

УДК 550.513

## СТРАТОСФЕРНО-ТРОПОСФЕРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВО ВРЕМЯ ВЕСЕННЕЙ ПЕРЕСТРОЙКИ ЦИРКУЛЯЦИИ

Е.Н. Савенкова

### STRATOSPHERE-TROPOSPHERE COUPLING DURING THE SPRING-TIME BREAKUP OF CIRCULATION

E.N. Savenkova

Стационарные планетарные волны (СПВ) возникают в тропосфере вследствие крупномасштабных неоднородностей орографии и различий в нагреве поверхности суши и океана. До последнего времени считалось, что только тропосфера оказывает влияние на имеющую значительно меньшую плотность стратосферу через распространяющиеся снизу вверх СПВ. В последние годы на основе анализа наблюдений и результатов модельных расчетов было установлено, что изменчивость циркуляции стратосферы оказывает существенное влияние на условия распространения и отражения СПВ. В данной работе выполнен анализ изменчивости активности СПВ и условий их распространения из тропосферы в стратосферу во время весенней перестройки циркуляции стратосферы.

The stationary planetary waves (SPW) arise in the troposphere due to large-scale orographic inhomogeneities and differences in heat of land surface and ocean. Until recently it was thought that the troposphere influences the stratosphere that has sufficiently less density by means of propagating SPW from lower to upper levels. During last years on base of analysis of observations and model simulations it was found that the variability of the stratospheric circulation substantially influences conditions of propagation and reflection of SPW. In current research the analysis of the variability of SPW activity as well as conditions of their propagation from the troposphere to the stratosphere during springtime transition of stratospheric circulation was performed.

В работах, посвященных исследованию весенней перестройки общей циркуляции стратосферы с зимнего режима на летний [Савенкова, Погорельцев, 2010; Канухина и др., 2011], отмечается, что существует сильная межгодовая изменчивость дат весенней перестройки. Сильная межгодовая изменчивость может объясняться тем, что на разрушение полярного вихря в Северном полушарии влияют как радиационные, так и динамические процессы. Зимняя стратосфера характеризуется большой внутригодовой и климатической изменчивостью, так что разница даже скорости среднемесячного зонального ветра на высотах стратосферы существенно меняется от года к году [Scaife, James, 2000]. Нелинейное взаимодействие стационарных планетарных волн (СПВ) со средним потоком в стратосфере ведет к возникновению нерегулярных колебаний как амплитуды СПВ, так и интенсивности самого среднего потока – так называемых стратосферных васцилляций [Holton, Mass, 1976] – и возникновению внезапных стратосферных потеплений [Matsuno, 1971].

Как известно, планетарные волны возникают в тропосфере и, распространяясь вверх, могут существенно влиять на динамический режим стратосферы. В то же время существует и обратная связь – циркуляция стратосферы может существенно влиять на тропосферу путем частичного отражения волн и наличием сильного зонального потока. Все это необходимо учитывать при изучении весенних перестроек стратосферной циркуляции.

Изменения амплитуды зональной гармоники с волновым числом  $m=1$  (ПВ1) в поле геопотенциальной высоты и среднего зонального ветра на уровне 10 гПа, полученные на основе UK Met Office-данных, представлены на рис. 1 для 2008, 2009, 2010 и 2011 гг. На рисунке хорошо видна межгодовая изменчивость дат весенней перестройки. В 2009 г. амплитуда ПВ1 в стратосфере незначительная и мы наблюдаем позднюю перестройку. В 2010 г. амплитуда ПВ1

существенно больше и перестройка ранняя. Весна 2011 г. представляет особый интерес – в середине марта амплитуда ПВ1 небольшая, но в конце марта – начале апреля наблюдается существенное усиление волновой активности, финальное потепление в стратосфере и очень быстрая перестройка циркуляции с датой перестройки, примерно соответствующей климатическому значению. Стоит также отметить, что средний зональный ветер более слабый в годы ранней перестройки (2008 и 2010 гг.), что обусловлено присутствием сильных бегущих и стационарных планетарных волн во время перестройки циркуляции. Когда наблюдается поздняя перестройка (2009 г.), зональный ветер имеет положительные значения в марте, при этом амплитуды волн меньше, чем в случае ранней перестройки. В результате сопоставления этих рисунков можно сделать вывод, что дата весенней перестройки в значительной степени определяется активностью планетарных волн в стратосфере в рассматриваемый период.

Из рис. 1 также хорошо видно, что в течение весенних месяцев, когда происходит перестройка общей циркуляции стратосферы с зимнего режима на летний, наблюдается сильная изменчивость амплитуд ПВ1 (например, начало марта 2008 г. и конец марта 2011 г.). ПВ1 можно разделить на западные и восточные бегущие волны. Однако такое разделение не однозначно, так как разделенные компоненты содержат волны с одинаковыми амплитудами, но распространяющиеся в противоположных направлениях [Погорельцев, 2007; Pogoreltsev et al., 2009]. Такие волны можно рассматривать как стоячие волны с осциллирующими амплитудами, которые описывают нерегулярную изменчивость стратосферы, т. е. так называемые стратосферные васцилляции [Holton, Mass, 1976]. Необходимо также отметить, что во время весенних перестроек в мезосфере и ионосфере присутствуют бегущие волны с периодом порядка 10–15 дней [Shepherd et al., 1999, 2002; Aushev et al.,

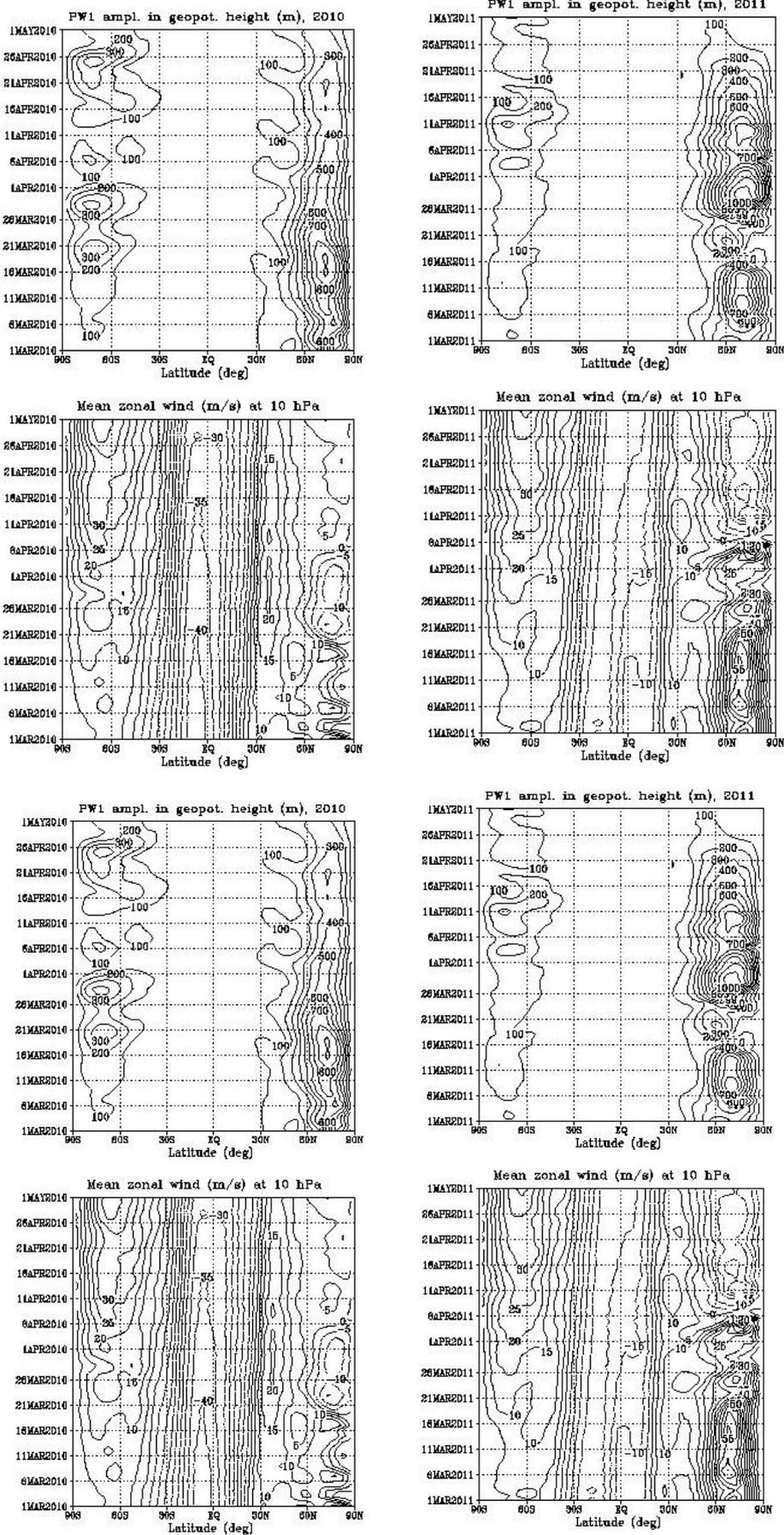


Рис. 1. Полученные на основании анализа данных UK Met Office широтно-временные сечения амплитуды зональной гармоник с  $m=1$  в поле геопотенциальной высоты и среднего зонального ветра на уровне 10 гПа за весенние месяцы для 2008, 2009, 2010 и 2011 гг. соответственно.

2006]. Когда эти бегущие волны совпадают по фазе со стационарной планетарной волной и со стоячими волнами, результирующая амплитуда зональной гармоники усиливается, что приводит к усилению направленного к полюсу волнового потока тепла. В результате полярная область стратосферы нагревается и происходит торможение или даже обращение среднего зонального потока.

Для более детального анализа активности планетарных волн, а также анализа проникновения волн из тропосферы в стратосферу и обратно были рассчитаны и проанализированы распределения вертикального потока волновой активности (так называемого потока Элиассена–Пальма [Edmon et al., 1980]). На рис. 2 показаны широтно-временные сечения распределений вертикальной составляющей этого потока на высоте 24 км для 2008, 2009, 2010 и 2011 гг. соответственно до, во время и после весенней перестройки циркуляции стратосферы. Заметим, что в нашем случае поток ЭП рассчитывался как усредненный по долготе трехмерный поток волновой активности [Plumb, 1985], т. е. без представления долготных вариаций метеорологических величин суммой зональных гармоник. Таким образом, вертикальная компонента этого потока представляет собой суммарный вклад всех планетарных волн (зональных гармоник).

Перед ранней перестройкой (2008 и 2010 гг.) на средних и высоких широтах Северного полушария

наблюдается усиление направленных вверх, из тропосферы в стратосферу, потоков волновой активности, которые приводят к развитию финального стратосферного потепления (ФСП). Происходит обращение циркуляции, после которого зимний полярный вихрь уже не восстанавливается. После перестройки стратосферной циркуляции на летний режим вертикальные потоки волновой активности практически отсутствуют. По-видимому, происходит запирание волн на высотах стратосферы сильным восточным потоком, вследствие чего способность волн проникать из тропосферы в стратосферу и обратно ослабевает.

В 2009 г. потоки волновой активности очень слабые на протяжении всех весенних месяцев. Присутствие сильного зонального потока не позволяет амплитудам волн достичь больших значений, и обмена между тропосферой и стратосферой практически не происходит. Наблюдается поздняя перестройка общей циркуляции стратосферы, происходящая из-за изменения зенитного угла Солнца и нагрева полярной области.

В 2011 г. наблюдается совершенно иная ситуация (рис. 2, верхняя панель). Необходимо отметить, что этот год необычен тем, что в течение весенних месяцев наблюдалось несколько сильных стратосферных потеплений, но природа их была разной. В начале весны на средних и верхних широтах Северного полушария наблюдаются нисходящие потоки. Затем

