

МЕТЕОРОЛОГИЯ*А.И. Погорельцев, Е.Н. Савенкова***МЕЖГОДОВАЯ И КЛИМАТИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СРОКОВ ВЕСЕННЕЙ ПЕРЕСТРОЙКИ ЦИРКУЛЯЦИИ СТРАТОСФЕРЫ***A.I. Pogoreltsev, E.N. Savenkova***INTERANNUAL AND CLIMATIC VARIABILITY OF BREAKUP DATE OF THE STRATOSPHERIC CIRCULATION**

Анализ данных наблюдений показывает, что существует достаточно сильная межгодовая изменчивость сроков весенней перестройки циркуляции стратосферы. В данной работе на основе данных, ассимилированных в моделях UK Met Office и NCEP/NCAR, проанализирована межгодовая и климатическая изменчивость сроков весенней перестройки циркуляции в стратосфере Северного полушария. В качестве характеристики среднезонального потока использовался геострофический ветер, рассчитанный по данным о геопотенциальной высоте уровня 10 гПа на широте 67,5 N. В среднем за много лет весенняя перестройка происходит в первых числах апреля, но иногда – очень рано (середина марта) или очень поздно (начало или даже середина мая). Результаты проведенного анализа показали, что дата перестройки зависит от активности планетарных волн в стратосфере, и в последние десятилетия наблюдается тенденция сдвига дат весенних перестроек к более поздним срокам – смещение составляет порядка 9 дней за декаду. Отмечено, что наблюдается зависимость сроков перестройки от фазы квази-двухлетних колебаний зонального потока в низких широтах.

Ключевые слова: динамика средней атмосферы, планетарные волны, весенняя перестройка, квази-двухлетние колебания.

The analysis of observations shows that there exists a sufficiently strong interannual variation of breakup date of the stratospheric circulation. In the present paper the interannual and climatic variability of the spring-time transition date of the circulation in the Northern Hemisphere is analyzed on the base of the data assimilated in the UK Met Office and NCEP/NCAR models. As a characteristic of zonal-mean flow the geostrophic wind calculated using the geopotential high of the 10 hPa level at 65.7 N has been used. On the average, the spring-time transition occurs at the beginning of April, however, sometimes it takes place earlier (in the middle of March) or later (at the beginning or even in the middle of May). The results obtained show that spring-time transition date depends on the planetary-wave activity in the stratosphere and there is a tendency of the shift of a breakup to the later date (the speed of this shift is about 9 days per decade). It is noted that a noticeable dependence of the breakup date on the phase of quasi-biennial oscillations of the zonal wind at low latitudes is observed.

Key words: dynamics of the middle atmosphere, planetary waves, spring-time transition, quasi-biennial oscillations.

Введение

Общая циркуляция стратосферы в зимний период контролируется как радиационными, так и динамическими процессами, обусловленными нелинейным взаимодействием среднего потока с планетарными волнами. Весенняя перестройка циркуляции (смена направления зонального потока с западно-восточного на восточно-западный) происходит за счет изменения зенитного угла Солнца и должна наблюдаться в первой половине апреля. Динамические процессы, однако, могут существенно влиять на характер и срок перестройки. Как правило, в реальной ситуации процессу перестройки предшествует так называемое финальное стратосферное потепление, когда амплитуда планетарных волн возрастает, температура в высоких широтах увеличивается и зимний полярный вихрь ослабевает или даже разрушается. Целью настоящей работы является исследование наблюдаемой за последние десятилетия межгодовой и климатической изменчивости сроков весенней перестройки циркуляции стратосферы на средних широтах Северного полушария.

Предпосылки

В работах по изучению процессов весенней перестройки [Бакулина, 2009; Wei, 2007; Waugh, 1999], дата перестройки определяется различными методами, основанными на определении срока перестройки как момента смены знака зонального потока или когда значение скорости ветра становится меньше определенного значения. Такое определение не всегда однозначно из-за того, что в отдельные годы скорость среднего зонального потока продолжительное время испытывает нерегулярные колебания около некоторого близкого к нулю значения и понять, когда точно происходит перестройка циркуляции, достаточно сложно.

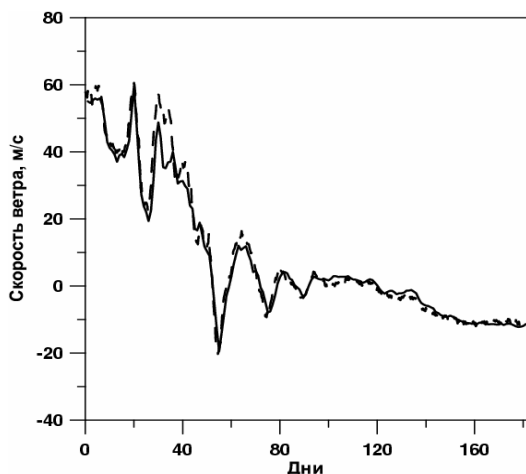


Рис. 1. Сезонные изменения скорости наблюдаемого (сплошная линия) и рассчитанного географического (штриховая линия) ветра на уровне 10 гПа, 67.5N, 2008 г.

Например, изменение среднезонального потока в течение зимне-весенних месяцев 2008 г. на уровне 10 гПа и широте 67,5N показано на рис. 1, из которого видно, что скорость среднего зонального потока продолжительное время осциллирует около нуля. Смена знака зонального потока происходит несколько раз, и определить, какой момент считать сроком перестройки, довольно трудно. Поэтому было решено разработать новый

метод однозначного определения срока весенней перестройки и рассчитать даты перестройки, наблюдаемые в последние десятилетия.

Используемые данные

При разработке метода и анализа сроков весенней перестройки циркуляции стратосферы вначале были использованы данные, ассимилированные в модели UK Met Office. Это было обусловлено тем фактом, что верхняя граница данной модели расположена достаточно высоко (0,1 гПа и даже 0,03 гПа в последние годы) [Swinbank, 1994; 8], и мы можем надеяться, что стратосферные процессы воспроизводятся моделью адекватно. Для анализа использовались данные о геопотенциальной высоте уровня 10 гПа в зимне-весенние месяцы с 1992 по 2009 г.

К сожалению, данные UK Met Office доступны, начиная только с 1992 г. Поэтому для оценки климатической изменчивости сроков весенней перестройки циркуляции стратосферы использовались также данные, ассимилированные в модели NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction /National Center for Atmospheric Research) [Kalnay, 1996]. Для анализа были использованы данные о геопотенциальной высоте уровня 10 гПа. Были рассмотрены зимне-весенние месяцы, начиная с 1971 г. Несмотря на то что одной из основных целей данной работы является определение климатической изменчивости сроков весенней перестройки, данные NCEP/NCAR за 1948–1970 гг. не анализировались. Причина в том, что до включения в NCEP/NCAR ре-анализ спутниковых наблюдений достоверность метеорологических характеристик, полученных в результате ассимиляции в стратосфере, не очень высокая, и мы решили ограничиться анализом данных только «спутниковой эры».

Метод определения даты весенней перестройки

На основе данных, ассимилированных в модели UK Met Office, были рассчитаны осредненные за 1992–2009 гг. изменения среднего зонального потока в январе–июне на уровне 10 гПа и широте 67,5N. В качестве характеристики среднего зонального потока использовался геострофический ветер, рассчитанный по данным о геопотенциальной высоте. Геострофический ветер для 2008 г. показан штриховой линией на рис. 1, из которого видно, что на рассматриваемой широте он достаточно хорошо согласуется с сезонным ходом наблюдаемого зонального потока (сплошная линия).

В качестве климатического значения даты перестройки был выбран день, когда абсолютная величина скорости изменения (уменьшения) геострофического ветра достигает максимального значения. Так как существуют сильные осцилляции значений скорости изменения ветра, чтобы определить абсолютный

минимум, значения временного градиента геострофического ветра рассчитывались по сглаженным по 31 дню значениям. Климатическое (среднее за 1992–2009 гг.) поведение геострофического ветра и скорость его изменения в январе–июне показаны на рис. 2 (сплошная и штриховая линии соответственно).

Таким образом, мы получили среднюю за 18 лет дату перестройки – 6 апреля. Далее была рассчитана невязка между наблюдаемым изменением геострофического ветра для каждого года и его климатическим ходом. Для расчета невязки использовался временной интервал в 60 дней, центрированный на климатической дате перестройки, и временной сдвиг между наблюдаемым и климатическим изменениями ветра варьировался в пределах ± 30 дней. Указанные значения были выбраны из тех соображений, что временной интервал между ранними и поздними перестройками циркуляции составляет примерно 2 месяца [Wei, 2007]. Дата весенней перестройки для каждого отдельного года определялась по климатическому значению, с учетом временного сдвига, при котором невязка имела минимальное значение. Таким образом, был получен временной ряд дат весенних перестроек с 1992 по 2009 г. (рис. 3).

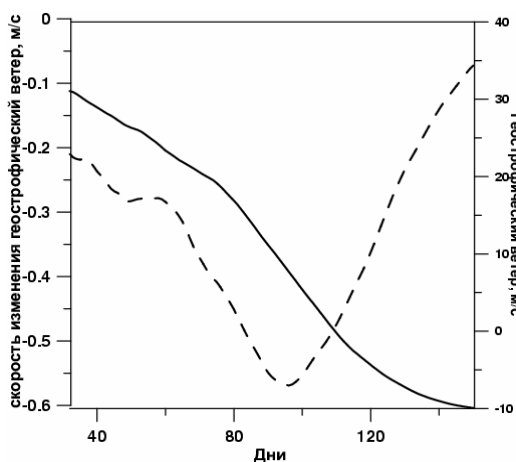


Рис. 2. Климатическое изменение геострофического ветра (сплошная линия) и сглаженная скорость изменения геострофического ветра в феврале–мае (штриховая линия), рассчитанные по данным UK Met Office на уровне 10 гПа, на широте 67,5N

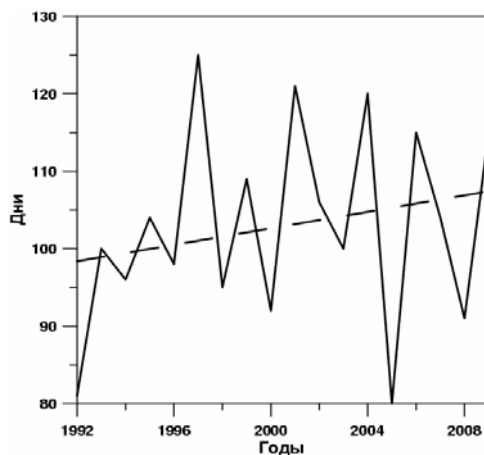


Рис. 3. Временной ряд дат весенних перестроек с 1992 по 2009 г. на уровне 10 гПа, на широте 67,5N по данным UK Met Office. Линейный тренд показан штриховой линией

Анализ полученных результатов показывает, что дата перестройки изменяется в диапазоне порядка 2 месяцев (с середины марта до середины мая). Кроме того, существует заметный тренд смещения сроков в сторону более поздних дат перестроек (рис. 3). Наблюдаемый тренд, возможно, связан с тем фактом, что ранние перестройки случаются с всё большей задержкой, в то время как поздние имеют более слабую межгодовую изменчивость.

Различия между ранними и поздними перестройками стратосферной циркуляции

Чтобы детально проанализировать процессы, протекающие в средней атмосфере в течение ранних и поздних перестроек, из наблюдаемого временного ряда были выбраны: типичный год с поздней перестройкой – 1997 (дата перестройки 5 мая) и год с относительно ранней перестройкой – 1998 (дата перестройки 5 апреля). Для того чтобы оценить, какие динамические процессы влияют на срок перестройки, была рассмотрена волновая активность в выбранные годы и поведение зонального ветра. Был рассмотрен широтно-временной разрез изменения амплитуды первой зональной гармоники в поле геопотенциальной высоты, которая примерно отражает изменчивость квазистационарной планетарной волны с зональным волновым числом $m = 1$ (СПВ1) на уровне 10 гПа (рис. 4 и 5).

