

УДК 551.51

БЕСПРЕЦЕДЕНТНАЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ АНТАРКТИЧЕСКОЙ ОЗОНОВОЙ АНОМАЛИИ 2020 г.

© 2023 г. Член-корреспондент РАН В. В. Зуев^{1,*}, Е. С. Савельева¹,
А. В. Павлинский¹, Е. А. Сидоровский¹

Поступило 19.10.2022 г.

После доработки 11.11.2022 г.

Принято к публикации 14.11.2022 г.

В работе показана тенденция удлинения периода высокой устойчивости антарктического полярного вихря в позднюю весну и раннее лето (ноябрь–декабрь), прослеживающаяся последние 30 лет. Такая тенденция проявляется как в динамике основных характеристик полярного вихря (площади вихря и скорости ветра по границе вихря), так и в площади антарктической озоновой дыры. Ярким проявлением этого является динамика полярного вихря в 2020 г., когда наблюдались аномально высокие значения скорости ветра по границе вихря в течение всего периода его существования и рекордные значения площади вихря и площади озоновой дыры с середины ноября по декабрь. При этом полярный вихрь существовал до последней недели декабря, что является беспрецедентным случаем. Для анализа динамики антарктического полярного вихря использовался метод оконтуривания вихрей по значениям геопотенциала, определенным по максимальному градиенту температуры и максимальной скорости ветра, характеризующим границы вихря.

Ключевые слова: антарктический полярный вихрь, полярные озоновые аномалии, геопотенциал, скорость ветра

DOI: 10.31857/S2686739722602319, **EDN:** TJECZJ

Полярные озоновые аномалии формируются в период с конца зимы по весну внутри устойчивых крупномасштабных циклонов, стратосферных полярных вихрей, в результате протекания комплекса гетерогенных и фотохимических реакций с участием резервуаров хлора (хлороводорода и хлорнитрата) и полярных стратосферных облаков в качестве “поверхностей” для гетерогенных реакций [1–4]. Масштабы и интенсивность разрушения озона при формировании озоновой аномалии определяются устойчивостью полярного вихря в этот период и в предшествующие зимние месяцы [5, 6]. Полярные вихри ежегодно формируются в осенний период над зимним полушарием вследствие увеличения стратосферного меридионального температурного градиента и, как правило, разрушаются весной при уменьшении температурного градиента (арктический полярный вихрь эпизодически разрушается в конце зимы) [7, 8]. При этом обоснованным с точки зрения законов термодинамики является зимний пик интенсивности полярного вихря, обуслов-

ленный понижением температуры в полярной области во время полярной ночи [9]. В Южном полушарии, под влиянием сезонного хода температуры нижней субтропической стратосферы (в значительной степени определяющей стратосферный меридиональный температурный градиент), пик интенсивности полярного вихря, как правило, наблюдается в сентябре, одновременно с максимумом в температурном ходе в субтропиках [9]. Однако в последние 30 лет наблюдается выраженная тенденция смещения устойчивости антарктического полярного вихря в поздневесенний и раннелетний период, что приводит к удлинению периода существования антарктической озоновой дыры.

В работе для анализа динамики антарктического полярного вихря и площади озоновой дыры использовались ежечасные данные реанализа ERA5 [10] с горизонтальным разрешением $0.25^\circ \times 0.25^\circ$: скорость зонального и меридионального ветра, геопотенциал и массовое отношение смеси озона на уровне 50 гПа, а также среднесуточные спутниковые данные NASA Goddard Space Flight Center (GSFC, <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov>) о площади озоновой дыры (область со значениями общего содержания озона ниже 220 ед. Д.) для региона 40° – 90° ю.ш. за период с 1992 по 2021 г. Использовался метод оконтуривания вихря с помо-

