

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ
ATMOSPHERE AND HYDROSPHERE PHYSICS<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-133-141>

УДК 551.51



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

**Взаимосвязь между площадью и скоростью ветра
по границе антарктического полярного вихря**

В.В. Зуев, Е.С. Савельева*

*Институт мониторинга климатических и экологических систем
Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия***esav.pv@gmail.com***Резюме**

Одним из условий формирования полярной озоновой аномалии является наличие динамического барьера по границе полярного вихря в зимне-весенний период, существующего при скорости ветра по границе вихря в нижней стратосфере не менее 20 м/с и площади вихря более 10 млн км². Целью данной работы является исследование взаимосвязи между площадью вихря и скоростью ветра по границе вихря на примере антарктического полярного вихря. В работе использовался метод оконтуривания вихрей на основе значений геопотенциала, определенных по максимальным значениям градиента температуры и скорости ветра. Показано, что взаимосвязь между площадью вихря и скоростью ветра по границе вихря прослеживается при значениях площади менее 25 млн км² (положительная корреляция) и более 50 млн км² (отрицательная корреляция).

Ключевые слова: граница вихря, оконтуривание вихрей, площадь вихря, полярные вихри, скорость ветра.

Для цитирования: Зуев В.В., Савельева Е.С. Взаимосвязь между площадью и скоростью ветра по границе антарктического полярного вихря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 2. С. 133–141. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-133-141>.

Поступила 29.04.2022

После переработки 31.05.2022

Принята 13.06.2022

**Relationship between area and wind speed along the edge
of the Antarctic polar vortex**

Vladimir V. Zuev, Ekaterina S. Savelieva*

*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia***esav.pv@gmail.com***Summary**

The Antarctic polar vortex forms in autumn, intensifies in the winter-spring period and decays in late spring. Inside the vortex in the lower stratosphere, favorable conditions are created for the annual spring ozone depletion.

One of the conditions for the formation of the Antarctic ozone hole is the presence of a dynamic barrier along the vortex edge in the winter-spring period, which contributes to a decrease in temperature inside the vortex (necessary for the existence of polar stratospheric clouds) and prevents the penetration of air masses into the vortex. The dynamic barrier exists when the wind speed along the vortex edge in the lower stratosphere is at least 20 m/s. When the vortex area decreases below 10 million km², the dynamic barrier usually weakens, preceded by the vortex breakdown. The purpose of this work is to consider the relationship between the vortex area and the wind speed along the vortex edge using the Antarctic polar vortex as an example. To analyze the dynamics of the Antarctic polar vortex, we used a method based on vortex delineation, which makes it possible to calculate the vortex area and wind speed along the vortex edge using geopotential values determined from the maximum values of temperature gradient and wind speed and, thus, characterizing the polar vortex edges. Seasonal variations in the vortex area are mainly determined by the time of the beginning, peak and end of the polar night. In turn, seasonal changes in wind speed along the edge of the Antarctic vortex are additionally determined by the influence of the temperature of the lower subtropical stratosphere. To eliminate the influence of the seasonal variation, polynomial trends were removed from the time series of the parameters considered. We have shown that the relationship between the vortex area and the wind speed along the vortex edge can be traced for area values of less than 25 million km² and more than 50 million km². At small values of the vortex area (< 25 million km²), during its formation and destruction, a positive correlation appears between the vortex area and the wind speed along the vortex edge. At high values of the vortex area (> 50 million km²), a negative correlation can be traced between the parameters studied.

Keywords: polar vortices, vortex area, vortex delineation, vortex edge, wind speed.

For Citation: Zuev V.V., Saveliyeva E.S. Relationship between area and wind speed along the edge of the Antarctic polar vortex. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (2): 133–141. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-133-141>.

Received 29.04.2022

Revised 31.05.2022

Accepted 13.06.2022

ВВЕДЕНИЕ

Стратосферные полярные вихри представляют собой крупномасштабные циклоны, распространяющиеся от тропопаузы в мезосферу и существующие с осени по весну [1–3]. Структура и динамика полярных вихрей играет важную роль в распределении стратосферного озона, движении воздушных масс у вихря и температурном режиме над полярной областью [4]. Границы полярного вихря представляют собой динамический барьер, препятствующий меридиональному переносу стратосферного озона из тропических и средних широт в полярную область [5, 6]. При этом внутри полярного вихря при экстремально низких температурах (< –78 °C) формируются полярные стратосферные облака (ПСО), на поверхности и в объеме которых протекают гетерогенные реакции с высвобождением молекулярного хлора. При появлении солнечного излучения над полярным регионом молекулярный хлор фотодиссоциирует с образованием радикалов хлора, вступающих в каталитический цикл разрушения озона [7–11]. Более раннее разрушение полярного вихря происходит в результате проникновения в стратосферу вертикально распространяющихся планетарных волн Россби и сопровождается возникновением внезапных стратосферных потеплений (ВСП) [12–14]. ВСП разделяются на большие и малые. Согласно определению Всемирной метеорологической организации, ВСП можно считать большим, если на высотах от уровня 10 гПа и ниже среднеширотная температура резко возрастает по направлению от 60° широт к полюсу при наблюдаемой смене направления зонального потока в течение нескольких дней/часов [15]. Если при выраженном росте стратосферных температур направление зональных ветров с западного на восточное не меняется, ВСП считается малым. При малых ВСП происходит сильное смещение полярного вихря, а при больших — его расщепление на два небольших вихря [16–18].

Полярный вихрь, со скоростью ветра по границе не менее 20 м/с в нижней стратосфере, характеризуется наличием динамического барьера [19]. При локальном уменьшении скорости ветра по границе вихря ниже 20 м/с в нижней стратосфере наблюдается повышение температуры внутри вихря и, как правило, полное разрушение частиц ПСО [19, 20]. Происходит изменение газового и аэрозольного состава атмосферы внутри вихря вплоть до ее первоначального состояния, когда полярный вихрь только сформировался и еще не содержит продуктов протекания гетерогенных реакций в достаточном количестве для масштабного разрушения озона с появлением солнечного излучения в конце зимы. В отличие от арктического полярного вихря, локальные понижения скорости ветра по границе антарктического вихря ниже 20 м/с крайне редки, в частности в период с июня по октябрь практически не наблюдаются (чаще встречаются в апреле и мае — на этапе формирования вихря и поздней весной). При уменьшении площади полярного вихря ниже 10 млн км² динамический барьер, как правило, ослабляется, предвзя разрушение вихря [21]. Целью данной работы является рассмотрение взаимосвязи между площадью вихря и скоростью ветра по границе вихря на примере антарктического полярного вихря.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для анализа динамики антарктического полярного вихря использовался метод оценки основных параметров вихря (площади вихря и скорости ветра по границе вихря) при оконтуривании его границ [22]. Геопотенциал зависит только от давления и температуры [23] и, таким образом, достаточно точно описывает динамику полярного вихря, поскольку внутри последнего наблюдаются низкие значения температуры и давления, а за его пределами — высокие. Кроме того, геопотенциал не претерпевает значительных сезонных изменений в период существования вихря и, соответственно, хорошо подходит для определения границ полярного вихря. Для определения значений геопотенциала, характеризующих границы антарктического полярного вихря 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>) [24]. По границе полярного вихря наблюдаются максимальный градиент температуры и, как правило, максимальные значения скорости ветра. На основе ежечасных данных с разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$ для уровней 50 и 10 гПа за 1979–2020 гг. были получены следующие значения: температура в точке максимального градиента по широте в диапазоне $40\text{--}90^\circ$ ю. ш., значение геопотенциала в точках максимального градиента температуры, максимальная скорость ветра по широте в диапазоне $40\text{--}90^\circ$ ю. ш. Скорость ветра определялась как векторная сумма зональной и меридиональной скорости. В среднем за 1979–2020 гг. значение геопотенциала Φ^* в районе максимального градиента температуры по границе вихря составило $\Phi^* = (19,30 \pm 0,17) \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$ на уровне 50 гПа и $\Phi^* = (29,30 \pm 0,33) \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$ на уровне 10 гПа. Таким образом, исследуемые параметры (площадь вихря и скорость ветра у границы вихря) рассчитывались по данным реанализа ERA5, основываясь на том, что граница антарктического полярного вихря на уровнях 50 и 10 гПа определяется значениями геопотенциала соответственно $19,3 \cdot 10^4$ и $29,3 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$.

