

## ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА, ОБУСЛОВЛЕННАЯ КРУПНОМАСШТАБНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В СТРАТОСФЕРЕ

Е.А. Дробашевская, А.И. Погорельцев, С.П. Смышляев

## VARIABILITY OF THE OZONE CONTENT DUE TO LARGE-SCALE DYNAMICAL PROCESSES IN THE STRATOSPHERE

E.A. Drobashvskaya, A.I. Pogoreltsev, S.P. Smyshlyayev

Рассматривается влияние динамических факторов на содержание озона в зимней стратосфере, а именно влияние планетарных волн на устойчивость циркумполярного вихря, температуру полярной стратосферы и содержание озона и других газовых примесей. Анализ проводился на основе спутниковых данных. Полученные результаты сравнивались с данными реанализа (MERRA). Кратко обсуждаются возможные механизмы, ответственные за взаимодействие химических и динамических процессов, которые могут приводить к понижению содержания озона.

Influence of dynamical factors on the ozone content in the winter stratosphere is investigated. The influence of planetary waves on the stability of circumpolar vortex, stratosphere temperature, and content of ozone and other trace gases is considered. Firstly we analyzed satellite data. The results obtained are compared with the reanalysis data (MERRA). The possible mechanisms responsible for the interaction of chemical and dynamical processes are shortly discussed.

Изменчивость состава и структуры стратосферы полярных районов характеризуется своими особенностями, не отмечаемыми в других районах земного шара. К таким особенностям, прежде всего, относятся: формирование циркумполярного вихря, изолирующего стратосферу высоких широт от обмена теплом и массой со средними широтами [Harvey et al., 2002], образование полярных стратосферных облаков (ПСО) [Hamil, Toon, 1991], гетерогенная активация хлорных и бромных газов на поверхности ПСО [Solomon et al., 1986], денитрификация и дегидратация полярной стратосферы [Peter and Groob, 2012] и формирование областей низкого содержания озона, именуемых «озоновыми дырами» [Solomon, 1999]. Процессы формирования и развития озоновых аномалий в Антарктике и Арктике существенно различаются: если в Антарктике озоновые дыры регистрируются практически каждый год, начиная с середины 80-х гг. XX в. [WMO, 2014], то в Арктике значительное уменьшение содержания озона отмечается лишь в отдельные годы и не достигает такой глубины, как в Антарктике [Strahan et al., 2013].

Основной причиной наблюдаемых различий между формированием озоновых полярных аномалий в северном и южном полушариях является разная устойчивость циркумполярного вихря. Если в Антарктике он формируется в начале зимы и стабильно сохраняется в течение нескольких месяцев, охватывая практически весь внетропический регион [Nash et al., 1996], то в Арктике полярный циклон чаще всего разрушается в течение зимы в результате нелинейного взаимодействия с планетарными волнами во время событий внезапных стратосферных потеплений [Holton, 1980; McIntyre, 1982; Погорельцев и др., 2014]. В результате воздух полярной стратосферы перемешивается с воздухом средних широт, температура полярной нижней стратосферы повышается, полярные стратосферные облака появляются лишь на короткое время, гетерогенная активация в полной мере не происходит и озоновые дыры не формируются [Chipperfield, Jones, 1999].

Причиной различной устойчивости циркумполярного вихря в северном и южном полушариях

может быть разная волновая активность на границе полярных и умеренных широт [Haynes et al., 1991]. Распространяющиеся из тропосферы в стратосферу орографические стационарные планетарные волны в антарктическом регионе слабее, чем в Арктике, так как в южном полушарии на границе полярных и умеренных широт в основном находится водная поверхность, а в северном полушарии – материковая часть. Слабые планетарные волны оказывают малое воздействие на средний поток, в результате чего в стратосфере зональная скорость мало меняется во времени, основной перенос массы и тепла осуществляется вокруг полюса и обмена между умеренными и полярными широтами не происходит [Newman et al., 2001]. При сильной волновой активности, характерной для зимы северного полушария, распространяющиеся из тропосферы планетарные волны воздействуют на средний поток в стратосфере, нарушают стабильность зонального переноса вокруг полюса, что приводит к разрушению или делению циркумполярного вихря [Vargin, 2013], обмену теплом и массой между средними и полярными широтами и потеплению полярной стратосферы [Huck et al., 2005].

