

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 551.51

Роль уменьшения площади арктического морского льда осенью в расщеплении полярного вихря зимой 1984/1985, 1998/1999 и 2012/2013 гг.

Е.С. Савельева, В.В. Зуев*

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

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.

В настоящей работе рассмотрены причины аномального поведения арктического стратосферного полярного вихря зимой 1984/1985, 1998/1999 и 2012/2013 гг. В исследуемые годы наблюдалось необычно раннее (с конца декабря по начало января) расщепление полярного вихря, после которого он отсутствовал более месяца или совсем не восстановился до следующей осени. Показано, что такая динамика вихря была обусловлена аномально длительным усилением активности вертикально распространяющихся планетарных волн в нижней стратосфере в течение более чем двух недель в первой половине зимы в результате рекордного уменьшения площади морского льда и соответствующего увеличения приземной температуры в районе моря Бофорта, в Канадском Арктическом архипелаге и Центральном Арктическом бассейне в ноябре.

Ключевые слова: полярный вихрь, площадь арктического морского льда, море Бофорта, Канадский арктический архипелаг, планетарные волны; polar vortex, Arctic sea ice, Beaufort Sea, Canadian Arctic Archipelago, planetary waves.

Арктический стратосферный полярный вихрь, как правило, формируется в октябре, достигает пика активности в середине зимы, после чего ослабевает и разрушается с конца зимы по весну [1, 2]. На протяжении почти всего своего жизненного цикла полярный вихрь эпизодически подвергается воздействию вертикально распространяющихся планетарных волн [3]. Внезапные стратосферные потепления (ВСП), сопровождающиеся его смещением или расщеплением под действием планетарных волн, регистрируются над Арктикой практически ежегодно [4, 5]. Воздействие планетарных волн на полярный вихрь не всегда приводит к его разрушению. Порой наблюдаются кратковременные расщепления, регистрируемые в течение нескольких дней, после чего вихрь достаточно быстро восстанавливается, и при падении температуры ниже -78°C вновь формируются полярные стратосферные облака. Такое восстановление наиболее вероятно зимой. Чаще всего большие ВСП, при которых расщепление полярного вихря распространяется в нижнюю стратосферу, происходят с конца января по март. За период с 1979 по 2018 г. выявлено всего три случая (зимы 1984/1985, 1998/1999 и 2012/2013 гг.), когда при расщеплении вихря в первой половине зимы в нижней стратосфере он не восстановился как минимум в течение месяца или до конца весны [6–9].

Зимой 1984/1985 гг., 29 декабря, наблюдалось расщепление полярного вихря, проявившееся на всех стратосферных высотах, после которого при очередной попытке восстановления полярного вихря 20 января произошло его повторное расщепление и затем разрушение [6, 7]. Зимой 1998/1999 гг. расщепление полярного вихря наблюдалось 20 декабря, восстановился он только в феврале [6, 8]. Зимой 2012/2013 гг. расщепление, проявившееся на всех стратосферных высотах, наблюдалось с 7 по 10 января; 20 января произошло повторное расщепление и полярный вихрь уже не восстановился вплоть до конца весны [6, 9]. Причиной аномально раннего его разрушения в исследуемые годы была повышенная активность планетарных волн [6].

На рис. 1 приведены временные изменения вихревого меридионального потока тепла в области $45\text{--}75^\circ$ с.ш. на уровне 100 гПа (~ 16 км) с октября по март 1984/1985, 1998/1999 и 2012/2013 гг. на фоне средних значений за 1979–2019 гг. с интервалами среднеквадратичного отклонения (СКО, $\pm 1\sigma$), полученные по данным NASA GSFC [10]. Видно, что аномальное увеличение вихревого потока тепла в нижней стратосфере в рассматриваемые годы наблюдалось главным образом в декабре и в первой половине января. В 1984/1985 гг. значения вихревого потока тепла значительно превышали СКО в период с 16 декабря по 2 января, в 1998/1999 гг. — с 26 ноября по 17 декабря и в 2012/2013 гг. — с 1 по 15 января (второй пик), т.е. во всех случаях в течение как минимум двух недель.

* Екатерина Сергеевна Савельева (esav.pv@gmail.com); Владимир Владимирович Зуев (vzuev@list.ru).

