



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

**АНАЛИЗ ДИНАМИКИ АРКТИЧЕСКОГО ПОЛЯРНОГО ВИХРЯ
ВО ВРЕМЯ ВНЕЗАПНОГО СТРАТОСФЕРНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ
В ЯНВАРЕ 2009 г.**

В.В. ЗУЕВ, Е.С. САВЕЛЬЕВА, А.В. ПАВЛИНСКИЙ*

*Институт мониторинга климатических и экологических систем
Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия*

**esav.pv@gmail.com*

Резюме

Арктический полярный вихрь во время своего жизненного цикла часто подвергается воздействию волновой активности. Распространяющиеся из тропосферы в стратосферу планетарные волны Россби эпизодически приводят к смещению или расщеплению полярного вихря, сопровождающемуся внезапным стратосферным потеплением (ВСП). В январе 2009 г. наблюдалось одно из сильнейших ВСП за весь период наблюдений в Арктике. В данной работе динамика полярного вихря во время ВСП 2009 г. рассмотрена с использованием нового метода, позволяющего определить площадь вихря и скорость ветра по границе вихря, а также оценить средние значения температуры и массового отношения смеси озона внутри вихря на основе данных реанализа ERA5. На основе анализа динамики арктического полярного вихря за 42 года и на примере ВСП 2009 г. показано, что, как правило, при снижении площади вихря менее 10 млн км² и уменьшении средней скорости ветра по границе вихря ниже 30 и 45 м/с соответственно в нижней и средней стратосфере полярный вихрь становится небольшим циклоном, который полностью разрушается в течение 1–3 недель.

Ключевые слова: внезапное стратосферное потепление, геопотенциал, озоновая аномалия, полярный вихрь, полярная стратосфера.

Для цитирования: Зув В.В., Савельева Е.С., Павлинский А.В. Анализ динамики арктического полярного вихря во время внезапного стратосферного потепления в январе 2009 г. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 2. С. 134–146. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-2-134-146>.

Поступила 24.12.2020

После переработки 02.04.2021

Принята 07.04.2021

**ANALYSIS OF THE ARCTIC POLAR VORTEX DYNAMICS DURING
THE SUDDEN STRATOSPHERIC WARMING IN JANUARY 2009**

VLADIMIR V. ZUEV, EKATERINA S. SAVELIEVA, ALEXEY V. PAVLINSKY*

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

**esav.pv@gmail.com*

Summary

The Arctic polar vortex is often affected by wave activity during its life cycle. The planetary Rossby waves propagating from the troposphere to the stratosphere occasionally lead to the displacement or splitting of the polar vortex, accompanied by sudden stratospheric warming (SSW). In January 2009, one of the largest SSWs was observed in the Arctic. In this work, the dynamics of the polar vortex during the 2009 SSW is considered using a new method that allows one to estimate the vortex area, the wind speed at the vortex edge, the mean temperature and ozone mass mixing ratio inside the vortex, based on the fact that the Arctic vortex edge at the 50 and 10 hPa pressure levels is determined by the geopotential values, respectively, $19.5 \cdot 10^4$ and $29.5 \cdot 10^4 \text{ m}^2/\text{s}^2$, using the ERA5 reanalysis data. The application of this method is justified for the Arctic polar vortex, which is characterized by significant variability, especially during the period of its splitting. The splitting of the polar vortex in 2009 was observed on January 24 and 28, respectively, in the middle and lower stratosphere. About a week after the splitting, the vortices became closer in characteristics to small cyclones, which completely collapsed within 1–3 weeks. The influence of planetary wave activity on the polar vortex does not always lead to its breakdown. Short-term splitting of the polar vortex is sometimes observed for several days after which the polar vortex strengthens again and PSCs form inside the vortex. Such a recovery of the polar vortex is most likely to occur in the winter. Based on the analysis of the dynamics of the Arctic polar vortex for 1979–2020 and using the example of the 2009 SSW, we showed that when the vortex area decreases to less than 10 million km^2 and the mean wind speed at the vortex edge decreases below 30 and 45 m/s, respectively, in the lower and middle stratosphere, the polar vortex becomes a small cyclone (with significantly higher temperatures within it), which usually collapses within 3 weeks.

Keywords: geopotential, ozone depletion, polar stratosphere, polar vortex, sudden stratospheric warming.

For Citation: Zuev V.V., Savelieva E.S., Pavlinsky A.V. Analysis of the Arctic polar vortex dynamics during the sudden stratospheric warming in January 2009. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2021, 67 (2): 134–146. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-2-134-146>

Received 24.12.2020

Revised 02.04.2021

Accepted 07.04.2021

ВВЕДЕНИЕ

Арктический стратосферный полярный вихрь, как правило, формируется в октябре–ноябре и разрушается в весенний период [1, 2]. Более раннее разрушение полярного вихря обусловлено влиянием планетарных волн Россби [3–5]. Распространяющиеся из тропосферы вертикальные потоки волновой активности в стратосфере разрушаются в результате взаимодействия с западным стратосферным течением (полярным вихрем) [6]. Происходящее при этом сильное смещение или расщепление полярного вихря сопровождается внезапным стратосферным потеплением (ВСП) [7–9]. ВСП разделяются на главные и минорные. Согласно существующему определению, предложенному Всемирной метеорологической организацией в 1978 г., ВСП можно считать главным, если на высотах от уровня 10 гПа и ниже среднеширотная температура резко возрастает по направлению от 60° широт к полюсу при наблюдаемой смене направления зонального потока в течение нескольких дней/часов [10]. Если при выраженном росте стратосферных температур направление зональных ветров с западного на восточное не меняется, ВСП считается минорным. При минорных ВСП происходит сильное смещение полярного вихря, а при главных — его расщепление на два небольших вихря [11–13]. ВСП представляют собой крупномасштабные температурные возмущения полярной стратосферы и могут способствовать более раннему протеканию весенней перестройки циркуляции стратосферы [14–15].

В формировании полярной озоновой аномалии ключевую роль играет устойчивость полярного вихря в зимне-весенний период [16–18]. Границы полярного вихря представляют собой динамический барьер, препятствующий меридиональному пере-

носу стратосферного озона из тропических и средних широт в полярную область [19, 20]. При этом внутри полярного вихря в стратосфере 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 [21]. Разрушение полярного вихря под действием планетарных волн в зимне-весенний период приводит к притоку в полярную область теплых, богатых озоном воздушных масс, способствующих разрушению ПСО и накоплению стратосферного озона в арктической области [22].

В данной работе рассмотрена динамика арктического полярного вихря во время одного из сильнейших ВСП в январе 2009 г. с использованием нового метода, позволяющего определить площадь вихря и скорость ветра по границе вихря, а также оценить средние значения температуры и массового отношения смеси озона внутри вихря на основе данных реанализа ERA5.

ДАнные И МЕТОды

Среднесуточные данные о потенциальной завихренности и температуре воздуха в области $30-90^\circ$ с. ш. с горизонтальным разрешением $3,0^\circ \times 3,0^\circ$ на уровнях 50 и 10 гПа за период с 10 января по 20 февраля 2009 г. получены по данным реанализа ERA-Interim Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) [23] (<http://apps.ecmwf.int/datasets/>). Среднесуточные данные о скорости зонального и меридионального ветра, геопотенциале, температуре воздуха и массовой концентрации озона в области $30-90^\circ$ с. ш. с горизонтальным разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ на уровнях 50 и 10 гПа за период с 1979 по 2020 г. получены по данным недавно выпущенного реанализа ERA5 [24], являющегося пятым поколением реанализов ECMWF и отличающегося высоким пространственным и временным разрешением (<https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6>).

Существует по крайней мере два метода оконтуривания стратосферных полярных вихрей. Граница полярного вихря может быть определена по максимальному градиенту потенциальной завихренности [25] и с использованием М-функции, характеризующей длину траекторий, проходящих через узлы заданной сетки [26]. Преимуществом М-функции по сравнению с градиентом потенциальной завихренности является ее неоднородность вдоль границы вихря, что позволяет оценить региональные особенности массообмена и определить область динамического барьера по границе вихря. В данной работе динамика стратосферного арктического вихря рассматривается с использованием метода оценки основных параметров вихря при оконтуривании его границ на основе данных о максимальном градиенте температуры и максимальной скорости ветра.

Метод оценки основных параметров арктического полярного вихря при оконтуривании его границ

Геопотенциал Φ^* выражается уравнением [27]:

$$d\Phi^* = g dz, \quad (1)$$

где g — ускорение свободного падения и z — вертикальное расстояние от уровня моря. Поскольку при отсутствии атмосферных движений сила тяжести должна быть точно сбалансирована вертикальной составляющей силы градиента давления [27]

$$dp/dz = -\rho g, \quad (2)$$

где p — давление и ρ — плотность, то

$$d\Phi^* = -(RT/\rho)dp = -RTd\ln p, \quad (3)$$

где R — универсальная газовая постоянная и T — температура. Как видно из уравнения (3), геопотенциал в основном зависит от давления и температуры. Таким образом, геопотенциал достаточно точно описывает динамику полярного вихря, поскольку внутри последнего наблюдается существенное понижение температуры и давления, а за его пределами — повышение. Кроме того, геопотенциал не претерпевает значительных сезонных изменений в период существования вихря и, соответственно, хорошо подходит для определения границ полярного вихря.

Для определения значений геопотенциала, наилучшим образом характеризующих границы арктического полярного вихря в нижней и средней стратосфере (на уровнях 50 и 10 гПа), использовались данные о скорости зонального и меридионального ветра, температуре воздуха и геопотенциале реанализа ERA5. По границе полярного вихря наблюдаются максимальный градиент температуры и, как правило, максимальные значения скорости ветра. На основе ежечасных данных с разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ для уровней 50 и 10 гПа за 1979–2020 гг. были получены следующие значения: температура в точке максимального градиента по широте в диапазоне $40\text{--}90^\circ$ с. ш. для каждого значения долготы градусной сетки, значение геопотенциала в точках максимального градиента температуры, максимальная скорость ветра по широте в диапазоне $40\text{--}90^\circ$ с. ш. для каждого значения долготы градусной сетки. Скорость ветра определялась как векторная сумма зональной и меридиональной скорости. Анализ динамики арктического полярного вихря за 42 года наблюдений показал, что практически во всех случаях максимальная скорость ветра, усредненная по границе полярного вихря, превышает 30 м/с на уровне 50 гПа и 45 м/с на уровне 10 гПа. В среднем за 1979–2020 гг. значение геопотенциала Φ^* в районе максимального градиента температуры по границе вихря составило $\Phi^* = (19,50 \pm 0,15) \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$ на высоте 50 гПа (при максимальной скорости ветра $v > 30 \text{ м/с}$) и $\Phi^* = (29,50 \pm 0,30) \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$ на высоте 10 гПа (при максимальной скорости ветра $v > 45 \text{ м/с}$).

Для анализа динамики арктического полярного вихря и связанных метеорологических параметров зимой 2009 г. рассчитывались площадь вихря, скорость ветра у границы вихря, средняя температура и среднее массовое отношение смеси озона внутри вихря, эти расчеты основывались на том, что граница арктического вихря на уровнях 50 и 10 гПа определяется значениями геопотенциала соответственно $19,5 \cdot 10^4$ и $29,5 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$. Расчеты проводились на уровнях 50 и 10 гПа с января 1979 г. по май 2020 г. (для временных периодов, когда полярный вихрь существовал) с использованием данных реанализа ERA5. Поведение исследуемых параметров в зимне-весенний период 2008/09 г. сравнивалось с 42-летними климатическими средними за 1979–2020 гг., полученными со среднеквадратичными отклонениями (СКО, σ). Климатические средние и значения СКО были сглажены FFT-фильтром (fast Fourier transform filter) по 15 точкам. Временные изменения исследуемых параметров с ноября 2008 г. по февраль 2009 г. были сглажены FFT-фильтром по 3 точкам.

РЕЗУЛЬТАТЫ, ИХ АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

Внезапное стратосферное потепление в арктической стратосфере в январе 2009 г.

В январе 2009 г. наблюдалось одно из самых сильных ВСП [28–35]. Одними из основных параметров, описывающих ВСП, являются потенциальная завихренность и температура. Высокие значения потенциальной завихренности в зимне-весенний период, как правило, определяют местоположение полярного вихря. На рис. 1 приведены поля потенциальной завихренности и температуры на уровнях 50 и 10 гПа над Арктикой

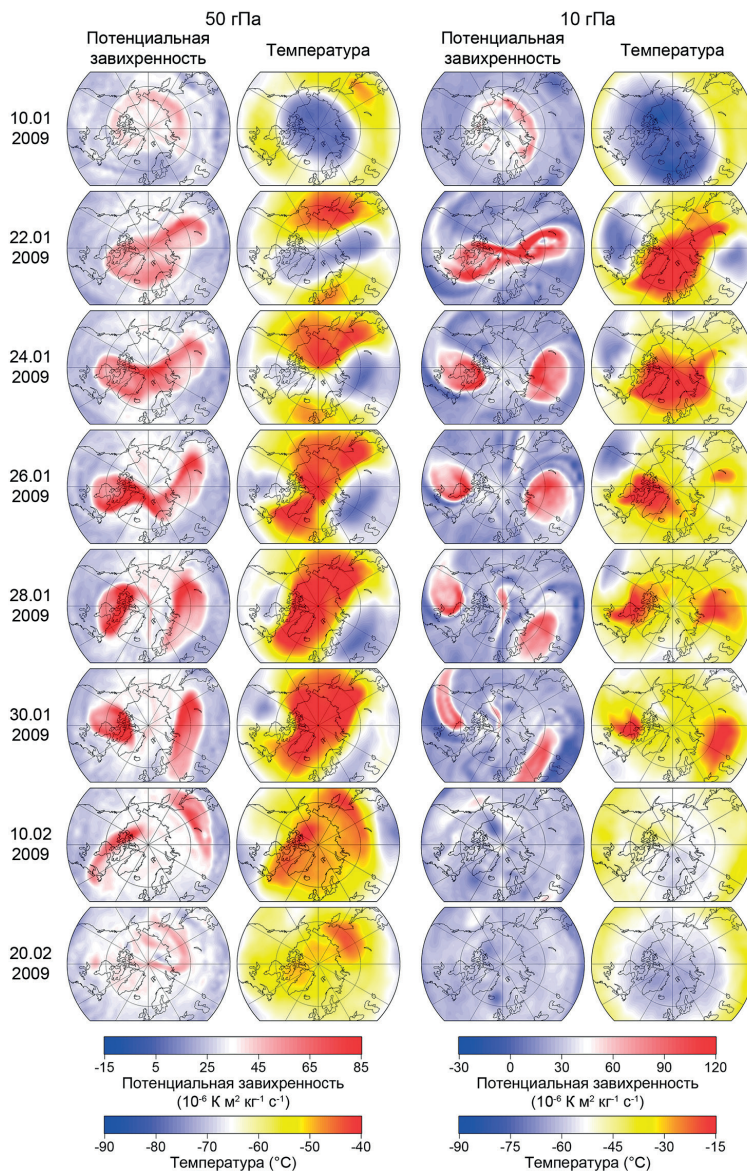


Рис. 1. Поля потенциальной завихренности и температуры на уровнях 50 и 10 гПа над Арктикой для выборочных дат с 10 января по 20 февраля 2009 г.

Fig. 1. Potential vorticity and temperature distributions at the 50 and 10 hPa pressure levels over the Arctic for selected dates from 10 January to 20 February, 2009

с января по февраль 2009 г. по данным реанализа ERA-Interim. В первой половине января 2009 г. полярный вихрь был хорошо центрирован относительно полюса и имел круглую форму. ВСП, произошедшему 24 января, предшествовало вытягивание полярного вихря 22 января, когда он принял форму «восьмерки». 24 января произошло расщепление вихря, полярную область заполнили теплые воздушные массы. Поля потенциальной

