

УДК 551.51

ПОСЛЕДСТВИЯ ОСЛАБЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО БАРЬЕРА АРКТИЧЕСКОГО ПОЛЯРНОГО ВИХРЯ

© 2024 г. Член-корреспондент РАН В. В. Зуев^{1,*}, Е. С. Савельева^{1,2}, Э. А. Масленникова^{1,2},
А. С. Томашова¹, В. Н. Крупчатников², О. Г. Чхетиани², М. В. Калашник²

Поступило 26.07.2023 г.

После доработки 28.09.2023 г.

Принято к публикации 30.10.2023 г.

Динамический барьер является одной из физических характеристик полярных вихрей, он препятствует проникновению внутрь вихря субполярных воздушных масс и способствует понижению температуры внутри вихря в нижней стратосфере. При наличии динамического барьера в зимний период на частицах полярных стратосферных облаков (ПСО) происходит накопление реагентов хлорного цикла разрушения озона и протекание гетерогенных реакций с образованием молекулярного хлора, а с появлением солнечного излучения над полярным регионом запускаются фотохимические реакции, приводящие к формированию масштабной озоновой аномалии. При ослаблении динамического барьера зимой происходит повышение температуры внутри вихря, разрушение частиц ПСО и, таким образом, прерывание накопления реагентов хлорного цикла на ПСО. Предложено разделение динамики арктического полярного вихря по характеру последствий на 3 типа: (1) сильный вихрь, в результате активности которого формируется озоновая аномалия, (2) слабый вихрь с разрушением зимой, знаменующимся внезапным стратосферным потеплением, (3) устойчивый вихрь с эпизодом (эпизодами) ослабления динамического барьера зимой без видимого разрушения озона в период с конца зимы по весну. В работе впервые дана характеристика динамического барьера полярного вихря на всех уровнях от 100 до 1 гПа и описаны последствия его ослабления. С использованием метода оконтуривания вихрей на основе данных реанализов ERA5 и MERRA-2 показано, что во всех случаях, когда в период с конца зимы по весну не регистрировалась полярная озоновая аномалия в условиях устойчивого полярного вихря, в середине зимы происходило ослабление динамического барьера с разрушением частиц ПСО.

Ключевые слова: арктический полярный вихрь, полярные стратосферные облака, полярные озоновые аномалии, динамический барьер, метод оконтуривания вихрей

DOI: 10.31857/S2686739724020183

Стратосферные полярные вихри представляют собой крупномасштабные объекты атмосферы с циклональным вращением. Они распространяются от тропопаузы в мезосферу и существуют с осени по весну [1]. Динамический барьер, будучи одной из физических характеристик полярных вихрей, препятствует проникновению внутрь вихря теплых, богатых озоном воздушных масс из средних и субполярных широт и тем самым способствует сохранению низких температур внутри вихря, необходимых для

формирования полярных стратосферных облаков (ПСО) [2]. В условиях устойчивого полярного вихря, характеризующегося наличием динамического барьера, ПСО, как правило, существуют на протяжении всей зимы. При ослаблении динамического барьера в нижней стратосфере вследствие локального уменьшения скорости ветра по границе вихря ниже 20 м/с происходит повышение температуры внутри вихря до значений более -78°C , сопровождающееся разрушением ПСО [3]. Полярные озоновые аномалии, формирующиеся внутри полярных вихрей в период с конца зимы по весну, образуются вследствие протекания каталитического хлорного цикла разрушения озона, начинающегося с гетерогенных реакций на поверхности ПСО [4]. “Резервуары” хлора (HCl и ClONO_2) взаимодействуют на поверхности ПСО с образованием

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

²Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова Российской Академии наук, Москва, Россия

*E-mail: vzuev@list.ru

фотохимически активного молекулярного хлора (Cl_2) и с появлением солнечного излучения над полярным регионом в конце зимы запускаются реакции разрушения озона [5]. При этом ПСО не только выступают в качестве “поверхностей” для протекания гетерогенных реакций, но и обеспечивают накопление реагентов этих реакций в течение зимы. При разрушении частиц ПСО в зимний период (вследствие ослабления динамического барьера и повышения температуры внутри вихря) вместе с ними в газовую форму переходят “резервуары” хлора и процесс накопления реагентов каталитического хлорного цикла на частицах ПСО начинается снова с восстановлением динамического барьера и понижением температуры ниже -78°C внутри вихря в нижней стратосфере. Антарктический полярный вихрь существенно сильнее и устойчивее арктического: за последние 44 года не было зафиксировано ни одного случая ослабления динамического барьера антарктического вихря в зимний период. Работа посвящена исследованию последствий ослабления динамического барьера, как одного из определяющих факторов формирования озоновой аномалии, на примере арктического полярного вихря.

Среднесуточные данные о скорости зонального и меридионального ветра, геопотенциале, температуре воздуха и массовом отношении смеси озона в области $40\text{--}90$ с.ш. с горизонтальным разрешением $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ на уровнях от 100 до 1 гПа за период с 1979 по 2022 гг. получены на основе реанализа ERA5 (<https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6>) [6]. Среднесуточные данные о площади ПСО на уровне 460 К в области $60\text{--}90^\circ$ с.ш. за период с 1979 по 2022 гг. получены на основе Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2), созданного Goddard Earth Observing System Data Assimilation System (GEOS DAS) с использованием спутниковых данных NASA Goddard Space Flight Center (GSFC; <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov>) [7]. Для анализа динамики арктического полярного вихря использовался метод оконтуривания вихрей с помощью геопотенциала [8]. В среднем за 1979–2022 гг. значение геопотенциала Φ^* в районе максимального градиента температуры по границе арктического полярного вихря на уровне 50 гПа составило $\Phi^* = (19.50 \pm 0.15) \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$. Характеристики вихря (средняя скорость ветра по границе вихря, средняя температура и среднее массовое отношение смеси озона внутри вихря) рассчитывались, основываясь на том, что граница арктического полярного вихря на уровне

50 гПа определяется значениями геопотенциала $19.5 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$.

Динамический барьер препятствует проникновению теплых воздушных масс внутрь вихря и тем самым косвенно способствует понижению температуры внутри полярного вихря в нижней стратосфере, формированию частиц ПСО и накоплению на них газовых “резервуаров” хлора, которые адсорбируются на поверхности ПСО при низких температурах. Как известно, ПСО формируются при температуре -78°C и ниже [5]. В качестве подтверждения ослабления динамического барьера в настоящей работе приводится динамика полей температуры на уровне 50 гПа или площади ПСО на уровне 460 К. Для определения правомерности такой взаимозамены на рис. 1 приведена внутрисезонная изменчивость минимальной температуры, площади с температурой $T \leq -78^\circ\text{C}$ на уровнях 30, 50 и 70 гПа и площади ПСО на уровне 460 К, а на рис. 2 показана полученная зависимость площади ПСО на уровне 460 К от площади с $T \leq -78^\circ\text{C}$ на уровне 50 гПа. Минимумы в сезонном ходе минимальной температуры совпадают с максимумами площади с $T \leq -78^\circ\text{C}$ на соответствующих уровнях: 30 гПа \sim 1 января, 50 гПа \sim 15 января и 70 гПа \sim 25 января. При этом сезонный ход, дата максимума (15 января) и диапазон изменений площади ПСО на уровне 460 К хорошо согласуются с соответствующими характеристиками площади с $T \leq -78^\circ\text{C}$ на уровне 50 гПа (рис. 1). Коэффициент корреляции между среднесуточными значениями площади ПСО и площади с $T \leq -78^\circ\text{C}$ составляет 0.99 в декабре, январе и феврале, при этом в период с 1 декабря по 1 марта коэффициент корреляции меняется в диапазоне 0.958–0.998 (рис. 2). Таким образом, можно считать, что при рассмотрении ослабления динамического барьера характеристики площадь ПСО (на 460 К) и площадь с $T \leq -78^\circ\text{C}$ (на 50 гПа) практически равносильны.

Ослабление и раннее разрушение полярного вихря происходят в результате проникновения в стратосферу вертикально распространяющихся планетарных волн Россби и сопровождается возникновением внезапных стратосферных потеплений (ВСП) [9]. Если после ВСП полярный вихрь не восстанавливается, то происходит более ранняя перестройка циркуляции стратосферы. ВСП характеризуются резким увеличением температуры в средней и нижней полярной стратосфере, наблюдающимся в результате сильного смещения или расщепления полярного

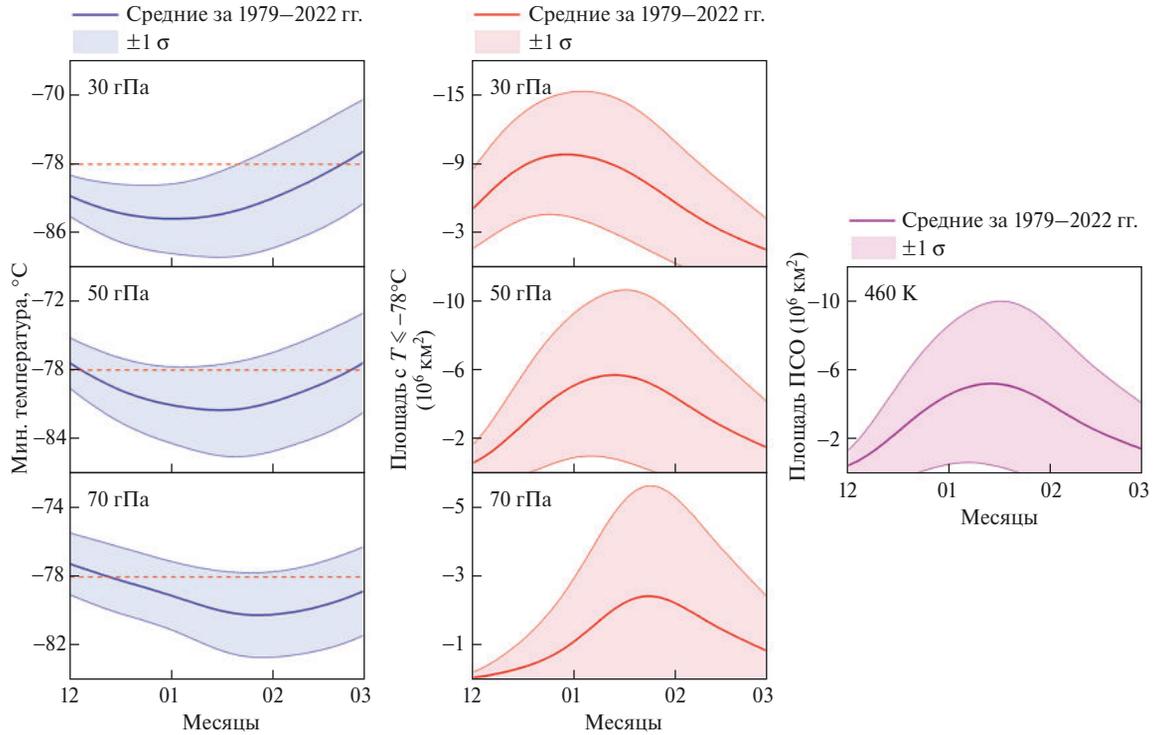


Рис. 1. Внутрисезонный ход минимальной температуры в области 60–90° с.ш., площади с температурой $T \leq -78^\circ\text{C}$ на уровнях 30, 50 и 70 гПа и площади ПСО над Арктикой на уровне 460 К в зимний период в среднем за 1979–2022 гг. со среднеквадратичными отклонениями (СКО, $\pm 1 \sigma$).

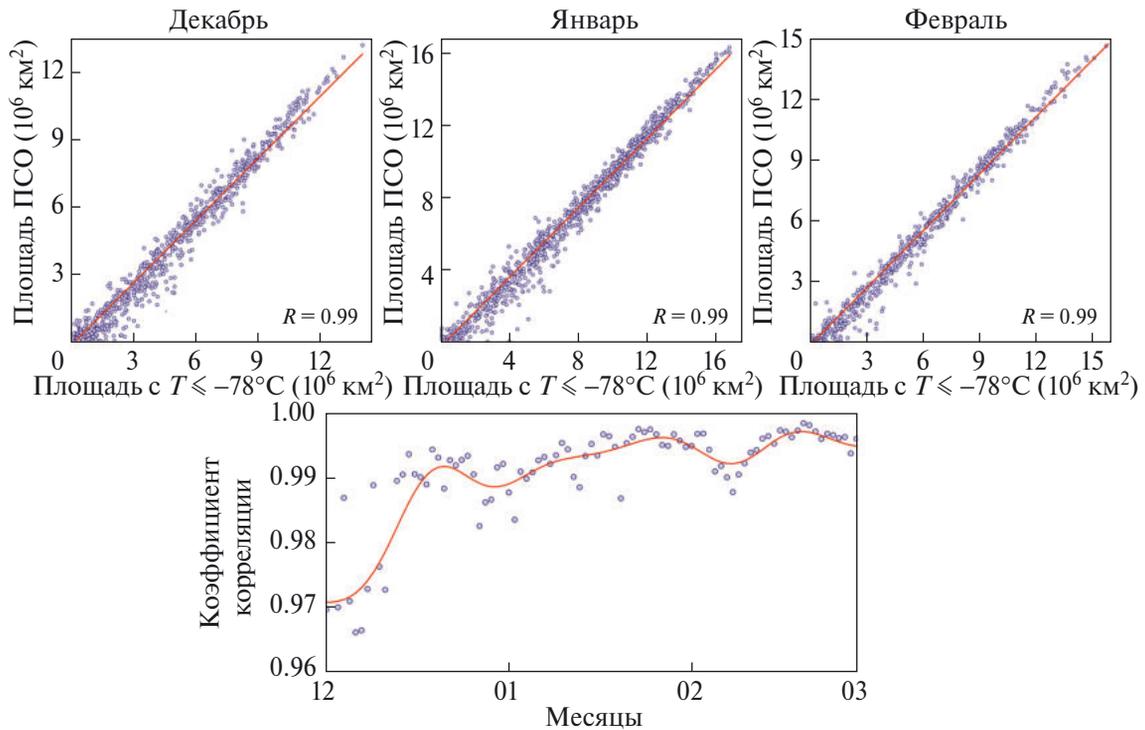


Рис. 2. Диаграммы рассеяния среднесуточных значений площади ПСО на уровне 460 К и площади с температурой $T \leq -78^\circ\text{C}$ на уровне 50 гПа за декабрь–февраль и динамика коэффициента корреляции между рассматриваемыми характеристиками с 1 декабря по 1 марта за 1979–2022 гг.

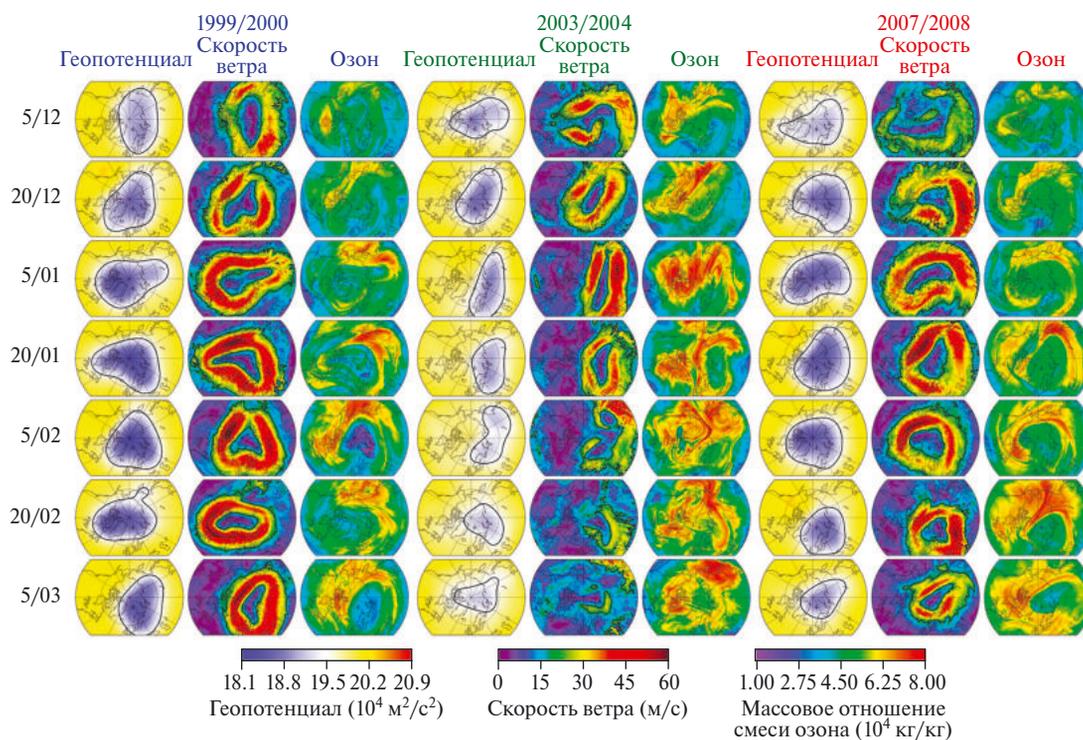


Рис. 3. Поля геопотенциала, скорости ветра и массового отношения смеси озона на уровне 50 гПа над Арктикой в период с 5 декабря по 5 марта 1999/2000, 2003/2004 и 2007/2008 гг.

вихря. ВСП над Арктикой регистрируются практически ежегодно, в одних случаях они являются следствием ослабления и последующего разрушения полярного вихря, в других – кратковременного ослабления, после которого происходит восстановление вихря. Динамику арктического полярного вихря в зимний период по характеру последствий можно разделить на 3 типа: (1) сильный вихрь, в результате активности которого формируется озоновая аномалия, (2) слабый вихрь с разрушением зимой, знаменующимся ВСП, (3) устойчивый вихрь с эпизодом (эпизодами) ослабления динамического барьера зимой без видимого разрушения озона в период с конца зимы по весну. На рис. 3 приведены примеры динамики арктического полярного вихря по характеру последствий (1999/2000 гг. – по типу 1, 2003/2004 гг. – по типу 2 и 2007/2008 гг. – по типу 3). На полях геопотенциала контуром выделена граница арктического полярного вихря ($19.5 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$), а на полях скорости ветра – динамический барьер (20 м/с). В феврале–марте 2000 г. регистрировалась озоновая аномалия [10], 5 января 2004 г. произошло ВСП [11], в зимне-весенний период 2007/2008 гг. в условиях устойчивого вихря глубокого разрушения

озона не наблюдалось. Зимой 2003/2004 гг. полярный вихрь был значительно возмущен (рис. 3, поля геопотенциала), с частыми ослаблениями динамического барьера (рис. 3, поля скорости ветра) и без видимого разрушения озона внутри вихря (рис. 3, поля озона): 5 января произошло значительное вытягивание и смещение вихря за пределы полюса (регистрировалось ВСП) с последующим постепенным разрушением. В зимне-весенний период 1999/2000 и 2007/2008 гг. прослеживается схожесть динамики полярного вихря по устойчивости, однако в 1999/2000 гг. полярный вихрь был немного сильнее (ниже значения геопотенциала внутри вихря, выше скорость ветра по границе).

На полях озона от 5 февраля и 5 марта 2000 г. хорошо прослеживаются области озоновой аномалии внутри вихря, в то время как в зимне-весенний период 2007/2008 гг. на полях озона видна граница полярного вихря (с внешней стороны накапливается озон, поступивший из средних широт в результате меридиональной циркуляции), при этом содержание озона внутри вихря меняется незначительно. На рис. 4 приведена динамика характеристик арктического полярного вихря в рассматриваемые годы: средняя

скорость ветра по границе вихря, средняя температура и среднее массовое отношение озона внутри вихря, полученные по методу оконтуривания вихрей, а также площадь ПСО. Зимой 2003/2004 гг. постепенное разрушение вихря после значительного смещения 5 января проявляется в снижении скорости ветра по границе вихря, увеличении температуры внутри вихря и повышенном содержании озона над полярной областью. После разрушения ПСО 5 января 2004 г. не наблюдалось их повторного формирования в пределах рассматриваемого зимне-весеннего периода. В 1999/2000 и 2007/2008 гг. наблюдалась схожая динамика вихря: в зимний период средняя скорость ветра по границе вихря составляла соответственно 39.9 и 35.8 м/с, средняя температура внутри вихря достигала -73.5 и -70.2°C , средний объем ПСО – 6.8 и 4.2 млн км². Среднее массовое отношение смеси озона внутри вихря с декабря по март варьировалось в диапазоне $(3.6-4.7)\cdot 10^{-6}$ кг/кг и $(4.6-5.2)\cdot 10^{-6}$ кг/кг соответственно в 1999/2000 и 2007/2008 гг. При этом зимой 2007/2008 гг. наблюдалось разрушение

ПСО (26 января, рис. 4), т.е. произошло ослабление динамического барьера, а в 1999/2000 гг. ПСО существовали непрерывно с 9 декабря по 9 марта (рис. 4).

Поскольку полярные вихри формируются осенью и разрушаются в зимне-весенний период, то каждый эпизод с осени по весну можно рассматривать как отдельный случай. В табл. 1 приведены случаи динамики арктического полярного вихря, когда внутри сильного вихря регистрировалась озоновая аномалия, когда в результате разрушения вихря зимой наблюдалось ВСП (отобранные события ВСП) и когда у относительно устойчивого полярного вихря происходило ослабление динамического барьера, зафиксированное на уровне 50 гПа (т.е. в табл. 1 все события за 1979–2022 гг. разделены по характеру последствий согласно типологии, предложенной выше). На рис. 5 приведена динамика средней скорости ветра по границе вихря, средней температуры внутри вихря, площади ПСО и среднего массового отношения смеси озона внутри вихря, усредненные за годы с озоновыми

Таблица 1. Список арктических озоновых аномалий, отобранных событий ВСП и случаев ослабления динамического барьера зимой за период с 1979 по 2022 гг.

