

УДК 551.51

Динамика антарктического полярного вихря во время внезапного стратосферного потепления в 2002 г.

Е.С. Савельева*

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

Поступила в редакцию 22.07.2019 г.

В сентябре 2002 г. в результате расщепления полярного вихря над Антарктикой наблюдалось внезапное стратосферное потепление (ВСП). Аномально раннее разрушение антарктического полярного вихря весной 2002 г. произошло в результате повышенной активности вертикально распространяющихся планетарных волн. В работе исследуется динамика южного полярного вихря в период ВСП 2002 г. В качестве возможной причины ослабления полярного вихря, которое предшествовало его расщеплению под действием планетарных волн, рассмотрено аномальное понижение температуры нижней субтропической стратосферы, способствовавшее уменьшению стратосферного меридионального температурного градиента.

Ключевые слова: внезапное стратосферное потепление, антарктический полярный вихрь, нижняя субтропическая стратосфера; sudden stratospheric warming, Antarctic polar vortex, lower subtropical stratosphere.

Введение

Раннее разрушение стратосферного полярного вихря происходит, как правило, в результате проникновения в стратосферу вертикально распространяющихся планетарных волн Россби и сопровождается внезапным стратосферным потеплением (ВСП) [1–3]. ВСП разделяются на большие (major) и малые (minor). Согласно определению Всемирной Метеорологической Организации ВСП можно считать большим, если на высотах от 10 гПа (~30 км) и ниже среднеширотная температура резко возрастает в диапазоне широт от 60 до 90° по направлению к полюсу при наблюдаемой смене направления зонального потока в течение нескольких дней/часов [4]. Если при выраженном росте стратосферных температур направление зональных ветров не меняется с западного на восточное, ВСП считается малым. Фактически при малых ВСП происходит сильное смещение полярного вихря, а при больших – его расщепление на два небольших вихря [3]. Над Арктикой ВСП наблюдаются практически ежегодно [5], в то время как над Антарктикой большое ВСП регистрировалось лишь однажды, в сентябре 2002 г. [6–10].

В [11, 12] рассмотрена роль температуры субтропической стратосферы в усилении полярного вихря. Показано, что в Южном полушарии сезонный ход температуры нижней субтропической стратосферы с апреля по сентябрь создает благоприятные условия для усиления антарктического полярного вихря [11], при этом повышение субтропической температуры в период с октября по ноябрь приводит к его поздневесеннему усилению [12]. Повышение темпе-

ратуры нижней субтропической стратосферы с осени по весну способствует увеличению стратосферного меридионального температурного градиента, что проявляется в усилении полярного вихря [13, 14]. Зимне-весеннее усиление полярного вихря приводит к формированию в полярной стратосфере условий, способствующих образованию полярной озоновой аномалии [15, 16].

Антарктический полярный вихрь, как правило, усиливается в сентябре [11]. В 2002 г. во время ВСП в результате расщепления полярного вихря в конце сентября в нижней субтропической стратосфере наблюдалось аномальное понижение температуры.

Цель настоящей работы – исследование динамики антарктического полярного вихря во время ВСП 2002 г. В качестве возможной причины ослабления полярного вихря, предшествовавшего его расщеплению под действием планетарных волн, рассмотрено аномальное понижение температуры нижней субтропической стратосферы, способствовавшее уменьшению стратосферного меридионального температурного градиента.

Внезапное стратосферное потепление в сентябре 2002 г.

Основными параметрами, характеризующими ВСП, являются потенциальная завихренность и температура. Высокие значения потенциальной завихренности¹ в зимне-весенний период определяют местоположение полярного вихря, при этом в пределах

¹ В Южном полушарии потенциальная завихренность принимает отрицательные значения, поэтому при описании полей потенциальной завихренности подразумеваются значения по абсолютной величине.

* Екатерина Сергеевна Савельева (kapitosh89@gmail.com).