РЕЗУЛЬТАТЫ, ИХ АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведена плотность диаграмм рассеяния площади антарктического полярного вихря и средней скорости ветра по границе вихря в нижней и средней

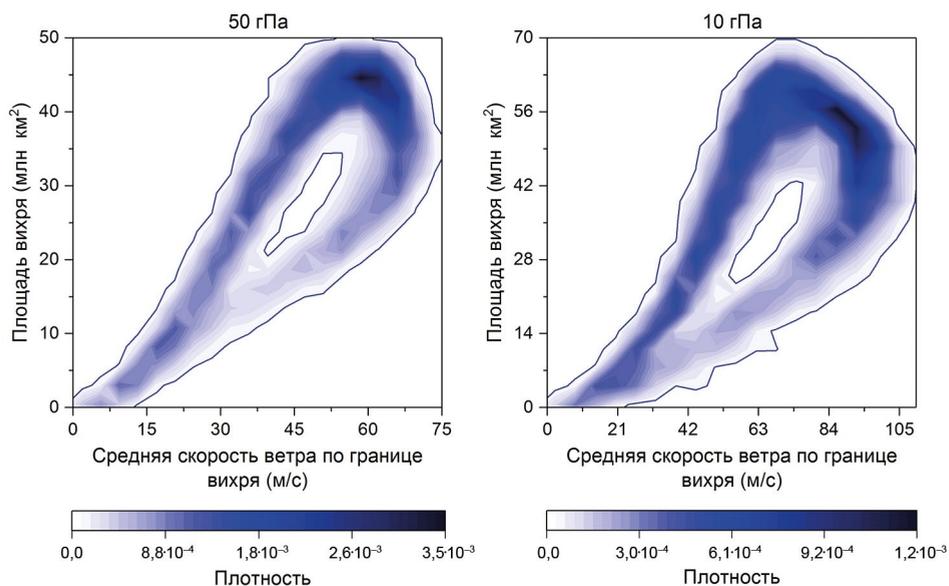


Рис. 1. Графики плотности диаграмм рассеяния среднесуточных значений площади вихря и средней скорости ветра по границе вихря на уровнях 50 и 10 гПа для антарктического полярного вихря за период с 1979 по 2019 г.

Fig. 1. Density plots of scatterplots of the daily mean values of vortex area and mean wind speed along the vortex edge at the 50 and 10 hPa pressure levels for the Antarctic polar vortex from 1979 to 2019

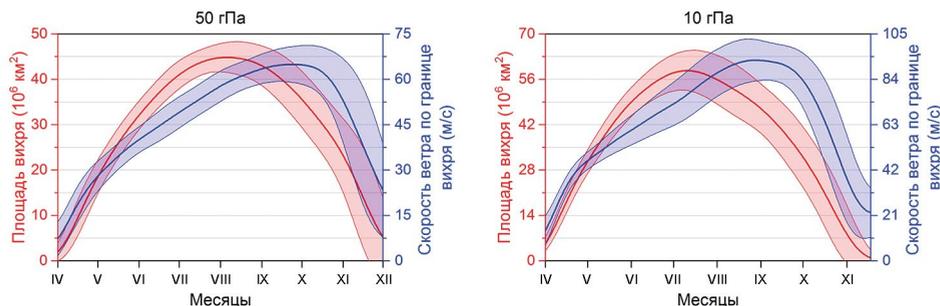


Рис. 2. Внутригодовой ход площади антарктического полярного вихря и средней скорости ветра у границы вихря на уровнях 50 и 10 гПа с апреля по ноябрь в среднем за 1979–2019 гг. с 1,5 СКО

Fig. 2. Seasonal variations of vortex area and mean wind speed along the edge of the Antarctic polar vortex at the 50 and 10 hPa pressure levels from April to November on average over 1979–2019 with 1.5 SD

стратосфере на основе среднесуточных данных, полученных по методу оконтуривания вихря. Диаграммы рассеяния на рис. 1 имеют «петлеобразную» форму и связаны с отличиями в сезонных изменениях рассматриваемых параметров. На рис. 2 приведены 41-летние средние сезонные изменения площади и скорости ветра по границе антарктического полярного вихря в нижней и средней стратосфере со среднеквадратичными отклонениями (1,5 СКО). Межсуточные и межгодовые изменения площади антарктического вихря и средней скорости ветра по границе вихря, как правило, незначительны и находятся (в более 90 % случаях) в пределах 1,5 СКО

относительно многолетнего сезонного хода (рис. 1, 2). Максимальная площадь вихря в нижней и средней стратосфере наблюдается, как правило, в середине зимы, в то время как пик скорости ветра по границе вихря проявляется в весенний период. Сезонные изменения площади стратосферного полярного вихря определяются сроками начала и окончания полярной ночи, которая способствует понижению температуры внутри вихря в нижней и средней стратосфере (в отсутствие солнечного излучения). В свою очередь, ежегодное весеннее увеличение скорости ветра по границе антарктического полярного вихря дополнительно обусловлено влиянием сезонного хода температуры нижней субтропической стратосферы, где в Южном полушарии наблюдается постепенный рост начиная с марта и максимум в сентябре, способствующие увеличению стратосферного меридионального температурного градиента и последующему усилению вихря [25].

Для исследования взаимосвязи между площадью антарктического полярного вихря и средней скоростью ветра по границе вихря из рядов значений рассматриваемых параметров были удалены полиномиальные тренды с целью устранения эффекта ложной корреляции, особенно проявляющегося на этапе формирования и разрушения вихря, когда изменения площади вихря и скорости ветра по границе вихря синхронны и обусловлены влиянием стратосферной циркуляции. Полиномиальные тренды 6-го порядка вычислялись и вычитались из рядов значений рассматриваемых параметров отдельно для каждого года за период с 1979 по 2019 г. Полученные ряды были разделены на 10 групп в зависимости от исходных значений площади вихря (до вычитания полиномиального тренда). В таблице приведены коэффициенты корреляции между среднесуточными значениями площади вихря и средней скорости ветра по границе вихря (полученные на основе рядов, после вычитания полиномиального тренда) на уровнях 50 и 10 гПа для разных диапазонов площади антарктического полярного вихря за 1979–2019 гг. Анализ полученных рядов показал существование взаимосвязи между площадью и скоростью ветра по границе вихря при исходных значениях площади вихря менее 25 млн км² и более 50 млн км² (см. табл. 1; значения выделены жирным шрифтом). На рис. 3, 4 приведены диаграммы рассеяния площади вихря и скорости ветра по границе вихря для диапазонов из таблицы, с наиболее высокими значениями корреляции при значениях

Таблица

Коэффициенты корреляции между среднесуточными значениями площади вихря и средней скорости ветра по границе вихря на уровнях 50 и 10 гПа для разных диапазонов площади антарктического полярного вихря за 1979–2019 гг.

Table

Correlation coefficients between the daily average values of vortex area and average wind speed along the vortex edge at the 50 and 10 hPa pressure levels for different ranges of the Antarctic polar vortex area for the period 1979–2019

Диапазон изменения площади вихря на уровне 50 гПа (млн км ²)									
(0–5]	(5–10]	(10–15]	(15–20]	(20–25]	(25–30]	(30–35]	(35–40]	(40–45]	(45–50]
0,75	0,74	0,72	0,68	0,62	0,40	0,14	0,06	–0,10	–0,25
Диапазон изменения площади вихря на уровне 10 гПа (млн км ²)									
(0–7]	(7–14]	(14–21]	(21–28]	(28–35]	(35–42]	(42–49]	(49–56]	(56–63]	(63–70]
0,74	0,70	0,54	0,46	0,31	–0,29	–0,55	–0,67	–0,75	–0,78