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

*E-mail: vzuev@list.ru

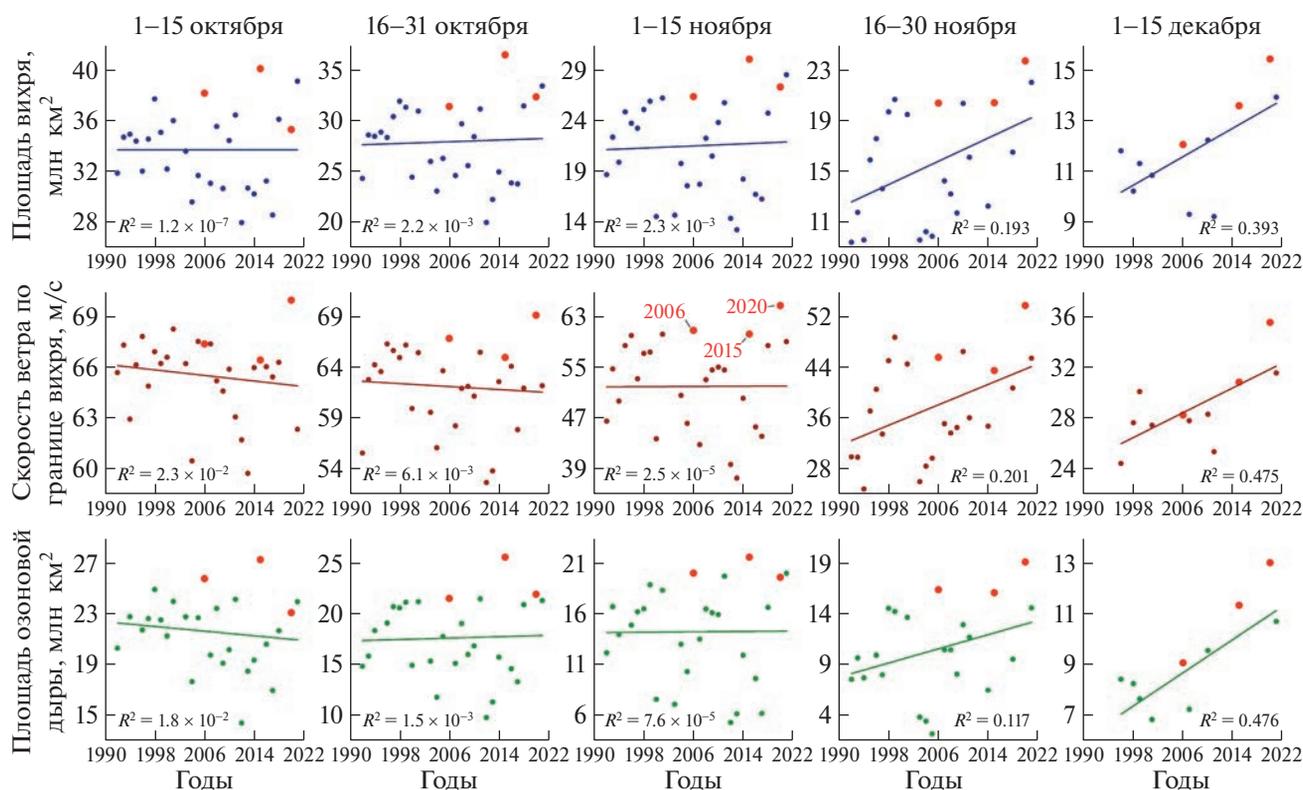


Рис. 1. Временные изменения площади антарктического полярного вихря и средней скорости ветра по границе вихря на уровне 50 гПа, а также площади антарктической озоновой дыры в среднем за периоды 1–15 октября, 16–31 октября, 1–15 ноября, 16–30 ноября и 1–15 декабря с 1992 по 2021 г.

стью значений геопотенциала, определенных по максимальному градиенту температуры и максимальной скорости ветра [11, 12]. Геопотенциал зависит только от давления и температуры [13] и, таким образом, хорошо 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, соответственно, хорошо подходит для определения границ полярного вихря. По границе вихря наблюдается максимальный градиент температуры и, как правило, максимальные значения скорости ветра. Среднее значение геопотенциала Φ^* в районе максимального градиента температуры по границе антарктического полярного вихря на уровне 50 гПа составляет $\Phi^* = (19.30 \pm 0.17) \times 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$ [11, 12]. Площадь вихря, средняя скорость ветра по границе вихря и среднее массовое отношение смеси озона внутри вихря рассчитывались, основываясь на том, что граница антарктического полярного вихря на уровне 50 гПа определяется значениями геопотенциала $19.3 \times 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$.