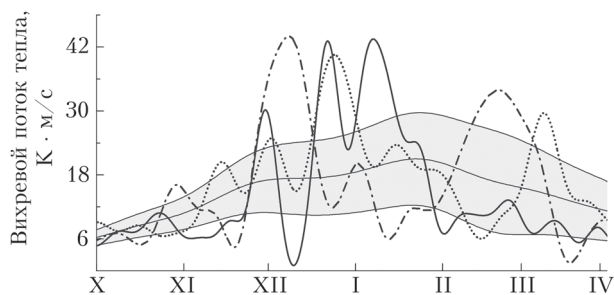


Рис. 1. Годовой ход вихревого потока тепла в области 45–75° с.ш. на уровне 100 гПа с октября по март 1984/1985 (пунктирная кривая), 1998/1999 (штрихпунктирная кривая) и 2012/2013 гг. (сплошная полужирная кривая) на фоне средних значений за 1979–2019 гг. (тонкая сплошная линия) с СКО ($\pm 1\sigma$, серая область)

В ряде работ [11–14] была выявлена связь между уменьшением площади арктического морского льда осенью и ослаблением стратосферного полярного вихря последующей зимой. В частности, в [11] исследовался стратосферный отклик уменьшения площади арктического морского льда в августе–сентябре с использованием данных реанализа ERA-Interim за 1979–2012 гг.; показано, что в условиях уменьшения площади морского льда наблюдается ослабление полярного вихря и повышение стратосферной температуры.

Связь между процессами в тропосфере и стратосфере проявляется через усиление планетарной волновой активности в результате увеличения приземной температуры, обусловленного уменьшением площади арктического морского льда. Период низких значений площади арктического морского льда характеризуется усилением вертикально распростра-

няющихся планетарных волн, особенно в области 70–90° с.ш. [11]. В [12] исследовалось ослабление полярного вихря в середине зимы вследствие истощения арктического морского льда с конца осени по начало зимы на основе рассчитанного вихревого потока тепла в области 45–75° с.ш. на уровне 100 гПа и численного моделирования моделью Community Atmospheric Model Version 5 (CAM5). Показано, что уменьшение площади льда в ноябре–декабре, особенно в акватории Баренцева и Карского морей, способствует усилению вертикально распространяющихся планетарных волн с волновыми числами 1 и 2, что приводит к ослаблению полярного вихря в январе–феврале [12]. В [6] были рассмотрены причины аномального поведения арктического стратосферного полярного вихря зимой 1984/1985, 1998/1999 и 2012/2013 гг. Показано, что аномально раннее расщепление вихря в исследуемые годы было вызвано повышенной активностью вертикально распространяющихся планетарных волн в результате аномального уменьшения площади морского льда в районе моря Бофорта, в Канадском Арктическом архипелаге и Центральном Арктическом бассейне с сентября по ноябрь.

В настоящей работе рассмотрены межгодовые изменения активности планетарных волн как основной причины необычно раннего расщепления арктического полярного вихря в рассматриваемые годы. На рис. 2, *a* приведены межгодовые изменения среднемесячных (ноябрь) значений площади морского льда, суммированных для регионов моря Бофорта, Канадского Арктического архипелага и Центрального Арктического бассейна, с 1979 по 2018 г., полученные по данным NSIDC [15]. В ноябре 1984, 1998 и 2012 гг. в этих регионах