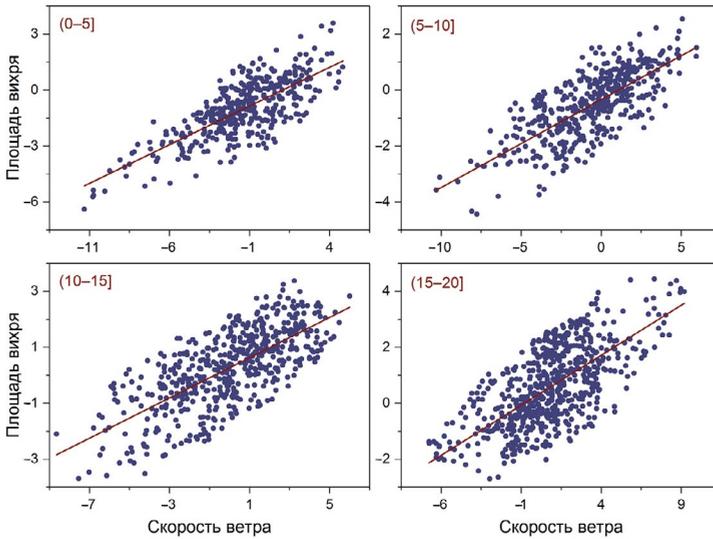


Рис. 3. Диаграммы рассеяния среднесуточных значений площади антарктического полярного вихря и средней скорости ветра по границе вихря на уровне 50 гПа за период с 1979 по 2019 г. для следующих диапазонов площади вихря (млн км²): (0–5], (5–10], (10–15] и (15–20]

Fig. 3. Scatterplots of the daily mean values of vortex area and mean wind speed along the edge of the Antarctic polar vortex at the 50 hPa pressure level from 1979 to 2019 for the following ranges of vortex area (million km²): (0–5], (5–10], (10–15] and (15–20]

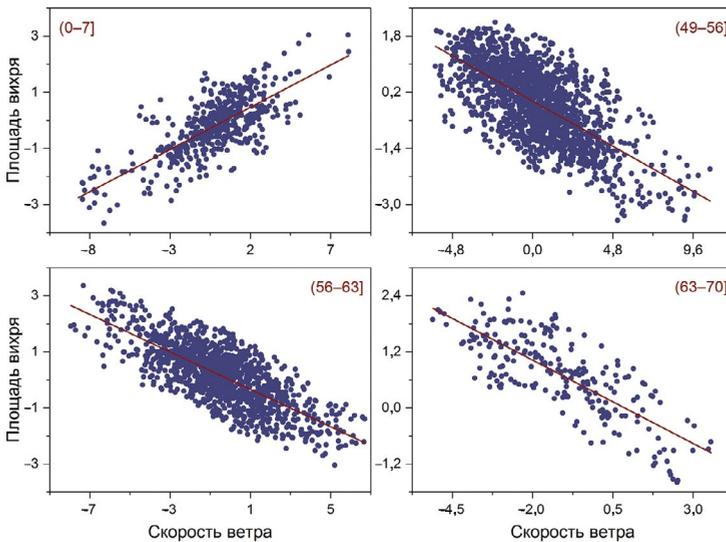


Рис. 4. Диаграммы рассеяния среднесуточных значений площади антарктического полярного вихря и средней скорости ветра по границе вихря на уровне 10 гПа за период с 1979 по 2019 г. для следующих диапазонов площади вихря (млн км²): (0–7], (49–56], (56–63] и (63–70]

Fig. 4. Scatterplots of the daily mean values of vortex area and mean wind speed along the edge of the Antarctic polar vortex at the 10 hPa pressure level from 1979 to 2019 for the following ranges of vortex area (million km²): (0–7], (49–56], (56–63] and (63–70]

площади вихря менее 25 млн км² и более 50 млн км². При площади вихря менее 25 млн км² наблюдаются синхронные изменения площади вихря и скорости ветра по границе вихря (рис. 3, 4). При площади вихря более 50 млн км² при уменьшении (увеличении) площади вихря наблюдается увеличение (уменьшение) скорости ветра по границе вихря (в средней стратосфере, рис. 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена взаимосвязь между площадью вихря и скоростью ветра по границе антарктического полярного вихря. Для устранения влияния сезонного хода из рядов рассматриваемых параметров были удалены полиномиальные тренды. Показано, что взаимосвязь между площадью вихря и скоростью ветра по границе вихря прослеживается при значениях площади менее 25 млн км² и более 50 млн км². При небольших значениях площади вихря (< 25 млн км²), на этапе его формирования и разрушения, проявляется положительная корреляция между площадью вихря и скоростью ветра по границе вихря. При высоких значениях площади вихря (> 50 млн км²) между исследуемыми параметрами прослеживается отрицательная корреляция.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00002, <https://rscf.ru/project/22-27-00002>.

Competing interests. The authors have no competing interests.

