

УДК 551.51

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРАТОСФЕРНЫХ ПОЛЯРНЫХ ВИХРЕЙ

© 2024 г. Член-корреспондент РАН В. В. Зуев^{1,*}, Е. С. Савельева^{1,2}

Поступило 20.02.2024 г.

После доработки 11.03.2024 г.

Принято к публикации 26.03.2024 г.

Впервые представлены динамические характеристики стратосферных полярных вихрей на уровнях от 100 до 1 гПа (минимальная площадь вихря, минимальная средняя скорость ветра по границе вихря и минимальная скорость ветра, при которой сохраняется динамический барьер), рассчитанные с использованием метода оконтуривания вихрей с помощью геопотенциала на основе данных реанализа ERA5. Получены сезонные изменения и усреднённые зимние вертикальные профили площади вихря, средней скорости ветра по границе вихря и средней температуры внутри вихря для антарктического и арктического полярных вихрей. Определена среднесуточная вероятность ослабления динамического барьера по границе вихря в зимний период по данным за 1979–2021 гг. в Арктике и Антарктике. Показано, что наиболее низкая вероятность ослабления динамического барьера (и возможного разрушения полярного вихря) в зимний период прослеживается на уровнях от 30 до 3 гПа и достигает менее 50% в Арктике и менее 1% в Антарктике. На уровне 50 гПа вероятность ослабления динамического барьера составляет 53.7% в Арктике и 1.4% в Антарктике.

Ключевые слова: полярные вихри, озоновые аномалии, метод оконтуривания вихря, площадь вихря, скорость ветра по границе вихря

DOI: 10.31857/S2686739724070173

Стратосферные полярные вихри, будучи детально исследованными за последние 50 лет научными группами по всему миру, до сих пор имеют нерешённые вопросы. Первые упоминания о существовании циркумполярных западных ветров в стратосфере появились в конце 1940-х годов [1, 2]. Термин *циркумполярный вихрь* появился в работах с 1950 г. [3], а его сокращённая форма *полярный вихрь* стала распространённой с конца 1950-х—начала 1960-х годов [4]. Значительное усиление интереса к полярным вихрям наблюдалось после “открытия” озоновых дыр над Антарктидой в начале 1980-х гг. [5]. В дальнейшем была выявлена их существенная роль в формировании внезапных стратосферных потеплений, усилении стратосферно-тропосферного обмена, и даже возникновении арктических вторжений холодных масс в субполярных широтах Северного полушария [6–8]. Получение и последующий

анализ характеристик стратосферных полярных вихрей позволяет улучшить понимание последствий и особенностей их динамики. В данной работе впервые представлены динамические характеристики стратосферных полярных вихрей (в частности, площадь вихря, средняя скорость ветра по границе вихря и средняя температура внутри вихря) на уровнях от 100 до 1 гПа, полученные по методу оконтуривания вихрей с помощью геопотенциала на основе данных реанализа ERA5.

Среднесуточные данные о скорости зонального и меридионального ветра, геопотенциале, температуре воздуха и массовом отношении смеси озона в области 40–90° ш. с горизонтальным разрешением 0.25°×0.25° на уровнях от 100 до 1 гПа за период с 1979 по 2021 гг. получены по данным реанализа ERA5 [9]. Для анализа динамических характеристик стратосферных полярных вихрей использовался метод их оконтуривания с помощью геопотенциала [10]. Усреднённые за 1979–2021 гг. значения геопотенциала Φ^* в районе максимального градиента температуры по границе арктического и антарктического полярных вихрей на уровнях от 100 до 1 гПа

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

Таблица 1. Значения геопотенциала, характеризующие границы антарктического и арктического полярных вихрей на изобарических поверхностях от 100 до 1 гПа

	По границе антарктического полярного вихря ($10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$)	По границе арктического полярного вихря ($10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$)
1 гПа	44.30±0.67	44.70±0.59
2 гПа	39.60±0.56	40.10±0.44
3 гПа	36.90±0.51	37.30±0.38
5 гПа	33.60±0.44	33.90±0.35
7 гПа	31.50±0.38	31.80±0.32
10 гПа	29.30±0.33	29.50±0.30
20 гПа	25.00±0.23	25.20±0.23
30 гПа	22.50±0.20	22.70±0.20
50 гПа	19.30±0.17	19.50±0.15
70 гПа	17.20±0.14	17.50±0.15
100 гПа	15.00±0.12	15.40±0.15

приведены в табл. 1. Динамические характеристики вихря (площадь вихря, средняя скорость ветра по границе вихря, средняя температура и среднее массовое отношение смеси озона внутри вихря) рассчитывались, основываясь на значениях геопотенциала, характеризующих границы полярных вихрей (табл. 1). На данный момент существует несколько методов оконтуривания полярных вихрей. Граница полярного вихря может быть определена по максимальному градиенту потенциальной завихренности [11], или с использованием М-функции, характеризующей длину траекторий, проходящих через узлы заданной сетки [12]. Потенциальная завихренность, будучи отношением абсолютного вихря к эффективной глубине вихря, хорошо описывает динамику полярного вихря [13–15]. В свою очередь М-функция позволяет охарактеризовать региональные особенности массообмена и определить область динамического барьера по границе вихря [12, 16]. В данной работе динамика полярных вихрей рассматривается с использованием метода оконтуривания вихрей с помощью геопотенциала, поскольку он позволяет оценить основные параметры вихря (скорость ветра по границе вихря, площадь вихря, средняя температура и содержание озона внутри вихря) на основе данных реанализа ERA5, представленных на изобарических поверхностях.

