

УДК 551.513

Влияние стратосферного и тропосферного полярных вихрей на площадь ледового покрытия Баренцева моря в зимний период 1997/1998 и 2015/2016 гг.

В.В. Зуев, Е.С. Савельева*

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

Поступила в редакцию 23.02.2019 г.

В зимний период внутри тропосферного полярного вихря происходит понижение температуры воздуха, что, в свою очередь, отражается на увеличении площади арктического морского льда. Однако Баренцево море зимой часто оказывается у границ тропосферного вихря, где приземная температура выше, из-за чего площадь морского льда уменьшается. С использованием данных реанализа ERA-Interim и спутниковых данных NSIDC показано, что с декабря по февраль площадь арктического морского льда в районе Баренцева моря зависит от формы и расположения тропосферного полярного вихря. На примере динамики полярных вихрей в 1997/1998 и 2015/2016 гг., а также с использованием корреляционного анализа показано, что границы тропосферного полярного вихря могут приближаться по форме и расположению к стратосферному вихрю в период с декабря по март. Таким образом, уменьшение площади арктического морского льда в результате изменения границ тропосферного вихря может происходить под влиянием стратосферного полярного вихря в зимний период.

Ключевые слова: стратосферный и тропосферный полярные вихри, Баренцево море, площадь арктического морского льда, приземная температура; stratospheric and tropospheric polar vortices, the Barents Sea, Arctic sea ice extent, surface temperature.

Введение

Стратосферный и тропосферный полярные вихри представляют собой масштабные циклоны, расположенные над полярными областями [1]. Стратосферный полярный вихрь значительно устойчивее тропосферного, он простирается от тропопаузы до стратопаузы и существует с осени по весну [2]. Тропосферный полярный вихрь простирается от поверхности земли до тропопаузы и существует в течение всего года [3], он значительно масштабнее стратосферного. В зимний период этот вихрь усиливается, но его площадь незначительно уменьшается. Подобно стратосферному полярному вихрю, тропосферный способствует понижению температуры воздуха в своих пределах и препятствует проникновению воздушных масс извне, что особенно проявляется в зимний период, во время его усиления. Динамика тропосферного полярного вихря играет важную роль в движении воздушных масс в полярной тропосфере и температурном режиме над полярной областью [3]. Кроме того, вторжения экстремально холодных воздушных масс из полярного региона в средние широты у поверхности земли (cold air outbreaks) обусловлены изменениями границ арктического полярного вихря [4, 5].

В ряде работ [6–9] рассматривалось влияние уменьшения площади арктического морского льда

на атмосферную циркуляцию. Как правило, оно проявляется с осени по начало зимы [7–9]. В зимний период преобладает влияние тропосферного полярного вихря [10, 11] и региональной циклонической активности [12, 13]. При этом границы тропосферного полярного вихря могут изменяться под влиянием стратосферного полярного вихря [3, 14].

В настоящей статье исследуется влияние динамики стратосферного полярного вихря на изменения формы и расположения тропосферного вихря, проявляющиеся в увеличении приземной температуры и уменьшении площади морского льда в районе Баренцева моря в зимний период, на примере 1997/1998 и 2015/2016 гг.

Данные и методы

Среднемесячные данные скорости зонального ветра и температуры воздуха в области 30–90° с.ш. с горизонтальным разрешением 3° × 3° на высотах 50, 100, 300, 500, 700, 900 и 1000 гПа за период с октября по март 1997/1998 и 2015/2016 гг. получены из реанализа ERA-Interim European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (<http://apps.ecmwf.int/datasets>) [15]. Среднемесячные значения температуры на высотах 100, 300, 900 гПа и приземной температуры за период с 1979 по 2018 г., усредненные над районом Баренцева моря (69–81° с.ш., 18–57° в.д.), получены из реанализа ERA-Interim, среднемесячные значения площади

* Владимир Владимирович Зуев (vzuev@list.ru); Екатерина Сергеевна Савельева (kapitosh89@gmail.com).

морского льда в районе Баренцева моря за период с 1979 по 2018 г. — из National Snow and Ice Data Center (NSIDC, <http://nsidc.org>) [16]. Для анализа температурных аномалий в феврале 1998 и 2016 гг. были рассмотрены 30-летние (средние за период с 1989 по 2018 г.) поля температуры за февраль над районом Баренцева моря с горизонтальным разрешением $3^\circ \times 3^\circ$ на высотах 300, 500, 700 и 1000 гПа по данным реанализа ERA-Interim. Такой же период использовался в работе при анализе вариаций площади морского льда в акватории Баренцева моря и температуры в тропосфере над Баренцевым морем в феврале 1998 и 2016 гг. Это позволило, при наличии значительного отрицательного тренда в межгодовых изменениях площади морского льда, усилить контрасты, необходимые для иллюстрации изменений в 1998 и 2016 гг.

Влияние стратосферного полярного вихря на тропосферный вихрь зимой 1997/1998 и 2015/2016 гг.

Как правило, в зимний период Баренцево море находится внутри тропосферного полярного вихря и подвержено влиянию его низких температур. Предполагается, что зимой в результате изменения границ тропосферного полярного вихря площадь морского льда в районе Баренцева моря может уменьшаться таким образом, что Баренцево море оказывается на границе полярного вихря, где приземная температура выше. Согласно [10] одно из минимальных значений площади арктического морского льда в зимний период наблюдалось в начале 2016 г. Для исследования причин аномального уменьшения площади морского льда в районе Баренцева моря в начале 2016 г. необходимо рассмотреть внутригодовые изменения динамики стратосферного и тропосферного полярных вихрей в 2015/2016 гг. в сравнении с их динамикой в 1997/1998 гг., поскольку, согласно NSIDC, в начале 1998 г. наблюдались рекордно высокие значения площади морского льда в районе Баренцева моря для периода 1989–2018 гг.

На рис. 1 (цв. вкладка) приведены среднемесячные поля скорости зонального ветра и температуры на высоте 50 и 500 гПа (~19,9 и 5,2 км соответственно) над Арктикой с октября по март 1997/1998 и 2015/2016 гг., полученные по данным реанализа ERA-Interim. Видно, что стратосферный полярный вихрь в обоих случаях формировался в октябре и существовал с ноября по март, что проявилось в высоких значениях скорости зонального ветра и низких температурах в эти месяцы на высоте 50 гПа. Зимой 1997/1998 гг. стратосферный полярный вихрь имел более круглую форму с ярко выраженной дугой в районе Баренцева моря, из-за чего оно оказывалось полностью в пределах вихря. Зимой 2015/2016 гг. полярный вихрь был более вытянутым и располагался так, что его граница проходила над Баренцевым морем. Начиная с октября тропосферные вихри усиливались, а их размеры уменьшались. В зимний период наблюдается уменьшение сходства

тропосферных вихрей между собой и усиление их сходства со стратосферными полярными вихрями (рис. 1). В феврале 1998 и 2016 гг. схожесть расположения границ и формы стратосферных и тропосферных вихрей наиболее заметна.

Предполагается, что в зимний период тропосферный полярный вихрь попадает под влияние сильного стратосферного полярного вихря, и границы тропосферного вихря по форме и расположению в некоторой степени начинают приближаться к стратосферному. Поскольку в исследуемые годы это наиболее сильно проявлялось в феврале (см. рис. 1), на рис. 2 (цв. вкладка) распределение скорости зонального ветра в стратосфере на высотах 50 и 100 гПа (~19,9 и 15,5 км) и в тропосфере на высотах 300, 500, 700 и 900 гПа (~8,6, 5,2, 2,8 и 0,9 км) представлено для февраля 1998 и 2016 гг. Как видно на рис. 2, границы тропосферных полярных вихрей на высоте 300 гПа в значительной степени повторяют границы стратосферных на высоте 100 гПа. Выраженная дуга в скорости движения зонального ветра по границе стратосферного полярного вихря, охватывающая акваторию Баренцева моря в феврале 1998 г., проявилась на всех основных высотах тропосферного полярного вихря (300–900 гПа). Вытянутая форма стратосферного полярного вихря в феврале 2016 г. наблюдается и у тропосферного; границы обоих вихрей проходят над районом Баренцева моря.

Влияние стратосферного полярного вихря на площадь морского льда в районе Баренцева моря

Внутри стратосферного и тропосферного полярных вихрей фиксируются пониженные значения температуры, а за их пределами — повышенные. Подобие формы и расположения стратосферного и тропосферного вихрей проявляется в схожих областях пониженных и повышенных температур в стратосфере и тропосфере соответственно. В табл. 1 приведены коэффициенты корреляции R (с вероятностью P) между среднемесячными значениями температуры в нижней стратосфере (100 гПа) и верхней тропосфере (300 гПа) над районом Баренцева моря (69–81° с.ш., 18–57° в.д.) с 1979 по 2018 г., полученные по данным реанализа ERA-Interim (при $P < 10^{-4}$ корреляция считается статистически значимой). Коэффициенты корреляции, превышающие 0,6, выделены полужирным. Корреляция значений

Таблица 1

Коэффициенты корреляции между среднемесячными значениями температуры на высотах 100 и 300 гПа над Баренцевым морем с 1979 по 2018 г.

Месяц	R	P	Месяц	R	P
VII	-0,13	0,41	I	0,65	$6,0 \cdot 10^{-6}$
VIII	-0,20	0,21	II	0,81	$2,8 \cdot 10^{-10}$
IX	-0,46	0,0029	III	0,83	$3,8 \cdot 10^{-11}$
X	-0,07	0,68	IV	0,59	$5,9 \cdot 10^{-5}$
XI	0,24	0,14	V	0,34	0,029
XII	0,71	$2,8 \cdot 10^{-7}$	VI	0,12	0,47

температуры в нижней стратосфере и верхней тропосфере над Баренцевым морем была максимальной с декабря по март, а ее ослабление в январе, вероятно, связано с высокой частотой случаев внезапных стратосферных потеплений в этом месяце, способствующих сильному смещению или расщеплению стратосферного полярного вихря [17–20].

Для оценки степени влияния тропосферного полярного вихря на площадь арктического морского льда были рассчитаны среднемесячные значения температуры на высоте 900 гПа (нижняя тропосфера) над Баренцевым морем по данным реанализа ERA-Interim и значения площади морского льда в районе Баренцева моря по данным NSIDC с 1979 по 2018 г. (табл. 2). Наиболее высокие значения коэффициентов корреляции ($R \geq 0,6$ выделены полужирным) между температурой в нижней стратосфере и площадью морского льда в районе Баренцева моря были получены для периода с декабря по февраль.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между среднемесячными значениями температуры на высоте 900 гПа и площади морского льда в районе Баренцева моря с 1979 по 2018 г.

Месяц	<i>R</i>	<i>P</i>	Месяц	<i>R</i>	<i>P</i>
VII	-0,15	0,35	I	-0,83	$8,5 \cdot 10^{-11}$
VIII	-0,15	0,34	II	-0,76	$1,1 \cdot 10^{-8}$
IX	-0,50	0,0011	III	-0,40	0,011
X	-0,66	$3,9 \cdot 10^{-6}$	IV	-0,50	0,0011
XI	-0,59	$6,5 \cdot 10^{-5}$	V	-0,48	0,0015
XII	-0,76	$1,8 \cdot 10^{-8}$	VI	-0,37	0,017

Таким образом, на основе наших результатов можно утверждать, что влияние динамики стратосферного полярного вихря на площадь морского льда в результате изменения динамики тропосферного полярного вихря может проявляться с декабря по февраль.

Площадь морского льда в акватории Баренцева моря в феврале 1998 и 2016 гг.

Коэффициент корреляции между приземной температурой и площадью морского льда в районе Баренцева моря, по данным за 1989–2018 гг., в феврале составляет -0,88. На рис. 3 приведены межгодовые изменения вышеупомянутых параметров в феврале в районе Баренцева моря с 1989 по 2018 г.

На рис. 4 (цв. вкладка) показаны аномалии температуры в феврале 1998 и 2016 гг. на высотах от 300 до 1000 гПа, полученные путем вычитания из среднемесячных значений за февраль 1998 и 2016 гг. средних значений за 1989–2018 гг.