вихря наблюдаются пониженные температуры, а за его пределами – повышенные. На рис. 1 приведены поля потенциальной завихренности и температуры на высоте 50 и 10 гПа (~20 и 30 км) над Антарктикой в период с сентября по ноябрь 2002 г. по данным реанализа ERA Interim [17]. Видно, что в середине сентября 2002 г. полярный вихрь в нижней и средней стратосфере был немного смещен относительно полюса, но при этом имел круглую форму. В течение последующих 10 дней полярный вихрь принял овальную форму. Затем, 25 сентября, произошло его расщепление, более четко проявившееся в средней стратосфере. В нижней стратосфере максимальные значения потенциальной завихренности 25–26 сентября образовали форму «восьмерки».

Однако факт расщепления полярного вихря в нижней стратосфере на два небольших вихря подтверждается распределением температуры, которое характеризуется наличием двух областей пониженных значений с выраженными границами и повышенными значениями за их пределами. В первой половине октября полярный вихрь частично восстановился, но был существенно меньше и слабее чем обычно. Окончательное разрушение вихря произошло в начале ноября, более чем на месяц раньше, чем в период 1989–2018 г. [18].

Характеристикой временной динамики полярного вихря может служить скорость зонального ветра на 60° ю.ш. в нижней и средней стратосфере, при этом объем полярных стратосферных облаков (ПСО)

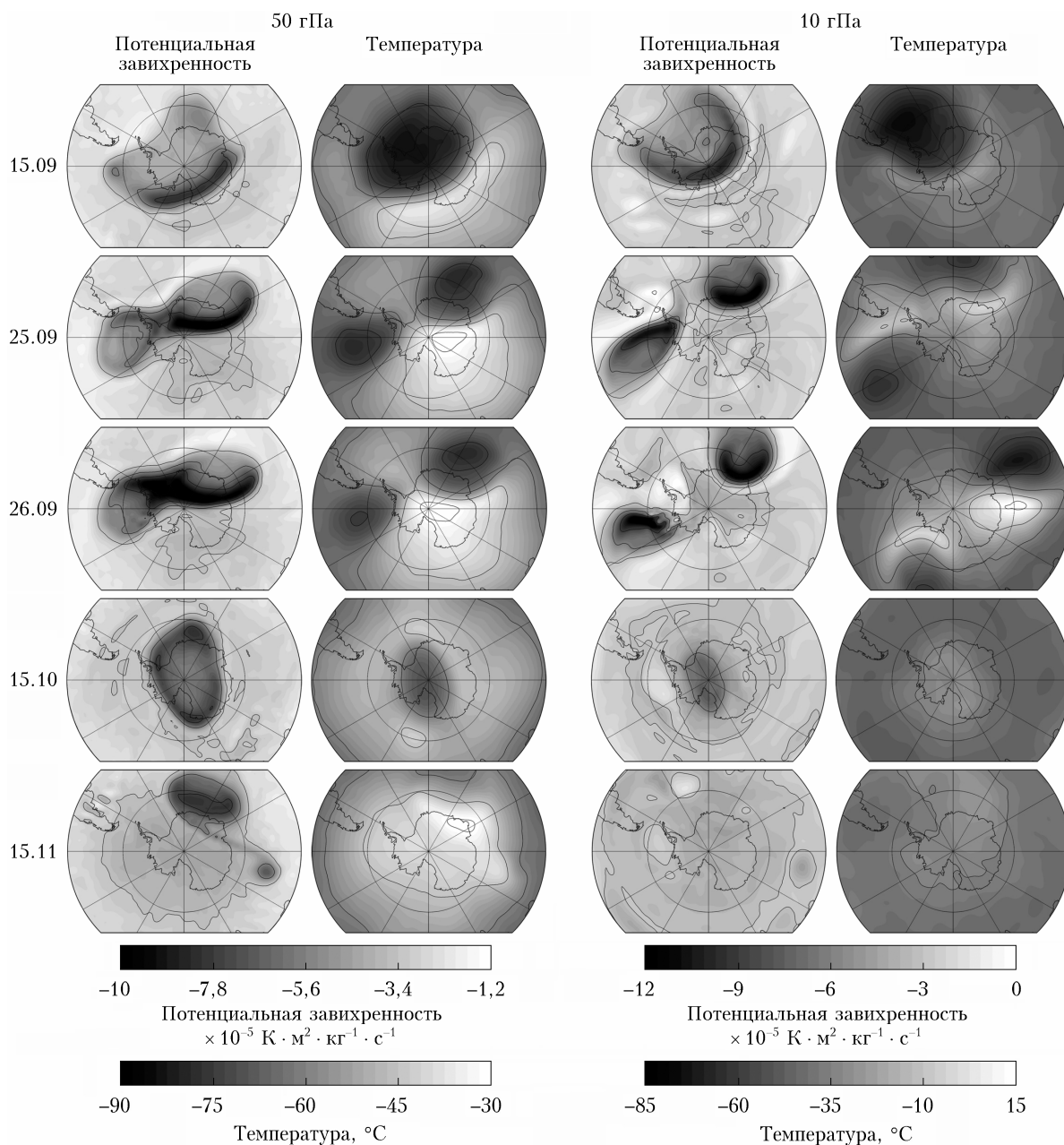


Рис. 1. Поля потенциальной завихренности и температуры на высоте 50 и 10 гПа над Антарктикой с сентября по ноябрь 2002 г.

и площадь озоновой дыры будут косвенными характеристиками активности вихря с конца зимы по весну. Как известно, внутри полярного вихря при экстремально низких температурах ($< -78^\circ\text{C}$) в результате абсорбции и кристаллизации происходит формирование ПСО, в поверхностном слое которых протекают гетерогенные реакции с высвобождением молекулярного хлора [19]. В конце зимы с появлением над полярной областью солнечного излучения запускается хлорный цикл разрушения озона, формируется озоновая дыра [20].

На рис. 2 приведены внутригодовые изменения скорости зонального ветра на 60° ю.ш. и минимальной температуры в области $50\text{--}90^\circ$ ю.ш. на высотах 50 и 10 гПа, объема ПСО в области $60\text{--}90^\circ$ ю.ш.

наблюдался со второй половины сентября, при этом первые признаки последующих изменений проявились в некоторых параметрах уже во второй половине августа.

Повышенная активность планетарных волн в нижней стратосфере весной 2002 г.

Причиной раннего разрушения антарктического полярного вихря весной 2002 г. было проникновение в нижнюю стратосферу вертикально распространяющихся планетарных волн [21]. Одной из измеряемых характеристик волновой активности является

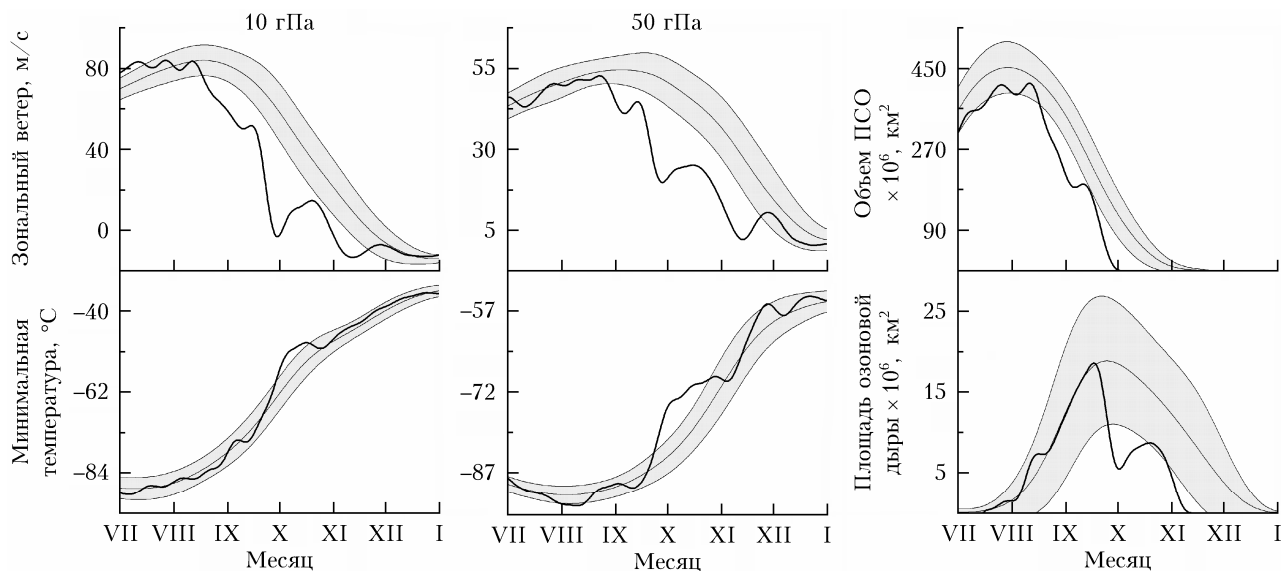


Рис. 2. Внутригодовые изменения скорости зонального ветра на 60° ю.ш. и минимальной температуры в области $60\text{--}90^\circ$ ю.ш. на высотах 10 и 50 гПа, объема ПСО в области $60\text{--}90^\circ$ ю.ш. и площади озоновой дыры с июля по декабрь 2002 г. на фоне средних значений за 1979–2018 гг. с интервалами среднеквадратичных отклонений ($\pm 1\sigma$)

и площади озоновой дыры с июля по декабрь 2002 г. в сравнении со средними значениями за 1979–2018 гг., полученными по данным NASA Goddard Space Flight Center (GSFC) [18]. Как видно из рисунка, с августа 2002 г. происходило стремительное уменьшение скорости зонального ветра в нижней и средней стратосфере, а с сентября наблюдалось повышение температуры в полярной стратосфере. Объем ПСО был ниже климатической нормы еще в середине зимы и стремительно снижался с августа по сентябрь, в октябре ПСО отсутствовали. Временные изменения площади озоновой дыры также хорошо отражают динамику полярного вихря: во второй половине сентября 2002 г. наблюдалось ее быстрое сокращение, небольшой рост в первой половине октября и последующее затягивание в начале ноября.

Таким образом, аномальный и необратимый характер динамических изменений полярного вихря

поток турбулентного тепла. В [22] было показано, что его высокая активность в области $45\text{--}75^\circ$ ю.ш. на высоте 100 гПа (~ 16 км) предшествует ослаблению полярного вихря, а низкая – усилению. При этом повышенная активность потока турбулентного тепла приводит к расщеплению полярного вихря и возникновению ВСП [22].

На рис. 3 приведены временные изменения потока турбулентного тепла в области $45\text{--}75^\circ$ ю.ш. на высоте 100 гПа с мая по октябрь 2002 г. в сравнении со средними значениями за 1979–2018 гг., полученными по данным NASA GSFC [18]. Поскольку в Южном полушарии поток турбулентного тепла принимает отрицательные значения, для него этот параметр принято представлять с обратным знаком [21] (на рис. 3 знак « \leftarrow » внесен в единицы измерения). Согласно рис. 3 аномальное усиление потока турбулентного тепла наблюдалось в августе

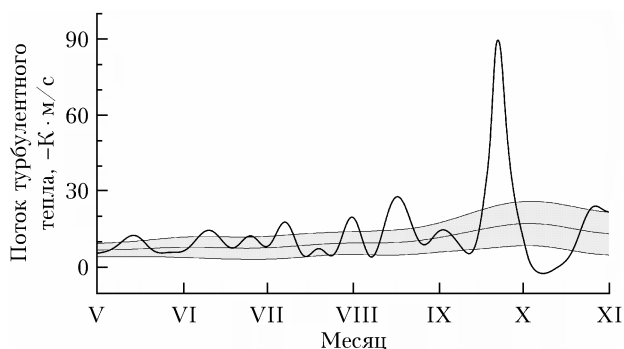
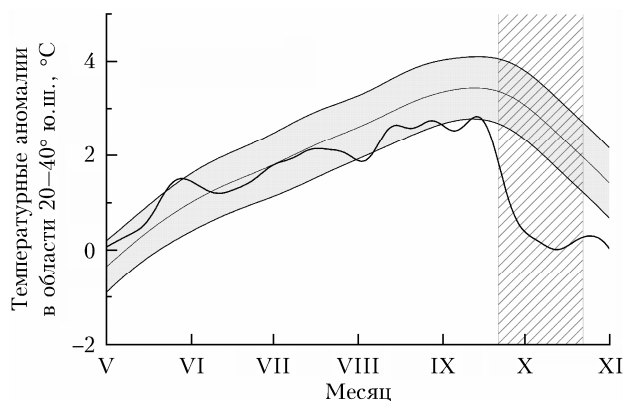


Рис. 3. Внутригодовые изменения потока турбулентного тепла в области 45–75° ю.ш. на высоте 100 гПа в период с мая по октябрь 2002 г. на фоне средних значений за 1979–2018 гг. с интервалами среднеквадратичных отклонений ($\pm 1\sigma$)

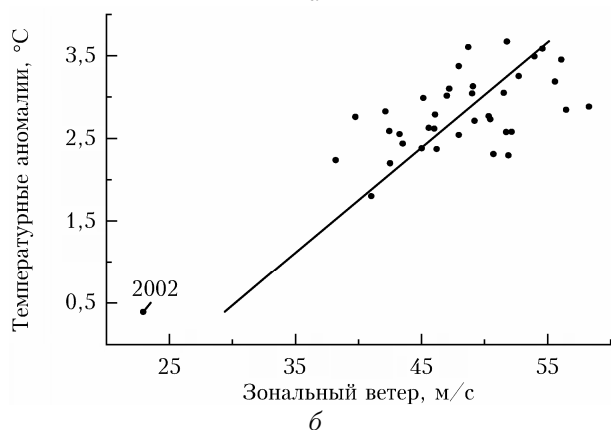
и во второй половине сентября 2002 г. При этом наибольшая интенсивность регистрировалась 22 сентября, т.е. за три дня до расщепления полярного вихря.

Ослабление полярного вихря, при котором он становится подверженным влиянию планетарных волн, происходит при уменьшении стратосферного меридионального температурного градиента [13, 14, 23, 24]. В 2002 г. уменьшение температурного градиента, вероятно, происходило в результате аномального понижения температуры нижней субтропической стратосферы. На рис. 4, а показан временной ход значений температуры в области 20–40° ю.ш. в нижней стратосфере на высоте 70 гПа (~18 км) с июля по декабрь 2002 г. в сравнении со средними значениями за 1979–2018 гг. по данным реанализа ERA-Interim [17]. Для получения температурных аномалий из ежедневных данных вычитались среднегодичные значения за соответствующий год. Как видно из рис. 4, в августе значения температуры нижней субтропической стратосферы стали ниже климатической нормы, а с середины сентября наблюдалось ее аномальное понижение. В частности, 22 сентября температура снизилась на 60% относительно нормы, в то время как 17 сентября ее значения еще находились в пределах среднеквадратичного отклонения. Наиболее значительное понижение температуры относительно климатической нормы наблюдалось с 21 сентября по 22 октября 2002 г. (на рис. 4, а этот период выделен заштрихованным прямоугольником).

На рис. 4, б приведена диаграмма рассеяния усредненных за период с 21 сентября по 22 октября значений скорости зонального ветра на 60° ю.ш. на высоте 50 гПа и температурных аномалий в области 20–40° ю.ш. на высоте 70 гПа с 1979 по 2018 г. Для получения температурных аномалий из усредненных за исследуемый период значений вычитались среднегодичные значения за соответствующий год. Очевидна сильная корреляционная зависимость между температурой нижней субтропической стратосферы и активностью полярного вихря: коэффициент корреляции $R = 0,72$ при $P = 2,15 \cdot 10^{-7}$ (вероятность P характеризует возможность того, что



а



б

Рис. 4. Внутригодовые изменения аномалий температуры в области 20–40° ю.ш. на высоте 70 гПа с июля по декабрь 2002 г. на фоне средних значений за 1979–2018 гг. с интервалами среднеквадратичных отклонений ($\pm 1\sigma$) (а). Диаграмма рассеяния усредненных за период с 21 сентября по 22 октября значений зонального ветра на 60° ю.ш. на высоте 50 гПа и температурных аномалий в области 20–40° ю.ш. на высоте 70 гПа за 1979–2018 гг. (б)

в генеральной совокупности связь между исследуемыми параметрами отсутствует; при $P < 10^{-4}$ корреляция считается статистически значимой). При расчете R был исключен 1991 г., когда после извержения вулкана Пинатубо наблюдалось аномальное потепление. Как было показано в [11, 12], потепление нижней субтропической стратосферы в весенний период способно приводить к усилению антарктического полярного вихря в результате увеличения стратосферного меридионального температурного градиента. В свою очередь, уменьшение температурного градиента приводит к ослаблению полярного вихря [23, 24]. Как видно из рис. 4, б, в 2002 г. ослабление полярного вихря могло происходить в результате аномального понижения температуры субтропической стратосферы, которое способствовало уменьшению температурного градиента.

Заключение

В работе рассмотрена динамика антарктического полярного вихря в период его расщепления 25 сентября 2002 г. Необратимый характер в поведении

полярного вихря наблюдался со второй половины сентября, при этом первые признаки последующих изменений прослеживались уже с конца августа. Несмотря на то, что полное разрушение полярного вихря произошло в начале ноября, ПСО отсутствовали уже с начала октября, что характеризует частично восстановившийся в октябре полярный вихрь как достаточно слабый.

Раннее разрушение антарктического полярного вихря весной 2002 г. наблюдалось в результате проникновения в нижнюю стратосферу вертикально распространяющихся планетарных волн. Аномальное увеличение потока турбулентного тепла в нижней стратосфере наблюдалось главным образом в конце сентября 2002 г. с пиком интенсивности, зарегистрированным за три дня до расщепления полярного вихря. В [11, 12] была показана роль повышения температуры нижней субтропической стратосферы в усилении антарктического полярного вихря. Весной 2002 г. наблюдалось аномальное понижение температуры нижней субтропической стратосферы. Предполагается, что похолодание в субтропиках привело к уменьшению стратосферного меридионального температурного градиента и последующему ослаблению полярного вихря, после которого наблюдалось его расщепление под действием планетарных волн.

Выражаю благодарность члену-корреспонденту РАН, доктору физико-математических наук, профессору В.В. Зуеву за ценные советы и полезные замечания, полученные в ходе работы над статьей.

Исследование выполнено в рамках государственной темы № АААА-А17-117013050038-7.