Funding. This study was supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-27-00002, <https://rscf.ru/en/project/22-27-00002/>).

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. № 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. *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. № 1. P. 37–44.
4. *Newman P.A.* Chemistry and dynamics of the Antarctic ozone hole // *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry. Geophysical Monograph Series.* 2010. V. 190. P. 157–171.
5. *Manney G.L., Zurek R.W.* On the motion of air through the stratospheric polar vortex // *J. Atmos. Sci.* 1994. V. 51. № 20. P. 2973–2994.
6. *Sobel A.H., Plumb R.A., Waugh D.W.* Methods of calculating transport across the polar vortex edge // *J. Atmos. Sci.* 1997. V. 54. № 18. P. 2241–2260.
7. *Solomon S., Garcia R.R., Rowland F.S., Wuebbles D.J.* On the depletion of Antarctic ozone // *Nature.* 1986. V. 321. P. 755–758.
8. *Solomon S.* Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history // *Rev. Geophys.* 1999. V. 37. № 3. P. 275–316.
9. *Solomon S., Portmann R.W., Sasaki T., Hofmann D.J., Thompson D.W.J.* Four decades of ozonesonde measurements over Antarctica // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. № 21. P. D21311.
10. *Finlayson-Pitts B.J., Pitts J.N.* Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments, and Applications. California: Academic Press, 2000. 969 p.
11. *Newman P.A., Kawa S.R., Nash E.R.* On the size of the Antarctic ozone hole // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. № 21. P. L21104.

12. Charlton A.J., Polvani L.M. A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: Climatology and modeling benchmarks // *J. Climate*. 2007. V. 20. № 3. P. 449–469.
13. Charlton A.J., Polvani L.M., Perlwitz J., Sassi F., Manzini E., Shibata K., Pawson S., Nielsen J.E., Rind D. A new look at stratospheric sudden warmings. Part II: Evaluation of numerical model simulations // *J. Climate*. 2007. V. 20. № 3. P. 470–488.
14. Matthewman N.J., Esler J.G., Charlton-Perez A.J., Polvani L.M. A new look at stratospheric sudden warmings. Part III: Polar vortex evolution and vertical structure // *J. Climate*. 2009. V. 22. № 6. P. 1566–1585.
15. Abridged final report of the seventh session of the commission for atmospheric sciences, Manila, 27 February — 10 March 1978. WMO Rep. 509. Geneva: WMO, 1978. 113 p.
16. Flury T., Hocke K., Haefele A., Kämpfer N., Lehmann R. Ozone depletion, water vapor increase, and PSC generation at midlatitudes by the 2008 major stratospheric warming // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. № 18. P. D18302.
17. Plumb R.A. Planetary waves and the extratropical winter stratosphere // *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry*. Geophysical Monograph Series. 2010. V. 190. P. 23–41.
18. Kuttippurath J., Nikulin G. A comparative study of the major sudden stratospheric warmings in the Arctic winters 2003/2004–2009/2010 // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12. № 17. P. 8115–8129.
19. Zuev V.V., Savelieva E. Arctic polar vortex dynamics during winter 2006/2007 // *Polar Sci.* 2020. V. 25. P. 100532.
20. Zuev V.V., Savelieva E. Sensitivity of polar stratospheric clouds to the Arctic polar vortex weakening in the lower stratosphere in midwinter // *Proc. SPIE*. 2021. V. 11916. P. 1191674.
21. Zuev V.V., Savelieva E.S., Pavlinsky A.V. Features of stratospheric polar vortex weakening prior to breakdown // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35. № 2. P. 183–186.
22. Zuev V.V., Savelieva E. Antarctic polar vortex dynamics during spring 2002 // *J. Earth Syst. Sci.* 2022. V. 131. № 2. P. 119.
23. Holton J. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. 4th Edition. California: Academic Press, 2004. 535 p.
24. 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., Lalouaux 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. № 729. P. 1–51.
25. Zuev V.V., Savelieva E. The cause of the spring strengthening of the Antarctic polar vortex // *Dynam. Atmos. Oceans*. 2019. V. 87. P. 101097.