В работах [10, 17] были исследованы динамические характеристики стратосферных полярных вихрей на уровне 50 гПа. Охарактеризован динамический барьер полярного вихря в нижней стратосфере, способствующий сохранению низких температур и полярных стратосферных облаков внутри вихря в зимний период. Показано, что полярный вихрь характеризуется

наличием динамического барьера на уровне 50 гПа при скорости ветра по границе вихря не менее 20 м/с. Также определены другие динамические характеристики полярного вихря на уровне 50 гПа: площадь вихря более 10 млн км² и средняя скорость ветра по границе вихря более 30 м/с. Показано, что критериями аномального ослабления полярного вихря, предшествующего его разрушению, является снижение площади вихря менее 10 млн км² и последующее уменьшение средней скорости ветра по границе вихря ниже 30 м/с на уровне 50 гПа, при которых полярный вихрь становится небольшим циклоном (характеризующимся высокими температурами и отсутствием динамического барьера) и разрушается в пределах 3-х недель. В данной работе на основе значений геопотенциала, описывающих границы полярных вихрей на уровнях от 100 до 1 гПа (табл. 1), и динамических характеристик полярного вихря на уровне 50 гПа получены и протестированы на рядах данных за 1979–2021 гг. соответствующие характеристики на уровнях от 100 до 1 гПа: минимальная площадь вихря, минимальная средняя скорость ветра по границе вихря и минимальная скорость ветра, при которой сохраняется динамический барьер (табл. 2).

На рис. 1–5 приведены полученные по методу оконтуривания с помощью геопотенциала на основе данных реанализа ERA5 среднесуточные изменения динамических характеристик стратосферных полярных вихрей (площадь вихря, средняя скорость ветра по границе вихря, средняя температура, содержание озона и геопотенциал внутри вихря) в нижней, средней и верхней стратосфере (на уровнях 50, 10 и 2 гПа) с 1979 по 2021 гг. для всех случаев,

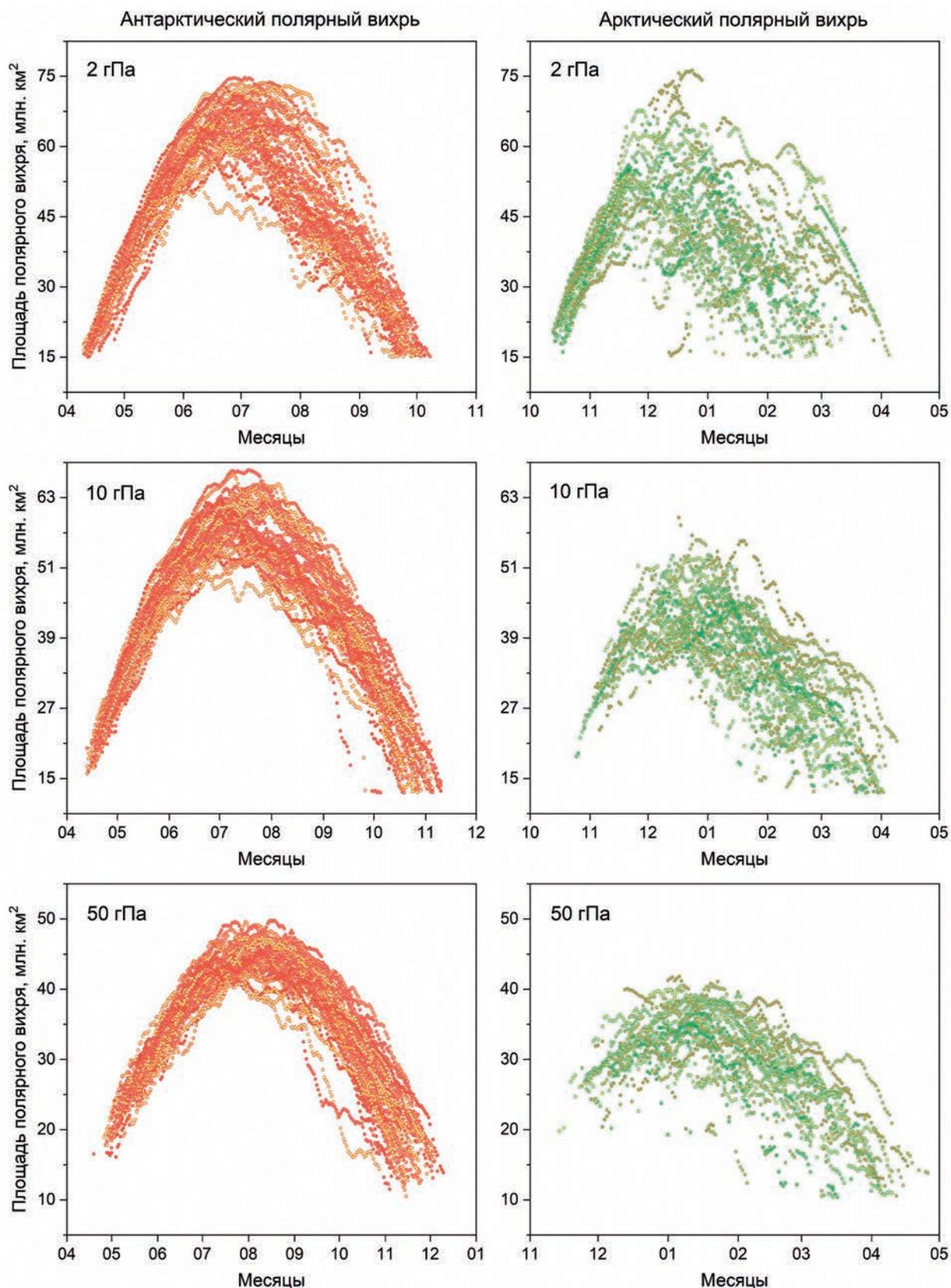


Рис. 1. Внутригодовые среднесуточные изменения площади антарктического и арктического полярных вихрей на уровнях 2, 10 и 50 гПа с 1979 по 2021 гг.