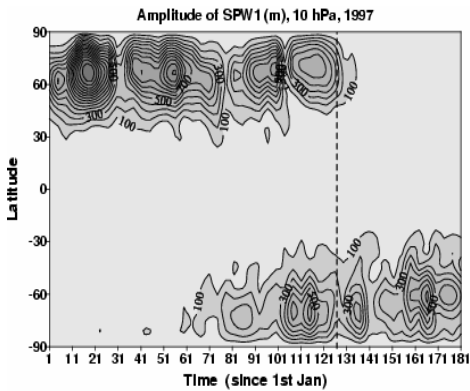


Рис. 4. Широтно-временной разрез изменения амплитуды СПВ1 для 1997 г. (поздняя перестройка)

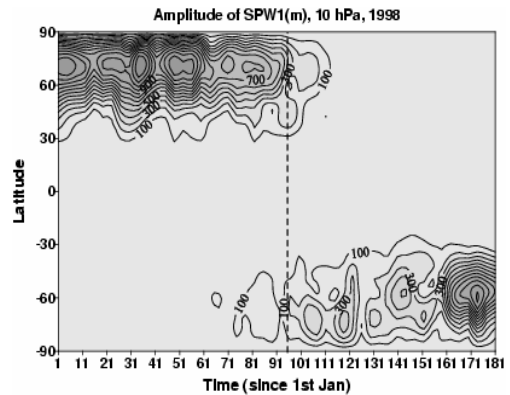


Рис. 5. Широтно-временной разрез изменения амплитуды СПВ1 для 1998 г. (ранняя перестройка)

Из сопоставления рис. 4 и 5 видно, что в обоих случаях (1997 и 1998 гг.) наблюдается усиление планетарной волны непосредственно перед самой перестройкой. Отсюда можно сделать предположение, что волновое усиление играет значительную роль в обращении циркуляции стратосферы как в годы с ранними, так и в годы с поздними перестройками.

Затем за эти же годы было рассмотрено поведение бегущих планетарных волн. Данные NCEP/NCAR представлялись в виде суммы зональных гармоник. Для каждой гармоники определялись временные ряды амплитуды и фазы. Волновое поле было разделено на волны, распространяющиеся на запад и на восток. Далее восстанавливался временной ряд, объединяющий только восточные и западные волны. Для этих восстановленных рядов применялось вейвлет преобразование Морле [Tongence, 1998]. В результате такого анализа были получены спектры вейвлет амплитуд отдельно для волн, распространяющихся на запад и восток. Но такое разделение волн на западные и восточные является неодно-

значным, так как имеются распространяющиеся в противоположных направлениях, но имеющие равные амплитуды и фазы волны. Это указывает на то, что в природе имеется неподвижная волна, осциллирующая по амплитуде. В связи с этим полученные вейвлет спектры были пересчитаны, и неподвижные волны интерпретировались как колебания амплитуды СПВ.

Для обоих лет были построены вейвлет спектры распространяющихся на запад волн (рис. 6 и 7). Видно, что при ранней перестройке бегущие 10–15 дневные волны активны более продолжительное время в течение весенних месяцев. В промежуток времени, когда эти бегущие волны по фазе примерно совпадают со стационарной, суммарная планетарная волна усиливается, что приводит к существенному ослаблению и/или даже обращению среднего потока. При поздней перестройке бегущие волны имеют значительные амплитуды в течение короткого временного интервала, и интерференция со стационарной волной не обеспечивает такого усиления суммарной волны, которое необходимо, чтобы вызвать существенное торможение среднего потока. Для этих же лет было рассмотрено поведение зонального ветра (рис. 8 и 9). Заметно, что в годы с ранней перестройкой зональный ветер довольно слабый, что обусловлено присутствием сильных бегущих и стационарной волн. В годы с поздними перестройками, наоборот, зональный ветер довольно сильный при слабых бегущих волнах.

Проанализировав отдельно годы с ранней и поздней перестройкой, можно сделать вывод, что изменчивость сроков перестройки стратосферной циркуляции с зимней на летнюю определяется главным образом (по крайней мере, в случае ранних перестроек) усилением волнового торможения. В случае поздних перестроек (низкая активность планетарных волн) – нагревом средней атмосферы над полярной областью за счет усиления поглощения ультрафиолетового излучения при сезонном изменении зенитного угла Солнца.

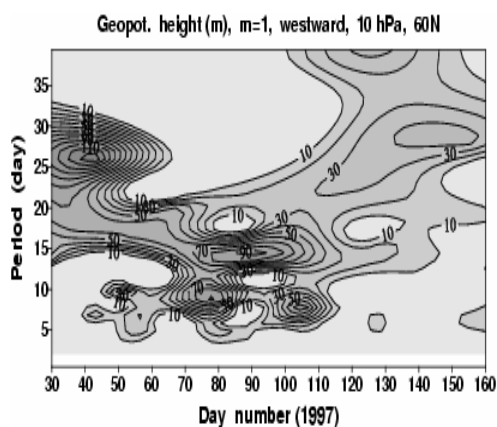


Рис. 6. Вейвлет спектры распространяющихся на запад волн для 1997 г. (поздняя перестройка)

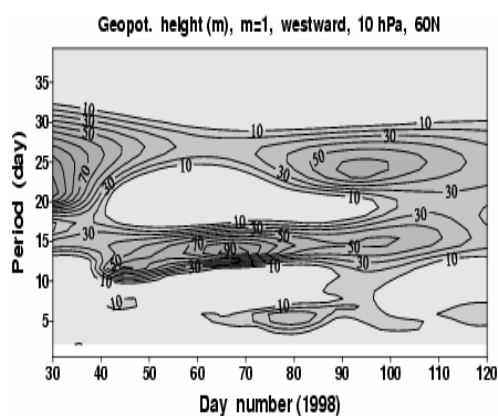


Рис. 7. Вейвлет спектры распространяющихся на запад волн для 1998 г. (ранняя перестройка)

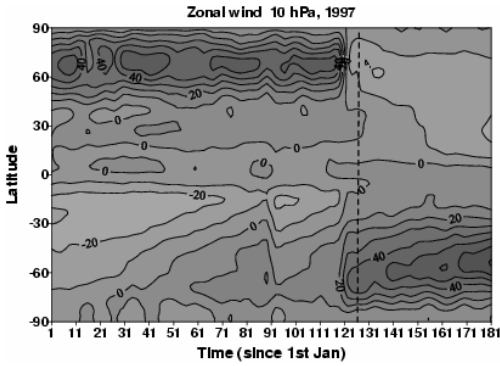


Рис. 8. Поведение зонального ветра в течение зимне-весенних месяцев для 1997 г. (поздняя перестройка)

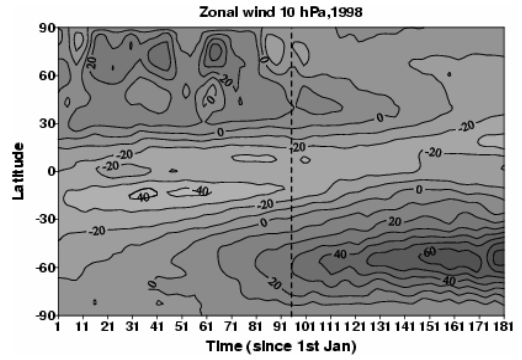


Рис. 9. Поведение зонального ветра в течение зимне-весенних месяцев для 1998 г. (ранняя перестройка)

Климатическая изменчивость сроков весенней перестройки циркуляции стратосферы

Анализ климатической изменчивости сроков весенней перестройки циркуляции был выполнен с использованием данных NCEP/NCAR ре-анализа. Для расчета дат перестроек за период с 1971 по 2009 г., были использованы данные о геопотенциальной высоте уровня 10 гПа, 67,5N с января по июнь. Климатическое значение даты перестройки по данным NCEP/NCAR ре-анализа за период с 1971 по 2009 г. определялось по сдвигу изменений геострофического ветра относительно хода изменений геострофического ветра, рассчитанного по данным UKMO (рис. 10). Из рисунка видно, что дата перестройки – максимальный градиент – сместился примерно на 7 дней в сторону более ранних перестроек. Таким образом, в качестве климатического значения даты перестройки было выбрано 30 марта.

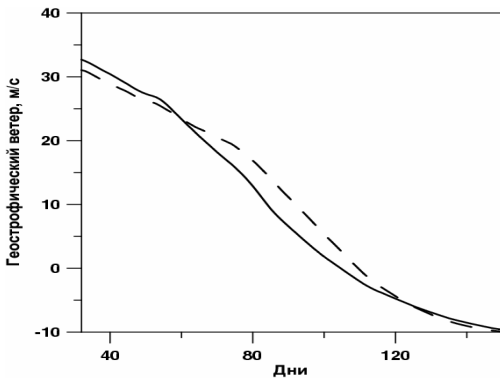


Рис. 10. Климатическое изменение геострофического ветра на высоте 10 гПа, 67,5N, рассчитанное по данным NCEP/NCAR ре-анализа (сплошная линия) и UK Met Office (штриховая линия)

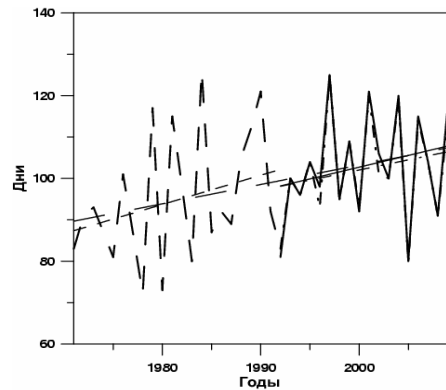


Рис. 11. Временные ряды сроков весенней перестройки, рассчитанные по данным UK Met Office (сплошная линия), NCEP/NCAR ре-анализа (пунктирная линия) и их линейные тренды

Далее, рассчитав по вышеуказанному методу даты весенней перестройки за каждый отдельный год, мы получили временной ряд сроков весенней перестройки за последние 40 лет (рис. 11, пунктирная линия). Из рисунка видно, что дата перестройки изменяется в диапазоне порядка 2 месяцев – с середины марта до середины мая. Кроме того, существует заметный тренд смещения сроков в сторону более поздних дат перестроек, как и в результатах, которые получились при анализе UK Met Office данных (рис. 11, сплошная линия). Видно, что сроки ранних перестроек значительно сместились (на 18 дней) в сторону более поздних дат. Как и в случае анализа данных UK Met Office, поздние перестройки имеют более слабую межгодовую изменчивость.

Тренды сроков весенней перестройки и их статистическая значимость

Анализ временных рядов сроков весенней перестройки циркуляции стратосферы, рассчитанных по данным NCEP/NCAR ре-анализа за период с 1971 по 2009 г. и UK Met Office за период с 1992 по 2009 г., показал, что существует заметный тренд смещение сроков в сторону более поздних перестроек. На рис. 11 показаны временные ряды сроков весенних перестроек и их тренды. Временной ряд дат перестроек за 1971–2009 гг. был разбит на две части (1971–1991 и 1992–2009). Если сравнивать между собой эти два временных отрезка, то можно заметить, что в последние десятилетия изменчивость снизилась, тренд смещения в сторону более поздних перестроек уменьшился. Это указывает на то, что необходимо рассматривать квадратичную зависимость смещения дат весенних перестроек, т.е. в последние годы это смещение стремится к насыщению.

Если мысленно провести линию вдоль поздних и ранних перестроек, то можно заметить, что сроки поздних перестроек имеют небольшую изменчивость за исключением сбоя в 1973–1975 и 1993–1995 гг. Слабая изменчивость дат поздних перестроек, вероятно, связана с тем, что они происходят, главным образом, за счет нагрева средней атмосферы над полярной областью за счет усиления поглощения ультрафиолетового излучения при сезонном изменении зенитного угла Солнца. Сроки ранних перестроек имеют сильную межгодовую изменчивость, и из рис. 11 явно видно, что происходит постепенное смещение сроков ранних перестроек в сторону более поздних. Так как ранние перестройки определяются главным образом усилением волн в феврале–марте, то можно предположить, что волновая активность в стратосфере в конце зимы имеет сильную межгодовую изменчивость, а сроки усиления волновой активности (финальное стратосферное потепление) смещаются по времени в сторону более поздних. Для окончательных выводов об изменчивости активности планетарных волн в феврале–марте необходимы дополнительные исследования.

По методу наименьших квадратов с использованием данных NCEP/NCAR ре-анализа за 1971–2009 гг. был рассчитан линейный тренд изменчивости сроков весенней перестройки циркуляции и оценена его статистическая значи-

мость. По критерию Стьюдента определено, что t-тест составляет 2,1, т.е. статистическая значимость линейного тренда составляет более 97,5 % для анализируемых 39 лет. Линейная скорость смещения даты перестройки равна 4 дням за десять лет.

Связь квази-двухлетних колебаний с датами весенней перестройки циркуляции

Известно, что квази-двухлетние колебания (КДК) влияют на условия распространения планетарных волн и разрушение полярного вихря в зимней стратосфере [Baldwin, 2001]. Поэтому можно предположить, что квази-двухлетние колебания оказывают влияние и на дату перестройки стратосферной циркуляции.

Данные о КДК (измерения ветра и температуры), получаемые с использованием наземных и спутниковых систем наблюдения, доступны с 1953 г. и до настоящих дней. В данной работе использовались среднемесячные данные о зональном ветре с 1971 до 2008 г. на уровне 10 гПа. Измерения проводились на станциях: Маледивес (GAN/Maledives) с координатами 00.41S 73.09E с 1971 до конца 1975 г.; Сингапур (Singapore) с координатами 01.22N 103.55E с начала 1976 до конца 2008 г. [9].

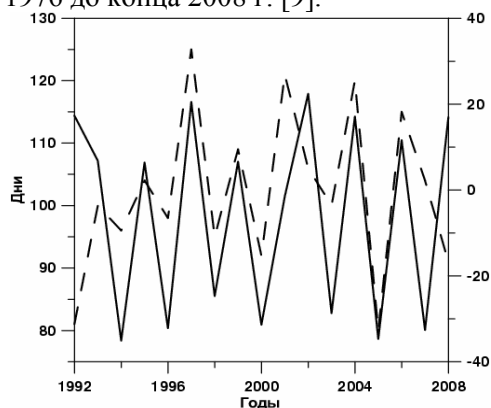


Рис. 12. Среднемесячные за март значения скорости зонального потока КДК (сплошная линия) и сроки весенней перестройки циркуляции стратосферы по данным UK Met Office (пунктирная линия) на уровне 10 гПа

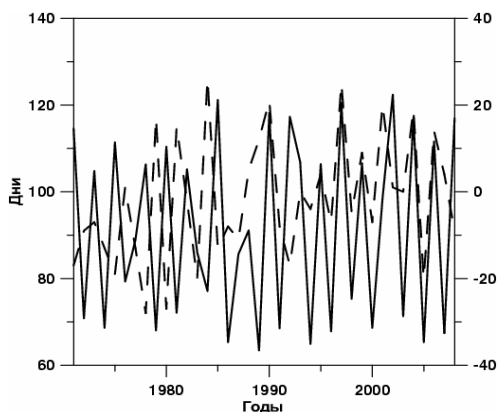


Рис. 13. Среднемесячные за март значения скорости зонального потока КДК (сплошная линия) и сроки весенней перестройки циркуляции стратосферы по данным NCEP/NCAR ре-анализа (пунктирная линия) на уровне 10 гПа

На рис. 12 и 13 показано сравнение мартовских среднемесячных значений зонального ветра на уровне 10 гПа и сроков весенней перестройки, рассчитанных по данным UK Met Office и NCEP/NCAR ре-анализа соответственно. Из рис. 12 можно видеть, что в последние годы, когда восточная и/или западная фаза КДК приходится на весну, наблюдается положительная корреляция КДК с датами перестроек, которая не прослеживается в ранние годы (рис. 13). Можно отметить также, что в середине рассматриваемого временного интервала наблюдается сбой фазы КДК и некий сбой в осциллирующей структуре дат перестроек.

Возможно, что наблюдаемый тренд в сроках перестроек может быть связан с медленным изменением фазы КДК, т.е. с отличием периода КДК от двухлетнего.

Заключение

Результаты проведенного анализа позволяют сделать следующие выводы:

– средняя (климатическая) дата весенней перестройки стратосферной циркуляции за последние 18 лет, рассчитанная на уровне 10 гПа на 67,5N, приходится на 6 апреля;

– средняя (климатическая) дата весенней перестройки за период с 1971 по 2009 г. (39 лет), рассчитанная на уровне 10 гПа на 67,5N по данным NCEP/NCAR, приходится на 30 марта;

– в случае ранних перестроек дата перехода стратосферной циркуляции с зимней на летнюю зависит главным образом от волновой активности (усиления волнового торможения). В случае поздних перестроек (низкая активность планетарных волн) – определяется увеличением нагрева средней атмосферы над полярной областью за счет усиления поглощения ультрафиолетового излучения при сезонном изменении зенитного угла Солнца;

– наблюдается смещение сроков весенней перестройки в сторону более поздних дат перестроек. Это обусловлено тем, что ранние перестройки случаются всё с большей задержкой, в то время как поздние перестройки имеют более слабую межгодовую изменчивость;

– возможно, наблюдаемый тренд в сроках перестроек может быть связан с медленным изменением фазы квази-двухлетних колебаний, т.е. с отличием периода КДК от двухлетнего. Причем это изменение имеет такой характер, что сменяющие друг друга максимумы – минимумы значений зонального ветра в последние годы приходятся на весну.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 08-05-00774) и Федерального агентства по образованию в рамках реализации ФЦП «Кадры» (государственный контракт № П1152).

Литература

1. Бакулина Е.А., Дунаева Е.А., Угрюмов А.И. Связь весенних перестроек циркуляции в стратосфере с характером процессов в тропосфере в марте–июне // *Метеорология и гидрология*, 2009, № 2, с. 29–37.
2. Baldwin M.P. et al. The quasi-biennial oscillation // *Rev. Geophys.*, 2001, vol. 39, p. 179–229.
3. Kalnay E. et al. The NCEP/NCAR 40-Year Re-analysis Project // *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, vol. 77, p. 437–471.
4. Swinbank R., O'Neill A. A stratosphere-troposphere assimilation system // *Mon. Weather Rev.*, 1994, vol. 122, p. 686–702.
5. Torrence Ch. A practical guide to wavelet analysis/ Ch. Torrence, G.P. Compo // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 1998, vol. 79, p. 61–78.
6. Waugh D.W. et al. Persistence of the lower stratospheric polar vortices // *J. Geophys. Res.*, 1999, vol. 104(D22), p. 27191–27202.
7. Wei K., Chen W., Huang R.-H. Dynamical diagnosis of the breakup of the stratospheric polar vortex in the Northern Hemisphere // *Sci. China D-Earth Sci.*, 2007, vol. 50, p. 1369–1379.
8. <http://badc.nerc.ac.uk/data/assim/>
9. <http://www.geo.fu-berlin.de/met/ag/strat/produkte/qbo/qbo.dat>