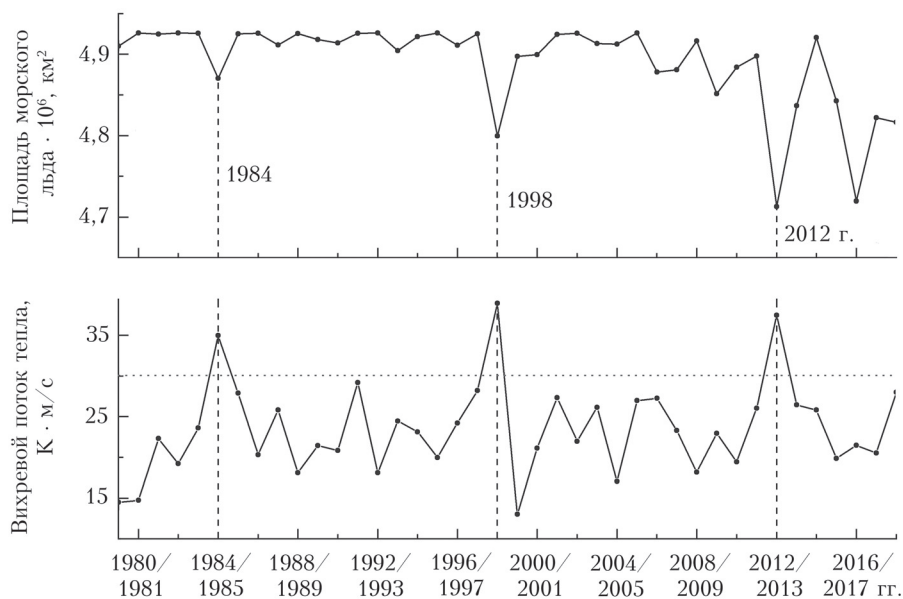


Рис. 2. Межгодовые изменения: *a* – среднемесячных (ноябрь) значений площади морского льда, просуммированных для Канадского Арктического архипелага, моря Бофорта и Центрального Арктического бассейна, с 1979 по 2018 гг.; *b* – максимальных 15-дневных средних значений вихревого потока тепла в области 45–75° с.ш. на уровне 100 гПа для первой половины зимы (1 декабря – 15 января)

наблюдалось аномальное по сравнению с предыдущими годами уменьшение площади морского льда, которое по отношению к площади льда в 1980 г. составило 1,13; 2,57 и 4,32%. Отметим, что межгодовые вариации площади морского льда в рассматриваемых регионах (рис. 2, *a*) происходят на фоне устойчивого ее уменьшения в условиях климатических изменений [16]. Десятилетняя потеря морского льда в зимние месяцы ускорилась с $-2,4\%$ за декаду с 1979 по 1999 г. до $-3,4\%$ за декаду с 2000 по 2018 г. [17].

Увеличение приземной температуры вследствие уменьшения площади льда приводит к усилению активности вертикально распространяющихся планетарных волн [11, 12]. В исследуемые годы их аномально высокая активность наблюдалась в течение не менее чем двух недель (см. рис. 1), что нехарактерно для первой половины зимы. Для анализа активности планетарных волн были получены 15-дневные средние значения вихревого потока тепла в области $45\text{--}75^\circ$ с.ш., из которых выделены максимальные значения с 1 декабря по 15 января 1979–2018 гг. по данным NASA GSFC [10] (рис. 2, *b*). Видно, что эти значения, как правило, не превышают $30 \text{ K} \cdot \text{m/s}$, за исключением 1984/1985, 1998/1999 и 2012/2013 гг., когда они достигали 35,0; 38,9 и 37,5 $\text{K} \cdot \text{m/s}$. Рекордное по сравнению с предыдущими годами уменьшение площади морского льда осенью 1984, 1998 и 2012 гг. в районе моря Бофорта, в Канадском Арктическом архипелаге и Центральном Арктическом бассейне привело к аномальному по длительности (более двух недель) усилению активности вертикально распространяющихся планетарных волн в первой половине зимы в нижней стратосфере и последующему необычайно раннему разрушению арктического стратосферного полярного вихря, после которого он отсутствовал более месяца. В ноябре 2016 г. также наблюдалось аномальное (но не рекордное) уменьшение площади морского льда в рассматриваемых регионах (рис. 2, *a*). Однако поскольку аномально длительного усиления активности планетарных волн в первой половине зимы 2016/2017 гг. не было (рис. 2, *b*: в нижней стратосфере значения вихревого потока тепла превышали $30 \text{ K} \cdot \text{m/s}$ в течение всего трех дней, с 3 по 5 января), то и необычно раннего расщепления вихря не произошло.

Таким образом, аномальное поведение арктического стратосферного полярного вихря зимой 1984/1985, 1998/1999 и 2012/2013 гг. обусловлено аномально длительным усилением активности вертикально распространяющихся планетарных волн в течение более чем двух недель в первой половине зимы в нижней стратосфере в результате рекордного уменьшения площади морского льда в районе моря Бофорта, в Канадском Арктическом архипелаге и Центральном Арктическом бассейне в ноябре. Для дополнительного подтверждения этой связи целесообразно проведение численного эксперимента. Отметим, что связь между уменьшением площади арктического морского льда осенью и последую-

щим ослаблением полярного вихря с конца зимы по весну в результате усиления активности вертикально распространяющихся планетарных волн была неоднократно показана с использованием численного моделирования в ряде работ [12–14, 18, 19].