REFERENCES

1. Waugh D.W., Randel W.J. Climatology of Arctic and Antarctic polar vortices using elliptical diagnostics. *J. Atmos. Sci.* 1999, 56 (11): 1594–1613.
2. Waugh D.W., Polvani L.M. Stratospheric polar vortices. *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry*. Geophysical Monograph Series. 2010, 190: 43–57.
3. 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, 98 (1): 37–44.
4. Newman P.A. Chemistry and dynamics of the Antarctic ozone hole. *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry*. Geophysical Monograph Series. 2010, 190: 157–171.
5. Manney G.L., Zurek R.W. On the motion of air through the stratospheric polar vortex. *J. Atmos. Sci.* 1994, 51 (20): 2973–2994.

6. Sobel A.H., Plumb R.A., Waugh D.W. Methods of calculating transport across the polar vortex edge. *J. Atmos. Sci.* 1997, 54 (18): 2241–2260.
7. Solomon S., Garcia R.R., Rowland F.S., Wuebbles D.J. On the depletion of Antarctic ozone. *Nature.* 1986, 321: 755–758.
8. Solomon S. Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history. *Rev. Geophys.* 1999, 37 (3): 275–316.
9. Solomon S., Portmann R.W., Sasaki T., Hofmann D.J., Thompson D.W.J. Four decades of ozonesonde measurements over Antarctica. *J. Geophys. Res.* 2005, 110 (21): D21311.
10. Finlayson-Pitts B.J., Pitts J.N. Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments, and Applications. California: Academic Press, 2000: 969 p.
11. Newman P.A., Kawa S.R., Nash E.R. On the size of the Antarctic ozone hole. *Geophys. Res. Lett.* 2004, 31 (21): L21104.
12. Charlton A.J., Polvani L.M. A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: Climatology and modeling benchmarks. *J. Climate.* 2007, 20 (3): 449–469.
13. Charlton A.J., Polvani L.M., Perlwitz J., Sassi F., Manzini E., Shibata K., Pawson S., Nielsen J.E., Rind D. A new look at stratospheric sudden warmings. Part II: Evaluation of numerical model simulations. *J. Climate.* 2007, 20 (3): 470–488.
14. Matthewman N.J., Esler J.G., Charlton-Perez A.J., Polvani L.M. A new look at stratospheric sudden warmings. Part III: Polar vortex evolution and vertical structure. *J. Climate.* 2009, 22 (6): 1566–1585.
15. Abridged final report of the seventh session of the commission for atmospheric sciences, Manila, 27 February — 10 March 1978. WMO Rep. 509. Geneva: WMO, 1978: 113 p.
16. Flury T., Hocke K., Haefele A., Kämpfer N., Lehmann R. Ozone depletion, water vapor increase, and PSC generation at midlatitudes by the 2008 major stratospheric warming. *J. Geophys. Res.* 2009, 114 (18): D18302.
17. Plumb R.A. Planetary waves and the extratropical winter stratosphere. *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry. Geophysical Monograph Series.* 2010, 190: 23–41.
18. Kuttippurath J., Nikulin G. A comparative study of the major sudden stratospheric warmings in the Arctic winters 2003/2004–2009/2010. *Atmos. Chem. Phys.* 2012, 12 (17): 8115–8129.
19. Zuev V.V., Savelieva E. Arctic polar vortex dynamics during winter 2006/2007. *Polar Sci.* 2020, 25: 100532.
20. Zuev V.V., Savelieva E. Sensitivity of polar stratospheric clouds to the Arctic polar vortex weakening in the lower stratosphere in midwinter. *Proc. SPIE.* 2021, 11916: 1191674.
21. Zuev V.V., Savelieva E.S., Pavlinsky A.V. Features of stratospheric polar vortex weakening prior to breakdown. *Atmos. Ocean. Opt.* 2022, 35 (2): 183–186.
22. Zuev V.V., Savelieva E. Antarctic polar vortex dynamics during spring 2002. *J. Earth Syst. Sci.* 2022, 131 (2): 119.
23. Holton J. An Introduction to Dynamic Meteorology. 4th Edition. California: Academic Press, 2004: 535 p.
24. 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., Villaume S., Thépaut J.-N. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 2020, 146 (729): 1–51.
25. Zuev V.V., Savelieva E. The cause of the spring strengthening of the Antarctic polar vortex. *Dynam. Atmos. Oceans.* 2019, 87: 101097.