

УДК [551.513.11+551.515.7]:
[551.510.52+551.510.53]«2013»

doi: 10.33933/2074-2762-2020-60-241-254

Реакция тропосферной циркуляции на внезапное стратосферное потепление, наблюдаемое в январе 2013 г.

***А.И. Погорельцев, О.Г. Анискина, А.Ю. Канухина, Т.С. Ермакова,
А.И. Угрюмов, Ю.В. Ефимова***

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,
apogor@rshu.ru

Представлен анализ изменения динамического режима стратосферы во время разных стадий внезапного зимнего стратосферного потепления (ВСП), наблюдаемого в январе 2013 г. Рассмотрены сценарии влияния ВСП на циркуляцию тропосферы через отражение планетарных волн (ПВ) и их последующее распространение в тропосферу. Рассчитаны трехмерные потоки волновой активности и их дивергенция на основании данных UK Met Office. Приведен анализ синоптических последствий ВСП.

Ключевые слова: внезапные стратосферные потепления, взаимодействие стратосферы и тропосферы, отражение планетарных волн, траектории антициклонов.

Tropospheric circulation response to sudden stratospheric warming observed in January 2013

***A.I. Pogoreltsev, O.G. Aniskina, A.Y. Kanukhina, T.S. Ermakova,
A.I. Ugryumov, Y.V. Efimova***

Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia

Analysis of the dynamical regime changes in the stratosphere during different phases of the Sudden Stratospheric Warming (SSW) that has been observed in January 2013 is presented. The different mechanisms of SSW influence on the tropospheric circulation through the stationary planetary waves (SPWs) reflection and/or increase in SPWs activity due to nonlinear interaction with the mean flow and their subsequent propagation into the troposphere are discussed. Three-dimensional wave activity flux and its divergence are determined using the UK Met Office data; the synoptic situation and its changes during the SSW events are analyzed. The wave activity penetrates downward from stratosphere into the troposphere and can affect weather processes during the SSW and right afterwards. It is this time that polar anticyclones can be formed at high latitudes, which quickly go southward along meridional directions and then deviate to the East at middle latitudes. Interestingly, the locations of polar anticyclone formations and subsequent displacements correspond to the regions of maximal horizontal wave activity fluxes connected with stratospheric processes. The results obtained allow us to suggest that accounting of stratospheric processes and their influence on the troposphere in winter season can improve the middle-range forecast of anticyclone formation and cold weather events at middle latitudes.

Keywords: sudden stratospheric warmings, stratosphere-troposphere coupling, planetary waves' reflection, anticyclone trajectories.

For citation: *A.I. Pogoreltsev, O.G. Aniskina, A.Y. Kanukhina, T.S. Ermakova, A.I. Ugryumov, Y.V. Efimova. Tropospheric circulation response to sudden stratospheric warming observed in January 2013. *Gidrometeorologiya i Ekologiya. Hydrometeorology and Ecology* (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020. 60: 241—254. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-60-241-254*

Введение

К числу наиболее ярких атмосферных процессов, во время которых проявляется динамическое взаимодействие тропосферы и стратосферы, относятся зимние события внезапного стратосферного потепления (ВСП) [1, 2], суть которых заключается в следующем. В спокойной зимней стратосфере господствует планетарный циркумполярный циклонический вихрь, окруженный субтропическими областями высокого давления. В периоды ВСП, которые могут осуществляться с равной вероятностью в течение всей зимы и продолжаться от нескольких дней до месяца, циклонический вихрь разбивается на отдельные ячейки, которые отходят в более низкие широты, а в полярные районы выходят субтропические антициклоны или распространяются их гребни. В результате зональная западная циркуляция нарушается, и на полюсе существенно повышается температура. Именно поэтому такая перестройка поля давления и циркуляции была названа внезапным стратосферным потеплением.

В отличие от финальных потеплений зимней стратосферы (март — май), в результате которых происходит окончательная перестройка стратосферной циркуляции на летний режим (циркумполярный антициклон и глобальный восточный перенос воздуха), события ВСП заканчиваются восстановлением зимнего циркумполярного циклона (рис. 1).

Изменение динамического режима стратосферы может влиять на циркуляцию тропосферы, например, через отражение планетарных волн (ПВ) и их

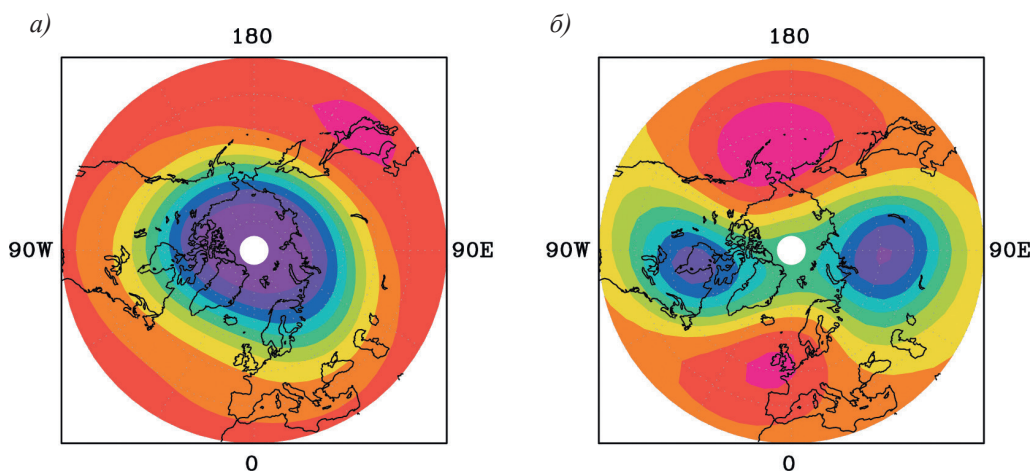


Рис. 1. Типичная картина изменения барических полей в стратосфере в периоды внезапных стратосферных потеплений (ВСП).

a — невозмущенный зимний циркумполярный циклонический вихрь,
б — барическое поле в период ВСП на высоте 10 гПа (31 км).

Fig. 1. Typical changing of baric fields in the stratosphere during Sudden Stratospheric Warming (SSW) at the altitude of 10 hPa (31 km).

a — unperturbed stratospheric polar vortex, *б* — the baric field during SSW event.

последующее распространение в тропосферу [3—5]. Отраженные ПВ могут достигать тропосферы, трансформироваться в результате нелинейных взаимодействий и/или фокусировки трехмерного потока волновой активности в волны меньшего масштаба и оказывать влияние на формирование погодных условий в отдельных регионах. Например, учет динамической ситуации в стратосфере путем ассимиляции данных ECMWF (проект ERA-40 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды) при сезонных прогнозах погоды для Северного полушария позволил существенно повысить успешность прогнозов в зимние месяцы [6]. Было показано, что влияние событий ВСП может проявляться в тропосфере в течение нескольких недель [7]. В частности, было высказано предположение о том, что после события ВСП в Арктике в марте 2007 г. изменение характера распространения ПВ и их отражение в направлении нижней тропосферы привели к экстремальным холодам на северо-востоке Северной Америки [8, 9].

Влияние ВСП на циркуляцию стратосферы и тропосферы не ограничивается только средними и высокими широтами. На основе анализа спутниковых данных была установлена связь ВСП в Арктике с охлаждением тропосферы в экваториальном регионе. Позднее эти результаты были подтверждены численными экспериментами с использованием модели общей циркуляции атмосферы, причем влияние ВСП на циркуляцию атмосферы наблюдалось не только в экваториальном регионе, но и в Южном полушарии. Анализ ВСП в Арктике за 1979—2003 гг. показал, что в результате главных ВСП происходит понижение температуры и усиление конвективных процессов в нижней стратосфере — верхней тропосфере на экваторе [8], в том числе и после главного ВСП в Антарктике в сентябре 2002 г. [10].

В работе [11] показано, что в январе 2008 г. продолжительные холода над Аравийским полуостровом, над южной и центральной частью Китая могли быть спровоцированы, наряду с другими факторами, совместным влиянием отражения планетарной волны $m = 1$ и сформировавшегося блокирующего антициклона над Уралом и Сибирью. Отражение планетарной волны могло вызвать экстремальную адвекцию холода из северных регионов бореальной зоны и из Сибири у поверхности. Авторы [11] приходят к заключению о заметном влиянии отражения планетарных волн в стратосфере на погоду в тропосфере в январе 2008 г. над определенными регионами Азии.

До настоящего времени не существует точного теоретического объяснения всех особенностей механизма динамической взаимосвязи стратосферы и тропосферы. В настоящей работе представлены результаты исследования волнового взаимодействия между тропосферой и стратосферой до начала, во время и после событий ВСП зимой 2012/13 г. Этот период выбран для исследования из-за экстремальности ситуации в стратосфере и тропосфере: зимой 2012/13 г. над Евразией образовался очень глубокий циклон, а на юге России, в Казахстане и на северо-западе Китая наблюдались экстраординарные холода, которые в некоторых исследованиях связывают с ВСП и распространением первой и второй планетарной волны в тропосферу [12, 13]. Наличие экстремального события ВСП зимой 2012/13 г. подтверждается данными реанализа и результатами радиозатменного эксперимента COSMIC/FORMOSAT-3 [14].

Методика и результаты исследований

Для анализа ВСП были использованы данные UK Met Office, которые являются в настоящий момент уникальными с точки зрения расположения верхней границы: начиная с ноября 2009 г. верхняя граница модели UK Met Office находится на уровне 0,01 гПа, т. е. фактически в мезосфере.

На рис. 2 представлены временные разрезы изменений основных показателей динамики и температурного режима атмосферы с 1 декабря 2012 г. по 1 апреля 2013 г., для того чтобы проследить фазы подготовки, максимального развития и затухания ВСП.

Из анализа полей, представленных на рис. 2, следует, что на высоте 50—60 км ослабление амплитуды зональной гармоники с волновым числом, равным единице ($m = 1$), т. е. единого глобального циклонического вихря, наблюдалось за 10—14 дней до события ВСП. Затем начался рост амплитуды волны, которая достигла максимума во время ВСП, а после 6 января 2013 г. стала резко уменьшаться. Однако минимум амплитуды, означающий разделение циклонического вихря на отдельные ячейки и выход в приполярный район антициклона, отмечается только за шесть дней до ВСП, т. е. перестройка полей давления и циркуляции заняла примерно 8—10 суток. Почти сразу же происходит обращение ветра с западного на восточный (антициклонический), которое заметно не только на высоте 50—60 км, но и ниже, на уровне 30 км. С 3 января 2013 г. и повторно с 10 января наблюдается сильное повышение температуры в приполярном районе на 40° с.ш. и севернее. Повышение температуры в стратосфере все еще заметно и после 16 января 2013 г., причем четко просматривается проникновение эффектов потепления вплоть до тропосферных высот. В целом процесс ВСП от начала перестройки метеорологических полей до восстановления зимнего циркумполярного циклонического вихря длится около месяца.

Для анализа динамического взаимодействия стратосферы с тропосферой во время развития события ВСП в январе 2013 г. были рассчитаны трехмерные потоки волновой активности и их дивергенция. Трехмерный вектор потока волновой активности описывает распространение пакетов планетарных волн (без разбиения на зональные гармоники) по долготе (F_x), широте (F_y), высоте (F_z), и выражения для его компонентов могут быть записаны следующим образом [16]:

$$\vec{F}_s = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = \frac{p}{p_0} \cos \varphi \begin{pmatrix} v'^2 - \frac{1}{2\Omega a \sin 2\varphi} \frac{\partial(v'\varphi')}{\partial \lambda} \\ -u'v' + \frac{1}{2\Omega a \sin 2\varphi} \frac{\partial(u'\varphi')}{\partial \lambda} \\ \frac{2\Omega \sin \varphi}{S} \left[v'T' - \frac{1}{2\Omega a \sin 2\varphi} \frac{\partial(T'\varphi')}{\partial \lambda} \right] \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где S — параметр статической устойчивости; u' — возмущение зональной скорости (отклонение от среднего по долготе значения); v' — возмущение меридиональной скорости; T' — возмущение температуры; φ' — возмущение геопотенциала; Ω — угловая скорость вращения Земли; λ — долгота; φ — широта; a — радиус Земли; p — давление; $p_0 = 1000$ гПа.

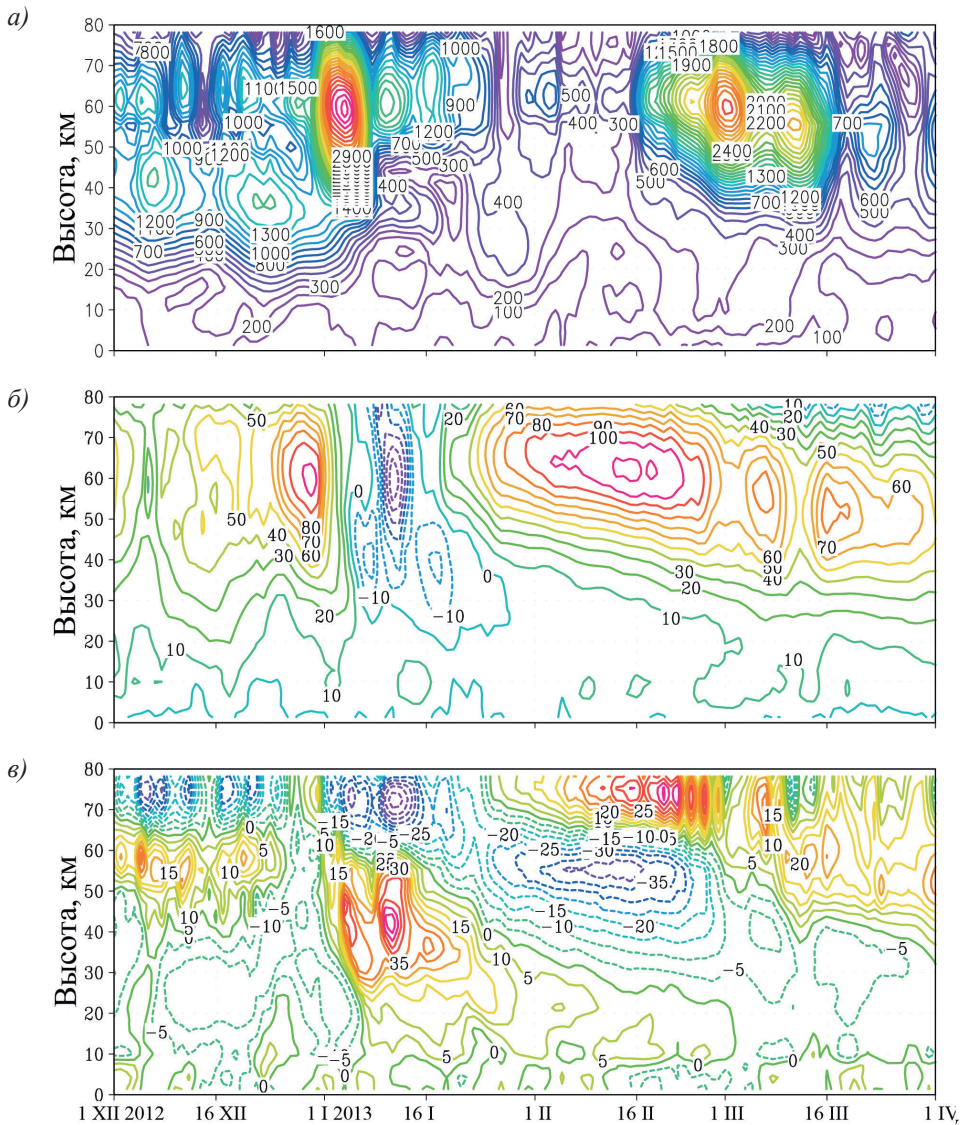


Рис. 2. Полученные на основании анализа данных UKMetOffice за период декабрь 2012 г. — март 2013 г. высотно-временные сечения амплитуды зональной гармоник с $m = 1$ на широте $62,5^\circ$ с.ш.

a — в поле геопотенциальной высоты (м), b — в поле среднего зонального ветра (м/с),
 v — изменения температуры на широте $87,5^\circ$ с.ш. (К).

Fig. 2. Altitude-time cross sections of zonal harmonic (with $m=1$) amplitude in the field of the geopotential height and the mean zonal wind at 62.5° N (upper and middle panels, respectively) and temperature changes at 87.5° N (bottom panel) obtained using UK Met Office data for December 2012 — March 2013.

