмосф. и океана. 2022. Т. 35, № 1. С. 81–83. DOI: 10.15372/AOO20220112; Zuev V.V., Savelieva E.S., Pavlinsky A.V. Features of stratospheric polar vortex weakening prior to breakdown // Atmos. Ocean. Opt. 2022. V. 35, N 2. P. 183–186.
 14. Zuev V.V., Savelieva E.S. Stratospheric polar vortex dynamics according to the vortex delineation method // J. Earth Syst. Sci. 2023. V. 132, N 1. P. 39. DOI: 10.1117/12.2688279.
 15. Lee S.H., Butler A.H. The 2018–2019 Arctic stratospheric polar vortex // Weather. 2020. V. 75, N 2. P. 52–57. DOI: 10.1002/wea.3643.
 16. 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., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Vil-laume S., Thépaut J.-N. The ERA5 global reanalysis // Q. J. Roy. Meteor. Soc. 2020. V. 146, N 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.

V.V. Zuev, E.A. Sidorovski, A.V. Pavlinsky. Dynamics of the stratospheric polar vortex in 2022/2023 by vortex delineation methods using geopotential and potential vorticity.

Two methods of delineation of the stratospheric polar vortex were compared by the main characteristics of the vortex they provide – vortex area, average wind speed at the edge, mean temperature inside the vortex. Both methods use the ERA5 reanalysis data for isobaric and isentropic surfaces, one of them is based on the geopotential and another one – on the potential vorticity (PV). Geopotential method gives higher vortex area than the PV method: 1.3 times higher for Arctic and 1.14 for Antarctic. The estimates of the average wind speed at the edge are very similar: the wind speed by PV method is 5% higher than by geopotential for the Arctic, and 3% higher in the Antarctic. Mean temperature inside the vortex by PV method is 1% lower in both the Arctic and Antarctic. The largest difference in the estimates of vortex area in the Arctic was 25.52 million km², which was reached on November 23, 2022 at the 600 K isentropic surface; and in the Antarctic it reached a value of 23.78 million km² on December 14.2. The significant difference in area demonstrates the need for careful selection of the delineation method when studying polar vortices. The significant difference in area demonstrates the need for careful selection of the delineation method when studying polar vortices.022 at the 475 K surface. The differences of vortex area are increasing with height: from 4.23 million km² at the 475 K surface to 10.24 million km² at the 600 K surface in the Arctic, from 4.91 million km² at the 475 K surface to 6.17 million km² at the 600 K surface in the Antarctic. The significant difference in areas demonstrates the necessity for careful selection of the delineation method when studying polar vortices.