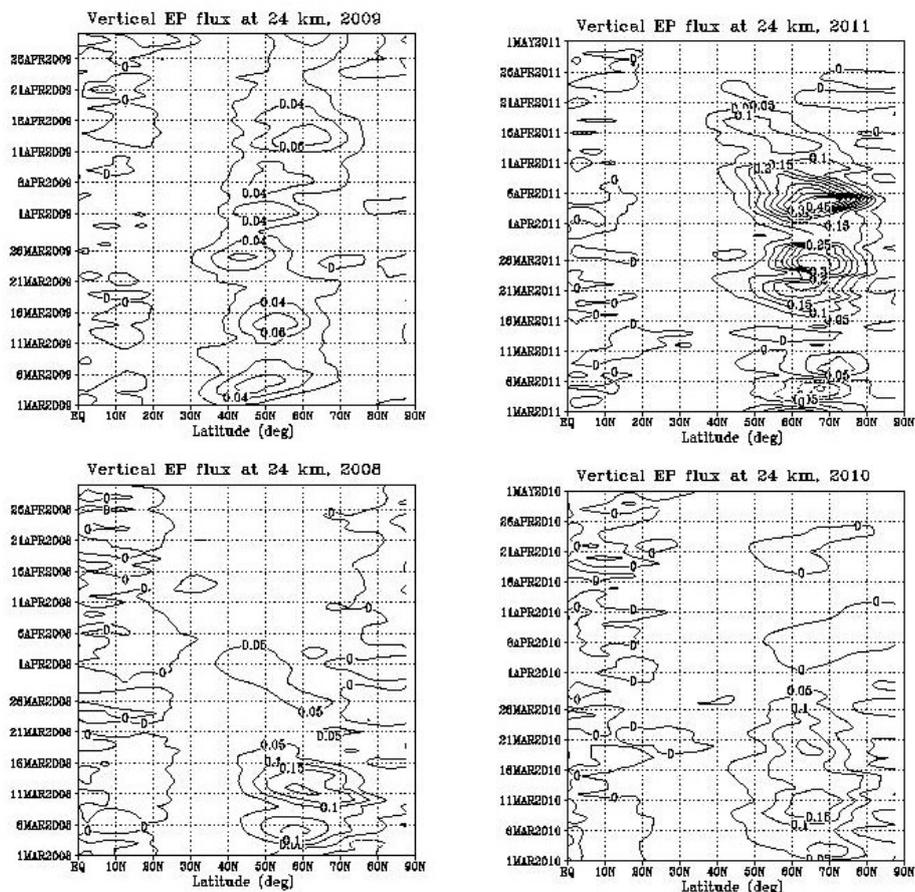


Рис. 2. Вертикальная компонента потока Элиассена–Пальма на высоте 24 км, рассчитанная по данным UK Met Office за март и апрель 2008 г. (интервалы между контурами  $0.05 \text{ м}^2/\text{с}^2$ ), 2009 г. (интервалы между контурами  $0.02 \text{ м}^2/\text{с}^2$ ), 2010 и 2011 гг. (интервалы между контурами  $0.05 \text{ м}^2/\text{с}^2$ ).

волны, достигшие тропосферных уровней, отражаются от поверхности и возникает восходящий поток, который впоследствии усиливается и приводит к мощному ФСП в начале апреля.

Заметим, что, так как потоки ЭП представляют собой осредненные по долготе трехмерные потоки волновой активности, на самом деле на рис. 2 мы не можем наблюдать нисходящие потоки из стратосферы в тропосферу, которые в действительности там присутствуют. Нисходящие потоки в тропосферу наблюдаются только в локализованных по долготе областях, и при осреднении они только ослабляют суммарный по всем долготам поток. Для более детального анализа необходимо рассматривать дополнительно трехмерные потоки волновой активности.

Работа выполнена при частичной поддержке проектов РФФИ № 10-05-00198 и № 11-05-00971.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Канухина А.Ю., Савенкова Е.Н., Погорельцев А.И. Влияние QVO и солнечной активности на межгодовую изменчивость дат весенней перестройки волновой активности // Труды XII Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Иркутск, 2011. С. 324–326.

Погорельцев А.И. Генерация нормальных атмосферных мод стратосферными вассилляциями // Изв. РАН. ФАО. 2007. Т. 43, № 4. С. 463–475.

Савенкова Е.Н., Погорельцев А.И. Межгодовая и климатическая изменчивость сроков весенней перестройки циркуляции стратосферы // Ученые записки РГТМУ. 2010. № 11. С. 53–62.

Aushev V.M., Fedulina I.N., Gordienko G.I., et al. Springtime effects in the mesosphere and ionosphere observed at northern midlatitudes // Planet. Space Sci. 2006. V. 54. P. 559–571.

Edmon H.J., Hoskins B.J., McIntyre M.E. Eliassen-Palm cross section for the troposphere // J. Atmos. Sci. 1980. V. 37. P. 2600–2616.

Holton J.R., Mass C. Stratospheric vacillation cycles // J. Atmos. Sci. 1976. V. 33. P. 2218–2225.

Matsuno T. A dynamical mode 31 of sudden stratospheric warming // Ibid. 1971. V. 28. P. 871–883.

Plumb R.A. On the three-dimensional propagation of stationary waves // Ibid. 1985. V. 42. P. 217–229.

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. V. 71. doi:10.1016/j.jastp.2009.05.011.

Scaife A.A., James I.N. Response of the stratosphere to interannual variability of tropospheric planetary waves // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2000. V. 126. P. 275–297.

Shepherd G.G., Stegman J., Espy P., et al. Springtime transition in lower thermospheric atomic oxygen // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. P. 213–223.

Shepherd M.G., Espy P.J., She C.Y., et al. Springtime transition in lower mesospheric temperature in the Northern Hemisphere // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2002. V. 64. P. 1183–1199.

*Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург*