

УДК 551.510.534

## Особенности перестройки циркуляции стратосферы вследствие внезапного стратосферного потепления в январе 2009 г.

В.В. Зуев, Н.Е. Зуева, В.Ю. Агеева, Е.С. Савельева\*

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

Поступила в редакцию 29.12.2016 г.

Проанализировано крупнейшее внезапное стратосферное потепление (ВСП), зарегистрированное в январе 2009 г. Показано, что произошедшее необратимое расщепление и последующее разрушение арктического циркумполярного вихря вызвали аномально раннюю перестройку циркуляции стратосферы. Проведен анализ динамики вертикальных профилей температуры над станциями Нью-Олесунн и Алерт, отражающий распространение потепления из средней стратосферы до верхней тропосферы и эволюцию тропопаузы. Рассмотрено нехарактерное поведение общего содержания озона в пределах Арктической области в зимне-весенний период 2009 г. после ВСП, препятствовавшего восстановлению зимнего режима циркуляции.

*Ключевые слова:* внезапное стратосферное потепление, весенняя перестройка циркуляции стратосферы, северный циркумполярный вихрь, эволюция тропопаузы, общее содержание озона, радиационный нагрев; sudden stratospheric warming, spring alteration of the stratospheric circulation, Arctic circumpolar vortex, tropopause evolution, total ozone content, radiation heating.

### Введение

Зимний режим циркуляции стратосферы тесно связан с существованием циркумполярного вихря. Переход к летнему режиму стратосферной циркуляции происходит вследствие весенней перестройки. Ее сроки испытывают сильные межгодовые колебания. Ранняя перестройка циркуляции стратосферы наблюдается в марте, средняя — в апреле, поздняя — в мае [1]. Значительную роль в этом играют внезапные стратосферные потепления (ВСП), возникающие при диссипации проникающих из тропосферы в стратосферу планетарных волн в результате их нелинейного взаимодействия с западным стратосферным потоком. ВСП характеризуются резким замедлением западных ветров циркумполярного вихря или сменой их направления, что сопровождается ростом стратосферных температур на несколько десятков градусов в течение достаточно короткого периода [2]. Образование стратосферного антициклона приводит к смене направления вертикального переноса в стратосфере сверху вниз, благодаря чему происходит адиабатический нагрев воздуха при его опускании.

ВСП разделяются на большие (*major sudden stratospheric warmings (SSW)*) и малые (*minor SSW*). Согласно определению Всемирной метеоро-

логической организации ВСП можно считать большим, если на высотах от 10 гПа (~31 км) и ниже среднеширотная температура резко возрастает от 60° широт к полюсу при наблюдаемой смене направления зонального потока в течение нескольких дней/часов. Если при выраженном росте стратосферных температур направление зональных ветров с западного на восточное не меняется, ВСП считается малым [3]. Как правило, при малых ВСП фактически происходит смещение циркумполярного вихря, при больших ВСП возможны его расщепление и разрушение [4].

Таким образом, ВСП представляют собой крупномасштабные температурные возмущения полярной стратосферы, оказывающие значительное влияние на ее циркуляцию, и могут способствовать более ранней перестройке циркуляции стратосферы. Однако события ВСП следует отличать от финального стратосферного потепления, которое связано с окончательным разрушением зимнего стратосферного циркумполярного вихря в весеннее время при усилении радиационного нагрева стратосферы. Как правило, если ВСП происходит в конце января — начале февраля, то циркумполярный вихрь успевает восстановиться и весенняя перестройка циркуляции происходит только в апреле [5]. Восстановление вихря связано с опусканием холодных воздушных масс из мезосферы. Если восстановления зимнего типа циркуляции не происходит, реализуется финальная перестройка. Целью нашей работы является исследование аномально ранней перестройки циркуляции стратосферы после крупнейшего в Арктике большого ВСП, зарегистрированного 24 января 2009 г. [6].

\* Владимир Владимирович Зуев (vvzuev@imces.ru);  
Нина Евгеньевна Зуева (vzuev@list.ru); Виктория Юрьевна Агеева; Екатерина Сергеевна Савельева (kapitosh89@gmail.com).