Между тем, и в Антарктике и в Арктике наблюдается довольно значительная межгодовая изменчивость, как глубины озоновых аномалий, так и площади зоны, охваченной озоновой дырой [Huck et al., 2005]. Как показывают результаты наблюдений, в первые весенние месяцы колебание среднего по полярной зоне общего содержания озона (рис. 1) от года к году может достигать до 100 ед. Добсона [Stolarski, Frith., 2006; Chehade et al., 2014]. Содержание хлорных и бромных малых газовых составляющих, которые, как считается в соответствии с современными представлениями, являются основными разрушителями озона в период формирования озоновых дыр [Solomon, 1999], в нижней стратосфере остается в последнее время стабильным и не подверженным значительной межгодовой изменчивости [Newman et al., 2007]. В этой ситуации причиной межгодовой изменчивости процессов формирования полярных озоновых аномалий могут быть не связан-

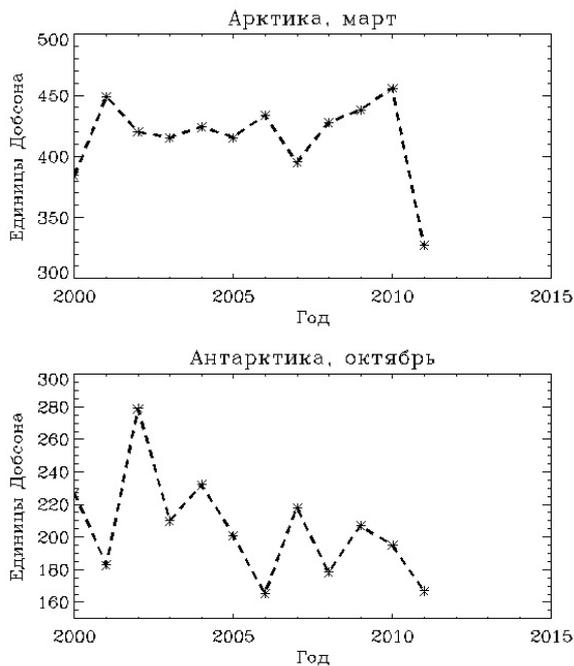


Рис. 1. Межгодовая изменчивость общего содержания озона полярной весной в северном (верх) и южном (низ) полушариях по результатам наблюдений TOMS и SBUV.

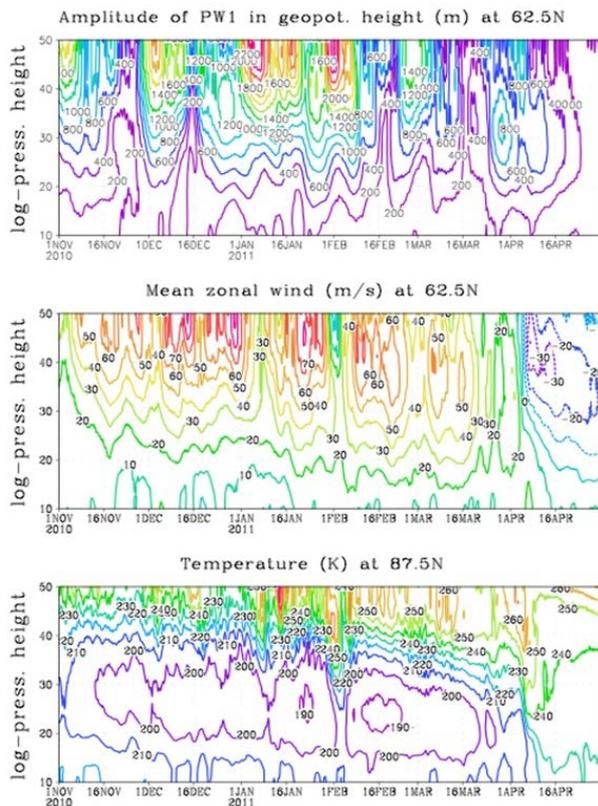


Рис. 2. Высотно-временные сечения амплитуды зональной гармоники в поле геопотенциальной высоты и среднего зонального ветра на  $62.5^\circ\text{N}$  (верхняя и средняя панель) и температура на  $87.5^\circ\text{N}$  (нижняя панель) в период с 01.11.2009 по 01.05.2010 г. (MERRA).

ные с орографическими особенностями вариации волновой активности, регистрируемые в обоих полушариях [Huck et al., 2005; Strahan et al., 2013]. В свою очередь, межгодовая изменчивость волновой активности внетропической стратосферы может быть

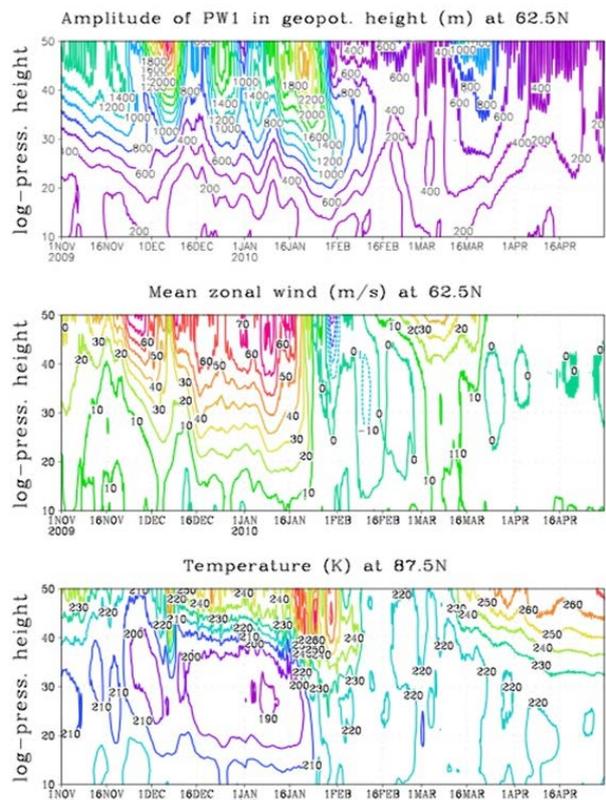


Рис. 3. Высотно-временные сечения амплитуды зональной гармоники в поле геопотенциальной высоты и среднего зонального ветра на  $62.5^\circ\text{N}$  (верхняя и средняя панель) и температура на  $87.5^\circ\text{N}$  в период (нижняя панель) 01.11.2010 по 01.05.2011 г. (MERRA).

обусловлена изменениями температуры поверхности океана (ТПО), приводящими к изменениям вертикального потока волновой активности из тропосферы в стратосферу [Hu et al., 2014].

Для исследования влияния волновой активности на общее содержание озона в стратосфере были использованы данные реанализа MERRA. Из рис. 2 видно, что зима 2010/2011 гг., после которой последовало anomalно низкое ОСО для СП, характеризуется сильной изменчивостью, как амплитуды планетарной волны, так и интенсивности зонального потока в стратосфере. Наблюдается два события ВСП, причем первое (в первой половине января) происходит достаточно высоко – полярная область нагревается на высотах свыше 50 км. Максимальные амплитуды планетарной волны в начале января чрезвычайно большие (обычно максимальные амплитуды порядка 2000 м) и также наблюдаются достаточно высоко. В начале февраля происходит второе событие ВСП, которое более похоже на классическое – высота около 40 км. Во время этого события полярный вихрь разрушается и наблюдается даже обращение циркуляции, которое, правда, длится недолго. Зимний тип циркуляции достаточно быстро восстанавливается, а весенняя перестройка происходит относительно поздно. Совершенно иначе выглядит зима 2009–2010 гг. (см. рис. 3), характеризующаяся не такой сильной изменчивостью амплитуды планетарной волны, и не высокой интенсивностью зонального потока. После ВСП в середине января, полярный вихрь разрушается и больше

не восстанавливается, низких температур не наблюдается. Можно сделать вывод, что предшествующим озоновым аномалиям событиями являются слабая волновая активность, стабильный ЦПВ, низкие температуры в стратосфере, а наличие ВСП снижает вероятность образования озоновых аномалий.

Также можно предположить, что определяющую роль в Арктике в образовании озоновых аномалий играют волновые процессы, определяющие образование и время жизни ЦПВ, вероятность образования ПСО и в последствии химических реакций на их поверхности. В Антарктике же волновая активность скорее влияет на глубину озоновых аномалий.

Возможно, что участвовавшие в последнее время озоновые мини-дыры в Арктике являются следствием влияния изменений климата на волновую активность, циркумполярный вихрь и процессы внутри него [Pogoreltsev et al., 2009; Strahan et al., 2013].

Несмотря на то, что теоретические аспекты влияния волновой активности на общую циркуляцию атмосферы, формирование циркумполярного вихря и физические и химические процессы внутри него являются хорошо известными, многие детали взаимосвязи изменений климата, свойств подстилающей поверхности, волновой активности, устойчивости циркумполярного вихря и формирования озоновых аномалий все еще являются предметом научной дискуссии.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-17-00685).

#### *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н., Перцев Н.Н. Внезапные стратосферные потепления: роль нормальных атмосферных мод // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2014. Т. 54, № 3. С. 387–403.

Chehade W., Weber M., Burrows J.P. Total ozone trends and variability during 1979–2012 from merged data sets of various satellites // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14. P. 7059–7074.

Chipperfield M.P., Jones R.L. Relative influences of atmospheric chemistry and transport on Arctic ozone trends // *Nature*. 1999. V. 400. P. 551–554.

Hamil P., Toon O.B. Polar stratospheric clouds and the ozone hole // *Physics today*. 1991. V. 44, N 12. P. 34–42.

Harvey V.L., Pierce R.B., Hitchman M.H. A climatology of stratospheric polar vortices and anticyclones // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107, N D20, P. 4442. doi:10.1029/2001JD001471.

Haynes P.H., Marks C.J., McIntyre M.E., et al. On the “downward control” of extratropical diabatic circulations by eddy-induced mean zonal forces // *J. Atmos. Sci.* 1991. V. 48, N 4. P. 651–678.

Holton J.R. The dynamics of sudden stratospheric warmings // *Ann. Rev. Earth P1. Sc.* 1980. V. 8. P. 169–190.

Hu D.Z., Tian W.S., Xie F., et al. Effects of meridional sea surface temperature changes on stratospheric temperature and circulation // *Adv. Atmos. Sci.* 2014. V. 31, N 4. P. 888–900. doi: 10.1007/s00376-013-3152-6.

Huck P.E., McDonald A.J., Bodeker G.E., Struthers H. Interannual variability in Antarctic ozone depletion controlled by planetary waves and polar temperature // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. doi:10.1029/2005GL022943.

McIntyre M.E. How well do we understand the dynamics of stratospheric warmings // *J. Meteorol. Soc. Jap.* 1982. V. 60, N 1. P. 37–64.

Nash E.R., Newman P.A., Rosenfield J.E., Schoeberl M.R. An objective determination of the polar vortex using Ertel’s potential vorticity // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 9471–9478.

Newman P.A., Nash E.R., Rosenfield J.E. What controls the temperature of the Arctic stratosphere during the spring? // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106, N D17. doi:10.1029/2000JD000061.

Newman P.A., Nash E.R. The Unusual Southern Hemisphere Stratosphere Winter of 2002 // *J. Atm. Sci.* 2005. V. 62, N 3. P. 614–628.

Newman P.A., Daniel J.S., Waugh D.W., Nash E.R. A new formulation of equivalent effective stratospheric chlorine (EESC) // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7. P. 4537–4552.

Peter T. Groob J.U. Polar Stratospheric Clouds and Sulfate Aerosol Particles: Microphysics, Denitrification and Heterogeneous Chemistry, chap. 4, RSC Publishing, Cambridge, 2012.

Pogoreltsev A.I., Kanukhina A.Yu., Suvorova E.V., Savenkova E.N. Variability of Planetary Waves as a Signature of Possible Climatic Changes // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 71. P. 1529–1539. doi:10.1016/j.jastp.2009.05.011.

Solomon S. Stratospheric ozone depletion, A review of concepts and history // *Rev. Geophys.* 1999. V. 37. P. 275–316.

Stolarski R.S. Frith S.M. Search for evidence of trend slow-down in the long-term TOMS/SBUV total ozone data record: the importance of instrument drift uncertainty // *Atmos. Chem. Phys.* 2006. V. 6, N 12/2. P. 4057.

Strahan S.E., Douglass A.R., Newman P.A. The contributions of chemistry and transport to low arctic ozone in March 2011 derived from Aura MLS observations // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2013. V. 118. P. 1563–1576. doi:10.1002/jgrd.50181.

Solomon S., Garcia R.R., Rowland F.S., Wuebbles D.J. On the depletion of Antarctic ozone // *Nature*. 1986. V. 321. P. 755–758.

Vargin P. Stratospheric Polar Vortex Splitting in December 2009 // *Atmosphere–Ocean*. 2013. doi: 10.1080/07055900.2013.851066.

*Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия*