

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

# ВЕРТИКАЛЬНАЯ СТРУКТУРА АНТАРКТИЧЕСКОГО ПОЛЯРНОГО ВИХРЯ ВО ВРЕМЯ ВНЕЗАПНЫХ СТРАТОСФЕРНЫХ ПОТЕПЛЕНИЙ 1988, 2002 И 2019 гг. ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2025 г. В. В. Зуев<sup>1</sup>, Е. С. Савельева<sup>1,2,\*</sup>, А. В. Павлинский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

\*E-mail: esav.pv@gmail.com

Поступила в редакцию 03.06.2024 г.

В работе с использованием спутниковых данных MERRA-2 и данных реанализа ERA5 рассмотрена вертикальная структура антарктического полярного вихря во время ВСП 1988, 2002 и 2019 гг. В 1988 и 2019 гг. наблюдалось значительное смещение полярного вихря, в 2002 г. – расщепление. Показаны различия в вертикальной динамике антарктического полярного вихря при ВСП, регистрируемом вследствие смещения (1988 и 2019 гг.) или расщепления вихря (2002 г.). Ослабление, смещение и последующее разрушение полярного вихря в 1988 и 2019 гг. наблюдалось сначала в верхней стратосфере и затем постепенно распространялось в среднюю и нижнюю стратосферу в течение месяца. Таким образом, ВСП в нижней стратосфере предвещалось значительным смещением вихря в верхней стратосфере за месяц до события. В свою очередь в 2002 г. до расщепления полярный вихрь был достаточно сильным и устойчивым на всех стратосферных уровнях, расщепление наблюдалось одновременно в средней и верхней стратосфере, после чего в верхней стратосфере вихрь разрушился, а в нижней и средней просуществовал еще месяц. Во всех случаях наблюдалось снижение скорости ветра по границе вихря, увеличение температуры внутри вихря, разрушение частиц полярных стратосферных облаков и уменьшение площади озоновой дыры начиная с конца августа. Более раннее затягивание озоновой дыры произошло соответственно 30 октября 1988 г., 9 ноября 2002 г. и 6 ноября 2019 г.

*Ключевые слова:* антарктический полярный вихрь, внезапные стратосферные потепления, полярные стратосферные облака, динамический барьер

DOI: 10.31857/S0205961425010011, EDN: DHQRQZ

### ВВЕДЕНИЕ

Стратосферные полярные вихри, формирующиеся над полярными областями поздней весной, представляют собой крупномасштабные циклональные образования, распространяющиеся от тропопаузы в мезосферу и существующие по весну (Waugh, Polvani, 2010; Waugh et al., 2017). Устойчивость полярного вихря в зимне-весенний период определяет масштабы и глубину весенней полярной озоновой аномалии (Newman et al., 2004). Границы полярного вихря представляют собой динамический барьер, препятствующий меридиональному переносу стратосферного озона из тропических и средних широт в полярную область (Manney et al., 2022). При этом внутри полярного вихря при экстремально низких температурах ( $< -78$  °C) формируются полярные стратосферные облака (ПСО), на поверхности и в объеме которых протекают гетерогенные реакции с высвобождением молекулярного хлора. При появлении солнечного излучения над

полярным регионом молекулярный хлор фотодиссоциирует с образованием радикалов хлора, вступающих в каталитический цикл разрушения озона (Solomon, 1999).

Внезапные стратосферные потепления (ВСП) представляют собой резкое потепление в полярной стратосфере в результате сильного смещения или расщепления стратосферного полярного вихря под действием вертикально распространяющихся планетарных волн (Ayarzagüena et al., 2019). Планетарные волны распространяются в среднюю стратосферу, где движутся в восточном направлении, противоположно направленно западному движению полярного вихря, что приводит к возмущению полярного вихря и его последующему смещению или расщеплению, сопровождающимся ВСП (Kuttippurath, Nikulin, 2012). Арктический полярный вихрь практически ежегодно подвергается влиянию планетарных волн, знаменующемуся ВСП (Агеева и др., 2017). В свою очередь в Антарктике за период с 1979 по 2023 гг. ВСП регистрировалось лишь трижды –

в 1988, 2002 и 2019 гг. (Roy et al., 2022). Первое из них часто не учитывается в статистике событий ВСП над Антарктикой, т.к. значительное смещение полярного вихря в 1988 г. наблюдалось на этапе его ослабления при уменьшении площади. Однако динамика полярного вихря в 1988 и 2019 гг. имеет много схожих черт, при этом второй случай является признанным событием ВСП (Safieddine et al., 2020; Kogure et al., 2021; Noguchi et al., 2020).

Более раннее ослабление и разрушение антарктического полярного вихря весной 2019 г. было рассмотрено в ряде работ (Goncharenko et al., 2020; Klekociuk et al., 2021; Eswaraiah et al., 2020; Shen et al., 2022). Аномальное ослабление полярного вихря в 2019 г. наблюдалось с сентября по октябрь, после чего регистрировалось ВСП в начале ноября и последующее разрушение вихря в первой половине ноября, примерно на месяц раньше, чем в среднем за 40 лет (Wargan et al., 2020; Milinevsky et al., 2019). Динамика ослабления полярного вихря в 2019 г. была сопоставима с динамикой вихря в 2002 г., когда произошло его расщепление (Lim et al., 2021). В 2002 г. расщепление антарктического полярного вихря и последующее ВСП наблюдались 25 сентября (Newman, Nash, 2005; Stolarski et al., 2005; Hoppel et al., 2003; Grooß et al., 2005). Необратимый характер в динамических изменениях полярного вихря весной 2002 г. наблюдался со второй половины сентября, при этом первые признаки последующих изменений прослеживались уже с конца августа (Charlton et al., 2005; Feng et al., 2005; Manney et al., 2005). Динамика полярного вихря весной 1988 г. имела схожую природу ослабления, что и в 2019 г., смещение вихря, знаменующееся ВСП, наблюдалось в первых числах ноября (Hirota et al., 1990; Grytsai et al., 2008). Целью данной работы является исследование вертикальной структуры антарктического полярного вихря во время ВСП 1988, 2002 и 2019 гг., а также динамики ПСО и озоновой дыры по данным спутниковых наблюдений.