## **Расщепление и разрушение арктического циркумполярного вихря при внезапном стратосферном потеплении в январе 2009 г.**

Основные параметры, характеризующие ВСП, — это потенциальная завихренность и температура на высотах средней стратосферы на уровне 10 гПа. Высокие значения потенциальной завихренности, как правило, описывают границы циркумполярного вихря; в пределах вихря наблюдаются низкие значения температуры, а за его пределами — высокие. На рис. 1 приведены поля потенциальной завихренности и температуры на высоте ~31 км (10 гПа) в течение периода январь–февраль 2009 г., охватывающего событие ВСП 24 января, по данным реанализа ERA Interim [7].

На рис. 1 видно, что 7 января циркумполярный вихрь имел округлую форму и был центрирован относительно полюса, при этом минимальные температуры регистрировались внутри вихря. Первые проявления будущего ВСП отличались постепенным вытягиванием вихря. Максимально вытянутую форму, значительно выходящую за пределы полярной области, циркумполярный вихрь принял 14 января, хотя температуры внутри вихря сохраняли низкие значения. Через восемь суток, 22 января, вихрь принял форму «восьмерки», в узкую часть которой проникли теплые массы воздуха. Наконец, 24 января произошло расщепление вихря на два фрагмента, которые в течение последующих двух недель постепенно «растворились» в окружающих их теплых воздушных массах; 14 февраля вихрь фактически исчез и в дальнейшем не восстановился.

Активность циркумполярного вихря характеризуется значениями максимальной потенциальной завихренности и скорости зонального потока на 60° с.ш. На рис. 2 приведены значения максимальной потенциальной завихренности на высоте ~32 км и средней скорости зонального потока на 60° с.ш. на высоте ~31 км, полученные по данным Goddard Space Flight Center (GSFC) NASA [8]. Видно, что еще в начале января рассматриваемые параметры не выходили за пределы интервала среднеквадратичного отклонения (СКО). Постепенное вытягивание вихря в первой половине января происходило на фоне роста максимальных значений потенциальной завихренности и средней скорости зонального потока. Рассматриваемые параметры достигли экстремально высоких значений 14 января, когда циркумполярный вихрь принял максимально вытянутую форму, выйдя за пределы интервала СКО. При расщеплении вихря на два фрагмента 24 января средняя скорость зонального потока приблизилась к нулю, произошла смена его направления с западного на восточное и 29 января средние значения скорости достигли –32 м/с. Максимальные значения потенциальной завихренности через три дня после ВСП, 27 января, еще находились у нижнего предела СКО, однако в середине февраля они достигли значений, характерных для конца апреля.

Таким образом, опираясь на данные, представленные на рис. 1 и 2, можно заключить, что после разрушения циркумполярного вихря, произошедшего вследствие ВСП 24 января 2009 г., стратосферный вихрь не смог восстановиться, т.е. в середине февраля произошла аномально ранняя перестройка циркуляции стратосферы.

## **Анализ динамики вертикальных температурных профилей над арктическими станциями Нью-Олесунн и Алерт за период с декабря 2008 по май 2009 г.**

Большие ВСП, как правило, носят настолько масштабный характер, что проявляются во всех атмосферных слоях от тропосферы до термосферы, при этом в нижней термосфере наблюдается потепление, а в мезосфере похолодание [9]. В средней стратосфере во время ВСП регистрируется потепление при общем нисходящем движении воздушных масс, в то время как в верхней тропосфере возможно похолодание при их восходящем движении [9]. В результате масштабных атмосферных возмущений могут запускаться процессы весенней перестройки циркуляции стратосферы, обычно происходящие в апреле [1].

На рис. 3 показаны температурные профили над станциями Нью-Олесунн (78,92° с.ш., 11,92° в.д.; Норвегия) и Алерт (82,48° с.ш., 62,35° з.д.; Канада) за период с декабря 2008 по май 2009 г. на основе результатов шар-зондовых измерений, которые представлены в базах данных NDACC [10] и Университета Вайоминга [11] соответственно. Данные обеих станций, несмотря на значительное удаление относительно друг от друга, отражают протекание одних и тех же процессов в средней и нижней стратосфере. Зимой 2008/09 г., с конца декабря до середины января, наблюдались характерные для Арктики зимние профили температуры (рис. 3), со значительным выхолаживанием в средней стратосфере и слабо выраженной тропопаузой. Во второй половине января в результате мощнейшего потепления в верхней и средней стратосфере при усилении волнового торможения зонального потока произошла ранняя перестройка циркуляции. После расщепления циркумполярного вихря, с 24 по 28 января, сформировалась ярко выраженная тропопауза, свойственная летней температурной стратификации Арктического региона, которая прослеживается во всех представленных на рис. 3 профилях вплоть до 22 мая.

Восстановление зимнего стратосферного вихря, разрушенного большим ВСП, обычно происходит при опускании холодных воздушных масс из мезосферы до нижней стратосферы. Однако, как видно на рис. 3, после события ВСП 2009 г. похолодания ниже 30 км не произошло. Можно предположить, что тепловой барьер в нижней стратосфере был обеспечен аномальным ростом общего содержания озона (ОСО), произошедшим после ВСП. На рис. 4 приведены значения средней скорости зонального потока на 60° с.ш. и арктической температуры на высоте 20 км, объема полярных стратосферных

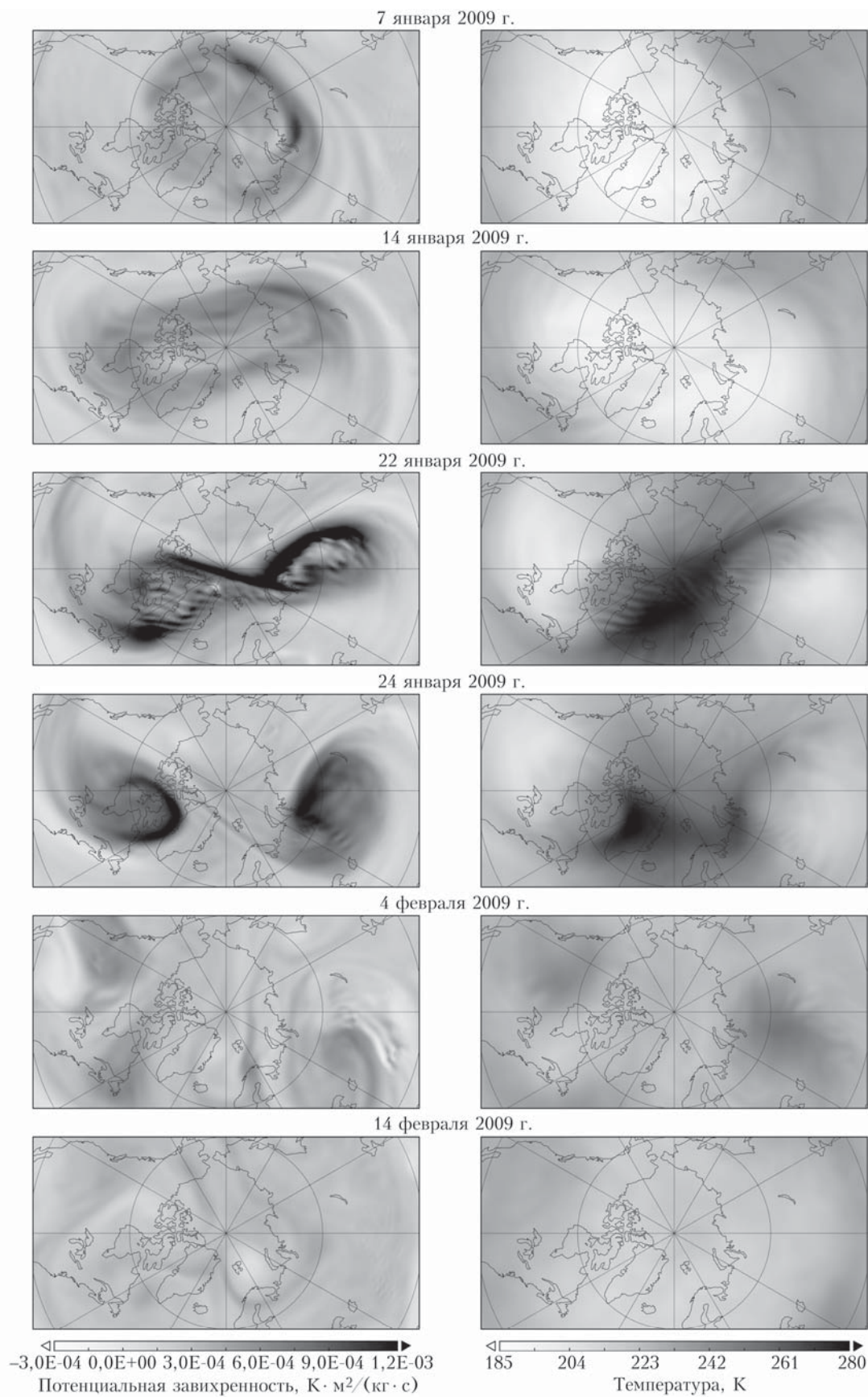


Рис. 1. Поля потенциальной завихренности и температуры на высоте ~31 км (изобарическая поверхность 10 гПа) для 7, 14, 22 и 24 января, а также 4 и 14 февраля 2009 г. по данным реанализа ERA Interim



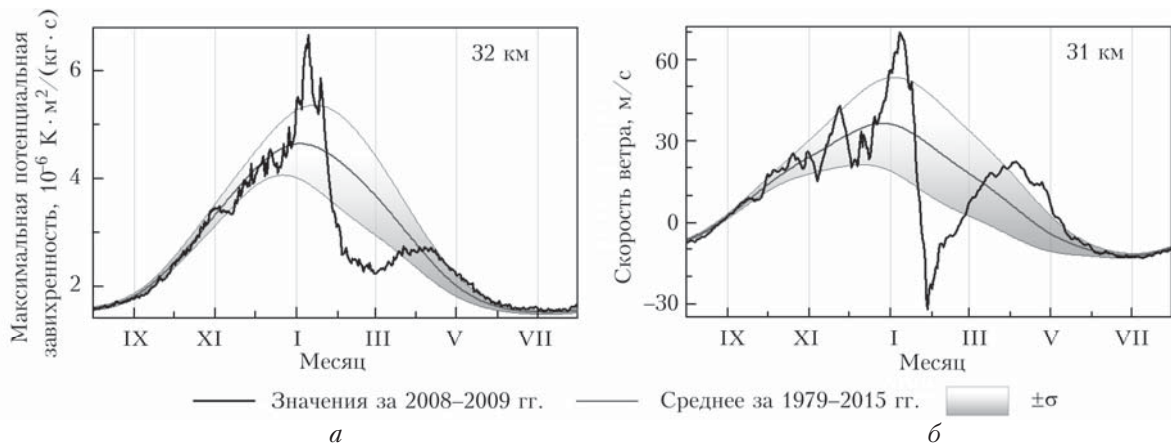


Рис. 2. Среднесуточные изменения значений максимальной потенциальной завихренности в Арктике на высоте ~32 км и средней скорости ветра на 60° с.ш. на высоте ~31 км в период с августа 2008 по июль 2009 г. на фоне среднеквадратичных отклонений ( $\pm\sigma$ ) от усредненных значений этих величин за период с 1979 по 2015 г.

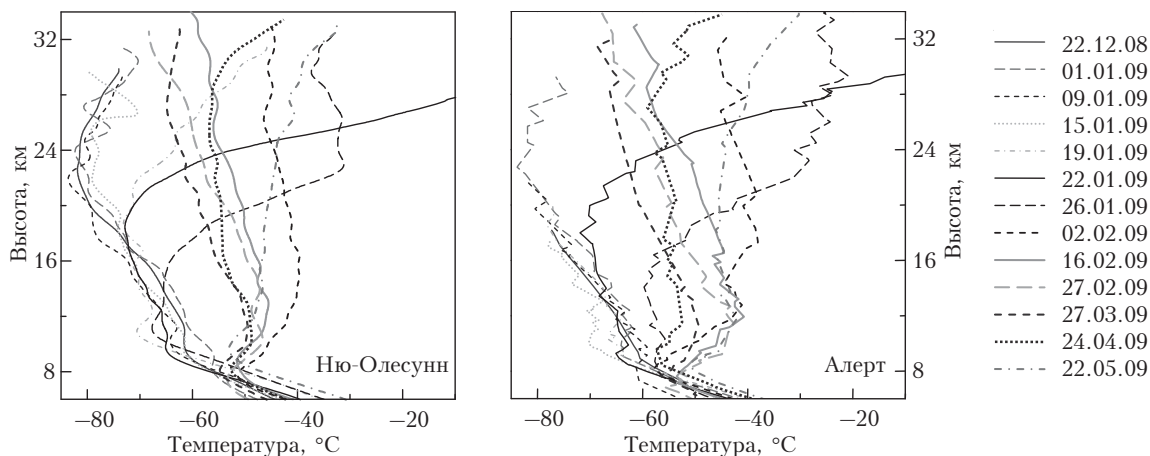


Рис. 3. Вертикальные профили температуры над норвежской станцией Нью-Олесунн (78,92° с.ш., 11,92° в.д.) и канадской станцией Алерт (82,48° с.ш., 62,35° з.д.) за период с 22 декабря 2008 г. по 22 мая 2009 г.