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

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.
2. Waugh D.W., Polvani L.M. Stratospheric polar vortices // *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry. Geophys. Monogr. Ser.* 2010. V. 190. P. 43–57.
3. 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.
4. Азеева В.Ю., Груздев А.Н., Елохов А.С., Мохов И.И., Зуева Н.Е. Внезапные стратосферные потепления: статистические характеристики и влияние на общее содержание NO_2 и O_3 // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2017. Т. 53, № 5. С. 545–555.
5. Vargin P. Stratospheric polar vortex splitting in December 2009 // *Atmos.-Ocean.* 2015. V. 53, N 1. P. 29–41.
6. Zuev V.V., Savelieva E. Arctic polar vortex splitting in early January: The role of the Arctic sea ice loss // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2019. V. 195. P. 105137.
7. Zuev V.V., Savelieva E.S. Dynamics of the Arctic polar vortex during the 1984/1985 sudden stratospheric warming // *IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci.* 2019. V. 386. P. 12010.
8. Zuev V.V., Savelieva E.S. Sudden stratospheric warming effects during the winter 1998/1999 // *Proc. SPIE.* 2019. V. 11208. P. 112086F.
9. Zuev V.V., Savelieva E.S. Influence of the upward wave activity flux in the winter 2012/2013 on the Arctic polar vortex // *Proc. SPIE.* 2019. V. 11208. P. 112088M.
10. Goddard Space Flight Center (GSFC). NASA's Ozone Hole Watch Web Site (online database). URL: <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov> (last access: 19.10.2020).
11. Jaiser R., Dethloff K., Handorf D. Stratospheric response to Arctic sea ice retreat and associated planetary wave propagation changes // *Tellus A.* 2013. V. 65, N 1. P. 19375.
12. Kim B.-M., Son S.-W., Min S.-K., Jeong J.-H., Kim S.-J., Zhang X., Shim T., Yoon J.-H. Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss // *Nat. Commun.* 2014. V. 5. P. 4646.
13. Hoshi K., Ukita J., Honda M., Iwamoto K., Nakamura T., Yamazaki K., Dethloff K., Jaiser R., Handorf D. Poleward eddy heat flux anomalies associated with recent Arctic sea ice loss // *Geophys. Res. Lett.* 2017. V. 44, N 1. P. 446–454.
14. Sun L., Deser C., Tomas R.A. Mechanisms of stratospheric and tropospheric circulation response to projected Arctic sea ice loss // *J. Climate.* 2015. V. 28, N 19. P. 7824–7845.
15. Fetterer F., Knowles K., Meier W., Savoie M., Windnagel A.K. National Snow and Ice Data Center (NSIDC). Sea Ice Index. Version 3. URL: <https://doi.org/10.7265/N5K072F8> (last access: 19.10.2020).
16. Notz D., Stroeve J. Observed Arctic sea-ice loss directly follows anthropogenic CO_2 emission // *Science.* 2016. V. 354, N 6313. P. 747–750.

17. *Stroeve J., Notz D.* Changing state of Arctic sea ice across all seasons // *Environ. Res. Lett.* 2018. V. 13, N 10. P. 103001.
18. *Nakamura T., Yamazaki K., Iwamoto K., Honda M., Miyoshi Y., Ogawa Y., Tomikawa Y., Ukita J.* The stratospheric pathway for Arctic impacts on midlatitude climate // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43, N 7. P. 3494–3501.
19. *Zhang P., Wu Y., Simpson I.R., Smith K.L., Zhang X., De B., Callaghan P.* A stratospheric pathway linking a colder Siberia to Barents-Kara Sea sea ice loss // *Sci. Adv.* 2018. V. 4, N 7. P. eaat6025.

E.S. Savelieva, V.V. Zuev. **Role of Arctic sea ice loss in autumn in the polar vortex splitting in winters 1984/1985, 1998/1999, and 2012/2013.**

The Arctic stratospheric polar vortex usually forms in autumn, reaches its peak intensity in mid-winter, and decays in spring. The polar vortex strength and persistence in the winter–spring period play an important role in stratospheric ozone depletion with the return of solar radiation in late winter. In this study, we investigated the causes of the unusual weakening of the Arctic stratospheric polar vortex in winters 1984/1985, 1998/1999, and 2012/2013. The unusually early (from late December to early January) splitting of the Arctic polar vortex in those years was observed in mid-winter, after which the polar vortex did not recover for at least a month or until next autumn. We showed that such vortex dynamics was caused by an unusually prolonged increase in the activity of vertically propagating planetary waves for more than two weeks in the first half of winter in the lower stratosphere as a result of a record decrease in sea ice area and a corresponding increase in surface temperature in those years in the Beaufort Sea, the Canadian Arctic Archipelago, and the Central Arctic in November.