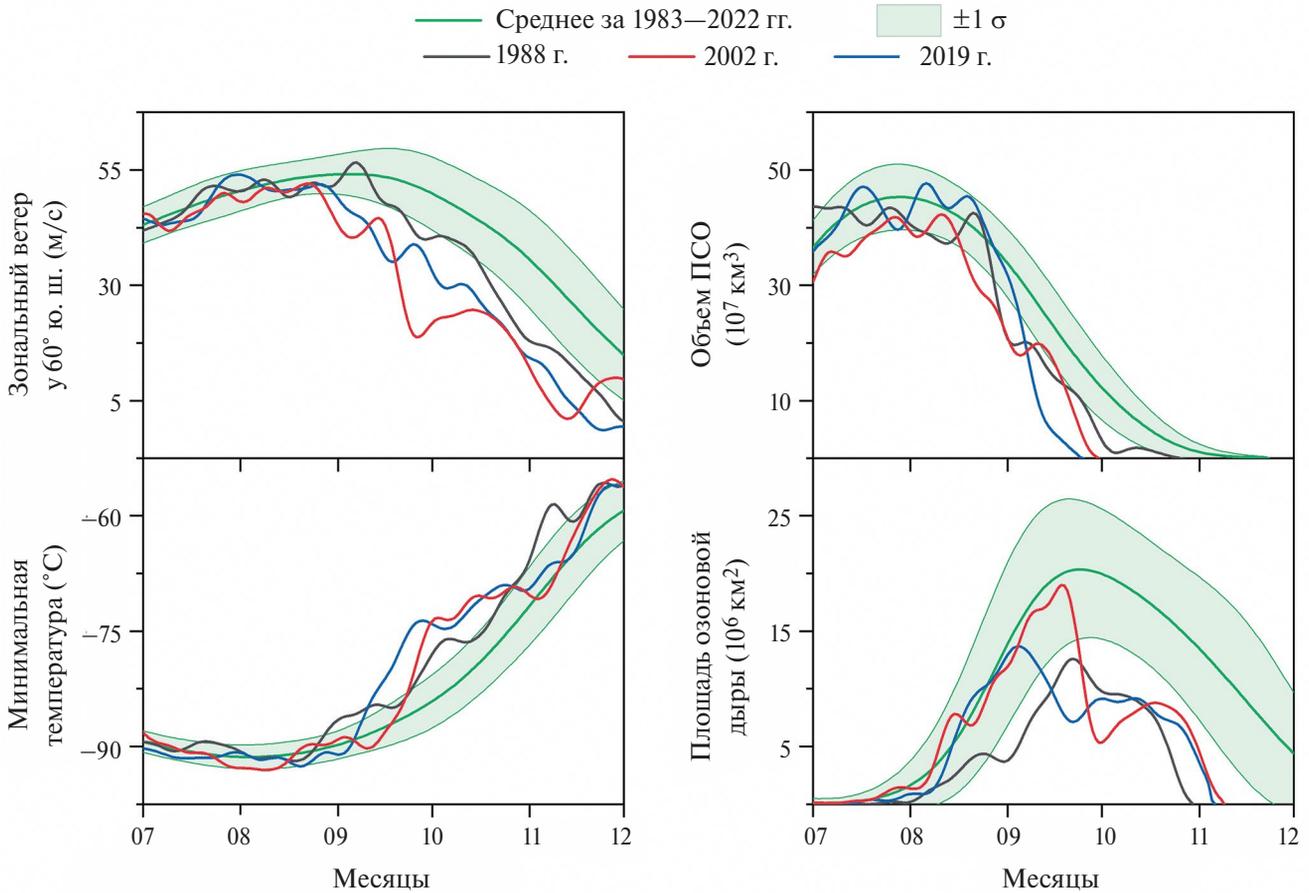
## ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Среднесуточные данные о скорости зонального ветра у  $60^\circ$  ю.ш., минимальной температуре в области  $50-90^\circ$  ю.ш. на уровне 50 гПа, объеме ПСО в области  $60-90^\circ$  ю.ш. и площади озоновой дыры (область, характеризующаяся значениями общего содержания озона (ОСО) ниже 220 ед. Д.) в области  $40-90^\circ$  ю.ш. за период с 1983 по 2022 гг. получены из архива Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2), созданного Goddard Earth Observing System Data Assimilation System (GEOS DAS) на основе спутниковых данных NASA Goddard Space Flight Center (GSFC), <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov>. MERRA-2 — это

первый долгосрочный глобальный реанализ, который усваивает данные космических наблюдений за аэрозолями и представляет их взаимодействие с другими физическими процессами в климатической системе (Gelaro et al., 2017). Среднесуточные данные о геопотенциале и скорости зонального и меридионального ветра в области  $30-90^\circ$  ю.ш. с горизонтальным разрешением  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  на уровнях от 100 до 5 гПа за 1988, 2002 и 2019 гг. получены по данным реанализа ERA5 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Hersbach et al., 2020), <https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6>. Для анализа вертикальной динамики антарктического полярного вихря во время ВСП 1988, 2002 и 2019 гг. поля геопотенциала и скорости ветра на уровнях от 100 до 5 гПа рассматривались в индексах. Индексы рассчитывались по формуле  $(x-y)/y$ , где  $x$  — значение геопотенциала (скорости ветра) в точке,  $y$  — значение геопотенциала, характеризующее границу полярного вихря (значение скорости ветра, при которой формируется динамический барьер) на рассматриваемом уровне (Zuev, Savelieva, 2024). Динамика рассматриваемых параметров в исследуемые годы сравнивалась с 40-летними климатическими средними за 1983–2022 гг., полученными со среднеквадратичными отклонениями (СКО,  $\sigma$ ) и сглаженным FFT-фильтром по 15 точкам.

## РЕЗУЛЬТАТЫ, ИХ АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведена динамика характеристик антарктического полярного вихря в зимне-весенний период 1988, 2002 и 2019 гг. Во всех случаях наблюдалось понижение зональной скорости, рост минимальной температуры, снижение объема ПСО и площади озоновой дыры начиная с конца августа. Более раннее “схлопывание” озоновой дыры произошло соответственно 30 октября 1988 г., 9 ноября 2002 г. и 6 ноября 2019 г. В табл. 1 приведены усредненные за сентябрь, октябрь и ноябрь характеристики антарктического полярного вихря в 1988, 2002 и 2019 гг. В 2002 и 2019 гг. наблюдалось более существенное ослабление полярного вихря, чем в 1988 г.: скорость ветра и объем ПСО были в среднем на 40 % и 30 % ниже, несмотря на более высокие значения площади озоновой дыры (рис. 1, табл. 1). На рис. 2–7 приведены поля геопотенциала и скорости ветра в индексах на уровнях от 100 до 5 гПа для дат до, во время и после событий ВСП 1988, 2002 и 2019 гг. На полях геопотенциала контуром отмечена предполагаемая граница полярного вихря, а на полях скорости ветра — динамический барьер (соответствуют значению “0” на шкале в индексах). В таблице 2 приведены значения площади вихря и средней скорости ветра по границе вихря для рассматриваемых дат до, во время и после событий ВСП 1988, 2002 и 2019 гг. на уровнях от 100 до 5 гПа.



**Рис. 1.** Внутригодовой ход скорости зонального ветра у 60° ю.ш., минимальной температуры в области 50–90° ю.ш. на уровне 50 гПа, объема ПСО в области 60–90° ю.ш. и площади озоновой дыры в области 40–90° ю.ш. с июля по ноябрь 1988, 2002 и 2019 гг. на фоне средних значений за 1983–2022 гг. с СКО ( $\pm 1 \sigma$ ).

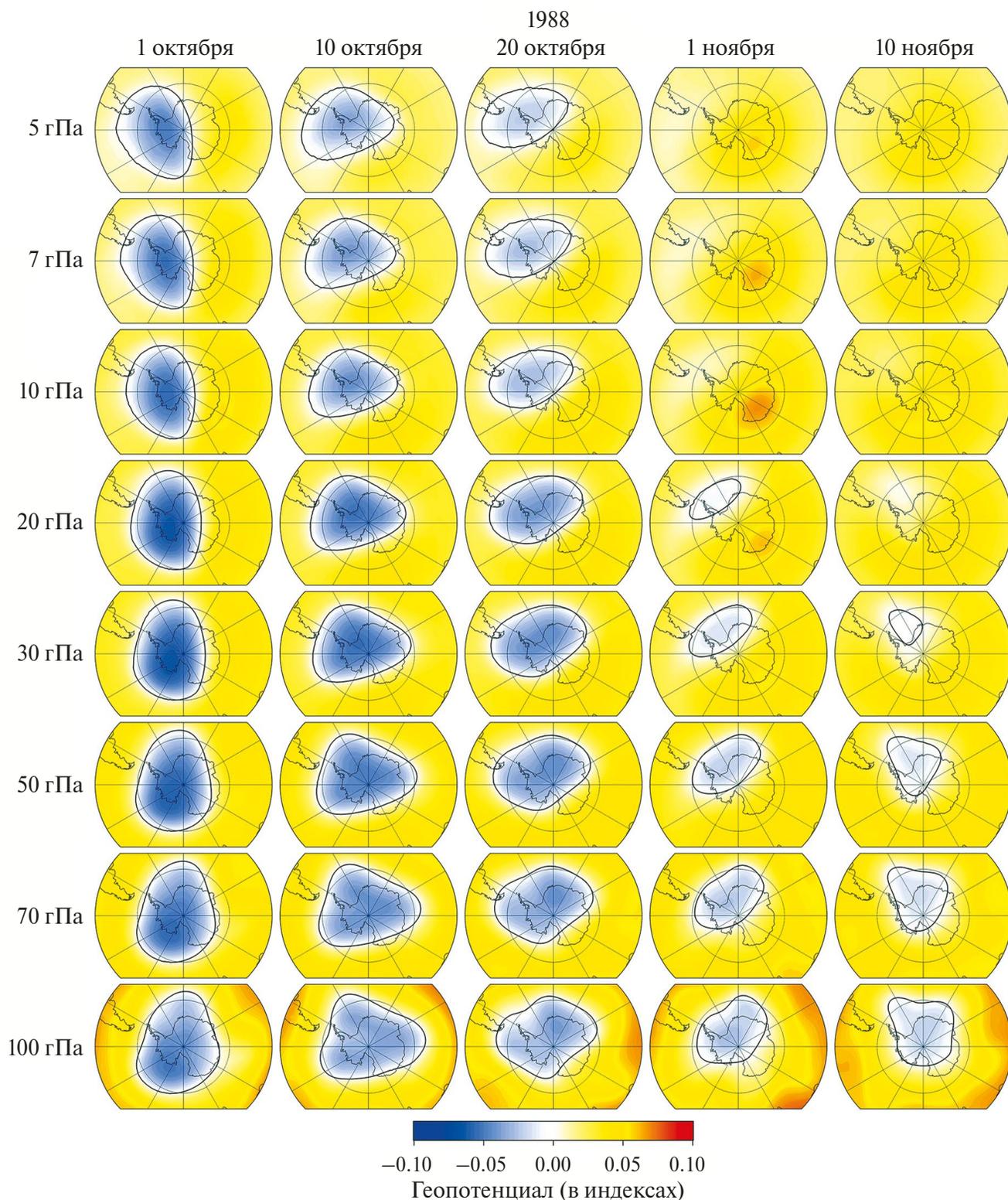
**ВСП 1988 г.** Весной 1988 г. значительное смещение полярного вихря, знаменующееся ВСП, наблюдалось 1 ноября в нижней стратосфере (рис. 2, 3). В средней и верхней стратосфере значительное смещение вихря проявлялось уже во второй половине октября, при этом в начале ноября на уровнях от 10 гПа и выше полярный вихрь уже не прослеживался (табл. 2). Ослабление полярного вихря в 1988 г. началось в первых числах октября в верхней стратосфере. На рис. 2, 3 можно видеть, как смещение и ослабление полярного вихря, начавшееся

в верхней стратосфере, постепенно проявляется на уровнях ниже, пока не достигает нижней стратосферы в начале ноября.

**ВСП 2002 г.** В первой половине сентября 2002 г. полярный вихрь был достаточно сильным и устойчивым, при этом характеризовался большей площадью и скоростью ветра по границе вихря в верхней и средней стратосфере, по сравнению с нижней (табл. 2, рис. 4, 5). 25 сентября расщепление вихря произошло в средней и верхней стратосфере (на уровнях

**Таблица 1.** Среднемесячные значения скорости зонального ветра у 60° ю.ш., минимальной температуры в области 50–90° ю.ш. на уровне 50 гПа, объема ПСО в области 60–90° ю.ш. и площади озоновой дыры в области 50–90° ю.ш. с сентября по ноябрь 1988, 2002 и 2019 гг.

|          | Зональный ветер, м/с |      |      | Минимальная температура, °C |       |       | Объем ПСО, 10 <sup>7</sup> км <sup>3</sup> |      |      | Площадь озоновой дыры, 10 <sup>6</sup> км <sup>2</sup> |      |      |
|----------|----------------------|------|------|-----------------------------|-------|-------|--|------|------|--|------|------|
|          | 1988                 | 2002 | 2019 | 1988                        | 2002  | 2019  | 1988                                       | 2002 | 2019 | 1988   | 2002 | 2019 |
| Сентябрь | 48.7                 | 34.4 | 40.4 | -84.2                       | -85.9 | -81.8 | 14.4                                       | 12.8 | 9.3  | 9.2  | 14.3 | 10.4 |
| Октябрь  | 32.5                 | 22.0 | 24.9 | -73.6                       | -71.1 | -71.6 | 0.9  | 0.1  | 0.2  | 6.4  | 7.7  | 7.9  |
| Ноябрь   | 11.0                 | 6.1  | 4.9  | -59.0                       | -62.7 | -62.7 | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.5  | 0.5  |



**Рис. 2.** Поля геопотенциала на уровнях от 100 до 5 гПа над Антарктикой с 1 октября по 10 ноября 1988 г.

от 20 гПа и выше), при этом в нижней стратосфере полярный вихрь принял форму “восьмерки”. После расщепления в верхней стратосфере сформировался небольшой антициклон, одна из частей по-

лярного вихря “растворилась”, вторая постепенно разрушилась. В свою очередь в нижней и средней стратосфере полярный вихрь частично восстановился и просуществовал еще месяц.

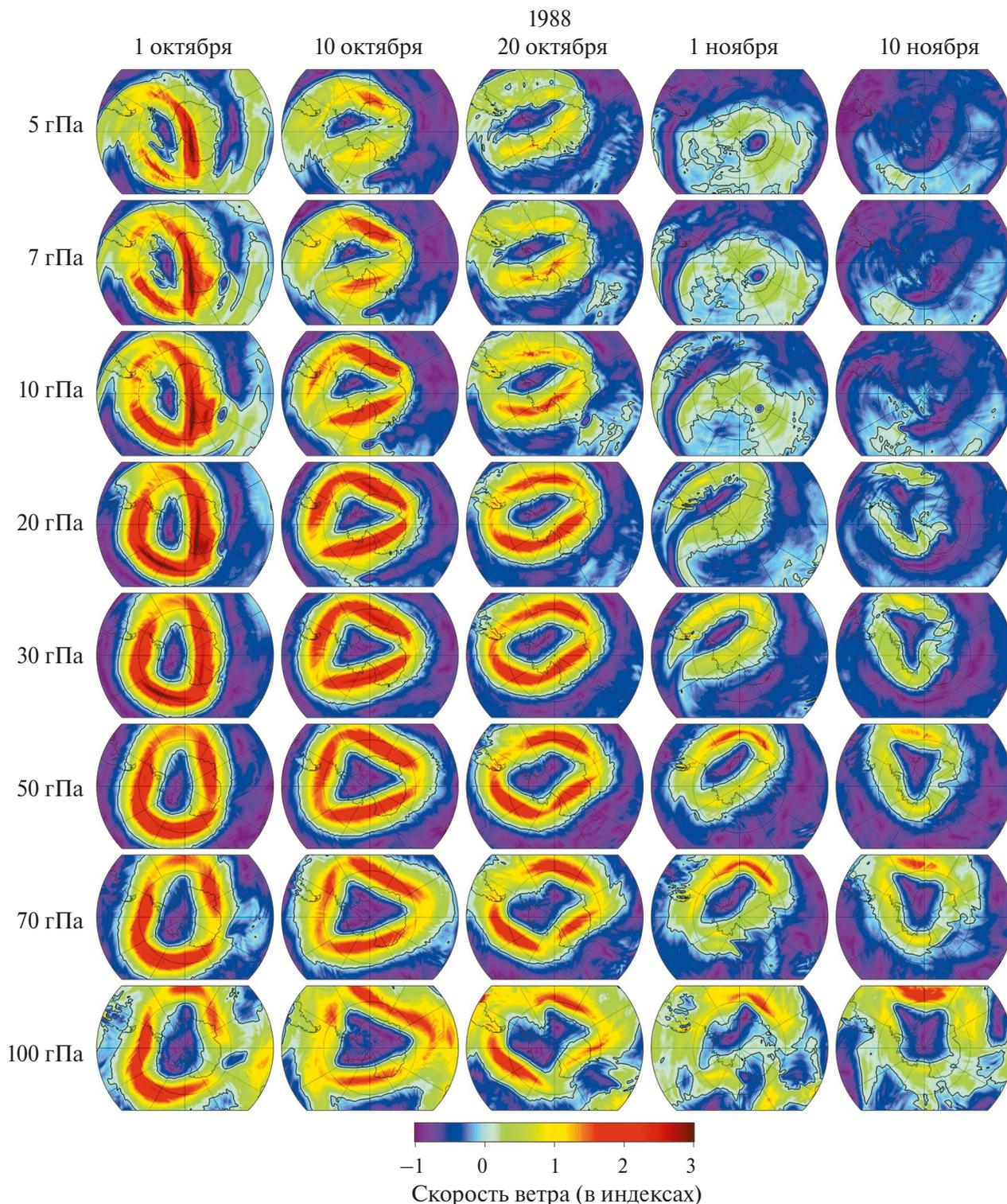


Рис. 3. Поля скорости ветра на уровнях от 100 до 5 гПа над Антарктикой с 1 октября по 10 ноября 1988 г.

**ВСП 2019 г.** Динамика вихря весной 2019 г. была в значительной степени схожа с динамикой при ВСП 1988 г. Ослабление и смещение вихря начало проявляться в верхней стратосфере еще в начале октября и постепенно распространялось в сред-

нюю и нижнюю стратосферу (рис. 6, 7). ВСП наблюдалось 1 ноября на уровнях 20 гПа и ниже, в то время как на уровнях от 10 гПа и выше значительное смещение полярного вихря наблюдалось еще во второй половине октября (табл. 2, рис. 6, 7).