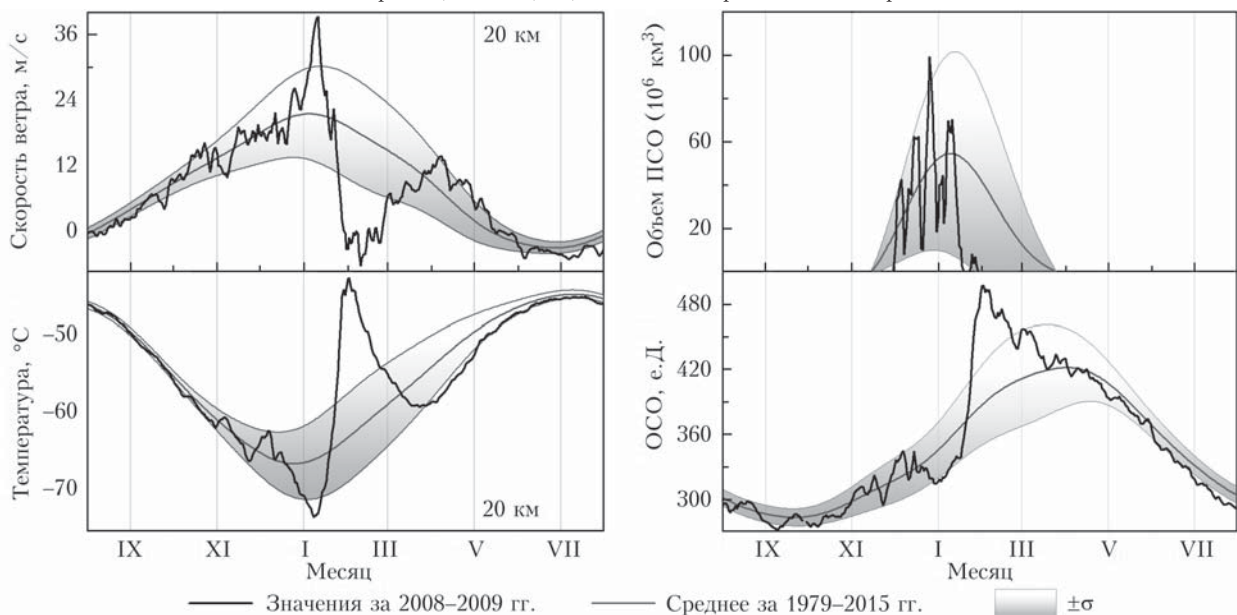


Рис. 4. Среднесуточные изменения значений скорости ветра на 60° с.ш. и температуры в области 60–90° с.ш. на высоте ~20 км (изобарическая поверхность 50 гПа), объема ПСО в области 60–90° с.ш. и ОСО в области 63–90° с.ш. в период с августа 2008 по июль 2009 г. на фоне среднеквадратичных отклонений ( $\pm\sigma$ ) от усредненных значений этих величин за период с 1979 по 2015 г.

облаков (ПСО) и ОСО в Арктике с августа 2008 г. по июль 2009 г. (по данным GSFC NASA [8]). На высоте 20 км ускорение зонального потока наблюдалось с 7 по 14 января, после чего произошло резкое понижение скорости ветра со сменой его направления в конце января. Практически весь февраль средние значения скорости находились в районе нуля и только в начале марта приблизились к климатической норме. Расщепление циркумполярного вихря 24 января привело к заполнению полярной стратосферы теплыми, богатыми озоном воздушными массами из субарктических широт. С 26 января по 23 февраля наблюдались максимальные за 38 лет наблюдений значения температуры для этого периода. Резкое потепление стратосферного полярного воздуха во второй половине января привело к стремительному таянию частиц ПСО, что исключило возможность активизации гетерогенных циклов восстановления хлора на их поверхностях, которые приводят к разрушению стратосферного озона. В итоге с 26 января по 8 марта в Полярной области регистрировались аномально высокие значения ОСО, характеризующие, главным образом, содержание озона в стратосфере. Вследствие того, что стратосферный озон является эффективным поглотителем УФ солнечной радиации, его увеличение стало причиной радиационного разогрева нижней стратосферы. В результате на высотах ниже 30 км сформировался тепловой барьер, препятствующий выхолаживанию и не позволивший восстановиться зимнему типу циркуляции стратосферы.