Как видно из рис. 3 и 4, в феврале 1998 и 2016 гг. действительно наблюдались аномальные (рекордно низкие и рекордно высокие) значения площади морского льда и приземных температур в районе Баренцева моря за последние 30 лет. Приземная температура в феврале 1998 г. достигала $-20,9^\circ\text{C}$, а в феврале 2016 г. $-3,6^\circ\text{C}$. Площадь морского льда в районе Баренцева моря в феврале 1998 и 2016 гг. составляла

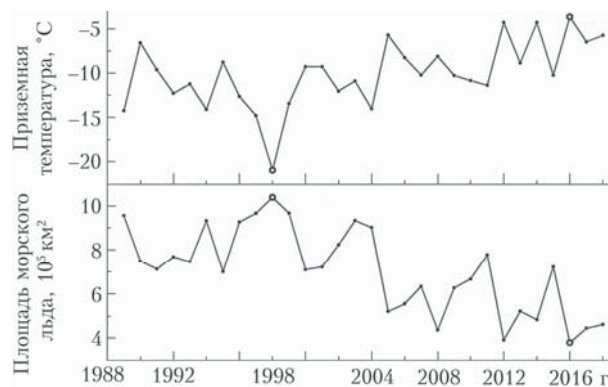


Рис. 3. Межгодовые изменения среднемесячных значений приземной температуры и площади морского льда в районе Баренцева моря за февраль с 1989 по 2018 г.

$10,4 \cdot 10^5$ и $3,8 \cdot 10^5 \text{ км}^2$ соответственно. Как видно из рис. 4, в средней и нижней стратосфере над Арктикой температуры в целом были ниже среднего в феврале 1998 г. и выше среднего в феврале 2016 г.

Заключение

В работе рассмотрено влияние динамики стратосферного полярного вихря на изменения формы и расположения тропосферного вихря, приводящие к изменению площади арктического морского льда в районе Баренцева моря в зимний период, на примере 1997/1998 и 2015/2016 гг. В осенний период уменьшение площади арктического морского льда способно приводить к усилению потоков Элиассена–Пальма, распространяющихся из тропосферы в стратосферу и способствующих ослаблению стратосферного полярного вихря [9]. Однако в зимний период, во время усиления стратосферного полярного вихря, заметно его влияние на площадь арктического морского льда. Как правило, зимой сильный стратосферный полярный вихрь влияет на форму и расположение тропосферного полярного вихря. На примере динамики стратосферного и тропосферного вихрей в 1997/1998 и 2015/2016 гг., а также на основе расчета коэффициентов корреляции между значениями температуры в нижней стратосфере и верхней тропосфере над Баренцевым морем с 1979 по 2018 г. показано, что границы тропосферного полярного вихря могут приближаться по форме и расположению к стратосферному вихрю в период с декабря по март.

Все арктические моря в основном расположены внутри полярного вихря и подвержены влиянию его низких температур. Площадь морского льда в них достигает максимальных значений зимой [21]. В Баренцевом море межгодовая изменчивость площади морского льда зимой увеличивается [22]. Тропосферный полярный вихрь усиливается и характеризуется наибольшей изменчивостью с осени по весну. Баренцево море зимой часто оказывается у границ тропосферного вихря, где приземная температура выше, что приводит к уменьшению площади морского льда.

На основе расчета коэффициентов корреляции между значениями температуры в нижней тропосфере над Баренцевым морем и площади морского льда в районе Баренцева моря с 1979 по 2018 гг. показано,

что с декабря по февраль площадь арктического морского льда в акватории Баренцева моря в значительной степени зависит от формы и расположения тропосферного полярного вихря. На примере февраля 1998 и 2016 гг., когда наблюдались максимальное и минимальное значения площади морского льда в феврале за последние 30 лет, показано, что вариации температуры над Баренцевым морем, способствующие изменению площади морского льда, проявляются в нижней, средней и верхней тропосфере и определяются изменениями границы тропосферного полярного вихря. Таким образом, изменения площади морского льда в Баренцевом море в зимний период в значительной степени обусловлены вариациями формы и расположения тропосферного полярного вихря, находящегося под влиянием стратосферного.

Исследование было выполнено в рамках государственного задания (тема № АААА-А17-117013050038-7).