На рис. 1 приведены межгодовые изменения площади антарктического полярного вихря,

средней скорости ветра по границе вихря и площади антарктической озоновой дыры, усредненные за 1–15 и 16–31 октября, 1–15 и 16–30 ноября, а также 1–15 декабря за последние 30 лет (1992–2021 г.). На рис. 1 также приведены соответствующие каждому временному периоду линейные тренды и характеризующие их коэффициенты детерминации R^2 (чем ближе значение R^2 к 1, тем выше уровень значимости трендов). Из рассмотрения были исключены аномальные данные за 2002 и 2019 г., когда наблюдалось раннее разрушение вихря (в конце октября), сопровождающееся расщеплением в первом случае и сильным смещением во втором (регистрировались главное и минорное внезапные стратосферные потепления) [14, 15]. Антарктическая озоновая аномалия, как правило, существует с августа по ноябрь, достигая максимальных значений в сентябре–октябре. В октябре и первой половине ноября тренды изменений рассматриваемых характеристик не значимы ($R^2 < 0.1$, рис. 1). Во второй половине ноября и, особенно, в декабре данные более разряжены, вследствие эпизодически происходящего более раннего разрушения вихря, и имеют выраженный положительный тренд. На всех графиках рис. 1 выделены значения за 2006, 2015 и 2020 г., когда наблюдались наиболее

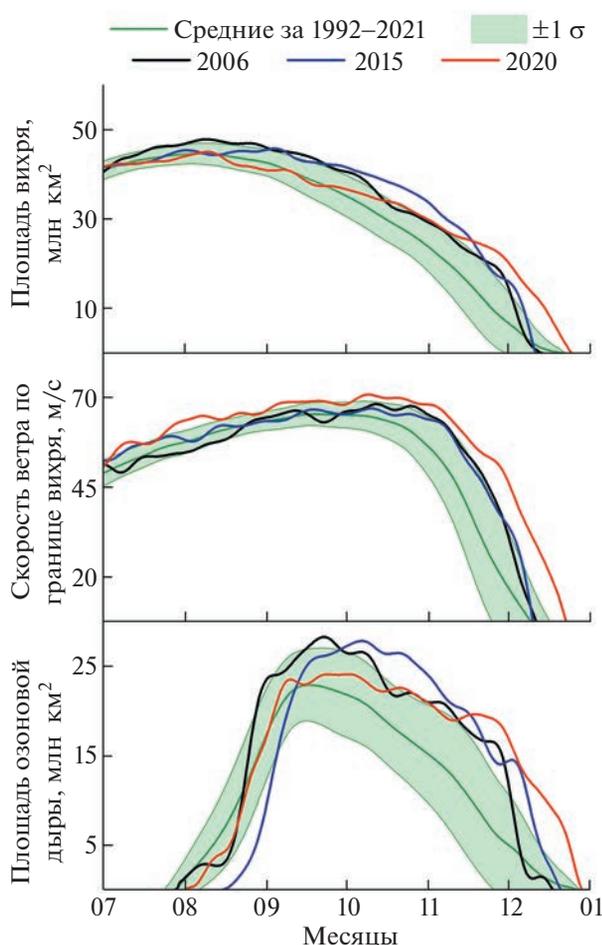


Рис. 2. Внутригодовой ход площади антарктического полярного вихря, средней скорости ветра по границе вихря на уровне 50 гПа и площади антарктической озоновой дыры с июля по декабрь 2006, 2015 и 2020 г. на фоне средних значений за период с 1992 по 2021 г. с СКО ($\pm 1 \sigma$).

масштабные озоновые аномалии [16, 17]. Между изменениями характеристик в 2006, 2015 и 2020 г. также прослеживается тенденция к поздневесеннему усилению полярного вихря, протекающему с увеличением площади озоновой дыры в поздне-весенний и раннелетний период (рис. 1).