На рис. 3 показано распределение вертикального потока волновой активности на высоте 20 км (F_z) и горизонтального потока в тропосфере на высоте 4 км (F_x и F_y) на разных стадиях развития ВСП. Видно, что во всех стадиях наблюдаются

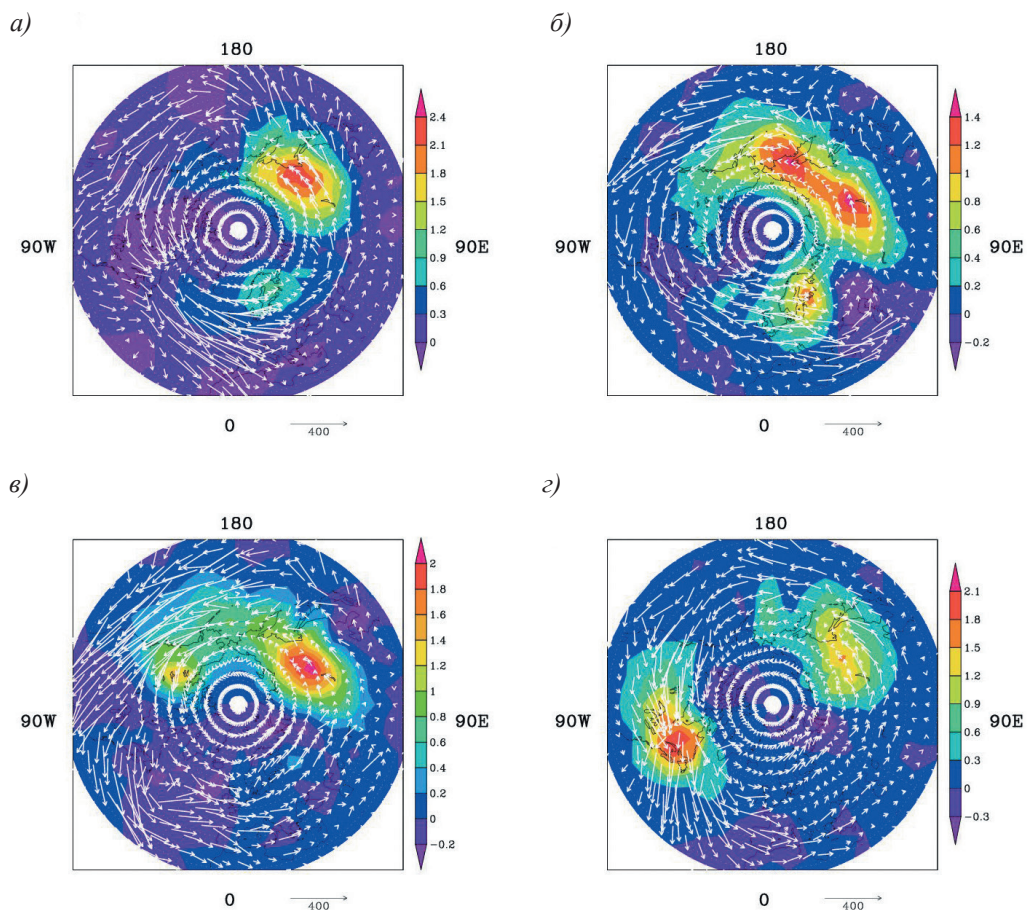


Рис. 3. Долготно-широтное распределение вертикального потока волновой активности на высоте 20 км (заливка) и горизонтальный поток волновой активности на высоте 4 км (стрелки), рассчитанные для разных стадий развития ВСП в январе 2013 г.

- а) на 1—5 января (начало события ВСП), б) на 6—10 января (максимум развития ВСП),
в) на 11—15 января (сразу после максимума ВСП),
г) на 21—25 января (через 10—12 дней после максимума ВСП).

Fig. 3. Longitudinal and latitudinal distribution of the wave activity vertical flux at the altitude of 20 km and horizontal flux of the wave activity at 4 km (arrows), calculated for different phases of SSW development in January 2013.

- а) January 1—5 (the beginning of the SSW event),
б) January 6—10 (maximum warming), в) January 11—15 (immediately after the SSW event maximum),
г) January 21—25 (10—12 days after the SSW event maximum).

относительно сильные нисходящие потоки волновой активности из стратосферы в тропосферу. Эти потоки достигают тропосферы и затем перераспределяются в горизонтальной плоскости. Таким образом, в процессе ВСП волновая энергия проникает из стратосферы в тропосферу и может, в принципе, менять в ней структуру длинных волн и погодообразующие процессы.

В начальной стадии ВСП (1—5 января, см. рис. 3 а) практически все Северное полушарие, кроме района Восточной Сибири, занято нисходящими потоками волновой активности из стратосферы. Горизонтальное перераспределение волновой активности наблюдается в основном над Северной Атлантикой, севером США и Европой. В период максимума развития ВСП (6—10 января, см. рис. 3 б) нисходящий поток стратосферной волновой активности сохраняется, как и горизонтальные ее потоки в тропосфере, максимум которых несколько смещается к востоку. Так, европейский очаг максимума F_x и F_y перемещается на Ближний Восток и в Центральную Азию. Сразу после максимума развития ВСП (11—15 января, см. рис. 3 в) общая картина распределения вертикального потока стратосферной волновой энергии сохраняется. Горизонтальные ее потоки в тропосфере наиболее сильны над Тихим океаном, Северной Америкой и Северной Атлантикой. Наконец, в конце события ВСП, через 10—12 дней после его максимума (21—25 января, см. рис. 3 г) нисходящий поток стратосферной волновой активности затухает, но горизонтальное его распространение в тропосфере еще продолжается, особенно над Северной Атлантикой.

Перераспределение волновой активности в горизонтальной плоскости на высотах тропосферы может приводить к ее усилению в областях, расположенных восточнее указанных регионов. В результате погодные аномалии могут наблюдаться не только в Европе, но и в Сибири. Такая ситуация может сохраняться в течение нескольких дней. В дальнейшем интенсивность волновых процессов в тропосфере уменьшается и наблюдаются существенно ослабленные горизонтальные потоки волновой активности.