1. Waugh D.W., Polvani L.M. Stratospheric polar vortices // *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry*. 2010. P. 43–57.
2. 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.
3. Waugh D.W., Sobel A.H., Polvani L.M. What is the polar vortex and how does it influence weather? // *B. Am. Meteorol. Soc.* 2017. V. 98, N 1. P. 37–44.
4. Cellitti M.P., Walsh J.E., Rauber R.M., Portis D.H. Extreme cold air outbreaks over the United States, the polar vortex, and the large-scale circulation // *J. Geophys. Res. D*. 2006. V. 111, N 2. P. D02114.
5. Li Zh., Manson A.H., Li Y., Meek C. Circulation characteristics of persistent cold spells in central-eastern North America // *J. Meteorol. Res.* 2017. V. 31, N 1. P. 250–260.
6. McKenna C.M., Bracegirdle T.J., Shuckburgh E.F., Haynes P.H., Joshi M.M. Arctic sea ice loss in different regions leads to contrasting Northern Hemisphere impacts // *Geophys. Res. Lett.* 2017. V. 45, N 2. P. 945–954.
7. Yang X.-Y., Yuan X., Ting M. Dynamical link between the Barents–Kara Sea ice and the Arctic Oscillation // *J. Climate*. 2016. V. 29, N 14. P. 5103–5122.
8. 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.
9. 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.
10. Overland J.E., Wang M. Recent extreme Arctic temperatures are due to a split polar vortex // *J. Climate*. 2016. V. 29, N 15. P. 5609–5616.
11. Li F., Wang H., Gao Y. Extratropical ocean warming and winter Arctic sea ice cover since the 1990s // *J. Climate*. 2015. V. 28, N 14. P. 5510–5522.
12. Sorteberg A., Kvingedal B. Atmospheric forcing on the Barents Sea winter ice extent // *J. Climate*. 2006. V. 19, N 19. P. 4772–4784.
13. Cullather R.I., Lim Y.-K., Boisvert L.N., Brucker L., Lee J.N., Nowicki S.M.J. Analysis of the warmest Arctic winter, 2015–2016 // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43, N 20. P. 10808–10816.
14. Black R.X. Stratospheric forcing of surface climate in the Arctic Oscillation // *J. Climate*. 2002. V. 15, N 3. P. 268–277.
15. 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., Hólm 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., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2011. V. 137, N. 656. P. 553–597.
16. Fetterer F., Knowles K., Meier W., Savoie M., Windnagel A.K. Sea Ice Index, Version 3. 2017, updated daily. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. [Electronic resource]. URL: <https://doi.org/10.7265/N5K072F8> (last access: 23.01.2019).
17. 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, N 17. P. 8115–8129.
18. Flury T., Hocke K., Haeferle 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. D18302.
19. 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. Ocean. Phys.* 2017. V. 53, N 5. P. 477–486.
20. 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.
21. Makshtas A.P., Shoutilin S.V., Andreas E.L. Possible dynamic and thermal causes for the recent decrease in sea ice in the Arctic Basin // *J. Geophys. Res. C*. 2003. V. 108, N 7. P. 3232.
22. Nakanowatari T., Sato K., Inoue J. Predictability of the Barents Sea ice in early winter: Remote effects of oceanic and atmospheric thermal conditions from the North Atlantic // *J. Climate*. 2014. V. 27, N 23. P. 8884–8901.

V.V. Zuev, E.S. Savelieva. **The influence of the stratospheric and tropospheric polar vortices on the Barents Sea ice extent during winter 1997/1998 and 2015/2016.**

A temperature decrease occurs inside the tropospheric polar vortex during winter, which is reflected in an increase in the Arctic sea ice extent. However, the Barents Sea often turns out to be at the tropospheric vortex edge in winter, where the surface temperature is higher, which leads to a decrease in sea ice extent. Based on the ERA-Interim reanalysis data and the NSIDC satellite data, we show that the Barents Sea ice extent depends on the shape and location of the tropospheric polar vortex from December to February. Based on the example of the polar vortex dynamics in 1997/1998 and 2015/2016 and using the correlation analysis, we show that the tropospheric polar vortex edge can repeat the shape and location of the stratospheric vortex from December to March. Thus, Arctic sea ice loss as a result of a change in the tropospheric vortex edge can occur under the influence of the stratospheric polar vortex in winter.