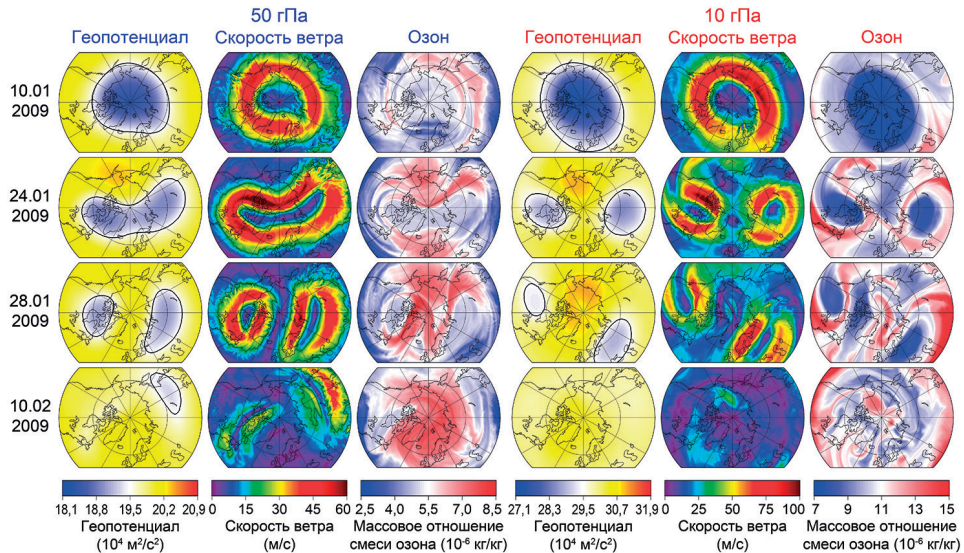


Рис. 2. Поля геопотенциала, скорости ветра и массового отношения смеси озона на уровнях 50 и 10 гПа над Арктикой для выборочных дат с 10 января по 10 февраля 2009 г.

Fig. 2. Geopotential, wind speed and ozone mass mixing ratio distributions at the 50 and 10 hPa pressure levels over the Arctic for selected dates from 10 January to 10 February, 2009

завихренности и температуры с 24 по 30 января демонстрируют разрушение полярного вихря после его расщепления (рис. 1). Согласно рис. 1, ни один из получившихся в результате расщепления фрагментов вихря не сформировался в полноценный полярный вихрь, и в начале февраля он полностью разрушился. Происходящие в средней стратосфере расщепление и разрушение полярного вихря проявлялись в нижней стратосфере с запаздыванием как минимум на 4 дня.

***Анализ динамики полярного вихря зимой 2009 г.
с использованием метода оценки основных параметров
арктического полярного вихря при более точном оконтуривании его границ***

На рис. 2 приведены поля геопотенциала, скорости ветра и массового отношения смеси озона на уровнях 50 и 10 гПа над Арктикой для выборочных дат с 10 января по 10 февраля 2009 г., полученные на основе данных реанализа ERA5. Границы полярного вихря, характеризуемые значениями геопотенциала $19,5 \cdot 10^4$ и $29,5 \cdot 10^4$ м²/с² соответственно на уровнях 50 и 10 гПа, выделены на полях геопотенциала контуром. Как видно из рис. 2, значения геопотенциала $19,5 \cdot 10^4$ м²/с² (на 50 гПа) и $29,5 \cdot 10^4$ м²/с² (на 10 гПа) достаточно точно описывают границы арктического полярного вихря в нижней и средней стратосфере, поскольку соответствуют максимальным значениям скорости ветра, а также пониженному содержанию озона в их пределах и повышенному — за пределами. На рис. 2 также хорошо прослеживается расщепление полярного вихря (24 января в средней стратосфере и 28 января в нижней стратосфере), после которого 10 февраля в средней стратосфере полярный вихрь уже не наблюдался (значения геопотенциала и скорости ветра на рис. 2 (10 гПа) составляют $\Phi^* > 29,5 \cdot 10^4$ м²/с² и $v < 45$ м/с). Разрушение вихря в нижней стратосфере произошло во второй половине февраля (рис. 1). Для анализа динамики арктического полярного вихря и связанных метеорологических параметров во

время ВСП 2009 г. были определены площадь арктического полярного вихря, скорость ветра у границы вихря, средняя температура и среднее массовое отношение смеси озона внутри вихря, основываясь на том, что граница арктического полярного вихря на уровнях 50 и 10 гПа определяется значениями геопотенциала соответственно $19,5 \cdot 10^4$ и $29,5 \cdot 10^4$ м²/с². На рис. 3 приведена динамика исследуемых параметров зимой 2008/09 г. на уровнях 50 и 10 гПа в сравнении с климатическими средними значениями.

Как видно из рис. 3, средняя скорость ветра по границе полярного вихря v в первой половине зимы в основном находилась в пределах нормы. Во второй половине зимы, 20 и 23 января в средней и нижней стратосфере наблюдался пик скорости

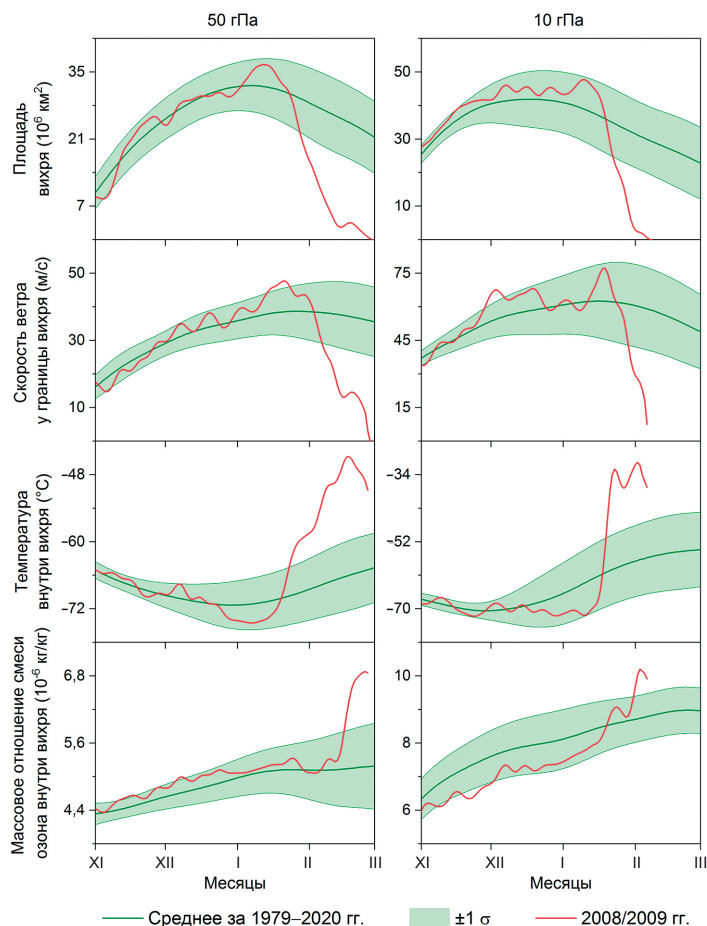


Рис. 3. Временной ход площади арктического полярного вихря, средней скорости ветра у границы полярного вихря, средней температуры внутри полярного вихря и среднего массового отношения смеси озона внутри полярного вихря на уровнях 50 и 10 гПа с ноября 2008 г. по февраль 2009 г. на фоне средних значений за 1979–2020 гг. с СКО ($\pm 1 \sigma$)

Fig. 3. Time series of the area of the Arctic polar vortex, the mean wind speed at the polar vortex edge, the mean temperature inside the polar vortex and the mean ozone mass mixing ratio inside the polar vortex at the 50 and 10 hPa pressure levels from November 2008 to February 2009 and the 1979–2020 climatological means with standard deviations ($\pm 1 \sigma$)

ветра: $v = 83,8$ м/с на уровне 10 гПа и $v = 49,0$ м/с на уровне 50 гПа. В момент расщепления 24 января средняя скорость по границам двух образовавшихся вихрей в средней стратосфере составляла $v = 63,5$ м/с и затем в течение двух недель до разрушения вихря 6 февраля уменьшалась со скоростью 4,0 м/с в сутки. В нижней стратосфере средняя скорость по границам двух образовавшихся вихрей в момент расщепления 28 января достигала $v = 44,7$ м/с, после чего наблюдалось уменьшение скорости на 2,2 м/с в сутки в течение 30 дней до полного разрушения вихря 26 февраля (рис. 3). Согласно изменениям средней скорости ветра по границе вихря (рис. 3) можно предположить, что разрушение вихря в средней и нижней стратосфере произошло 6 и 26 февраля соответственно. При этом остается неясным, можно ли назвать полярным вихрем циклон, наблюдавшийся в стратосфере в феврале (рис. 1, 2). Средняя скорость по границе вихрей в средней стратосфере снизилась до значений $v < 45$ м/с 30 января, а в нижней стратосфере до $v < 30$ м/с — 6 февраля.

Максимальная площадь полярного вихря в средней и нижней стратосфере наблюдалась соответственно 10 и 15 января и достигла 48,1 и 36,5 млн км² (рис. 3). В момент расщепления суммарная площадь вихрей в средней и нижней стратосфере достигала соответственно 20,3 млн км² (24 января на 10 гПа) и 21,2 млн км² (28 января на 50 гПа). Уменьшение площади вихрей до значений ниже 10 млн км² наблюдалось в средней стратосфере 29 января, а в нижней стратосфере — 6 февраля (практически одновременно со снижением скорости вихря в средней и нижней стратосфере до значений менее 45 и 30 м/с соответственно). Стремительное повышение содержания озона внутри вихря в феврале также свидетельствует о том, что граница вихря постепенно перестает быть динамическим барьером для воздушных масс. При этом одним из основных свойств полярного вихря является понижение температуры в его пределах, что обуславливает формирование ПСО и последующее протекание гетерогенных реакций, запускающих каталитический цикл разрушения озона с появлением солнечного излучения. Среднее значение температуры внутри вихря в нижней стратосфере превысило значение 2σ от климатической нормы 5 февраля, практически одновременно с уменьшением скорости ветра по границе вихря ниже 30 м/с и площади вихря — менее 10 млн км² (рис. 3).

Таким образом, на этапе разрушения полярного вихря можно выделить два критерия, за пределами которых полярный вихрь становится небольшим циклоном, разрушающимся полностью в течение 1–3 недель: площадь вихря более 10 млн км² и скорость ветра по границе полярного вихря более 30 и 45 м/с соответственно в нижней и средней стратосфере. При этом, как видно из рис. 3, на этапе формирования полярного вихря в ноябре значения скорости ветра и площади могут какое-то время не удовлетворять предложенным критериям, пока вихрь полностью не сформируется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрена динамика арктического полярного вихря во время одного из сильнейших ВСП в январе 2009 г. по данным реанализа ERA5. Для анализа динамики полярного вихря и связанных метеорологических параметров зимой 2009 г. были рассчитаны площадь вихря, скорость ветра у границы вихря, средняя температура и среднее массовое отношение смеси озона внутри вихря, основываясь на том, что граница арктического вихря на уровнях 50 и 10 гПа определяется значениями геопотенциала соответственно $19,5 \cdot 10^4$ и $29,5 \cdot 10^4$ м²/с². Применение данного метода оправдано для арктического полярного вихря, характеризующегося

значительной изменчивостью, особенно в период его расщепления. Расщепление полярного вихря в 2009 г. наблюдалось 24 и 28 января соответственно в средней и нижней стратосфере. Примерно через неделю после расщепления образовавшиеся вихри по характеристикам стали ближе к небольшим циклонам, которые полностью разрушились в течение 1–3 недель. Воздействие планетарной волновой активности на полярный вихрь не всегда приводит к его разрушению. В некоторых случаях наблюдаются кратковременные расщепления, регистрируемые в течение нескольких дней, после чего вихрь достаточно быстро восстанавливается, формируются ПСО [36]. Восстановление полярного вихря более вероятно в зимние месяцы, когда в арктической стратосфере радиационный нагрев отсутствует или слабый, в отличие от весенних месяцев [37]. На основе анализа динамики арктического полярного вихря за 1979–2020 гг. и на примере ВСП 2009 г. показано, что при снижении площади вихря менее 10 млн км² и уменьшении средней скорости ветра по границе вихря ниже 30 и 45 м/с соответственно в нижней и средней стратосфере полярный вихрь становится небольшим циклоном (с существенно более высокими температурами в его пределах), который, как правило, достаточно быстро, в пределах 3 недель, разрушается.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Источник финансирования. Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № 121031300156-5.

Competing interests. The authors have no competing interests.

Funding sources. This work was supported by the State contract no. 121031300156-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Waugh D.W., Randel W.J.* Climatology of Arctic and Antarctic polar vortices using elliptical diagnostics // *J. Atmos. Sci.* 1999. V. 56. № 11. P. 1594–1613.
2. *Waugh D.W., Polvani L.M.* Stratospheric polar vortices // *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry. Geophysical Monograph Series.* 2010. V. 190. P. 43–57.
3. *Polvani L.M., Saravanan R.* The three-dimensional structure of breaking Rossby waves in the polar wintertime stratosphere // *J. Atmos. Sci.* 2000. V. 57. № 21. P. 3663–3685.
4. *Plumb R.A.* Planetary waves and the extratropical winter stratosphere // *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry. Geophysical Monograph Series.* 2010. V. 190. P. 23–41.
5. *Butler A.H., Seidel D.J., Hardiman S.C., Butchart N., Birner T., Match A.* Defining Sudden Stratospheric Warmings // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2015. V. 96. № 11. P. 1913–1928.
6. *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.
7. *Charlton A.J., Polvani L.M.* A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: Climatology and modeling benchmarks // *J. Climate.* 2007. V. 20. № 3. P. 449–469.
8. *Charlton A.J., Polvani L.M., Perlwitz J., Sassi F., Manzini E., Shibata K., Pawson S., Nielsen J.E., Rind D.* A new look at stratospheric sudden warmings. Part II: Evaluation of numerical model simulations // *J. Climate.* 2007. V. 20. № 3. P. 470–488.
9. *Matthewman N.J., Esler J.G., Charlton-Perez A.J., Polvani L.M.* A new look at stratospheric sudden warmings. Part III: Polar vortex evolution and vertical structure // *J. Climate.* 2009. V. 22. № 6. P. 1566–1585.
10. Abridged final report of the seventh session of the commission for atmospheric sciences, Manila, 27 February — 10 March 1978. WMO Rep. 509. Geneva: WMO, 1978. 113 p.

11. Flury T., Hocke K., Haefele A., Kämpfer N., Lehmann R. Ozone depletion, water vapor increase, and PSC generation at midlatitudes by the 2008 major stratospheric warming // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. № 18. P. D18302.
12. 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.
13. Torre L., Garcia R.R., Barriopedro D., Chandran A. Climatology and characteristics of stratospheric sudden warmings in the Whole Atmosphere Community Climate Model // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. № 4. P. D04110.
14. Варгин П.Н., Кострыкин С.В., Ракушина Е.В., Володин Е.М., Погорельцев А.И. Исследование изменчивости дат весенних перестроек циркуляции стратосферы и параметров стратосферного полярного вихря в Арктике по данным моделирования и реанализа // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана.* 2020. Т. 56. № 5. С. 526–539.
15. Savenkova E.N., Kanukhina A.Yu., Pogoreltsev A.I., Merzlyakov E.G. Variability of the springtime transition date and planetary waves in the stratosphere // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2012. V. 90–91. P. 1–8.
16. Solomon S., Garcia R.R., Rowland F.S., Wuebbles D.J. On the depletion of Antarctic ozone // *Nature.* 1986. V. 321. P. 755–758.
17. 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.
18. Solomon S. Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history // *Rev. Geophys.* 1999. V. 37. № 3. P. 275–316.
19. Manney G.L., Zurek R.W. On the motion of air through the stratospheric polar vortex // *J. Atmos. Sci.* 1994. V. 51. № 20. P. 2973–2994.
20. Sobel A.H., Plumb R.A., Waugh D.W. Methods of calculating transport across the polar vortex edge // *J. Atmos. Sci.* 1997. V. 54. № 18. P. 2241–2260.
21. Finlayson-Pitts B.J., Pitts J.N. *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments, and Applications.* California: Academic Press, 2000. 969 p.
22. Whiteway J.A., Duck T.J., Donovan D.P., Bird J.C., Pal S.R., Carswell A.I. Measurements of gravity wave activity within and around the Arctic stratospheric vortex // *Geophys. Res. Lett.* 1997. V. 24. № 11. P. 1387–1390.
23. 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., Kållberg 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., Vitari F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 2011. V. 37. № 656. P. 553–597.
24. 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. № 729. P. 1–51.
25. 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.
26. 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.

27. Holton J. An Introduction to Dynamic Meteorology. 4th Edition. California: Academic Press, 2004. 535 p.
28. Manney G.L., Schwartz M.J., Krüger K., Santee M.L., Pawson S., Lee J.N., Daffer W.H., Fuller R.A., Livesey N.J. Aura Microwave Limb Sounder observations of dynamics and transport during the record-breaking 2009 Arctic stratospheric major warming // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. № 12. P. L12815.
29. Wang H., Fuller-Rowell T.J., Akmaev R.A., Hu M., Kleist D.T., Iredell M.D. First simulations with a whole atmosphere data assimilation and forecast system: The January 2009 major sudden stratospheric warming // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. № 12. P. A12321.
30. Klimenko M.V., Bessarab F.S., Sukhodolov T.V., Klimenko V.V., Koren'kov Yu.N., Zakharenkova I.E., Chirik N.V., Vasil'ev P.A., Kulyamin D.V., Shmidt Kh., Funke B., Rozanov E.V. Ionospheric effects of the sudden stratospheric warming in 2009: Results of simulation with the first version of the EAGLE model // *Russ. J. Phys. Chem. B.* 2018. V. 12. № 4. P. 760–770.
31. Labitzke K., Kunze M. On the remarkable Arctic winter in 2008/2009 // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. P. D00102.
32. Iida C., Hirooka T., Eguchi N. Circulation changes in the stratosphere and mesosphere during the stratospheric sudden warming event in January 2009 // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119. № 12. P. 7104–7115.
33. Funke B., Ball W., Bender S., Gardini A., Harvey V.L., Lambert A., López-Puertas M., Marsh D.R., Meraner K., Nieder H., Päivärinta S.-M., Pérot K., Randall C.E., Reddmann T., Rozanov E., Schmidt H., Seppälä A., Sinnhuber M., Sukhodolov T., Stiller G.P., Tsvetkova N.D., Verronen P.T., Versick S., von Clarmann T., Walker K.A., Yushkov V. HEPPA-II model–measurement intercomparison project: EPP indirect effects during the dynamically perturbed NH winter 2008–2009 // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 17. № 5. P. 3573–3604.
34. Tao M., Konopka P., Ploeger F., Grooß J.-U., Müller R., Volk C.M., Walker K.A., Riese M. Impact of the 2009 major sudden stratospheric warming on the composition of the stratosphere // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. № 15. P. 8695–8715.
35. Gray L.J., Brown M.J., Knight J., Andrews M., Lu H., O'Reilly C., Anstey J. Forecasting extreme stratospheric polar vortex events // *Nature Communication.* 2020. V. 11. P. 4630.
36. Zuev V.V., Savelieva E. The role of the polar vortex strength during winter in Arctic ozone depletion from late winter to spring // *Polar Sci.* 2019. V. 22. P. 100469.
37. Zuev V.V., Savelieva E. Arctic polar vortex dynamics during winter 2006/2007 // *Polar Sci.* 2020. V. 25. P. 100532.

REFERENCES

1. Waugh D.W., Randel W.J. Climatology of Arctic and Antarctic polar vortices using elliptical diagnostics. *J. Atmos. Sci.* 1999, 56 (11): 1594–1613.
2. Waugh D.W., Polvani L.M. Stratospheric polar vortices. *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry. Geophysical Monograph Series.* 2010, 190: 43–57.
3. Polvani L.M., Saravanan R. The three-dimensional structure of breaking Rossby waves in the polar wintertime stratosphere. *J. Atmos. Sci.* 2000, 57 (21): 3663–3685.
4. Plumb R.A. Planetary waves and the extratropical winter stratosphere. *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry. Geophysical Monograph Series.* 2010, 190: 23–41.
5. Butler A.H., Seidel D.J., Hardiman S.C., Butchart N., Birner T., Match A. Defining Sudden Stratospheric Warmings. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2015, 96 (11): 1913–1928.
6. Limpasuvan V., Thompson D.W.J., Hartmann D.L. The life cycle of the Northern Hemisphere sudden stratospheric warmings. *J. Climate.* 2004, 17 (13): 2584–2596.

7. Charlton A.J., Polvani L.M. A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: Climatology and modeling benchmarks. *J. Climate*. 2007, 20 (3): 449–469.
8. Charlton A.J., Polvani L.M., Perlwitz J., Sassi F., Manzini E., Shibata K., Pawson S., Nielsen J.E., Rind D. A new look at stratospheric sudden warmings. Part II: Evaluation of numerical model simulations. *J. Climate*. 2007, 20 (3): 470–488.
9. Matthewman N.J., Esler J.G., Charlton-Perez A.J., Polvani L.M. A new look at stratospheric sudden warmings. Part III: Polar vortex evolution and vertical structure. *J. Climate*. 2009, 22 (6): 1566–1585.
10. Abridged final report of the seventh session of the commission for atmospheric sciences, Manila, 27 February — 10 March 1978. WMO Rep. 509. Geneva: WMO, 1978: 113 p.
11. Flury T., Hocke K., Haefele A., Kämpfer N., Lehmann R. Ozone depletion, water vapor increase, and PSC generation at midlatitudes by the 2008 major stratospheric warming. *J. Geophys. Res.* 2009, 114 (18): D18302.
12. 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, 12 (17): 8115–8129.
13. Torre L., Garcia R.R., Barriopedro D., Chandran A. Climatology and characteristics of stratospheric sudden warmings in the Whole Atmosphere Community Climate Model. *J. Geophys. Res.* 2012, 117 (4): D04110.
14. Vargin P.N., Kostykin S.V., Rakushina E.V., Volodin E.M., Pogoreltsev A.I. Study of the variability of spring breakup dates and Arctic stratospheric polar vortex parameters from simulation and reanalysis data. *Izvestiia RAN. Fizika atmosfery i okeana. Atmos. Ocean. Phys.* 2020, 56 (5): 458–469. [In Russian].
15. Savenkova E.N., Kanukhina A. Yu., Pogoreltsev A.I., Merzlyakov E.G. Variability of the springtime transition date and planetary waves in the stratosphere. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2012, 90–91: 1–8.
16. Solomon S., Garcia R.R., Rowland F.S., Wuebbles D.J. On the depletion of Antarctic ozone. *Nature*. 1986, 321: 755–758.
17. Newman P.A., Kawa S.R., Nash E.R. On the size of the Antarctic ozone hole. *Geophys. Res. Lett.* 2004, 31 (21): L21104.
18. Solomon S. Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history. *Rev. Geophys.* 1999, 37 (3): 275–316.
19. Manney G.L., Zurek R.W. On the motion of air through the stratospheric polar vortex. *J. Atmos. Sci.* 1994, 51 (20): 2973–2994.
20. Sobel A.H., Plumb R.A., Waugh D.W. Methods of calculating transport across the polar vortex edge. *J. Atmos. Sci.* 1997, 54 (18): 2241–2260.
21. Finlayson-Pitts B.J., Pitts J.N. *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments, and Applications*. California: Academic Press, 2000: 969 p.
22. Whiteway J.A., Duck T.J., Donovan D.P., Bird J.C., Pal S.R., Carswell A.I. Measurements of gravity wave activity within and around the Arctic stratospheric vortex. *Geophys. Res. Lett.* 1997, 24 (11): 1387–1390.
23. 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., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavalato C., Thépaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 2011, 37 (656): 553–597.
24. 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, 146 (729): 1–51.

25. Lawrence Z.D., Manney G.L., Wargan K. Reanalysis intercomparisons of stratospheric polar processing diagnostics. *Atmos. Chem. Phys.* 2018, 18 (18): 13547–13579.

26. Smith M.L., McDonald A.J. A quantitative measure of polar vortex strength using the function M. *J. Geophys. Res.* 2014, 119 (10): 5966–5985.

27. Holton J. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. 4th Edition. California: Academic Press, 2004: 535 p.

28. Manney G.L., Schwartz M.J., Krüger K., Santee M.L., Pawson S., Lee J.N., Daffer W.H., Fuller R.A., Livesey N.J. Aura Microwave Limb Sounder observations of dynamics and transport during the record-breaking 2009 Arctic stratospheric major warming. *Geophys. Res. Lett.* 2009, 36 (12): L12815.

29. Wang H., Fuller-Rowell T.J., Akmaev R.A., Hu M., Kleist D.T., Iredell M.D. First simulations with a whole atmosphere data assimilation and forecast system: The January 2009 major sudden stratospheric warming. *J. Geophys. Res.* 2011, 116 (12): A12321.

30. Klimenko M.V., Bessarab F.S., Sukhodolov T.V., Klimenko V.V., Koren'kov Yu.N., Zakharenkova I.E., Chirik N.V., Vasil'ev P.A., Kulyamin D.V., Shmidt Kh., Funke B., Rozanov E.V. Ionospheric effects of the sudden stratospheric warming in 2009: Results of simulation with the first version of the EAGLE model. *Russ. J. Phys. Chem. B.* 2018, 12 (4): 760–770.

31. Labitzke K., Kunze M. On the remarkable Arctic winter in 2008/2009. *J. Geophys. Res.* 2009, 114: D00102.

32. Iida C., Hirooka T., Eguchi N. Circulation changes in the stratosphere and mesosphere during the stratospheric sudden warming event in January 2009. *J. Geophys. Res.* 2014, 119 (12): 7104–7115.

33. Funke B., Ball W., Bender S., Gardini A., Harvey V.L., Lambert A., López-Puertas M., Marsh D.R., Meraner K., Nieder H., Päivärinta S.-M., Pérot K., Randall C.E., Reddmann T., Rozanov E., Schmidt H., Seppälä A., Sinnhuber M., Sukhodolov T., Stiller G.P., Tsvetkova N.D., Verronen P.T., Versick S., von Clarmann T., Walker K.A., Yushkov V. HEPPA-II model–measurement intercomparison project: EPP indirect effects during the dynamically perturbed NH winter 2008–2009. *Atmos. Chem. Phys.* 2017, 17 (5): 3573–3604.

34. Tao M., Konopka P., Ploeger F., Groß J.-U., Müller R., Volk C.M., Walker K.A., Riese M. Impact of the 2009 major sudden stratospheric warming on the composition of the stratosphere. *Atmos. Chem. Phys.* 2015, 15 (15): 8695–8715.

35. Gray L.J., Brown M.J., Knight J., Andrews M., Lu H., O'Reilly C., Anstey J. Forecasting extreme stratospheric polar vortex events. *Nature Communication*. 2020, 11: 4630.

36. Zuev V.V., Savelieva E. The role of the polar vortex strength during winter in Arctic ozone depletion from late winter to spring. *Polar Sci.* 2019, 22: 100469.

37. Zuev V.V., Savelieva E. Arctic polar vortex dynamics during winter 2006/2007. *Polar Sci.* 2020, 25: 100532.