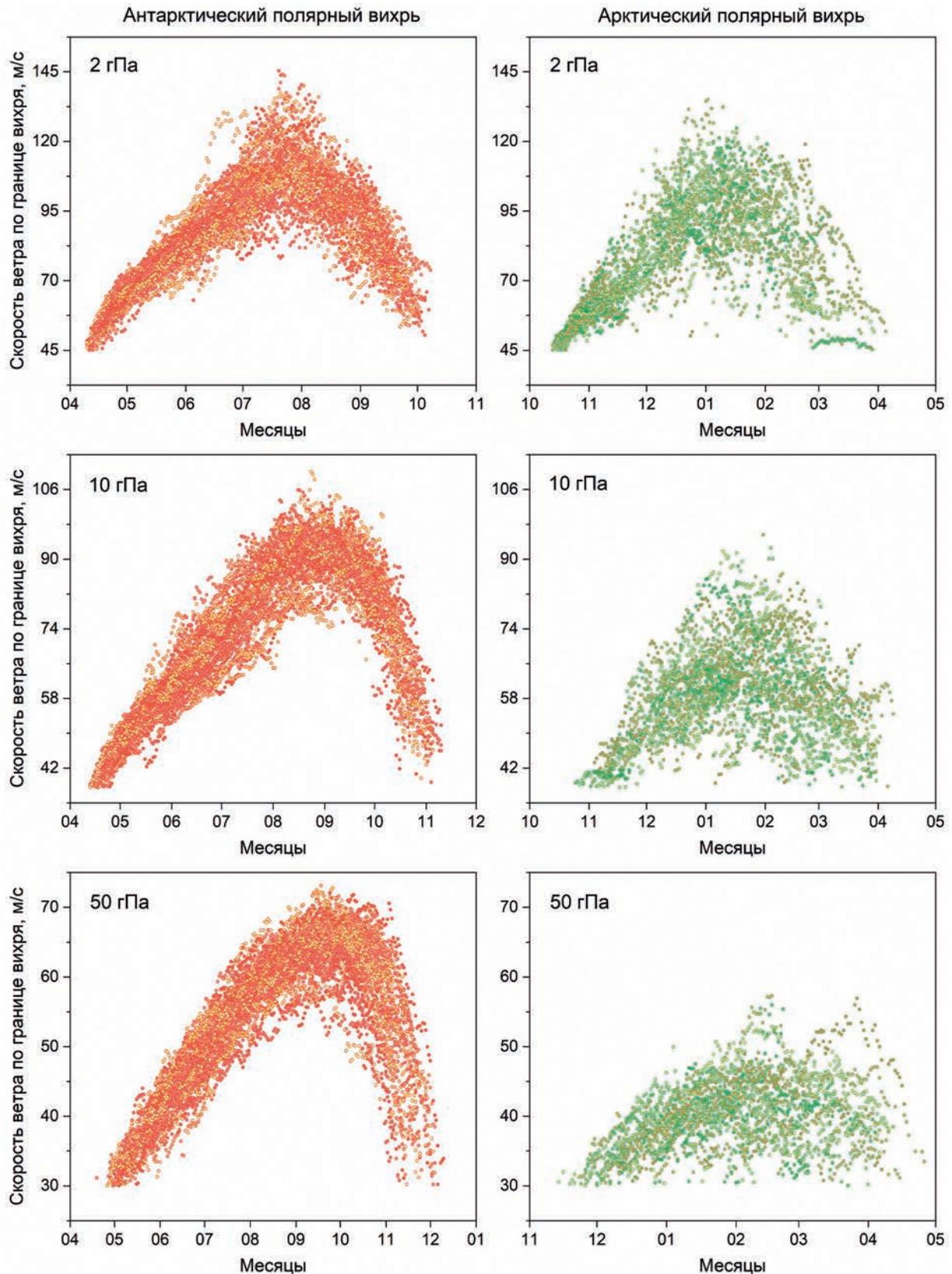


Рис. 2. Внутригодовые среднесуточные изменения средней скорости ветра по границе антарктического и арктического полярных вихрей на уровнях 2, 10 и 50 гПа с 1979 по 2021 гг.

Таблица 2. Динамические характеристики стратосферных полярных вихрей на изобарических поверхностях от 100 до 1 гПа

	Площадь вихря	Средняя скорость ветра по границе вихря	Скорость ветра, при которой формируется динамический барьер
1 гПа	>16.0 млн. км ²	>48.0 м/с	>32.0 м/с
2 гПа	>15.0 млн. км ²	>45.0 м/с	>30.0 м/с
3 гПа	>14.5 млн. км ²	>43.5 м/с	>29.0 м/с
4 гПа	>14.0 млн. км ²	>42.0 м/с	>28.0 м/с
5 гПа	>13.5 млн. км ²	>40.5 м/с	>27.0 м/с
7 гПа	>13.0 млн. км ²	>39.0 м/с	>26.0 м/с
10 гПа	>12.5 млн. км ²	>37.5 м/с	>25.0 м/с
15 гПа	>12.0 млн. км ²	>36.0 м/с	>24.0 м/с
20 гПа	>11.5 млн. км ²	>34.5 м/с	>23.0 м/с
30 гПа	>11.0 млн. км ²	>33.0 м/с	>22.0 м/с
40 гПа	>10.5 млн. км ²	>31.5 м/с	>21.0 м/с
50 гПа	>10.0 млн. км ²	>30.0 м/с	>20.0 м/с
70 гПа	>9.5 млн. км ²	>28.5 м/с	>19.0 м/с
100 гПа	>9.0 млн. км ²	>27.0 м/с	>18.0 м/с