Полученные результаты указывают на то, что в периоды ВСП первоначально наблюдается усиление потоков волновой активности из стратосферы в тропосферу, т. е. первоисточником тропосферных возмущений служит усиление волновой активности на высотах стратосферы, которое может происходить в результате нелинейного взаимодействия стационарной планетарной волны с волновым числом, равным единице (СПВ1), со средним потоком. Таким образом, предлагаемый нами сценарий развития события ВСП выглядит следующим образом:

- в результате нелинейного взаимодействия СПВ со средним потоком происходит усиление СПВ1 на высотах стратосферы, которое сопровождается последующим усилением потока волновой активности из стратосферы в тропосферу;

- волновая активность в тропосфере перераспределяется в горизонтальной плоскости, и в это время возможно развитие аномалий погоды в тропосфере;

- в период максимума развития ВСП происходит вторичное усиление активности планетарных волн в стратосфере, которое сопровождается разогревом полярных областей и ослаблением или даже обращением стратосферного струйного течения;

— в течение, по крайней мере, 10—12 суток после стадии максимума развития ВСП горизонтальный поток волновой активности в тропосфере поддерживается не менее чем на трех четвертях всего Северного полушария.

Таким образом, события ВСП оказывают влияние на возмущение западного переноса тропосферы, придавая ему меридиональный характер. Данный результат требует синоптической интерпретации в целях установления районов полушария, где могут развиваться аномалии погоды.

Рассмотрим поля, представленные на рис. 3, с точки зрения направления распространения потоков волновой энергии в тропосфере. Видно, что во всех без исключения случаях данные потоки имеют ярко выраженную северную составляющую. Следовательно, событие ВСП приводит к меридиональной перестройке циркуляции и адвекции арктических воздушных масс в умеренные широты. В синоптическом смысле это означает, что в период ВСП должен активизироваться антициклогенез в высоких широтах и наблюдаться дальнейшее движение холодных антициклонов на юг. В областях их распространения будет отмечаться существенное похолодание.

В работе [14] показано, что с ВСП связано усиление антициклогенеза в полярных регионах, и это может влиять на температурный режим тропосферы умеренных широт. Для синоптического исследования тропосферных процессов во время ВСП были рассмотрены случаи экстремального ВСП за январь 2013 и 2014 гг. В качестве исходных данных использовались карты ежедневных аномалий высоты изобарической поверхности 1000 гПа для каждого дня, начиная с максимума развития стратосферного ВСП и на 20 дней вперед. Были построены сборные карты географического расположения центров очагов положительной аномалии геопотенциала АТ 1000 (антициклонов). Анализ сборных карт подтвердил, что в каждом случае ВСП действительно происходила активизация приземного антициклогенеза.

Рассмотрим траектории арктических антициклонов в периоды двух мощных ВСП: 10—29 января 2013 г. и 1—23 января 2014 г.

На рис. 4 представлены траектории антициклонов за период с 10 по 29 января 2013 г. Из рисунка видно, что происходит интенсивный процесс каскадного образования арктических антициклонов и их смещения к югу: I траектория — 10—16 января, II траектория — 16—18 января, III траектория — 19—29 января. В случае I и III траекторий отчетливо виден поворот антициклонов на восток в умеренных и субтропических широтах.

Рассмотрим подробнее распределение потока волновой активности для периода после ВСП 2013 г., которое соответствует смещению II и III антициклонов (рис. 5). Область нисходящих потоков волновой активности на рис. 5 очерчена пунктирными кривыми и занимает территорию Атлантики от Британских островов, Скандинавию, европейскую часть России, Урал и Западную Сибирь. Сильные горизонтальные потоки волновой активности присутствуют над Скандинавией, Северным морем, приобретая дополнительную южную составляющую над Западной Европой. II антициклон 2013 г. (см. рис. 4) зарождается над Кольским полуостровом в области наблюдаемых нисходящих потоков волновой активности

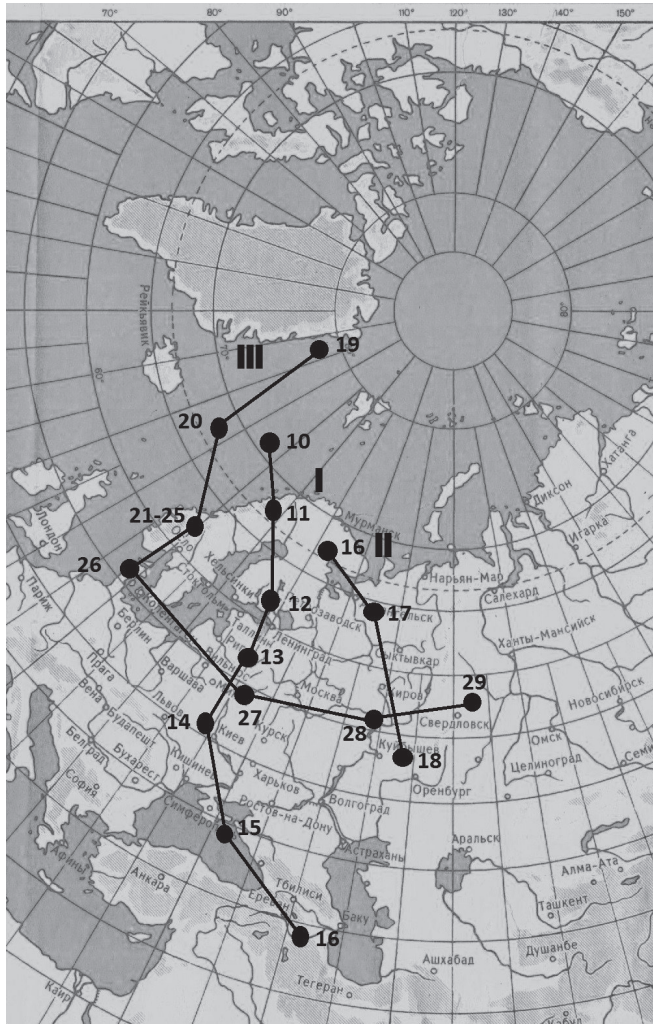


Рис. 4. Траектории приземных арктических антициклонов в период ВСП 10—29 января 2013 г.