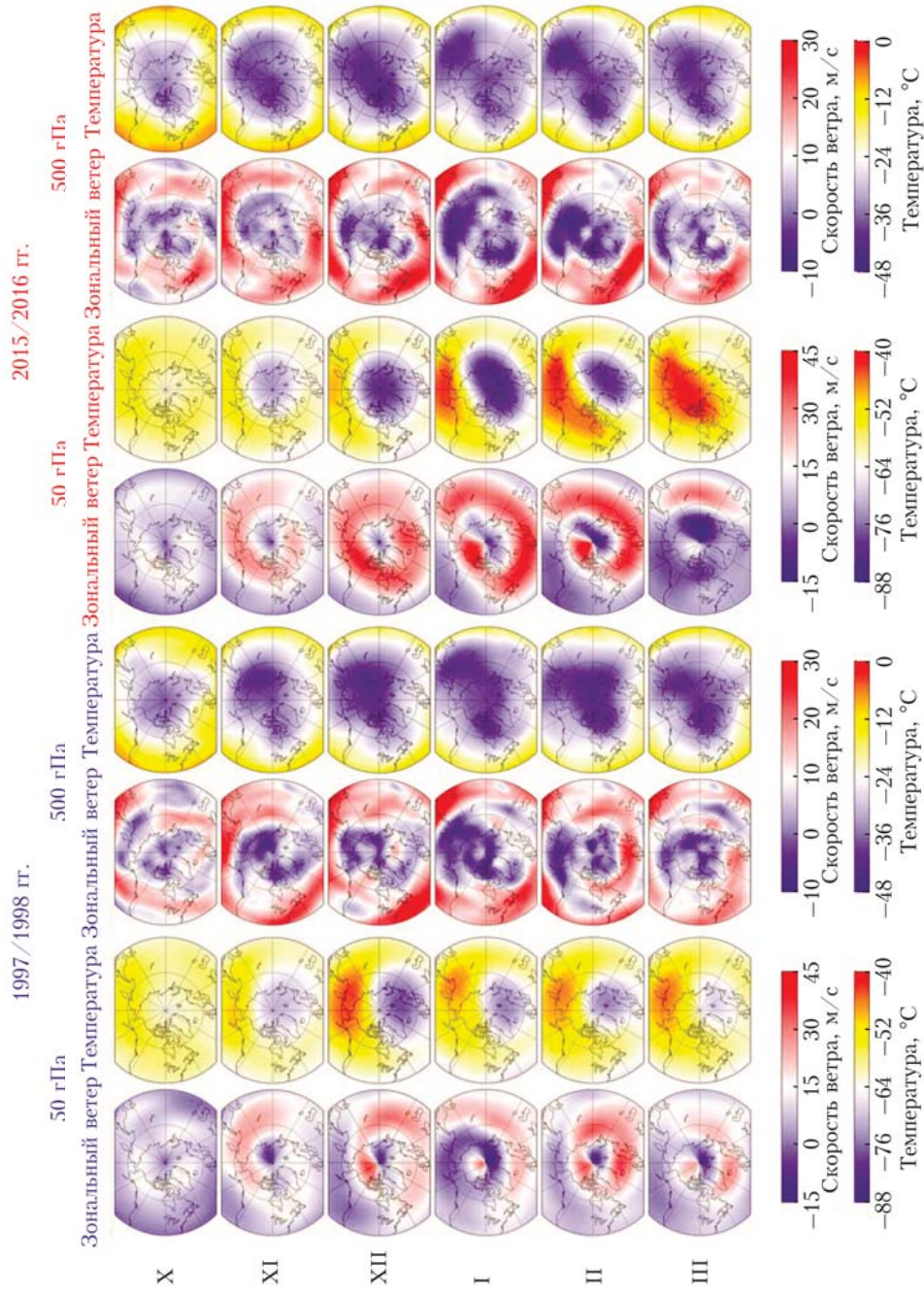


Рис. 1. Среднемесячные поля скорости зонального ветра и температуры на высоте 50 и 500 гПа над Арктикой в 1997/1998 и 2015/2016 гг.