когда выполнялись динамические характеристики из табл. 2. В табл. 3 приведены усреднённые за зимний период 1979–2021 гг. значения площади вихря, средней скорости ветра по границе вихря и средней температуры внутри вихря со среднеквадратичными отклонениями (СКО) на уровнях от 100 до 1 гПа для антарктического и арктического полярных вихрей (с июня по август – для Южного полушария (ЮП) и с декабря по февраль – для Северного полушария (СП)) для случаев с сохранением динамических характеристик (табл. 2). Среднесуточная вероятность ослабления динамического барьера в зимний период (представляющая собой процент таких событий за 1979–2021 гг.) значительно увеличивается при приближении к нижней и верхней границам вихрей: на уровне 100 гПа составляет 96.6% и 20.3%, на уровне 70 гПа – 77.0% и 5.4%, на уровне 1 гПа – 56.3% и 12.6% в Арктике и Антарктике, соответственно. На уровнях 50 и 2 гПа вероятность ослабления динамического барьера составляет 53.7% и 52.0% в Арктике и 1.4% и 2.8% в Антарктике. При этом в области от 30 до 3 гПа среднесуточная вероятность ослабления динамического барьера (и возможного разрушения полярного вихря) в зимний период наиболее низкая – менее 50% в Арктике и менее 1% в Антарктике.

Значительное преимущество в устойчивости антарктического полярного вихря по сравнению с арктическим проявляется в меньшем разбросе и большей величине значений площади вихря

и скорости ветра по границе вихря (рис. 1, 2; табл. 3). При этом существенная изменчивость арктического полярного вихря начинает проявляться уже с декабря, т.е. вскоре после его формирования. Устойчивость вихря снижается, а разброс значений увеличивается с ростом высоты, что сильнее проявляется в Арктике (рис. 1, 2; табл. 3). Рассмотренные особенности проявляются в распределении значений средней температуры и среднего содержания озона внутри вихря (рис. 3, 4; табл. 3). В условиях более сильного и устойчивого антарктического полярного вихря внутри него в нижней стратосфере наблюдаются более низкие температуры, а в верхней более высокие по сравнению с распределением температуры внутри арктического вихря. Вариации температуры верхней полярной стратосферы определяются содержанием озона и косвенно зависят от динамики полярного вихря. Если в нижней стратосфере в условиях сильного вихря происходит понижение температуры в результате динамических процессов и снижения содержания озона, то в верхней стратосфере проявляется обратная зависимость: в условиях понижения содержания озона внутри полярного вихря происходит повышение температуры [18] (рис. 3, 4). Распределение значений среднего геопотенциала внутри полярных вихрей отражает существенно более сильное, стабильное понижение давления внутри антарктического полярного вихря по сравнению с арктическим (рис. 5). При этом амплитуда сезонных изменений значений

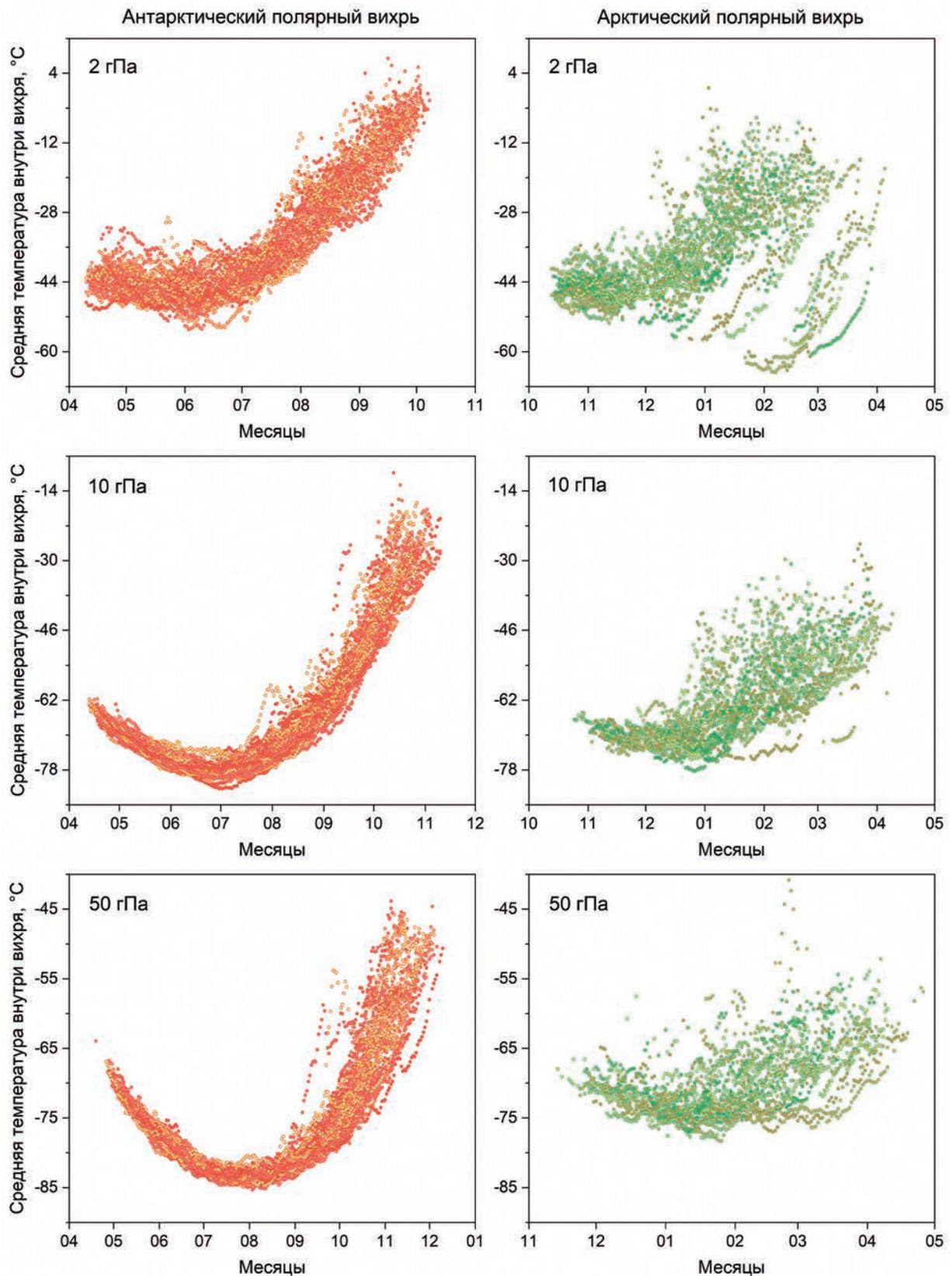


Рис. 3. Внутригодовые среднесуточные изменения средней температуры внутри антарктического и арктического полярных вихрей на уровнях 2, 10 и 50 гПа с 1979 по 2021 гг.

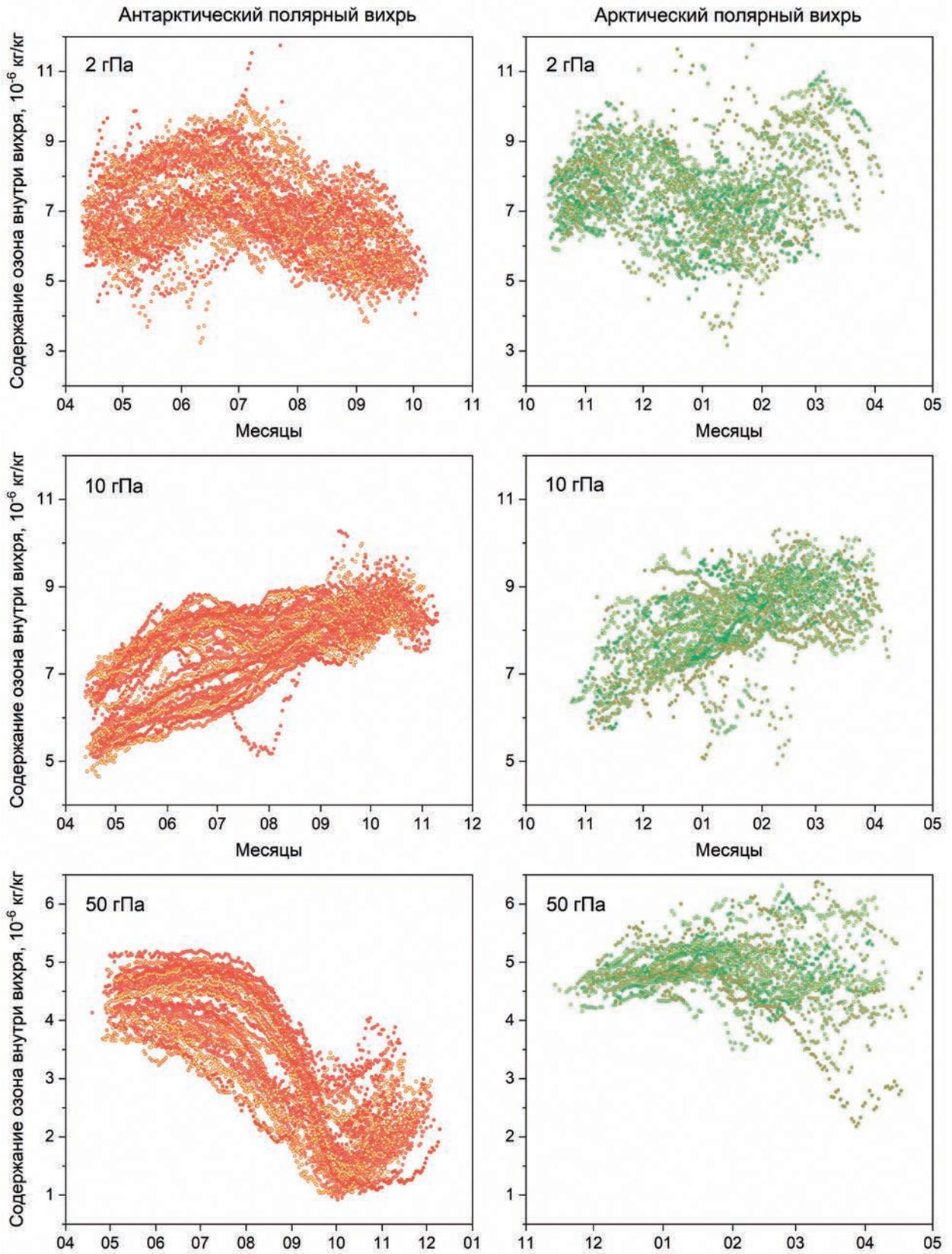


Рис. 4. Внутригодовые среднесуточные изменения среднего массового отношения смеси озона внутри антарктического и арктического полярных вихрей на уровнях 2, 10 и 50 гПа с 1979 по 2021 гг.