Для детального рассмотрения динамики антарктического полярного вихря в годы с наиболее масштабными озоновыми аномалиями на рис. 2 и 3 представлены изменения характеристик вихря и озоновой аномалии с июля по декабрь 2006, 2015 и 2020 г. На рис. 2 приведены внутригодовые изменения площади антарктического полярного вихря, средней скорости ветра по границе вихря и площади антарктической озоновой дыры в 2006, 2015 и 2020 г. по сравнению с 30-летними средними изменениями этих характеристик со средне-квадратичными отклонениями (СКО, $\pm 1 \sigma$). Максимальная площадь озоновой дыры в 2006 г.

наблюдалась в сентябре, в 2015 г. — в октябре, в то время как в 2020 г. регистрировались рекордные значения площади озоновой дыры с середины ноября по декабрь за период с 1979 по 2021 г. Значительное увеличение площади антарктического полярного вихря в поздневесенний и раннелетний период также прослеживается в 2015 и 2020 г., в то время как в 2006 г. максимальная площадь вихря наблюдалась в августе (рис. 2). Кроме того, в 2020 г. наблюдалось необычное увеличение средней скорости ветра по границе вихря в течение всего периода существования полярного вихря. Фактически в динамике исследуемых характеристик на рис. 1 и в годы с наиболее сильным вихрем на рис. 2 прослеживается удлинение периода устойчивости антарктического полярного вихря в поздневесенний и раннелетний период (в 2006 г. пик интенсивности вихря наблюдался в сентябре, в 2015 г. — в октябре, в то время как в 2020 г. аномальная интенсивность регистрировалась в ноябре и декабре). Как отражение такой тенденции в 2020 г. антарктический полярный вихрь существовал до последней недели декабря, что является беспрецедентным фактом.

Одной из динамических характеристик полярного вихря является наличие динамического барьера [12]. На рис. 3 приведены поля геопотенциала, скорости ветра и массового отношения смеси озона за 1-е и 15-е число с июля по декабрь 2006, 2015 и 2020 г., отражающие динамику полярного вихря в рассматриваемые годы. На полях геопотенциала соединены линией значения $19.3 \times 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$, характеризующие (согласно методу оконтуривания вихря) границы антарктического полярного вихря, а на полях скорости ветра — значения 20 м/с, отражающие наличие динамического барьера. Во все рассматриваемые годы наблюдался очень сильный полярный вихрь с глубоким разрушением озона в весенний период. В 2006 г. полярный вихрь был наиболее симметричным и масштабным в сентябре, в то время как с октября наблюдались его вытягивание и постепенное ослабление. В 2015 г. увеличилась устойчивость вихря в период с октября по ноябрь. В свою очередь в 2020 г. прослеживается увеличение устойчивости вихря в поздневесенний и раннелетний период, с начала ноября. На полях за 15 декабря 2020 г. (в отличие от 2006 и 2015 г.) полярный вихрь по-прежнему прослеживается и характеризуется наличием динамического барьера.

Таким образом, в работе с использованием метода оконтуривания вихрей показана тенденция удлинения периода устойчивости антарктического полярного вихря в нижней стратосфере в поздне-весенний и раннелетний период, наблюдающаяся в течение последних 30 лет. Это проявляется как в динамике основных характеристик полярного вихря (площади вихря и средней скорости ветра по границе вихря), так и в площади

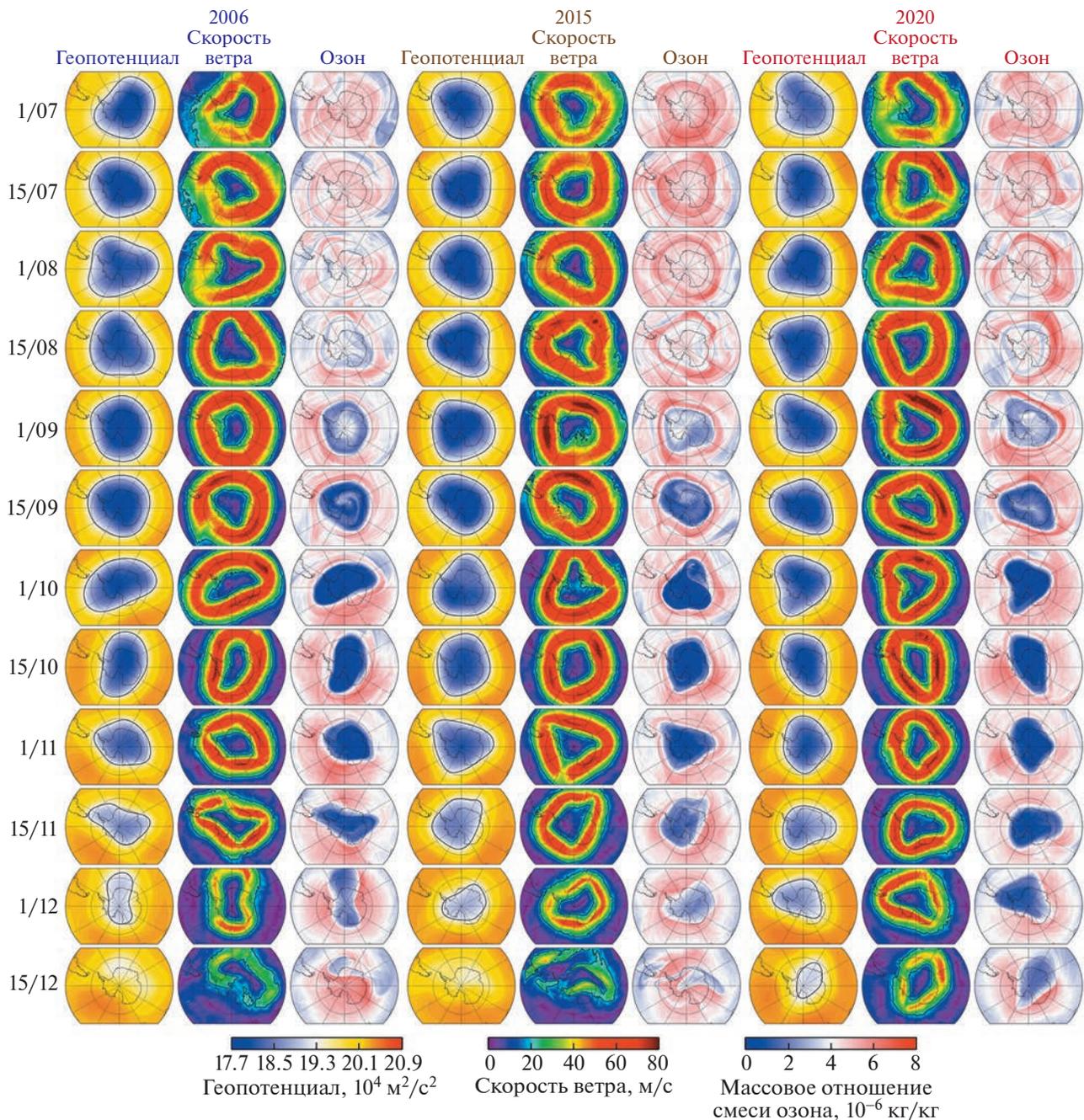


Рис. 3. Поля геопотенциала, скорости ветра и массового отношения смеси озона на уровне 50 гПа над Антарктикой в период с июля по декабрь 2006, 2015 и 2020 г.

антарктической озоновой дыры. Показано, что тенденция позднеосеннего усиления полярного вихря прослеживается и в годы с наиболее сильным вихрем: 2006, 2015 и 2020 г., отражаясь в увеличении площади озоновой дыры. В 2020 г. наблюдались anomalously высокие значения средней скорости ветра по границе вихря в течение всего периода его существования и anomalously высокие значения площади вихря с середины ноября. Антарктический полярный вихрь в 2020 г. существовал до последней недели декабря, что является

беспрецедентным случаем. Тенденция удлинения периода устойчивости полярного вихря в нижней стратосфере отражается в динамике вихря в средней и верхней стратосфере несмотря на то, что ослабление вихря на этих высотах происходит раньше. Увеличение устойчивости антарктического полярного вихря в нижней стратосфере в позднеосенний период может происходить в условиях повышения температуры нижней субтропической стратосферы, как это наблюдалось в 1987, 1998, 1999, 2001, 2006, 2011 и 2015 г. [18].

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Solomon S.* Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history // *Rev. Geophys.* 1999. V. 37. № 3. P. 275–316.
2. *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.
3. *Варгин П.Н., Никифорова М.П., Звягинцев А.М.* Изменчивость антарктической озоновой аномалии в 2011–2018 гг. // *Метеорология и гидрология.* 2020. № 2. С. 20–34.
4. *Сибир Е.Е., Радионов В.Ф., Русина Е.Н.* Результаты многолетних наблюдений за общим содержанием озона в Антарктиде и над акваториями Атлантического и Южного океанов // *Метеорология и гидрология.* 2020. № 3. С. 33–43.
5. *Waugh D.W., Randel W.J., Pawson S., Newman P.A., Nash E.R.* Persistence of the lower stratospheric polar vortices // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. № 22. P. 27191–27201.
6. *Zuev V.V., Savelieva E.* The role of the polar vortex strength during winter in Arctic ozone depletion from late winter to spring // *Polar Sci.* 2019. V. 22. P. 100469.
7. *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.
8. *Stenchikov G., Robock A., Ramaswamy V., Schwarzkopf M.D., Hamilton K., Ramachandran S.* Arctic Oscillation response to the 1991 Mount Pinatubo eruption: Effects of volcanic aerosols and ozone depletion // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № 24. P. ACL28.
9. *Zuev V.V., Savelieva E.* The cause of the spring strengthening of the Antarctic polar vortex // *Dynam. Atmos. Oceans.* 2019. V. 87. P. 101097.
10. *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. V. 146. № 729. P. 1–51.
11. *Zuev V.V., Savelieva E.* Antarctic polar vortex dynamics during spring 2002 // *J. Earth Syst. Sci.* 2022. V. 131. № 2. P. 119.
12. *Zuev V.V., Savelieva E.* Antarctic polar vortex dynamics depending on wind speed along the vortex edge // *Pure Appl. Geophys.* 2022. V. 179. № 6–7. P. 2609–2616.
13. *Holton J.* An Introduction to Dynamic Meteorology. 4th Edition. California: Academic Press, 2004. 535 p.
14. *Newman P.A., Nash E.R.* The unusual Southern Hemisphere stratosphere winter of 2002 // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. № 3. P. 614–628.
15. *Safieddine S., Bouillon M., Paracho A.-C., Jumelet J., Tencé F., Pazmino A., Goutail F., Wespes C., Bekki S., Boynard A., Hadji-Lazaro J., Coheur P.-F., Hurtmans D., Clerbaux C.* Antarctic ozone enhancement during the 2019 sudden stratospheric warming event // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. № 14. P. e2020GL087810.
16. *Cracknell A.P., Varotsos C.A.* The Antarctic 2006 ozone hole // *Int. J. Remote Sens.* 2007. V. 28. № 1. P. 1–2.
17. *Stone K.A., Solomon S., Kinnison D.E., Mills M.J.* On recent large Antarctic ozone holes and ozone recovery metrics // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48. № 22. P. e2021GL095232.
18. *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.

UNPRECEDENTED DURATION OF THE 2020 ANTARCTIC OZONE DEPLETION

Corresponding member of the RAS V. V. Zuev^{a, #}, E. S. Savelieva^a, A. V. Pavlinsky^a, and E. A. Sidorovski^a

^a*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation*

[#]*E-mail: vzuev@list.ru*

In this work, we show a trend of lengthening the period of high intensity of the Antarctic polar vortex in late spring and early summer (November–December), which has been traced over the past 30 years. This trend is observed both in the dynamics of the main characteristics of the polar vortex (vortex area and wind speed along the vortex edge) and in the Antarctic ozone hole area. A clear manifestation of this is the polar vortex dynamics in 2020, when there were unusually high wind speeds along the vortex edge throughout the entire period of its existence and record values of vortex area and ozone hole area from mid-November to December. In addition, the polar vortex existed until the last week of December, which is an unprecedented case. To analyze the Antarctic polar vortex dynamics, we used the vortex delineation method by geopotential values determined from the maximum temperature gradient and maximum wind speed characterizing the vortex edge.

Keywords: Antarctic polar vortex, polar ozone depletion, geopotential, wind speed