Точки — центры антициклонов, цифры — число месяца.

Fig. 4. Trajectories of the Polar anticyclones during January 10—29, 2013 SSW event.

Dots — the centers of the anticyclones, numbers — the day of the month.

и перемещается к югу Урала, над которым располагается максимум нисходящих потоков. Продолжительный путь III антициклона (см. рис. 4) лежит от восточных берегов Гренландии через северную Атлантику, Норвегию, Данию, Балтийское море к Среднему Уралу, совпадая с векторами горизонтальных волновых потоков и положением зоны максимума нисходящих потоков (см. рис. 5).

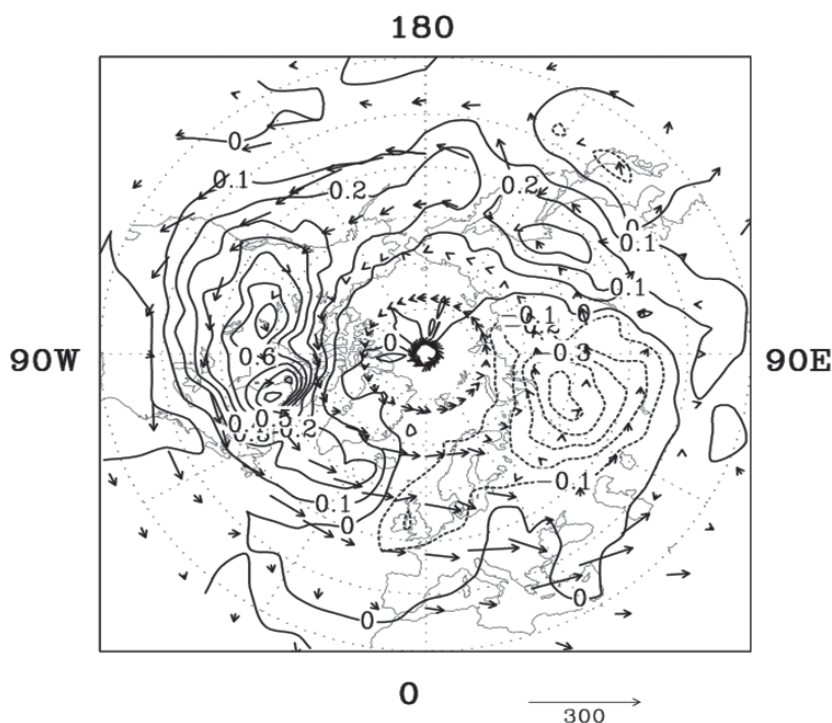


Рис. 5. Долготно-широтное распределение потока волновой активности, рассчитанное на 16—20 января 2013 г. после окончания ВСП.

Fig. 5. Longitudinal and latitudinal distribution of the wave activity flux calculated for January 16-20, 2013 (post-SSW period).

Для дополнительного анализа влияния ВСП на процессы в тропосфере были проанализированы арктические антициклоны за январь 2014 г., когда, так же как и зимой 2013 г., наблюдалось сильное ВСП. На рис. 6 представлены две траектории приземных арктических антициклонов, появившихся сразу после начала ВСП в январе 2014 г. Первый из них, зародившись 1 января в районе Земли Франца-Иосифа, быстро смещался на юг, а затем повернул на восток и к 8—10 января объединился с сибирским антициклоном. Траектория второго антициклона начинается 13 января; с 14 по 18 января он стационарирует на севере Финляндии, а далее быстро смещается на территорию Западной Сибири и север Казахстана.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в периоды ВСП действительно формируются приземные арктические антициклоны, быстро уходящие на юг по меридиональным траекториям и поворачивающие на восток в умеренных широтах. При этом районы образования и последующего смещения арктических антициклонов (Северная Европа и европейская часть России) полностью соответствуют областям горизонтального потока стратосферной волновой активности, представленной на рис. 3.

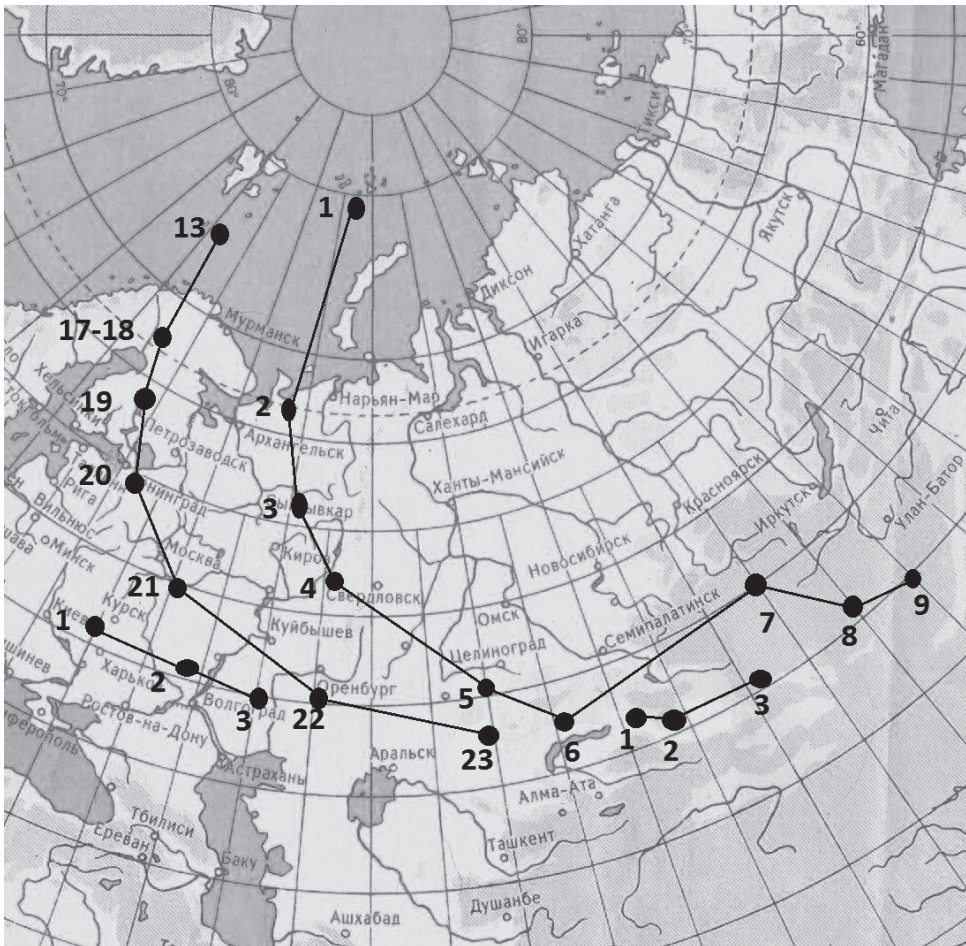


Рис. 6. Траектории приземных арктических антициклонов в период ВСП 1—23 января 2014 г.

Точки — центры антициклонов, цифры — число месяца.

Fig. 6. Trajectories of the Polar anticyclones during January 1-23, 2014 SSW event.

Dots — the centers of the anticyclones, numbers — the day of the month.

Выводы

Подтверждение выявленной в двух случаях ВСП закономерности на материалах за последние 15—20 лет позволяет надеяться на разработку методики прогноза вторжения арктических антициклонов в умеренные широты и соответствующего изменения погоды с заблаговременностью до 10—12 суток после момента максимальной стадии развития ВСП. Данный результат послужит основанием для совершенствования среднесрочных прогнозов зимних арктических вторжений и существенных похолоданий.

Благодарности

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете. Анализ динамического и температурного режима стратосферы и расчет распределений потока волновой активности проводились при поддержке РФФИ-ГФЕН (проект № 20-55-53039), исследование влияния ВСП на антициклогенез выполнялось в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSZU-2020-0009.

Авторы выражают благодарность British Atmospheric Data Center и UK Met Office за предоставленный доступ к данным.

Acknowledgments

The study has been carried out by the Russian State Hydrometeorological university. The analysis of dynamic and temperature regimes in the stratosphere and the calculation of the wave activity flux distribution have been carried out with the support of the RFBR (project No. 20-55-53039), the study of the SSW influence on the anticyclonogenesis has been carried out within the framework of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation task, project No. FSZU- 2020-0009.

The authors would like to thank the British Atmospheric Data Center and the UK Met Office for providing access to the data.

Список литературы

1. Holton J.R. The dynamics of sudden stratospheric warmings // Annual Rev. Earth Planet. Sci. 1980. V. 8. P. 169—190.
2. McIntyre M.E. How well do we understand the dynamics of stratospheric warmings // J. Meteorol. Soc. Japan. 1982. V. 60. No. 1. P. 37—64.
3. Chen P., Robinson W. A. Propagation of planetary waves between the troposphere and stratosphere // J. Atmos. Sci. 1992. V. 49. P. 2533—2545.
4. Kuroda Y. and Kodera K. Role of Planetary Waves in the Stratosphere-troposphere. Coupled Variability in the Northern Hemisphere Winter // Geophys. Res. Lett. 1999. V. 26. No. 15. P. 2375—2378.
5. Perlwitz J., Harnik N. Observational evidence of a stratospheric influence on the troposphere by planetary wave reflection // J. Climate. 2003. V. 16. P. 3011—3026.
6. Douville H. Stratospheric polar vortex influence on Northern Hemisphere winter climate variability // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. No. 18. L18703, doi:10.1029/2009GL039334.
7. Baldwin M., Dunkerton T. Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. No. 30. P. 937—946.
8. Kodera K. Influence of stratospheric sudden warming on the equatorial troposphere // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. L06804, 2005GLO024510
9. Kodera K., Mukougawa H., Itoh S. Tropospheric impact of reflected planetary waves from the stratosphere // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. L16806.
10. Eguchi N., Kodera K. Impact of the 2002, Southern Hemisphere, stratospheric warming on the tropical cirrus clouds and convective activity // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. 2006GLO028744.
11. Nath D., Chen W., Wang L. and Ma Y. Planetary Wave Reflection and Its Impact on Tropospheric Cold Weather over Asia during January 2008 // Adv. in Atm. Sci. 2014. July. V. 31. P. 851—862.
12. Medvedeva I.V., Semenov A.I., Pogoreltsev A.I., Tatarnikov A.V. Influence of sudden stratospheric warming on the mesosphere / lower thermosphere from the hydroxyl emission observations and numerical simulations // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2019. V. 187. P. 22—32. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.02.005

13. Nath D., Chen W., Zelin C., Pogoreltsev A.I., Wei K. Dynamics of 2013 Sudden Stratospheric Warming event and its impact on cold weather over Eurasia: Role of planetary wave reflection // *Sci. Rep.* 2016. V. 6. 24174; DOI: 10.1038/srep24174
14. Зарубин А.С., Н.В. Ширшов Н.В., Погорельцев А.И. Глобальные атмосферные волны по данным современных реанализов и радиозатменного эксперимента COSMIC/FORMOSAT-3 // *Ученые записки РГГМУ.* 2020. № 58. С. 20—29.
15. Безрук А.В., Угрюмов А.И. Тропосферный антициклонез и сопутствующие холодные вторжения в периоды внезапных стратосферных потеплений // *Ученые записки РГГМУ.* 2017. № 49. С. 9—16.
16. Pogoreltsev A., Kanukhina A., Suvorova E., Savenkova E. Variability of Planetary Waves as a Signature of Possible Long-term Trends // *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2009. V. 71. doi:10.1016/j.jastp.2009.05.011.

References

1. Holton J.R. The dynamics of sudden stratospheric warmings. *Annual Rev. Earth Planet. Sci.* 1980, 8: 169–190.
2. McIntyre M.E. How well do we understand the dynamics of stratospheric warmings. *J. Meteorol. Soc. Japan.* 1982, 60: 37–64.
3. Chen P. and Robinson W. A. Propagation of planetary waves between the troposphere and stratosphere. *J. Atmos. Sci.* 1992, 49: 2533–2545.
4. Kuroda Y. and Kodera K. Role of Planetary Waves in the Stratosphere-troposphere. Coupled Variability in the Northern Hemisphere Winter. *Geophys. Res. Lett.* 1999, 26: 2375–2378.
5. Perlwitz J., Harnik N. Observational evidence of a stratospheric influence on the troposphere by planetary wave reflection. *J. Climate.* 2003, 16: 3011–3026.
6. Douville H. Stratospheric polar vortex influence on Northern Hemisphere winter climate variability. *Geophys. Res. Lett.* 2009, 36: L18703, doi:10.1029/2009GL039334.
7. Baldwin M., Dunkerton T. Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere. *J. Geophys. Res.* 1999, 104: 937–946.
8. Kodera K. Influence of stratospheric sudden warming on the equatorial troposphere. *Geophys. Res. Lett.* 2006, 33: L06804, 2005GLO024510
9. Kodera K., Mukougawa H., Itoh S. Tropospheric impact of reflected planetary waves from the stratosphere. *Geophys. Res. Lett.* 2008, 35: L16806.
10. Eguchi N., Kodera K. Impact of the 2002, Southern Hemisphere, stratospheric warming on the tropical cirrus clouds and convective activity. *Geophys. Res. Lett.* 2007, 34: 2006GLO028744.
11. Nath D., Chen W., Wang L. and Ma Y. Planetary Wave Reflection and Its Impact on Tropospheric Cold Weather over Asia during January 2008. *Adv. in Atm. Sci.* 2014, 31: 851–862.
12. Medvedeva, I.V., Semenov, A.I., Pogoreltsev, A.I., Tatarnikov, A.V. Influence of sudden stratospheric warming on the mesosphere / lower thermosphere from the hydroxyl emission observations and numerical simulations. *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2019, 187: 22–32. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.02.005
13. Nath D., Chen W., Zelin C., Pogoreltsev A.I., Wei K. Dynamics of 2013 Sudden Stratospheric Warming event and its impact on cold weather over Eurasia: Role of planetary wave reflection. *Sci. Rep.* 2016, 6: 24174; DOI: 10.1038/srep24174
14. Zarubin A.S., Shirshov N.V., Pogoreltsev A.I. Global atmospheric waves according to the modern reanalyses and radio-occultation experiment COSMIC / FORMOSAT-3 data. *Gidrometeorologiya i Ekologiya. Hydrometeorology and Ecology* (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020. 58: 20—30. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-58-20-30
15. Bezruk A.V., A.I. Ugriumov A.I. The tropospheric anticyclonogenesis and attendant cold penetration during sudden stratospheric heating. *Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta.* Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University. 2017. 49: 9—16. [In Russian].
16. Pogoreltsev A., Kanukhina A., Suvorova E., Savenkova E. Variability of Planetary Waves as a Signature of Possible Long-term Trends. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2009, 71: doi:10.1016/j.jastp.2009.05.011.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 23.08.2020
Принята к публикации 15.09.2020*

Сведения об авторах

Александр Иванович Погорельцев, д-р физ.-мат. наук, доцент, профессор кафедры метеорологических прогнозов Российского государственного гидрометеорологического университета, apogor@rshu.ru

Ольга Георгиевна Анискина, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры метеорологических прогнозов Российского государственного гидрометеорологического университета, olga.aniskina@mail.ru

Татьяна Сергеевна Ермакова, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры метеорологических прогнозов Российского государственного гидрометеорологического университета, taalika@mail.ru

Анна Юрьевна Канухина, канд. физ.-мат. наук, Российский государственный гидрометеорологический университет, anna.kanukhina@rshu.ru

Александр Иванович Угрюмов, д-р геогр. наук, профессор, Российский государственный гидрометеорологический университет, ugrumov-met@mail.ru

Юлия Викторовна Ефимова, канд. геогр. наук, доцент кафедры метеорологических прогнозов Российского государственного гидрометеорологического университета, luluef@mail.ru

Information about authors

Alexander Pogoreltsev, Grand PhD (Phys. and Math. Sci.), Professor, Meteorological Forecasting Department, Russian State Hydrometeorological University, apogor@rshu.ru

Olga Aniskina, PhD (Phys. and Math. Sci.), Meteorological Forecasting Department, Russian State Hydrometeorological University, olga.aniskina@mail.ru

Tatiana Ermakova, PhD (Phys. and Math. Sci.), Meteorological Forecasting Department, Russian State Hydrometeorological University, taalika@mail.ru

Anna Kanukhina, PhD (Phys. and Math. Sci.), Russian State Hydrometeorological University, anna.kanukhina@rshu.ru

Alexander Ugrumov, Grand PhD (Geogr. Sci.), Professor, Russian State Hydrometeorological University, ugrumov-met@mail.ru

Iuliia Efimova, PhD (Geogr. Sci.), Meteorological Forecasting Department, Russian State Hydrometeorological University, luluef@mail.ru