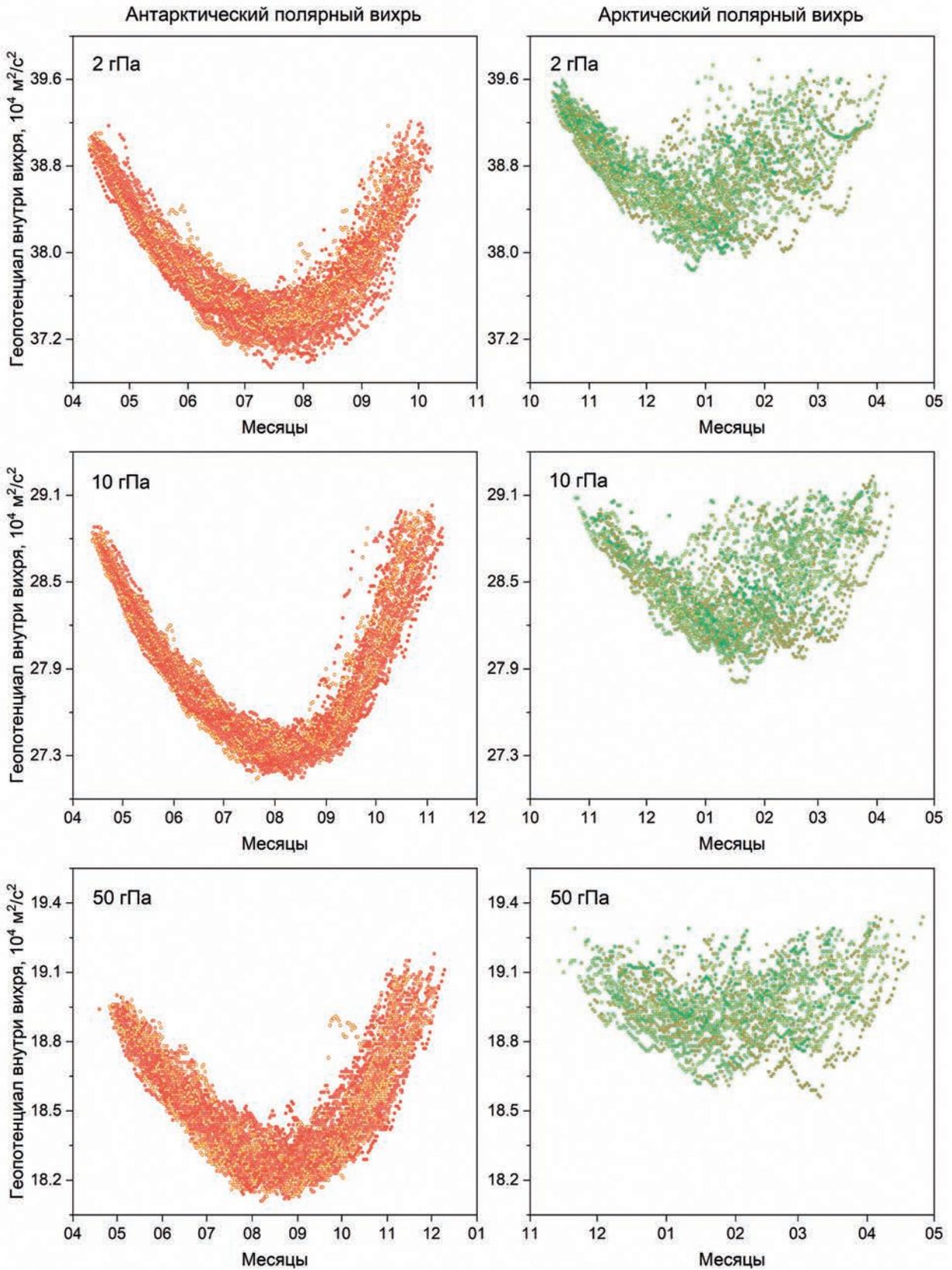


Рис. 5. Внутригодовые среднесуточные изменения среднего геопотенциала внутри антарктического и арктического полярных вихрей на уровнях 2, 10 и 50 гПа с 1979 по 2021 гг.