№	Озоновые аномалии		ВСП		Ослабление динамического барьера	
	Год	Месяц	Год	Дата	Год	Дата
1	1982/1983	02.1983	1978/1979	22.02.1979	1979/1980	10.01.1980
2	1985/1986	02.1986	1980/1981	31.01.1981	1983/1984	22.12.1983
3	1986/1987	01.1987	1981/1982	24.01.1982	1987/1988	06.12.1987– 18.01.1988
4	1991/1992	01.1992	1984/1985	01.01.1985	1989/1990	22.12.1989
5	1992/1993	02.1993	1988/1989	21.02.1989	1993/1994	01–04.01.1994
6	1994/1995	02.1995	1990/1991	25.01.1991	1997/1998	05–13.01.1998
7	1995/1996	03.1996	1998/1999	26.02.1999	2006/2007	01.01.2007
8	1996/1997	03–04.1997	2000/2001	11.02.2001	2007/2008	26.01.2008
9	1999/2000	02–03.2000	2001/2002	17.02.2002	2013/2014	09–24.12.2013
10	2002/2003	01.2003	2003/2004	05.01.2004	2016/2017	16.01.2017
11	2004/2005	02–03.2005	2005/2006	21.01.2006		
12	2010/2011	03.2011	2008/2009	24.01.2009		
13	2015/2016	02.2016	2009/2010	09.02.2010		
14	2019/2020	01–04.2020	2011/2012	12.01.2012		
15	2021/2022	03.2022	2012/2013	06.01.2013		
16			2014/2015	04.01.2015		
17			2017/2018	10.02.2018		
18			2018/2019	20.12.2018		
19			2020/2021	05.01.2021		

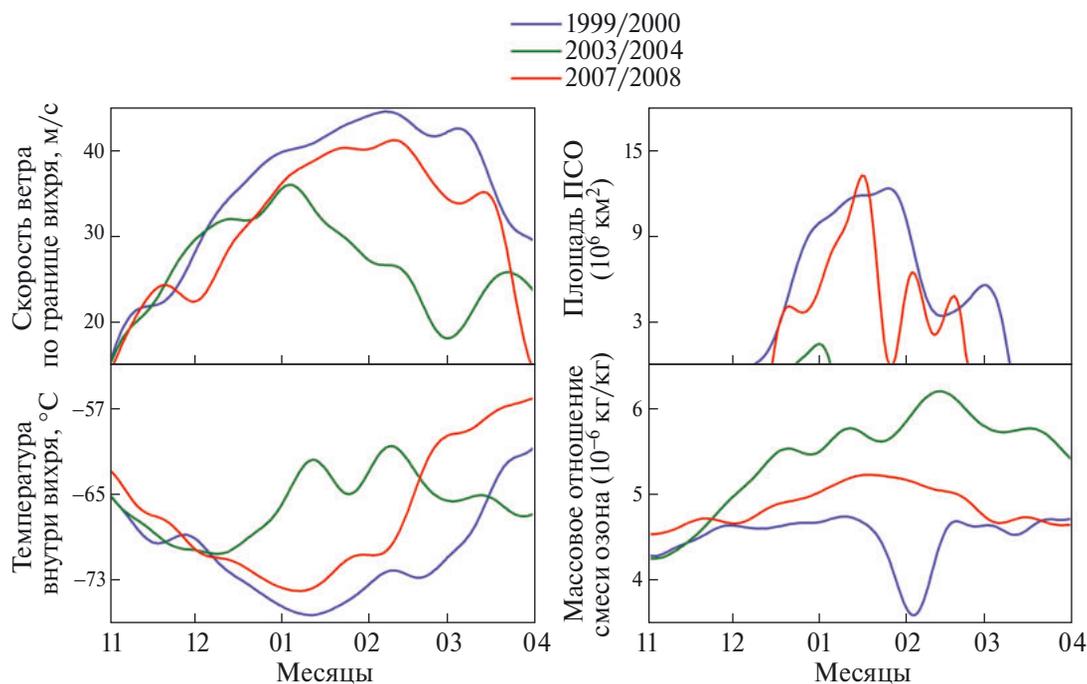


Рис. 4. Временной ход средней скорости ветра по границе вихря, средней температуры внутри вихря, среднего массового отношения смеси озона внутри вихря на уровне 50 гПа и площади ПСО на уровне 460 К над Арктикой с ноября по март 1999/2000, 2003/2004 и 2007/2008 гг.

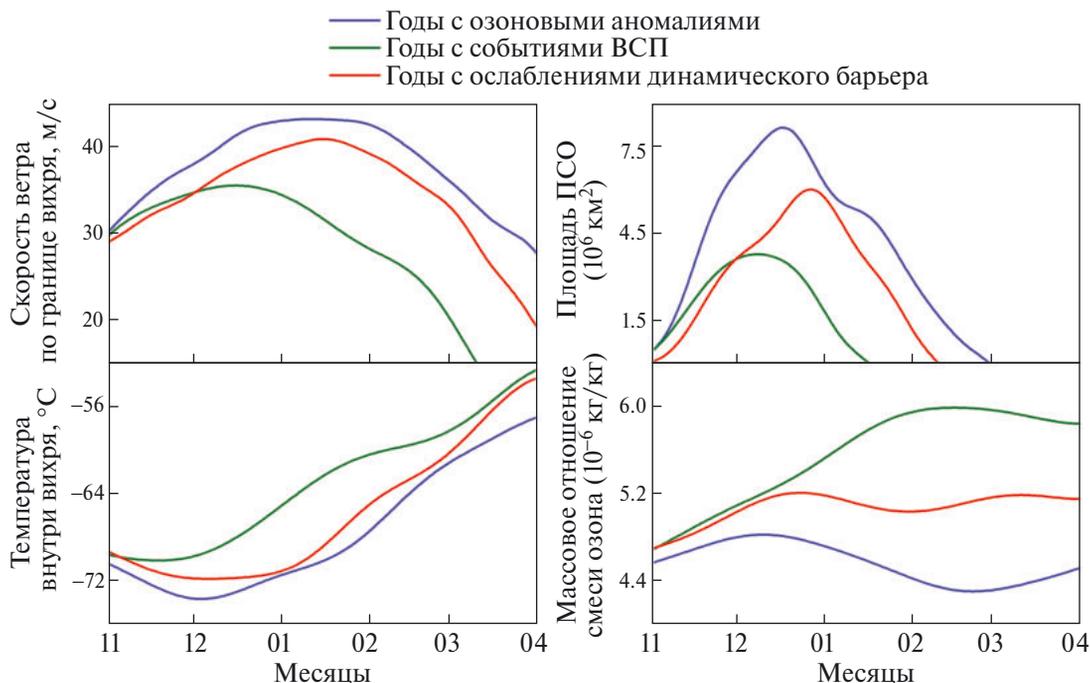


Рис. 5. Временной ход средней скорости ветра по границе вихря, средней температуры внутри вихря, среднего массового отношения смеси озона внутри вихря на уровне 50 гПа и площади ПСО на уровне 460 К над Арктикой с ноября по март в среднем за годы с озоновыми аномалиями, за годы с отобранными событиями ВСП, за годы с ослаблениями динамического барьера зимой (табл. 1).

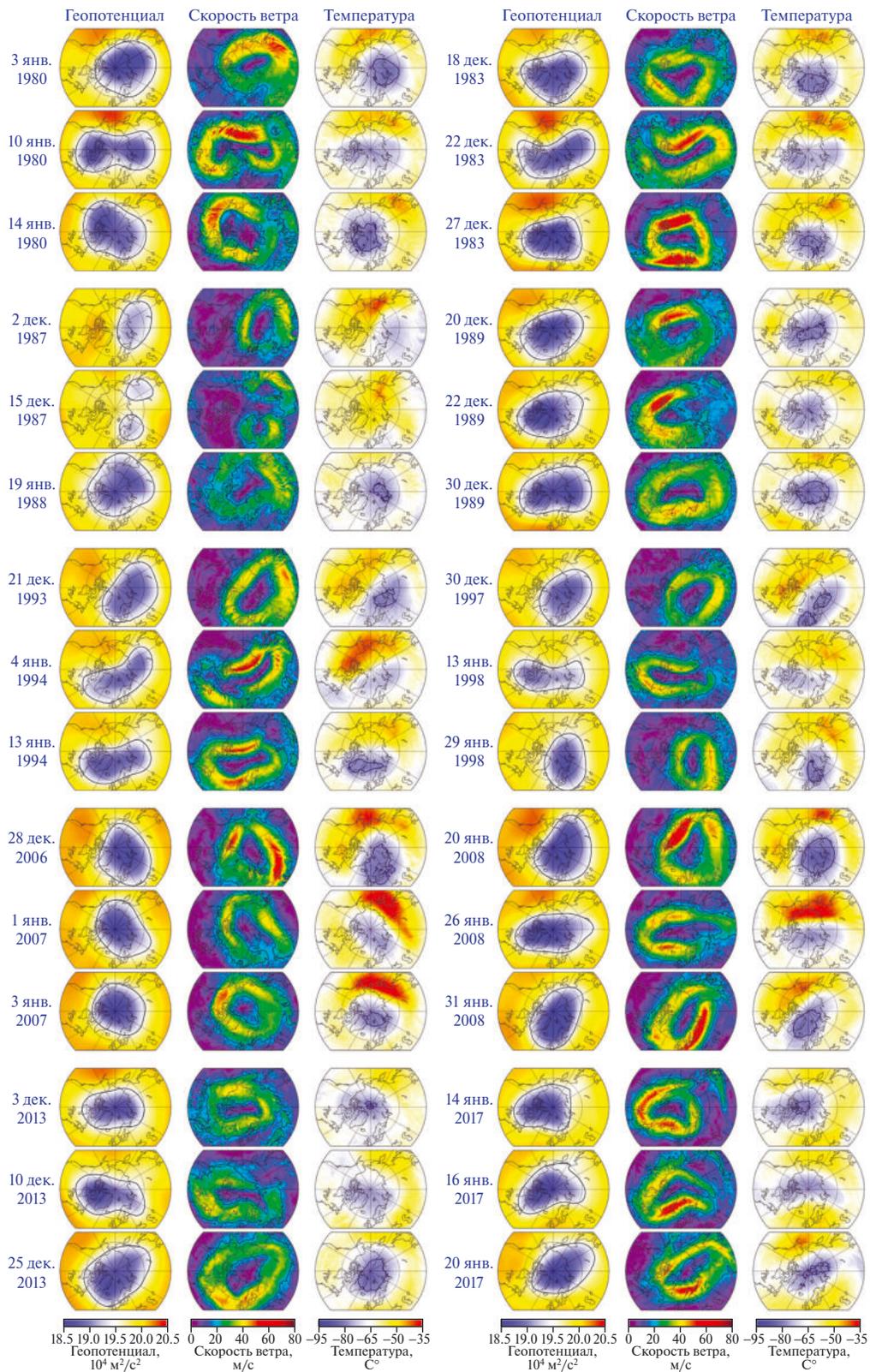


Рис. 6. Поля геопотенциала, скорости ветра и температуры на уровне 50 гПа над Арктикой зимой 1978/1980, 1983/1984, 1987/1988, 1989/1990, 1993/1994, 1997/1998, 2006/2007, 2007/2008, 2013/2014 и 2016/2017 гг.

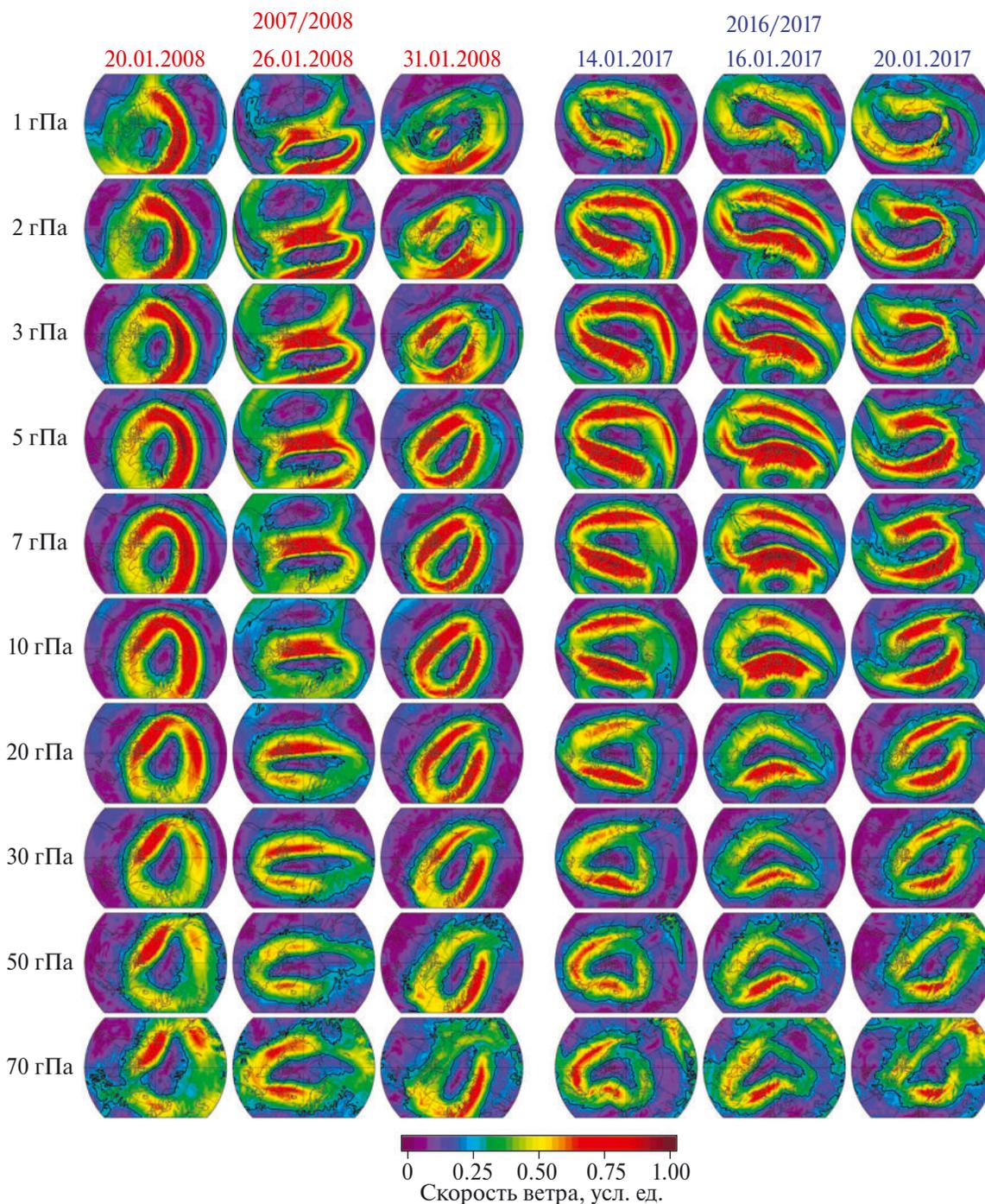


Рис. 7. Поля скорости ветра (в условных единицах) на уровнях от 70 до 1 гПа над Арктикой до, во время и после ослабления динамического барьера зимой 2007/2008 и 2016/2017 гг.

Таблица 2. Характеристики динамического барьера полярного вихря на уровнях от 100 до 1 гПа

Изобарическая поверхность													
100 гПа	70 гПа	50 гПа	40 гПа	30 гПа	20 гПа	15 гПа	10 гПа	7 гПа	5 гПа	4 гПа	3 гПа	2 гПа	1 гПа
Скорость ветра по границе вихря													
≥ 16 м/с	≥ 18 м/с	≥ 20 м/с	≥ 22 м/с	≥ 24 м/с	≥ 26 м/с	≥ 28 м/с	≥ 30 м/с	≥ 32 м/с	≥ 34 м/с	≥ 36 м/с	≥ 38 м/с	≥ 40 м/с	≥ 45 м/с

аномалиями (тип 1 согласно предложенной типологии), за годы с отобранными событиями ВСП (тип 2) и за годы с ослаблениями динамического барьера зимой (тип 3) согласно табл. 1. Случаи с озоновыми аномалиями характеризуются наиболее сильным полярным вихрем (с более высокой скоростью ветра по границе вихря, более низкой температурой внутри вихря, большей площадью ПСО). Наиболее слабый полярный вихрь наблюдается в годы с отобранными событиями ВСП (рис. 5). При этом полярный вихрь в годы с ослаблениями динамического барьера немного слабее, чем в годы с озоновыми аномалиями (скорость ветра по границе вихря зимой в среднем на 7.6% ниже), и характеризуется значительно меньшей площадью ПСО (в среднем на 35.4% ниже). Последствия описанной динамики проявляются в ходе содержания озона внутри вихря: глубокое понижение озона и его повышение наблюдались соответственно в годы с озоновыми аномалиями и в годы с отобранными событиями ВСП. При этом в годы с ослаблениями динамического барьера динамика содержания озона не отражает ни его повышения, ни понижения, что свидетельствует о том, что в эти годы полярный вихрь в этот период существовал, но разрушения озона внутри вихря практически не наблюдалось.

На рис. 6 приведена динамика арктического полярного вихря в годы с ослаблениями динамического барьера (согласно табл. 1). На полях геопотенциала линией выделены границы полярного вихря, на полях скорости ветра – динамический барьер (20 м/с), а на полях температуры – области с $T \leq -78^\circ\text{C}$. В каждом из случаев первая и третья даты характеризуются наличием динамического барьера: по всей границе вихря скорость ветра превышает 20 м/с, на полях температуры прослеживаются области с $T \leq -78^\circ\text{C}$ (искл.: 2 декабря 1987 г., когда с момента образования вихря до ослабления динамического барьера прошло недостаточно времени для понижения температуры ниже -78°C). Вторая дата в каждом из случаев на рис. 6 соответствует эпизоду ослабления динамического барьера в нижней стратосфере: локально по границе вихря наблюдалось понижение скорости ветра ниже 20 м/с, сопровождающееся увеличением температуры выше -78°C , при этом во всех случаях во время ослабления динамического барьера регистрировалось разрушение ПСО (согласно данным MERRA-2).

В табл. 2 приведены характеристики динамического барьера полярного вихря на уровнях от 100

до 1 гПа, полученные на основе значений геопотенциала, описывающих границы вихрей на рассматриваемых уровнях (согласно методу оконтуривания вихрей), и характеристики динамического барьера на уровне 50 гПа (скорость ветра ≥ 20 м/с [3, 8, 12]). Ослабление динамического барьера в нижней стратосфере приводит к повышению температуры внутри вихря (протекающему с разрушением ПСО зимой), в то время как ослабление барьера в верхней стратосфере способствует понижению температуры внутри вихря (в верхней стратосфере температура внутри вихря выше, чем за его пределами, что объясняется обратной зависимостью температуры от содержания озона, по сравнению с нижней стратосферой [13]). Ослабление динамического барьера не всегда прослеживается на протяжении всего полярного вихря: 26 января 2008 г. оно наблюдалось только на уровне 50 гПа, а 16 января 2017 г. – на уровнях от 50 до 1 гПа (рис. 7).

Таким образом, с использованием метода оконтуривания вихрей на основе данных реанализов ERA5 и MERRA-2 впервые предложена характеристика динамического барьера полярного вихря на уровнях от 100 до 1 гПа и описаны последствия его ослабления. Предложено разделение динамики арктического полярного вихря на 3 типа: сильный вихрь с озоновой аномалией, слабый вихрь с разрушением зимой и устойчивый вихрь с эпизодическим ослаблением динамического барьера зимой. Показано, что ослабление динамического барьера в нижней стратосфере приводит к разрушению частиц ПСО, в результате которого прерывается цикл накопления “резервуаров” хлора на их поверхности и в период с конца зимы по весну не регистрируется разрушения озона (в условиях устойчивого полярного вихря).

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00273, <https://rscf.ru/project/23-17-00273/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *Manney G. L., Zurek R. W., O'Neill A., Swinbank R.* On the motion of air through the stratospheric polar vortex // *J. Atmos. Sci.* 1994. V. 51. № 20. P. 2973–2994.
3. *Zuev V. V., Savelieva E.* Arctic polar vortex dynamics during winter 2006/2007 // *Polar Sci.* 2020. V. 25. P. 100532.

4. *Solomon S.* Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history // *Rev. Geophys.* 1999. V. 37. № 3. P. 275–316.
5. *Finlayson-Pitts B.J., Pitts J.N.* Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments, and Applications. California: Academic Press, 2000. 969 p.
6. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P., et al.* The ERA5 global reanalysis // *Q.J. Roy. Meteor. Soc.* 2020. V. 146. № 729. P. 1–51.
7. *Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., et al.* The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // *J. Climate.* 2017. V. 30. № 14. P. 5419–5454.
8. *Zuev V.V., Savelieva E.* Stratospheric polar vortex dynamics according to the vortex delineation method // *J. Earth Syst. Sci.* 2023. V. 132. № 1. P. 39.
9. *Limpasuvan V., Thompson D.W.J., Hartmann D.L.* The life cycle of the Northern Hemisphere sudden stratospheric warmings // *J. Climate.* 2004. V. 17. № 13. P. 2584–2596.
10. *Hoppel K., Bevilacqua R., Nedoluha G., et al.* POAM III observations of Arctic ozone loss for the 1999/2000 winter // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № 20. P. 8262.
11. *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. № 17. P. 8115–8129.
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.

CONSEQUENCES OF WEAKENING OF DYNAMIC BARRIER OF THE ARCTIC POLAR VORTEX

Corresponding member of the RAS **V. V. Zuev^{a, #}, E. S. Savel'eva^{a, b}, E. A. Maslennikova^{a, b}, A. S. Tomashova^a, V. N. Krupchatnikov^b, O. G. Chkhetiani^b, M. V. Kalashnik^b**

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

^b*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*
[#]*E-mail: vzuev@list.ru*

The dynamic barrier is one of the physical characteristics of the polar vortices; it prevents subpolar air masses from penetrating into the vortex and contributes to a temperature decrease inside the vortex in the lower stratosphere. In the presence of a dynamic barrier in winter, chlorine compounds involved in the ozone destruction cycle accumulate on particles of polar stratospheric clouds (PSCs) and heterogeneous reactions occur with the formation of molecular chlorine, and with the appearance of solar radiation over the polar region, photochemical reactions begin, leading to large-scale ozone depletion. When the dynamic barrier is weakened in winter, the temperature inside the vortex rises, PSC melts and, thus, the accumulation of chlorine cycle reagents on PSC is interrupted. We proposed dividing the Arctic polar vortex dynamics into 3 types according to the consequences: (1) the strong vortex, whose activity results in ozone depletion, (2) the weak vortex with breakdown in winter, marked by a sudden stratospheric warming, and (3) the stable vortex with an episode (episodes) weakening of the dynamic barrier in winter without ozone depletion in the period from late winter to spring. We have for the first time proposed a characteristic of the dynamic barrier of the polar vortex at all pressure levels from 100 to 1 hPa and described the consequences of its weakening. Using the vortex delineation method based on the data of the ERA5 and MERRA-2 reanalyses, we showed that in all cases when the polar ozone depletion was not recorded from late winter to spring under the conditions of the stable polar vortex, the dynamic barrier weakening and PSC melting was observed in midwinter.

Keywords: Arctic polar vortex, polar stratospheric clouds, polar ozone depletion, dynamic barrier, vortex delineation method