### Заключение

Как правило, весенняя перестройка циркуляции стратосферы, обусловленная радиационными процессами (сезонное изменение зенитного угла Солнца), осуществляется в середине апреля. Однако динамические процессы в стратосфере оказывают значительное влияние на сроки и особенности протекания весенней перестройки. ВСП являются одним из ярчайших динамических проявлений взаимодействия стратосферы и тропосферы. ВСП зарождаются в тропосфере при усилении и распространении в среднюю и верхнюю стратосферу вертикального потока волновой планетарной активности (поток Элиассена–Пальма). Проникающие в стратосферу планетарные волны, распространяясь в западном направлении и нелинейно взаимодействуя с зональным потоком, диссипируют, что приводит к замедлению или смене направления зонального потока и масштабному потеплению [6]. Тепло распространяется вниз, вызывая раннюю перестройку циркуляции стратосферы. При этом если большое ВСП происходит в конце января – начале февраля, то зимний тип циркуляции, как правило, успевает

восстановиться, и весенняя перестройка циркуляции происходит только в апреле [5].

Большое ВСП 24 января 2009 г. привело к расщеплению и последующему необратимому разрушению циркумполярного вихря, запустило механизмы ранней перестройки циркуляции стратосферы. Восстановление зимнего типа циркуляции до конца апреля не произошло, в том числе из-за теплового барьера в нижней стратосфере, обусловленного аномальным ростом ОСО в феврале–марте. Ранняя перестройка стратосферной циркуляции, ставшая следствием данного ВСП, оказалась финальной.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-50017 мол\_нр.

1. Козельцева В.Ф., Алешина А.М., Кузнецова Н.Н. Весенняя перестройка циркуляции стратосферы и устойчивый переход температуры воздуха через 0 °С, +5 °С весной // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 353. С. 88–108.
2. Mohanakumar K. Stratosphere troposphere interactions: An introduction. Netherlands: Springer, 2008. 424 p.
3. 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.
4. Варгин П.Н., Володин Е.М. Анализ воспроизведения динамических процессов в стратосфере климатической моделью ИВМ РАН // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2016. Т. 52, № 1. С. 3–18.
5. Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н. Межгодовая и климатическая изменчивость сроков весенней перестройки циркуляции стратосферы // Уч. зап. РГГМУ. 2010. № 11. С. 53–62.
6. Kuttippurath J., Nikulin G. A comparative study of the major sudden stratospheric warmings in the Arctic winters 2003/2004–2009/2010 // Atmos. Chem. Phys. 2012. V. 12, N 17. P. 8115–8129.
7. The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). ERA Interim reanalysis. URL: <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=pl/> (дата обращения 10.10.2016).
8. Goddard Space Flight Center (GSFC). NASA's Ozone Hole Watch Web Site. URL: <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/SH.html> (дата обращения 10.10.2016).
9. Flury T., Hoche 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. D. 2009. V. 114, N 18. P. D18302.
10. Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC). NOAA's National Weather Service. URL: <http://www.ndsc.ncep.noaa.gov/> (дата обращения 10.10.2016).
11. University of Wyoming. College of Engineering. Department of Atmospheric Science. Soundings. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (дата обращения 10.10.16 г.).

V.V. Zuev, N.E. Zueva, V.Y. Ageyeva, E.S. Savelieva. Features of the stratospheric circulation dynamics due to the January 2009 sudden stratospheric warming.

Effects of the major sudden stratospheric warming event in January 2009 on the stratospheric circulation dynamics are analyzed. Irreversible splitting and successive destruction of the arctic circumpolar vortex on January 24, 2009, are shown to cause anomalously early alteration of the stratospheric circulation. The dynamics of vertical temperature profiles over the Ny-Elesund and Alert stations reflecting distribution of warming from the middle stratosphere to the upper troposphere and the tropopause evolution has been analyzed. Here we consider the uncharacteristic trend in the total ozone content within the Arctic region preventing the restoration of the winter circulation pattern during the winter and spring time in 2009 after the sudden stratospheric warming.