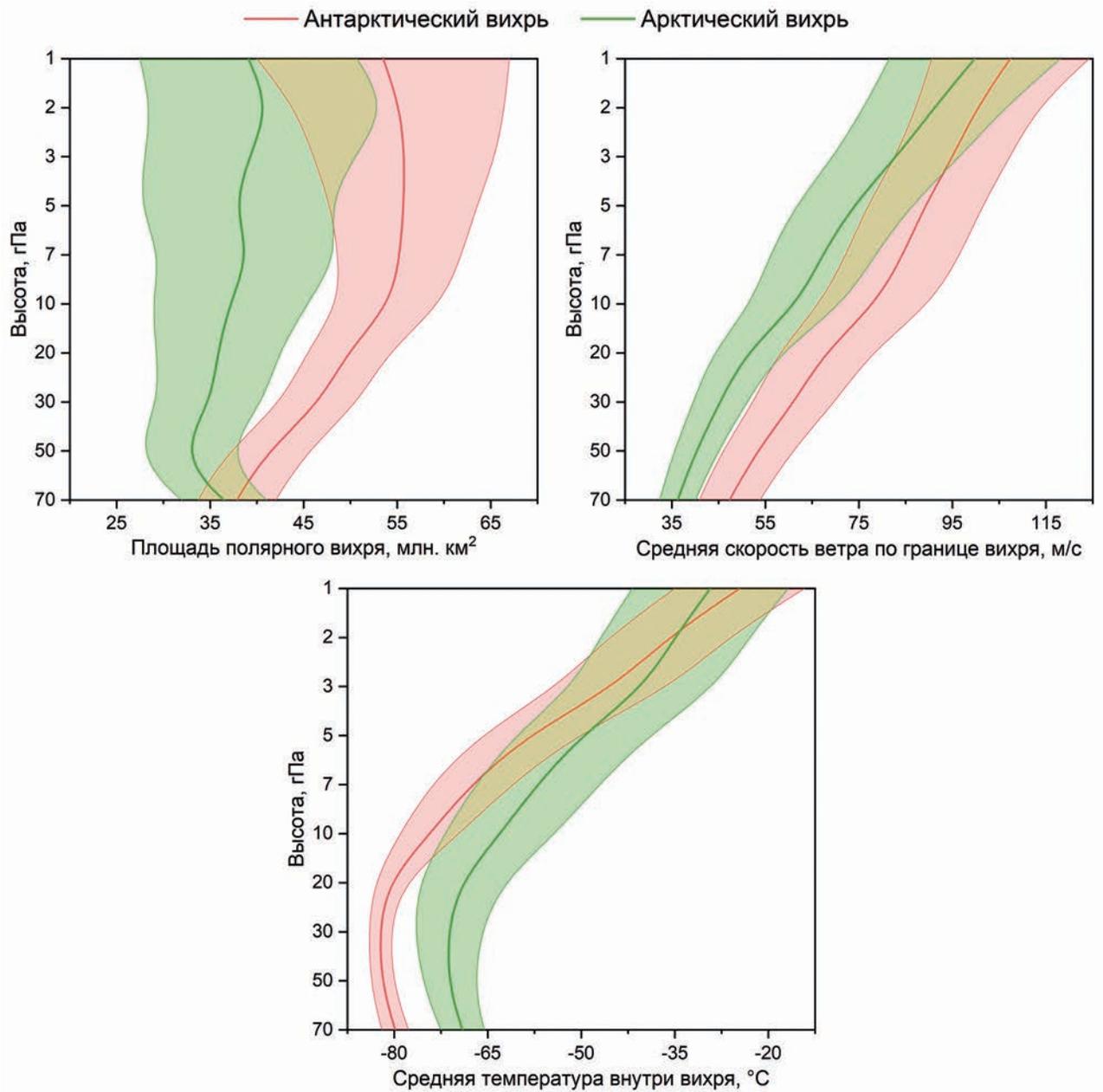


Рис. 6. Усреднённые за зимний период 1979–2021 гг. значения площади полярного вихря, средней скорости ветра по границе вихря и средней температуры внутри вихря на уровнях от 70 до 1 гПа для антарктического и арктического полярных вихрей с СКО.

геопотенциала в верхней стратосфере в 2 раза выше, чем в нижней.

Усреднённые за зимний период динамические характеристики полярных вихрей, представленные в табл. 3, проиллюстрированы на рис. 6. В динамике антарктического полярного вихря прослеживается значительное увеличение площади с высотой вплоть до 10 гПа в среднем на ~20 млн км² (рис. 6, табл. 3), вероятно обусловленное устойчивостью и центрированностью

относительно полюса антарктического вихря. В обоих полушариях прослеживается постепенное увеличение средней скорости ветра по границе вихря с высотой, в итоге значения в верхней стратосфере примерно в 2.5–3.0 раза превышают значения в нижней стратосфере. В нижней и средней стратосфере температура внутри антарктического полярного вихря, как правило, ниже более чем на 10°C соответствующих значений для арктического вихря, в то время как

Таблица 3. Усредненные за зимний период характеристики антарктического и арктического полярных вихрей на уровнях от 100 до 1 гПа за 1979–2021 гг.

	Число случаев с сохранением динамических характеристик		Площадь вихря, млн км ²		Средняя скорость ветра по границе вихря, м/с		Средняя температура внутри вихря, °С	
	ЮП	СП	ЮП	СП	ЮП	СП	ЮП	СП
1 гПа	3458 (87.4%)	1693 (43.7%)	53.5±13.5	39.1±11.6	107.4±16.8	99.8±18.3	-24.6±10.4	-29.3±12.5
2 гПа	3844 (97.2%)	1859 (48.0%)	55.3±11.2	41.3±12.6	100.2±12.9	91.1±15.0	-36.1±9.6	-35.0±11.9
3 гПа	3916 (99.0%)	1937 (50.1%)	55.8±9.7	39.2±11.2	95.1±12.2	83.1±13.5	-44.7±9.1	-39.9±11.5
5 гПа	3945 (99.7%)	2192 (56.6%)	55.7±7.8	37.6±10.1	89.1±12.3	73.7±12.3	-58.6±7.7	-49.9±10.7
7 гПа	3944 (99.7%)	2039 (52.7%)	55.3±6.6	39.2±9.5	84.5±12.2	67.2±11.2	-67.7±6.4	-57.1±9.9
10 гПа	3950 (99.8%)	2173 (56.1%)	54.3±5.5	37.1±8.3	78.6±11.8	61.9±9.9	-74.3±4.8	-63.0±8.9
20 гПа	3953 (99.9%)	2106 (54.4%)	49.6±4.3	35.8±6.5	67.6±9.9	50.8±7.1	-81.0±2.3	-69.4±6.7
30 гПа	3935 (99.5%)	2002 (51.7%)	46.8±4.1	35.1±5.6	61.2±8.7	45.3±5.7	-82.4±1.7	-71.4±5.3
50 гПа	3900 (98.6%)	1791 (46.3%)	41.2±4.2	31.9±4.8	53.2±7.4	40.2±4.7	-82.0±1.8	-71.3±4.2
70 гПа	3741 (94.6%)	890 (23.0%)	37.7±4.2	35.8±4.5	47.3±6.5	36.1±3.8	-80.0±2.1	-69.3±3.4
100 гПа	3154 (79.7%)	133 (3.4%)	35.3±3.8	44.0±4.4	41.7±5.3	32.9±3.2	-76.9±2.6	-65.5±3.1

в верхней стратосфере в большинстве случаев проявляется обратная динамика.