1. *Limpasuvan V., Thompson D.W.J., Hartmann D.L.* The life cycle of the Northern Hemisphere sudden stratospheric warmings // *J. Climate*. 2004. V. 17, N 13. P. 2584–2596.
2. *Torre L., Garcia R.R., Barriopedro D., Chandran A.* Climatology and characteristics of stratospheric sudden warmings in the Whole Atmosphere Community Climate Model // *J. Geophys. Res. D*. 2012. V. 117, N 4. P. D04110.
3. *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. D*. 2009. V. 114, N 18. P. 18302.
4. *Abridged final report of the seventh session of the commission for atmospheric sciences, Manila, 27 February – 10 March 1978.* Geneva: WMO, 1978. Report N 509. 113 p.
5. *Ageyeva V.Yu., Gruzdev A.N., Elokhov A.S., Mokhov I.I., Zueva N.E.* Sudden stratospheric warmings: Statistical characteristics and influence on NO₂ and O₃ total contents // *Izv. Atmos. Oceanic Phys.* 2017. V. 53, N 5. P. 477–486.
6. *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.
7. *Feng W., Chipperfield M.P., Roscoe H.K., Remedios J.J., Waterfall A.M., Stiller G.P., Glatthor N., Höpfner M., Wang D.-Y.* Three-dimensional model study of the Antarctic ozone hole in 2002 and comparison with 2000 // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62, N 3. P. 822–837.
8. *Hoppel K., Bevilacqua R., Allen D., Nedoluha G., Randall C.* POAM III observations of the anomalous 2002 Antarctic ozone hole // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30, N 7. P. 1394.
9. *Kondragunta S., Flynn L.E., Neuendorffer A., Miller A.J., Long C., Nagatani R., Zhou S., Beck T., Beach E., McPeters R., Stolarski R., Bhartia P.K., DeLand M.T., Huang L.-K.* Vertical structure of the anomalous 2002 Antarctic ozone hole // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62, N 3. P. 801–811.
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.
11. *Zuev V.V., Savelieva E.* The cause of the spring strengthening of the Antarctic polar vortex // *Dynam. Atmos. Oceans*. 2019. V. 87. P. 101097.
12. *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.
13. *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. D*. 2002. V. 107, N 24. P. ACL28.
14. *Kirchner I., Stenchikov G.L., Graf H.-F., Robock A., Antuca J.C.* Climate model simulation of winter warming and summer cooling following the 1991 Mount Pinatubo volcanic eruption // *J. Geophys. Res. D*. 1999. V. 104, N 16. P. 19039–19055.
15. *Newman P.A.* Chemistry and dynamics of the Antarctic ozone hole // *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry*. Geophys. Monograph Ser. 2010. V. 190. P. 157–171.
16. *Solomon S.* Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history // *Rev. Geophys.* 1999. V. 37, N 3. P. 275–316.
17. *Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hylm E.V., Isaksen I., Kellberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavalato C., Thépaut J.-N., Vitart F.* The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 2011. V. 137, N 656. P. 553–597.
18. *Goddard Space Flight Center (GSFC).* NASA's Ozone Hole Watch Web Site (online database) [Electronic resource] URL: <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/SH.html> (last access: 20.07.2019).
19. *Finlayson-Pitts B.J., Pitts J.N.* Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments, and Applications. California: Academic Press, 2000. 969 p.
20. *Solomon S., Garcia R.R., Rowland F.S., Wuebbles D.J.* On the depletion of Antarctic ozone // *Nature*. 1986. V. 321. P. 755–758.
21. *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.
22. *Polvani L.M., Waugh D.W.* Upward wave activity flux as a precursor to extreme stratospheric events and subsequent anomalous surface weather regimes // *J. Climate*. 2004. V. 17, N 18. P. 3548–3554.

23. *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.

24. *Manney G.L., Sabutis J.L.* Development of the polar vortex in the 1999–2000 Arctic winter stratosphere // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27, N 17. P. 2589–2592.

E.S. Savelieva. **Dynamics of the Antarctic polar vortex during the 2002 sudden stratospheric warming.**

In September 2002, the sudden stratospheric warming (SSW) was observed over the Antarctic as a result of the polar vortex splitting. The unusually early breakdown of the Antarctic polar vortex in spring 2002 was caused by the increased activity of vertically propagating planetary waves. The dynamics of the south polar vortex during SSW of 2002 is investigated. An unusual temperature decrease in the lower subtropical stratosphere, which contributed to a decrease in the stratospheric meridional temperature gradient is considered a possible cause of the weakening of the polar vortex, which preceded its splitting under the influence of planetary waves.