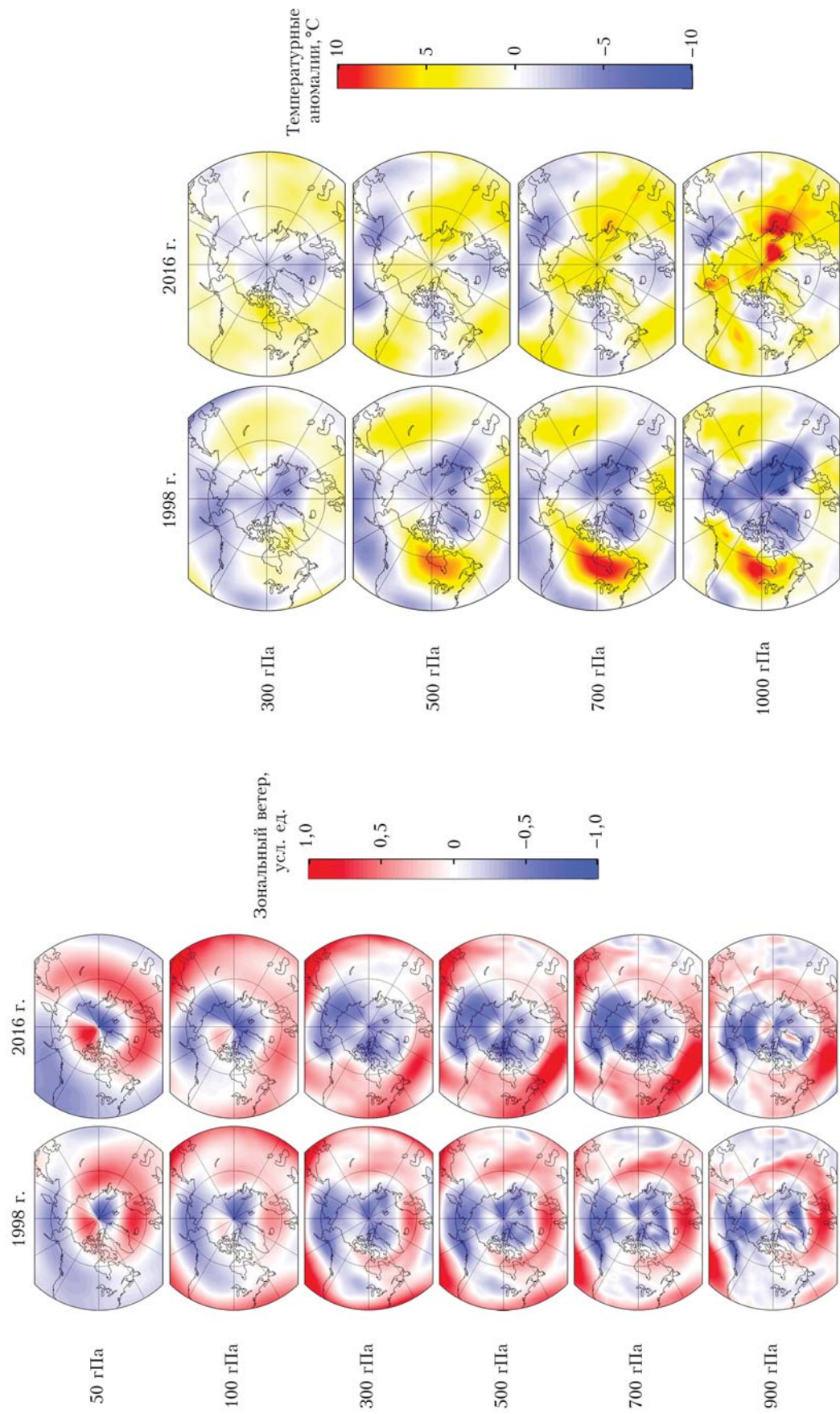


Рис. 2. Среднемесячные поля скорости зонального ветра на высотах от 50 до 900 гПа над Арктикой за февраль 1998 и 2016 гг.

Рис. 4. Разности температуры между среднемесячными значениями за февраль 1998 и 2016 гг. и средними за 1989–2018 гг. на высотах от 300 до 1000 гПа над Арктикой