Таким образом, в работе с использованием метода оконтуривания вихрей с помощью геопотенциала на основе данных реанализа ERA5 впервые получены динамические характеристики стратосферных полярных вихрей на уровнях от 100 до 1 гПа: минимальная площадь вихря, минимальная средняя скорость ветра по границе вихря и минимальная скорость ветра, при которой сохраняется динамический барьер. С учётом выполнения динамических характеристик получены и проиллюстрированы сезонные изменения параметров стратосферных полярных вихрей (площади вихря, средней скорости ветра по границе вихря, средней температуры, среднего массового отношения озона и среднего геопотенциала внутри вихря). Определена среднесуточная вероятность ослабления динамического барьера по границе вихря в зимний период по данным за 1979–2021 гг. в Арктике и Антарктике. Показано, что наиболее низкая вероятность ослабления динамического барьера (и возможного разрушения полярного вихря) в зимний период прослеживается на уровнях от 30 до 3 гПа и достигает менее 50% в Арктике и менее 1% в Антарктике. На уровне 50 гПа вероятность ослабления динамического барьера составляет 53.7% в Арктике и 1.4% в Антарктике. Получены усреднённые за 1979–2021 гг. зимние вертикальные профили площади вихря, средней скорости ветра по границе вихря и средней температуры внутри вихря для антарктического и арктического полярных вихрей.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Scherhag R.* Neue Methoden der Wetteranalyse und Wetterprognose. Berlin: Springer, 1948. 424 p.
2. *Gutenberg B.* New data on the lower stratosphere // *B. Am. Meteorol. Soc.* 1949. V. 30. № 2. P. 62–64.
3. *Brasfield C. J.* Winds and temperatures in the lower stratosphere // *J. Meteorol.* 1950. V. 7. № 1. P. 66–69.
4. *Palmer C. E.* The stratospheric polar vortex in winter // *J. Geophys. Res.* 1959. V. 64. № 7. P. 749–764.
5. *Farman J. C., Gardiner B. G., Shanklin J. D.* Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction // *Nature.* 1985. V. 315. № 6016. P. 207–210.
6. *Holton J. R.* The dynamics of sudden stratospheric warmings // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 1980. V. 8. P. 169–190.
7. *Holton J. R., Haynes P. H., McIntyre M. E. et al.* Stratosphere-troposphere exchange // *Rev. Geophys.* 1995. V. 33. № 4. P. 403–439.

8. *Kolstad E. W., Breiteig T., Scaife A. A.* The association between stratospheric weak polar vortex events and cold air outbreaks in the Northern Hemisphere // *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 2010. V. 136. No 649. P. 886–893.
9. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al.* The ERA5 global reanalysis // *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 2020. V. 146. № 729. P. 1–51.
10. *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.
11. *Lawrence Z. D., Manney G. L., Wargan K.* Reanalysis intercomparisons of stratospheric polar processing diagnostics // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. № 18. P. 13547–13579.
12. *Smith M. L., McDonald A. J.* A quantitative measure of polar vortex strength using the function M // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119. № 10. P. 5966–5985.
13. *Варгин П. Н., Кострыкин С. В., Ракушина Е. В. и др.* Исследование изменчивости дат весенних перестроек циркуляции стратосферы и объема полярных стратосферных облаков в Арктике по данным моделирования и реанализа // *Известия РАН. ФАО.* 2020. Т. 56. № 5. С. 526–539.
14. *Vargin P., Kostykin S., Koval A. et al.* Arctic stratosphere changes in the 21st century in the Earth system model SOCOLv4 // *Front. Earth Sci.* 2023. V. 11. P. 1214418.
15. *Vargin P. N., Kostykin S. V., Volodin E. M. et al.* Arctic stratosphere circulation changes in XXI century in simulations of INM CM5 // *Atmosphere.* 2022. V. 13. № 1. P. 25.
16. *Лукьянов А. Н., Варгин П. Н., Юшков В. А.* Исследование с помощью лагранжевых методов аномально устойчивого арктического стратосферного вихря, наблюдавшегося зимой 2019–2020 гг. // *Известия РАН, ФАО.* 2021. Т. 57. № 3. С. 278–285.
17. *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.
18. *Holton J.* An Introduction to Dynamic Meteorology. 4th Edition. California: Academic Press, 2004. 535 p.

DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE STRATOSPHERIC POLAR VORTICES

Corresponding Member of the RAS **V. V. Zuev^{a, #}**, **E. S. Savelieva^{a, 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: vzeuv@list.ru*

The dynamic characteristics of the stratospheric polar vortices at levels from 100 to 1 hPa (minimum vortex area, minimum mean wind speed along the vortex edge, and minimum wind speed at which there is a dynamic barrier), obtained using the vortex delineation method with geopotential based on ERA5 reanalysis data, presented for the first time. Seasonal changes and average winter vertical profiles of the vortex area, mean wind speed along the vortex edge, and mean temperature inside the vortex for the Antarctic and Arctic polar vortices were obtained. The average daily probability of weakening of the dynamic barrier along the vortex edge in winter was determined based on data for 1979–2021 over the Arctic and Antarctic. It is shown that the lowest probability of weakening of the dynamic barrier (and possible breakdown of the polar vortex) in winter can be traced at levels from 30 to 3 hPa and reaches less than 50% in the Arctic and less than 1% in the Antarctic. At the 50 hPa level, the probability of weakening of the dynamic barrier is 53.7% in the Arctic and 1.4% in the Antarctic.

Keywords: polar vortices, ozone depletion, vortex delineation method, vortex area, wind speed along the vortex edge