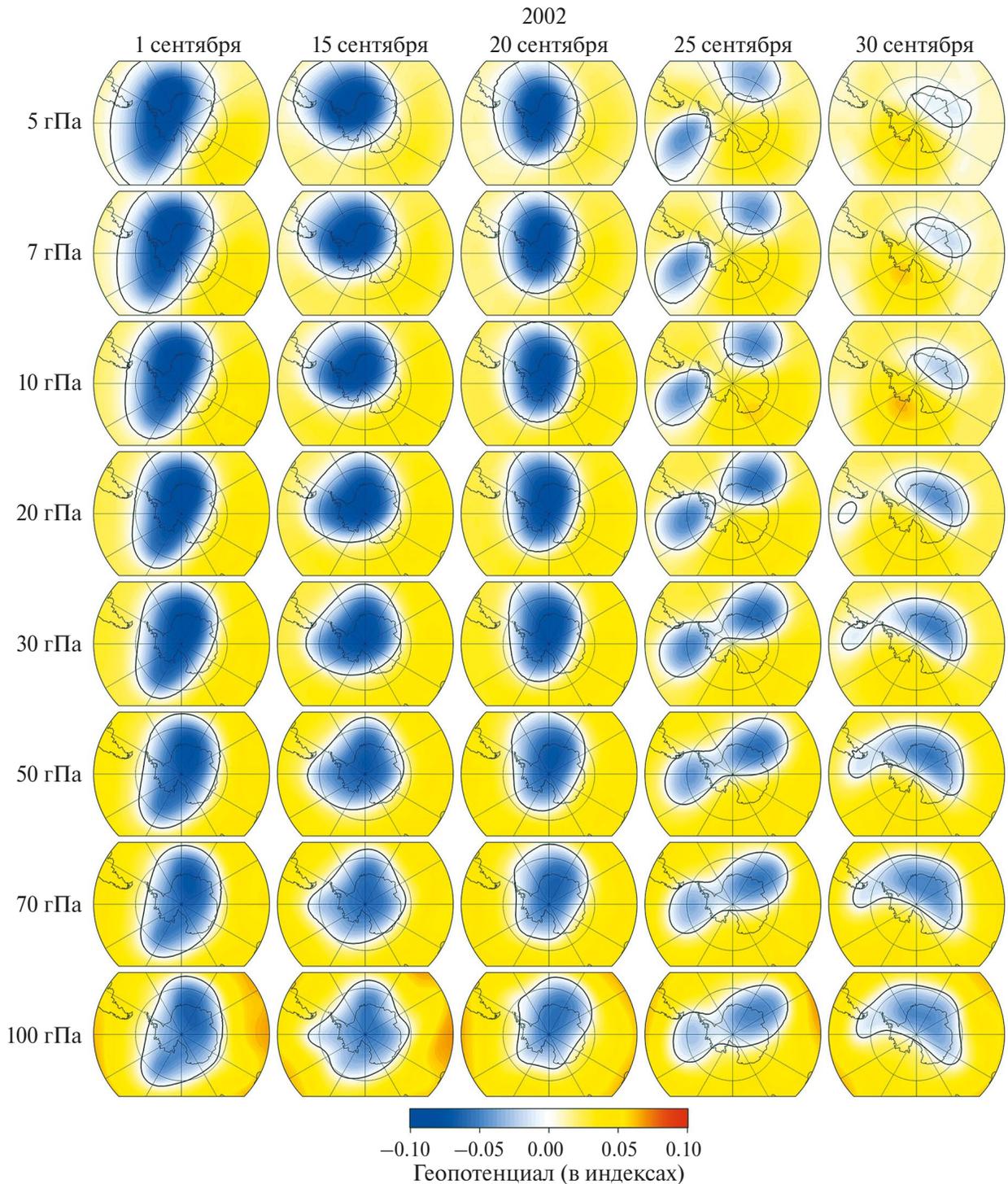


Рис. 4. Поля геопотенциала на уровнях от 100 до 5 гПа над Антарктикой с 1 по 30 сентября 2002 г.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена вертикальная структура антарктического полярного вихря во время ВСП 1988, 2002 и 2019 гг., а также динамика объема ПСО и площади озоновой дыры по данным спутниковых наблюдений. В 1988 и 2019 гг. наблю-

далось значительное смещение полярного вихря, в 2002 г. — расщепление. Объем ПСО и площадь озоновой дыры являются косвенными характеристиками динамики полярного вихря. В рассматриваемые годы практически одновременно, начиная с конца августа, наблюдалось снижение скорости ветра по границе вихря, увеличение температуры

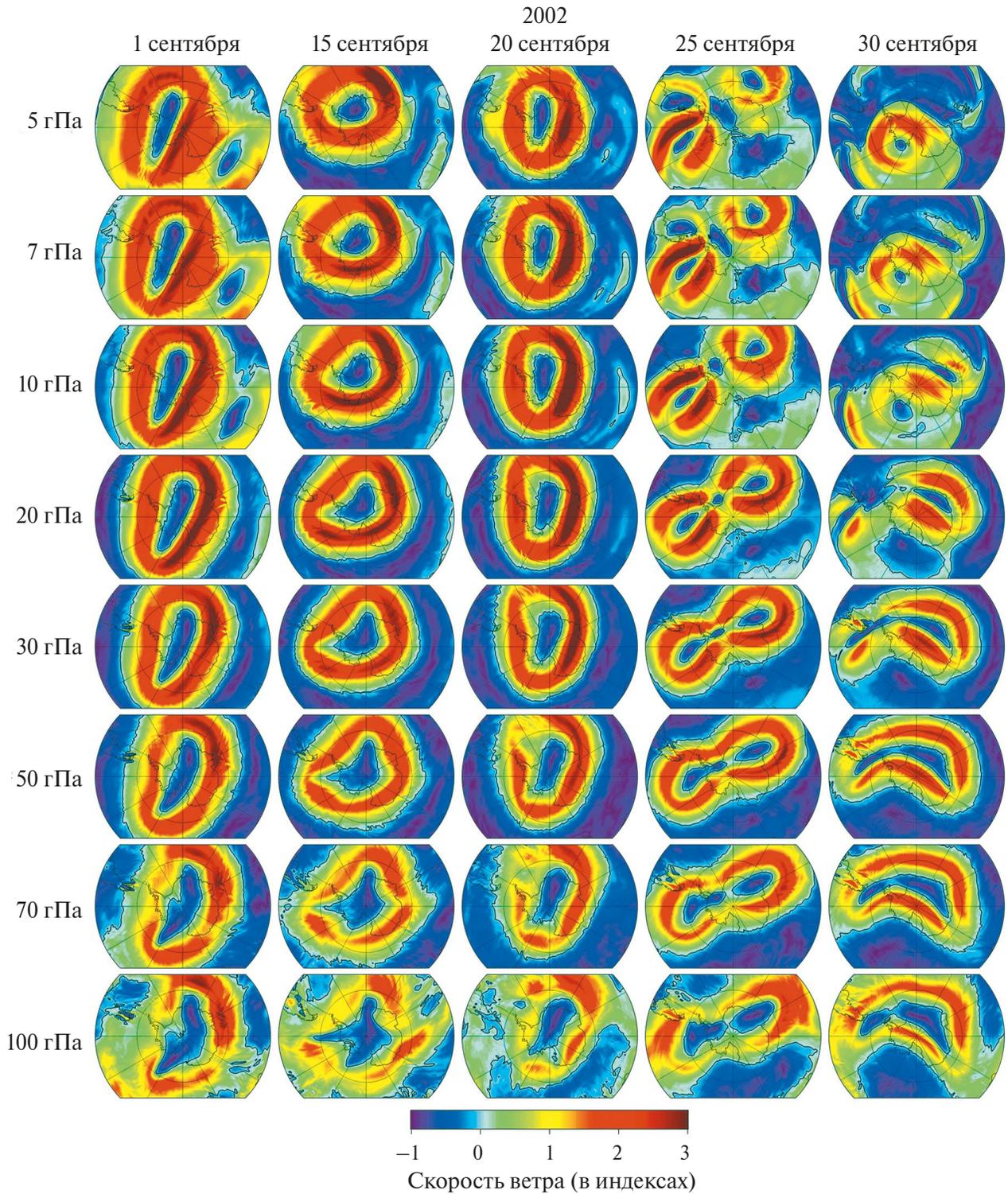


Рис. 5. Поля скорости ветра на уровнях от 100 до 5 гПа над Антарктикой с 1 по 30 сентября 2002 г.

внутри вихря, разрушение частиц ПСО и уменьшение площади озоновой дыры. Более раннее затягивание озоновой дыры произошло соответственно 30 октября 1988 г., 9 ноября 2002 г. и 6 ноября 2019 г. При этом в 2002 и 2019 гг. наблюдалось более су-

щественное ослабление полярного вихря: скорость ветра и объем ПСО были в среднем на 40 % и 30 % ниже, чем в 1988 г.

Были выявлены разные тенденции в вертикальной динамике антарктического полярного

Таблица 2. Площадь вихря и средняя скорость ветра по границе вихря до, во время и после ВСП 1988, 2002 и 2019 гг.

|         | Площадь вихря, млн. км <sup>2</sup> |            |            |            |            |            | Скорость ветра по границе вихря, м/с |            |            |            |  |  |
|---------|-------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------------------------------|------------|------------|------------|--|--|
|         | 01.10.1988                          | 10.10.1988 | 20.10.1988 | 01.11.1988 | 10.11.1988 | 01.10.1988 | 10.10.1988                           | 20.10.1988 | 01.11.1988 | 10.11.1988 |  |  |
| 5 гПа   | 28.8                                | 26.1       | 20.7       |            |            | 66.8       | 49.5                                 | 46.4       |            |            |  |  |
| 7 гПа   | 28.0                                | 24.8       | 20.1       |            |            | 66.4       | 56.7                                 | 52.9       |            |            |  |  |
| 10 гПа  | 27.1                                | 23.8       | 19.4       |            |            | 72.3       | 65.8                                 | 54.7       |            |            |  |  |
| 20 гПа  | 30.2                                | 28.4       | 25.3       |            |            | 70.3       | 69.9                                 | 60.8       |            |            |  |  |
| 30 гПа  | 31.2                                | 30.2       | 27.2       | 11.5       |            | 66.1       | 66.8                                 | 60.0       | 33.8       |            |  |  |
| 50 гПа  | 32.4                                | 31.7       | 28.4       | 14.9       | 11.7       | 57.5       | 57.0                                 | 53.6       | 35.3       | 22.1       |  |  |
| 70 гПа  | 32.9                                | 32.7       | 28.8       | 16.5       | 15.2       | 50.8       | 48.6                                 | 46.4       | 31.1       | 24.3       |  |  |
| 100 гПа | 50.8                                | 50.5       | 45.4       | 37.8       | 36.3       | 37.9       | 37.5                                 | 35.5       | 27.8       | 28.0       |  |  |
|         | 01.09.2002                          | 15.09.2002 | 20.09.2002 | 25.09.2002 | 30.09.2002 | 01.09.2002 | 15.09.2002                           | 20.09.2002 | 25.09.2002 | 30.09.2002 |  |  |
| 5 гПа   | 56.8                                | 40.7       | 39.2       | 29.6       |            | 59.7       | 65.8                                 | 64.7       | 66.6       |            |  |  |
| 7 гПа   | 50.6                                | 38.4       | 35.3       | 27.5       |            | 62.6       | 67.9                                 | 71.4       | 70.4       |            |  |  |
| 10 гПа  | 44.0                                | 35.3       | 32.2       | 25.5       |            | 69.8       | 72.5                                 | 80.3       | 72.0       |            |  |  |
| 20 гПа  | 42.0                                | 35.5       | 33.7       | 29.6       | 16.2       | 66.8       | 67.2                                 | 75.3       | 62.4       | 56.7       |  |  |
| 30 гПа  | 40.6                                | 35.2       | 33.6       | 30.6       | 22.2       | 63.2       | 63.7                                 | 69.2       | 60.4       | 57.0       |  |  |
| 50 гПа  | 38.9                                | 34.7       | 32.2       | 29.8       | 26.5       | 56.8       | 55.0                                 | 57.2       | 54.3       | 56.6       |  |  |
| 70 гПа  | 37.8                                | 34.3       | 30.5       | 29.1       | 27.3       | 51.3       | 47.7                                 | 49.5       | 46.9       | 50.8       |  |  |
| 100 гПа | 54.3                                | 52.1       | 45.4       | 46.7       | 47.1       | 38.0       | 35.0                                 | 30.8       | 31.1       | 30.8       |  |  |
|         | 01.10.2019                          | 10.10.2019 | 20.10.2019 | 01.11.2019 | 10.11.2019 | 01.10.2019 | 10.10.2019                           | 20.10.2019 | 01.11.2019 | 10.11.2019 |  |  |
| 5 гПа   | 22.6                                | 18.2       | 12.6       |            |            | 45.8       | 42.7                                 | 32.3       |            |            |  |  |
| 7 гПа   | 19.3                                | 16.9       | 12.6       |            |            | 51.8       | 47.1                                 | 37.1       |            |            |  |  |
| 10 гПа  | 17.5                                | 15.8       | 12.2       |            |            | 57.6       | 53.4                                 | 43.0       |            |            |  |  |
| 20 гПа  | 21.5                                | 19.9       | 17.2       | 11.7       |            | 59.7       | 58.4                                 | 52.5       | 41.1       |            |  |  |
| 30 гПа  | 23.4                                | 22.1       | 19.5       | 14.4       |            | 59.3       | 57.3                                 | 51.7       | 45.0       |            |  |  |
| 50 гПа  | 25.1                                | 24.6       | 21.7       | 16.1       | 9.2        | 56.0       | 54.3                                 | 48.9       | 44.5       | 31.2       |  |  |
| 70 гПа  | 26.0                                | 26.3       | 23.0       | 16.3       | 10.7       | 52.3       | 50.2                                 | 43.6       | 37.4       | 33.0       |  |  |
| 100 гПа | 42.0                                | 42.8       | 42.1       | 34.6       | 27.7       | 33.2       | 34.3                                 | 28.4       | 25.4       | 25.9       |  |  |

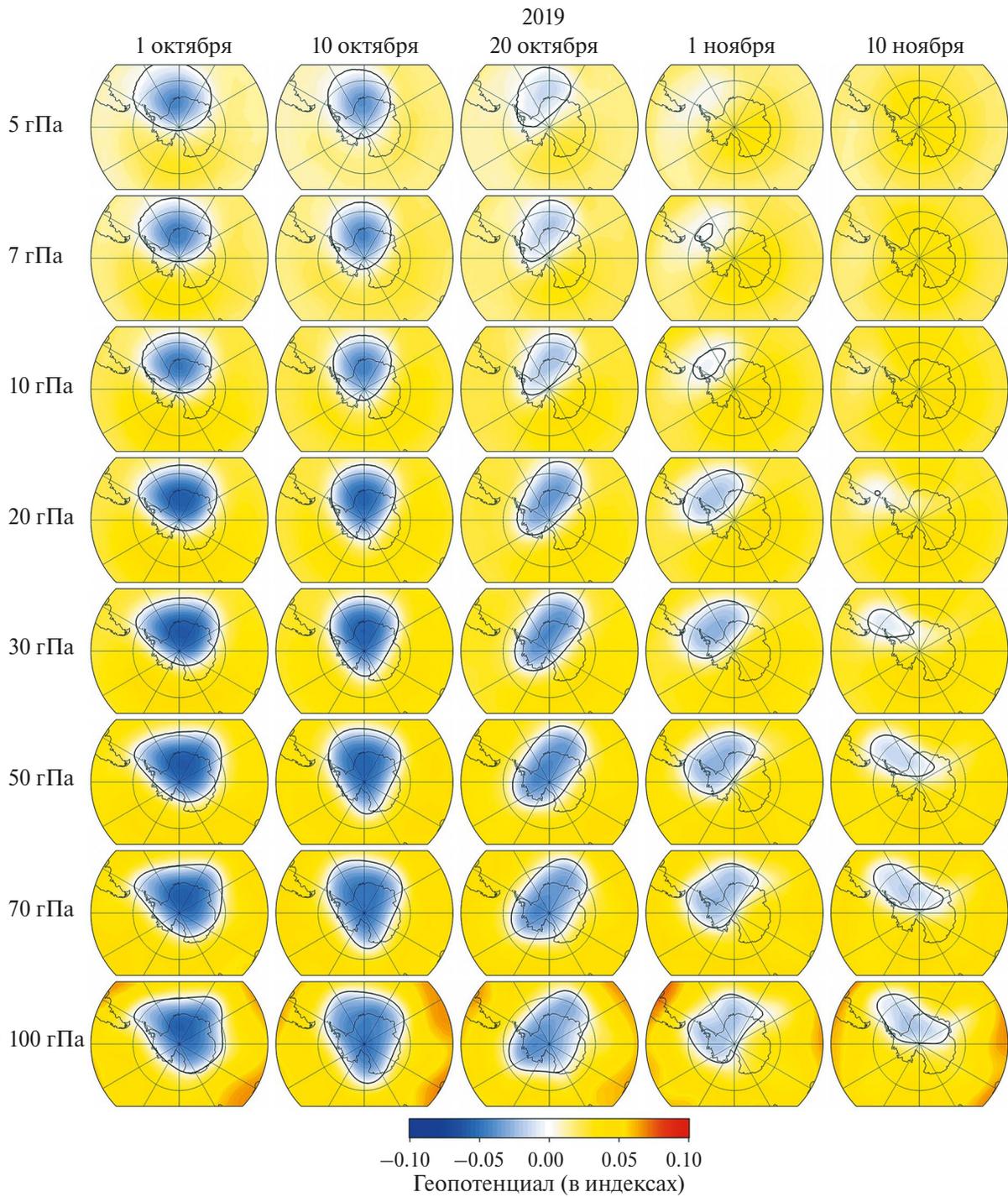


Рис. 6. Поля геопотенциала на уровнях от 100 до 5 гПа над Антарктикой с 1 октября по 10 ноября 2019 г.

вихря при ВСП, регистрируемом вследствие смещения (1988 и 2019 гг.), или расщеплении вихря (2002 г.). Ослабление, смещение и последующее разрушение полярного вихря в 1988 и 2019 гг. наблюдалось сначала в верхней стратосфере и затем постепенно распространялось в среднюю и нижнюю стратосферу в течение месяца. При этом ВСП в нижней стратосфере предвещало значи-

тельным смещением вихря в верхней стратосфере за месяц до события. В свою очередь в 2002 г. до расщепления полярный вихрь был достаточно сильным и устойчивым на всех стратосферных высотах, расщепление произошло в средней и верхней стратосфере, после чего в верхней стратосфере вихрь разрушился, а в нижней и средней просуществовал еще 1 месяц.

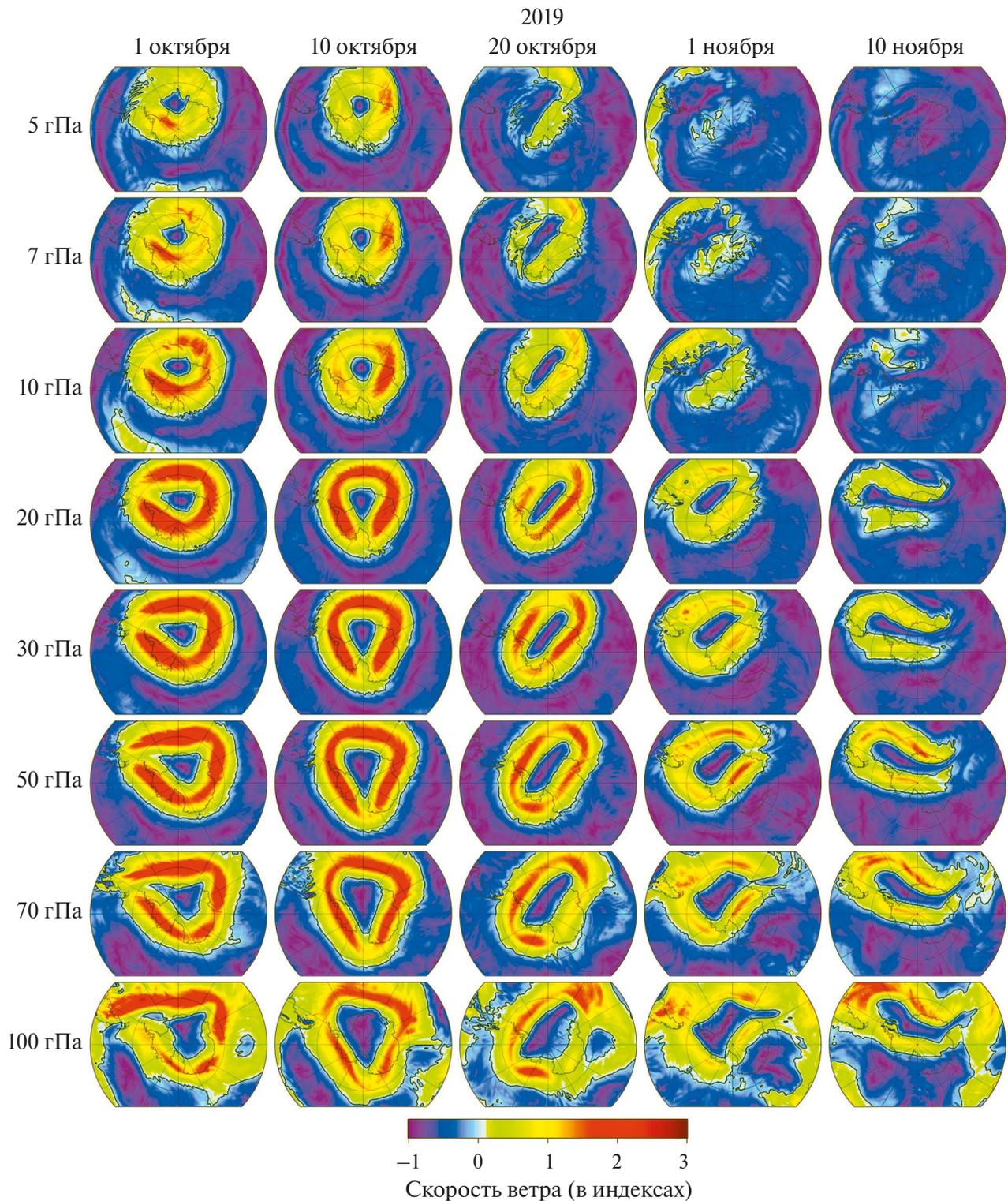


Рис. 7. Поля скорости ветра на уровнях от 100 до 5 гПа над Антарктикой с 1 октября по 10 ноября 2019 г.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агеева В.Ю., Груздев А.Н., Елохов А.С., Мохов И.И. Внезапные стратосферные потепления: статистические характеристики и влияние на общее содержание  $\text{NO}_2$  и  $\text{O}_3$  // Из-

- вестия РАН. ФАО. 2017. Т. 53. № 5. С. 545–555. doi:10.7868/S0003351517050014.
- Ayarzagüena B., Palmeiro F.M., Barriopedro D., Calvo N., Lange-matz U., Shibata K. On the representation of major stratospheric warmings in reanalyses // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. V. 19. № 14. P. 9469–9484. DOI: 10.5194/acp-19-9469-2019.
- Charlton A.J., O'Neill A., Lahoz W.A., Berrisford P. The splitting of the stratospheric polar vortex in the Southern Hemisphere, September 2002: Dynamical evolution // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. № 3. P. 590–602. DOI: 10.1175/JAS-3318.1.
- Eswaraiah S., Kim J.-H., Lee W., Hwang J., Kumar K.N., Kim Y.H. Unusual changes in the Antarctic middle atmosphere during the 2019 warming in the Southern Hemisphere // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. № 19. P. e2020GL089199. DOI: 10.1029/2020GL089199.
- Feng W., Chipperfield M.P., Roscoe H.K., Remedios J.J., Waterfall A.M., Stiller G.P., Glatthor N., Höpfner M., Wang D.-Y. Three-dimensional model study of the Antarctic ozone hole in 2002 and comparison with 2000 // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. № 3. P. 822–837. DOI: 10.1175/JAS-3335.1.
- Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A.M., Gu W., Kim G.-K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J.E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S.D., Sienkiewicz M., Zhao B. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // *J. Climate.* 2017. V. 30. № 14. P. 5419–5454. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
- Goncharenko L.P., Harvey V.L., Greer K.R., Zhang S.-R., Coster A.J. Longitudinally dependent low-latitude ionospheric disturbances linked to the Antarctic sudden stratospheric warming of September 2019 // *J. Geophys. Res.* 2020. V. 125. № 8. P. e2020JA028199. DOI: 10.1029/2020JA028199.
- Groß J.-U., Konopka P., Müller R. Ozone chemistry during the 2002 Antarctic vortex split // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. № 3. P. 860–870. DOI: 10.1175/JAS-3330.1.
- Grytsai A.V., Evtushevsky O.M., Milinevsky G.P. Anomalous quasi-stationary planetary waves over the Antarctic region in 1988 and 2002 // *Ann. Geophys.* 2008. V. 26. № 5. P. 1101–1108. DOI: 10.5194/angeo-26-1101-2008.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., de Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N. The ERA5 global reanalysis // *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 2020. V. 146. № 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
- Hirota I., Kuroi K., Shiotani M. Midwinter warmings in the southern hemisphere stratosphere in 1988 // *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 1990. V. 116. № 494. P. 929–941. DOI: 10.1002/qj.49711649407.
- Hoppel K., Bevilacqua R., Allen D., Nedoluha G., Randall C. POAM III observations of the anomalous 2002 Antarctic ozone hole // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. № 7. P. 1394. DOI: 10.1029/2003GL016899.
- Klekociuk A.R., Tully M.B., Krummel P.B., Henderson S.I., Smale D., Querel R., Nichol S., Alexander S.P., Fraser P.J., Nedoluha G. The Antarctic ozone hole during 2018 and 2019 // *J. South. Hemisph. Earth Syst. Sci.* 2021. V. 71. № 1. P. 66–91. DOI: 10.1071/ES20010.
- Kogure M., Yue J., Liu H. Gravity wave weakening during the 2019 Antarctic stratospheric sudden warming // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48. № 8. P. e2021GL092537. DOI: 10.1029/2021GL092537.
- 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. DOI: 10.5194/acp-12-8115-2012.
- Lim E.-P., Hendon H.H., Butler A.H., Thompson D.W.J., Lawrence Z.D., Scaife A.A., Shepherd T.G., Polichchouk I., Nakamura H., Kobayashi C., Comer R., Coy L., Dowdy A., Garreaud R.D., Newman P.A., Wang G. The 2019 Southern Hemisphere stratospheric polar vortex weakening and its impacts // *B. Am. Meteorol. Soc.* 2021. V. 102. № 6. P. E1150–E1171. DOI: 10.1175/BAMS-D-20-0112.1.
- Manney G.L., Sabutis J.L., Allen D.R., Lahoz W.A., Scaife A.A., Randall C.E., Pawson S., Naujokat B., Swinbank R. Simulations of dynamics and transport during the September 2002 Antarctic major warming // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. № 3. P. 690–707. DOI: 10.1175/JAS-3313.1.
- Manney G.L., Millán L.F., Santee M.L., Wargan K., Lambert A., Neu J.L., Werner F., Lawrence Z.D., Schwartz M.J., Livesey N.J., Read W.G. Signatures of anomalous transport in the 2019/2020 Arctic stratospheric polar vortex // *J. Geophys. Res.* 2022. V. 127. № 20. P. e2022JD037407. DOI: 10.1029/2022JD037407.
- Milinevsky G., Evtushevsky O., Klekociuk A., Wang Y., Grytsai A., Shulga V., Ivaniha O. Early indications of anomalous behaviour in the 2019 spring ozone hole over Antarctica // *Int. J. Remote Sens.* 2019. V. 41. № 19. P. 7530–7540. DOI: 10.1080/2150704X.2020.1763497.
- Newman P.A., Kawa S.R., Nash E.R. On the size of the Antarctic ozone hole // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. № 21. P. L21104. DOI: 10.1029/2004GL020596.
- Newman P.A., Nash E.R. The unusual Southern Hemisphere stratosphere winter of 2002 // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. № 3. P. 614–628. DOI: 10.1175/JAS-3323.1.
- Noguchi S., Kuroda Y., Kodera K., Watanabe S. Robust enhancement of tropical convective activity by the 2019 Antarctic sudden stratospheric warming // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. № 15. P. e2020GL088743. DOI: 10.1029/2020GL088743.
- Roy R., Kuttippurath J., Lefèvre F., Raj S., Kumar P. The sudden stratospheric warming and chemical ozone loss in the Antarctic winter 2019: comparison with the winters of 1988 and 2002 // *Theor. Appl. Climatol.* 2022. V. 149. P. 119–130. DOI: 10.1007/s00704-022-04031-6.
- Safieddine S., Bouillon M., Paracho A.-C., Jumelet J., Tencé F., Pazmino A., Goutail F., Wespes C., Bekki S., Boynard A., Hadji-Lazaro J., Coheur P.-F., Hurtmans D., Clerbaux C. Antarctic ozone enhancement during the 2019 sudden stratospheric warming event // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. № 14. P. e2020GL087810. DOI: 10.1029/2020GL087810.
- Shen X., Wang L., Osprey S., Hardiman S.C., Scaife A.A., Ma J. The life cycle and variability of Antarctic weak polar vortex events // *J. Climate.* 2022. V. 35. № 6. P. 2075–2092. DOI: 10.1175/JCLI-D-21-0500.1.
- Solomon S. Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history // *Rev. Geophys.* 1999. V. 37. № 3. P. 275–316. DOI: 10.1029/1999RG900008.
- Stolarski R.S., McPeters R.D., Newman P.A. The ozone hole of 2002 as measured by TOMS // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. № 3. P. 716–720. DOI: 10.1175/JAS-3338.1.

Wargan K., Weir B., Manney G.L., Cohn S.E., Livesey N.J. The anomalous 2019 Antarctic ozone hole in the GEOS constituent data assimilation system with MLS observations // *J. Geophys. Res.* 2020. V. 125. № 18. P. e2020JD033335. DOI: 10.1029/2020JD033335.

Waugh D.W., Polvani L.M. Stratospheric polar vortices. In: Polvani L.M., Sobel A.H., Waugh D.W. (Eds.). *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry* // *Geo-*

physical Monograph Series. 2010. V. 190. P. 43–57. DOI: 10.1002/9781118666630.ch3.

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. DOI: 10.1175/BAMS-D-15-00212.1.

Zuev V.V., Savelieva E.S. Dynamic characteristics of the stratospheric polar vortices // *Dokl. Earth Sci.* 2024. V. 517. № 1. P. 1240–1248. DOI: 10.1134/S1028334X24601895.

## Vertical Structure of the Antarctic Polar Vortex During Sudden Stratospheric Warmings in 1988, 2002 and 2019 According to Satellite Observations

V. V. Zuev<sup>1</sup>, E. S. Savelieva<sup>1,2</sup>, A. V. Pavlinsky<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia*

<sup>2</sup>*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Using the MERRA-2 satellite data and ERA5 reanalysis data, we examined the vertical structure of the Antarctic polar vortex during the sudden stratospheric warming events (SSWs) of 1988, 2002 and 2019. The significant displacements of the polar vortex were observed in 1988 and 2019, and the vortex splitting occurred in 2002. Differences in the vertical dynamics of the Antarctic polar vortex during SSWs recorded due to displacement (1988 and 2019) or vortex splitting (2002) are shown. The weakening, displacement and subsequent breakdown of the polar vortex in 1988 and 2019 was observed first in the upper stratosphere, and then gradually spread into the middle and lower stratosphere within a month. Thus, the SSW in the lower stratosphere was preceded by a significant displacement of the polar vortex in the upper stratosphere a month before the event. While in 2002, before the split, the polar vortex was strong and stable at all stratospheric levels, the split was observed simultaneously in the middle and upper stratosphere, after which the vortex collapsed in the upper stratosphere, and existed for another month in the lower and middle stratosphere. In all cases, a decrease in wind speed along the vortex edge, an increase in temperature inside the vortex, melting of particles of polar stratospheric clouds and a decrease in ozone hole area were observed starting in late August. The earlier recovery of ozone hole occurred on 30 October 1988, 9 November 2002 and 6 November 2019, respectively.

**Keywords:** Antarctic polar vortex, sudden stratospheric warming, polar stratospheric clouds, dynamic barrier

### REFERENCES

Ageeva V.Yu., Gruzdev A.N., Elokhov A.S., Mokhov I.I. Sudden stratospheric warmings: statistical characteristics and impact on the total content of NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> // *Izv. RAS. Atmospheric and Oceanic Physics.* 2017. V. 53. № 5. P. 545–555. DOI: 10.7868/S0003351517050014. (In Russian).

Ayarzagüena B., Palmeiro F.M., Barriopedro D., Calvo N., Langematz U., Shibata K. On the representation of major stratospheric warmings in reanalyses // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. V. 19. № 14. P. 9469–9484. DOI: 10.5194/acp-19-9469-2019.

Charlton A.J., O'Neill A., Lahoz W.A., Berrisford P. The splitting of the stratospheric polar vortex in the Southern Hemisphere, September 2002: Dynamical evolution // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. № 3. P. 590–602. DOI: 10.1175/JAS-3318.1.

Eswaraiah S., Kim J.-H., Lee W., Hwang J., Kumar K.N., Kim Y.H. Unusual changes in the Antarctic middle atmosphere during the 2019 warming in the Southern Hemisphere // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. № 19. P. e2020GL089199. DOI: 10.1029/2020GL089199.

Feng W., Chipperfield M.P., Roscoe H.K., Remedios J.J., Waeterfall A.M., Stiller G.P., Glatthor N., Höpfner M., Wang D.-Y. Three-dimensional model study of the Antarctic ozone hole in

2002 and comparison with 2000 // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. № 3. P. 822–837. DOI: 10.1175/JAS-3335.1.

Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A.M., Gu W., Kim G.-K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J.E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S.D., Sienkiewicz M., Zhao B. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // *J. Climate.* 2017. V. 30. № 14. P. 5419–5454. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.

Goncharenko L.P., Harvey V.L., Greer K.R., Zhang S.-R., Coster A.J. Longitudinally dependent low-latitude ionospheric disturbances linked to the Antarctic sudden stratospheric warming of September 2019 // *J. Geophys. Res.* 2020. V. 125. № 8. P. e2020JA028199. DOI: 10.1029/2020JA028199.

Groß J.-U., Konopka P., Müller R. Ozone chemistry during the 2002 Antarctic vortex split // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. № 3. P. 860–870. DOI: 10.1175/JAS-3330.1.

Grytsai A.V., Evtushevsky O.M., Milinevsky G.P. Anomalous quasi-stationary planetary waves over the Antarctic region in 1988 and 2002 // *Ann. Geophys.* 2008. V. 26. № 5. P. 1101–1108. DOI: 10.5194/angeo-26-1101-2008.

- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., de Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N.* The ERA5 global reanalysis // *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 2020. V. 146. № 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
- Hirota I., Kuroi K., Shiotani M.* Midwinter warmings in the southern hemisphere stratosphere in 1988 // *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 1990. V. 116. № 494. P. 929–941. DOI: 10.1002/qj.49711649407.
- Hoppel K., Bevilacqua R., Allen D., Nedoluha G., Randall C.* POAM III observations of the anomalous 2002 Antarctic ozone hole // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. № 7. P. 1394. DOI: 10.1029/2003GL016899.
- Klekociuk A.R., Tully M.B., Krummel P.B., Henderson S.I., Smale D., Querel R., Nichol S., Alexander S.P., Fraser P.J., Nedoluha G.* The Antarctic ozone hole during 2018 and 2019 // *J. South. Hemisph. Earth Syst. Sci.* 2021. V. 71. № 1. P. 66–91. DOI: 10.1071/ES20010.
- Kogure M., Yue J., Liu H.* Gravity wave weakening during the 2019 Antarctic stratospheric sudden warming // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48. № 8. P. e2021GL092537. DOI: 10.1029/2021GL092537.
- 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. DOI: 10.5194/acp-12-8115-2012.
- Lim E.-P., Hendon H.H., Butler A.H., Thompson D.W.J., Lawrence Z.D., Scaife A.A., Shepherd T.G., Polichtchouk I., Nakamura H., Kobayashi C., Comer R., Coy L., Dowdy A., Garreaud R.D., Newman P.A., Wang G.* The 2019 Southern Hemisphere stratospheric polar vortex weakening and its impacts // *B. Am. Meteorol. Soc.* 2021. V. 102. № 6. P. E1150–E1171. DOI: 10.1175/BAMS-D-20-0112.1.
- Manney G.L., Sabutis J.L., Allen D.R., Lahoz W.A., Scaife A.A., Randall C.E., Pawson S., Naujokat B., Swinbank R.* Simulations of dynamics and transport during the September 2002 Antarctic major warming // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. № 3. P. 690–707. DOI: 10.1175/JAS-3313.1.
- Manney G.L., Millán L.F., Santee M.L., Wargan K., Lambert A., Neu J.L., Werner F., Lawrence Z.D., Schwartz M.J., Livesey N.J., Read W.G.* Signatures of anomalous transport in the 2019/2020 Arctic stratospheric polar vortex // *J. Geophys. Res.* 2022. V. 127. № 20. P. e2022JD037407. DOI: 10.1029/2022JD037407.
- Milnevsky G., Evtushevsky O., Klekociuk A., Wang Y., Grytsai A., Shulga V., Ivaniha O.* Early indications of anomalous behaviour in the 2019 spring ozone hole over Antarctica // *Int. J. Remote Sens.* 2019. V. 41. № 19. P. 7530–7540. DOI: 10.1080/2150704X.2020.1763497.
- Newman P.A., Kawa S.R., Nash E.R.* On the size of the Antarctic ozone hole // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. № 21. P. L21104. DOI: 10.1029/2004GL020596.
- Newman P.A., Nash E.R.* The unusual Southern Hemisphere stratosphere winter of 2002 // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. № 3. P. 614–628. DOI: 10.1175/JAS-3323.1.
- Noguchi S., Kuroda Y., Kodera K., Watanabe S.* Robust enhancement of tropical convective activity by the 2019 Antarctic sudden stratospheric warming // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. № 15. P. e2020GL088743. DOI: 10.1029/2020GL088743.
- Roy R., Kuttippurath J., Lefèvre F., Raj S., Kumar P.* The sudden stratospheric warming and chemical ozone loss in the Antarctic winter 2019: comparison with the winters of 1988 and 2002 // *Theor. Appl. Climatol.* 2022. V. 149. P. 119–130. DOI: 10.1007/s00704-022-04031-6.
- Safieddine S., Bouillon M., Paracho A.-C., Jumelet J., Tencé F., Pazmino A., Goutail F., Wespes C., Bekki S., Boynard A., Hadji-Lazaro J., Coheur P.-F., Hurtmans D., Clerbaux C.* Antarctic ozone enhancement during the 2019 sudden stratospheric warming event // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. № 14. P. e2020GL087810. DOI: 10.1029/2020GL087810.
- Shen X., Wang L., Osprey S., Hardiman S.C., Scaife A.A., Ma J.* The life cycle and variability of Antarctic weak polar vortex events // *J. Climate.* 2022. V. 35. № 6. P. 2075–2092. DOI: 10.1175/JCLI-D-21-0500.1.
- Solomon S.* Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history // *Rev. Geophys.* 1999. V. 37. № 3. P. 275–316. DOI: 10.1029/1999RG900008.
- Stolarski R.S., McPeters R.D., Newman P.A.* The ozone hole of 2002 as measured by TOMS // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. № 3. P. 716–720. DOI: 10.1175/JAS-3338.1.
- Wargan K., Weir B., Manney G.L., Cohn S.E., Livesey N.J.* The anomalous 2019 Antarctic ozone hole in the GEOS constituent data assimilation system with MLS observations // *J. Geophys. Res.* 2020. V. 125. № 18. P. e2020JD033335. DOI: 10.1029/2020JD033335.
- Waugh D.W., Polvani L.M.* Stratospheric polar vortices. In: Polvani L.M., Sobel A.H., Waugh D.W. (Eds.). *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry* // *Geophysical Monograph Series.* 2010. V. 190. P. 43–57. DOI: 10.1002/9781118666630.ch3.
- 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. DOI: 10.1175/BAMS-D-15-00212.1.
- Zuev V.V., Savelieva E.S.* Dynamic characteristics of the stratospheric polar vortices // *Dokl. Earth Sci.* 2024. V. 517. № 1. P. 1240–1248. DOI: 10.1134/S1028334X24601895.