

НЕЛИНЕЙНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СРЕДНЕЙ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ

¹К.А. Диденко, ²А.И. Погорельцев

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия
didenko.xeniya@yandex.ru

NONLINEAR INTERACTION OF WAVE PROCESSES IN THE MIDDLE AND UPPER ATMOSPHERE

¹K.A. Didenko, ²A.I. Pogoreltsev

¹Saint Petersburg University, Saint-Petersburg, Russia

²Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia

Аннотация. Чтобы рассмотреть эффекты нелинейных взаимодействий волна-волна и волна-средний поток, были изучены члены, которые дают вклад в баланс вихревой энтропии. Используя ее общую форму уравнения, была рассчитана эволюция для планетных волн с зональными волновыми числами $m = 1, 2$ и 3 . Также исследовался вклад различных членов взаимодействия в изменение вихревой энтропии. Полученные результаты показывают, что квазигеострофическое приближение не подтверждается в верхней стратосфере, по крайней мере, во время внезапных стратосферных потеплений.

Ключевые слова: энтрофия, потенциальный вихрь Эртеля, планетарные волны, взаимодействие волн.

Abstract. To consider the effects of nonlinear wave-wave and wave-mean flow interactions, the terms contributing to the eddy enstrophy balance have been studied. Using the general form of the eddy enstrophy balance equation, its evolution for planetary waves with zonal wave numbers $m = 1, 2$, and 3 has been calculated. The contribution of different interaction terms to the change the eddy enstrophy has been discussed. The results obtained show that quasi-geostrophic approach is not approved in the upper stratosphere at least during the sudden stratospheric warmings.

Keywords: enstrophy, Ertel potential vorticity, planetary waves, waves interaction.

Введение

Для того, чтобы рассмотреть эффекты нелинейного взаимодействия, были получены члены, дающие вклад в баланс возмущения потенциальной энтропии. В общем виде уравнение баланса энтропии записывается в следующем виде:

$$\frac{\partial \bar{q}'^2}{\partial t} + \underbrace{\frac{\bar{q}'u'}{\alpha \cos \varphi}}_A + \underbrace{\frac{\bar{v}'\bar{q}'}{\alpha}}_B + \underbrace{\frac{\bar{q}'v'}{\alpha}}_C + \underbrace{\frac{\bar{q}'v'}{\alpha}}_D = \bar{q}'\bar{Q}', \quad (1)$$

где q' — возмущение квазигеострофического потенциального вихря, u' и v' — возмущения зональной и меридиональной составляющей скорости геострофического ветра, Q' является возмущением диабатических источников и стоков, а также включает диссипативные слагаемые, которые не могут быть оценены из наблюдений. Все прочие символы имеют общепринятые значения. Первое слагаемое в левой стороне уравнения (A) описывает эволюцию волны. Два последующих слагаемых (B) — взаимодействия по типу волна-волна. Последний член (C) описывает изменения возмущения потенциальной энтропии, вызванные взаимодействием волны со средним потоком. Член в правой части уравнения (D) обозначает изменения в возмущениях потенциальной энтропии за счет диабатического нагрева и диссипации в уравнении импульса, включая вклад со стороны гравитационных и инерционно-гравитационных волн.

Нелинейное взаимодействие волна-волна

Для того чтобы рассчитать вклад разных членов в баланс возмущения потенциальной энтропии мы используем несколько иные формулы, чем предложенные в работе Smith [Smith, 1983]. Вторую строчку, описывающую взаимодействие волны 1 и волны 2, можно переписать в следующем виде

$$+ \frac{1}{4\alpha \cos \varphi} \left[2U_2 Q_1^* Q_1^{*2} + U_2^* (Q_1^{*2} - Q_1^2) \right] + \quad (2)$$

$$+ \frac{1}{4\alpha} \left[(V_2 Q_1 + V_2^* Q_1^*) \frac{\partial}{\partial \varphi} Q_1 + (V_2^* Q_1 + V_2 Q_1^*) \frac{\partial}{\partial \varphi} Q_1^* \right]$$

Обозначения аналогичны обозначениям, приведенным в работе Smith [Smith, 1983]. Этот член может быть различным образом переписан при использовании квазигеострофического уравнения неразрывности для возмущений за счет волны 2, как было предложено в работе Smith et al. [Smith, Gille et al., 1984].

$$+ \frac{1}{8\alpha \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left\{ \left[V_2 (Q_2^1 - Q_1^{*2}) + 2V_2^* (Q_1 Q_1^*) \right] \cos \varphi \right\} \quad (3)$$

Сравнение результатов полученных при использовании выражений (2) и (3) показывает, что между ними существуют значительные расхождения (по крайней мере, в средних широтах зимней стратосферы, где нелинейные взаимодействия волна-

волна сильны). Следует отметить также, что в Smith [Smith,1983] есть опечатка в первой строчке, описывающей вклад в уравнение баланса возмущения потенциальной энтропии для волны 1 за счет нелинейного взаимодействия волн 2 и 3. Правильная запись этой строчки будет выглядеть следующим образом (возможно в статье просто перепутаны подстрочные индексы):

$$+ \frac{3}{4\alpha \cos \varphi} \left[U_2 (Q_1 Q_3^* - Q_1^* Q_3) + U_2^* (Q_1^* Q_3 - Q_1 Q_3^*) \right] \quad (4)$$

Таким образом, для правильного описания нелинейных взаимодействий необходимо отказаться от использования геострофического приближения. Учитывая выражение для абсолютной завихренности $\omega_a = \text{rot} V + 2\Omega$, $\Omega = \{0, \Omega \cos \varphi, \Omega \sin \varphi\}$ и пренебрегая $2\Omega \cos \varphi$ по сравнению с вертикальной производной зонального ветра u_z , получаем выражение для потенциального вихря Эртеля $P = \omega_a \nabla \theta / \rho_0$, которое обычно используют в атмосферных приложениях, когда работают с «примитивными» уравнениями в сферической системе координат [Andrews, 1987].

$$\rho_0 P = \theta_z \left[f - \frac{(u \cos \varphi)_\varphi}{\alpha \cos \varphi} + \frac{u_\lambda}{\alpha \cos \varphi} \right] - \frac{\theta_\lambda v_z}{\alpha \cos \varphi} + \frac{\theta_\varphi u_z}{\alpha} \quad (5)$$

В дальнейшем, для сопоставления результатов, полученных в геострофическом приближении с результатами при использовании выражения (5), в уравнение баланса возмущения потенциальной энтропии (1) вместо q' подставляется $P' \frac{\rho_0}{\theta_z}$.

Заключение

На рис. 1 и 2 приведены результаты расчетов слагаемых, описывающих временную изменчивость и нелинейные взаимодействия для СПВ1 и СПВ2, которые были получены с использованием геострофического выражения для возмущения потенциа-

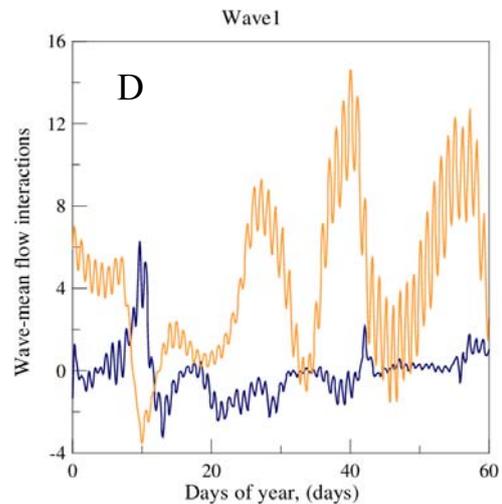
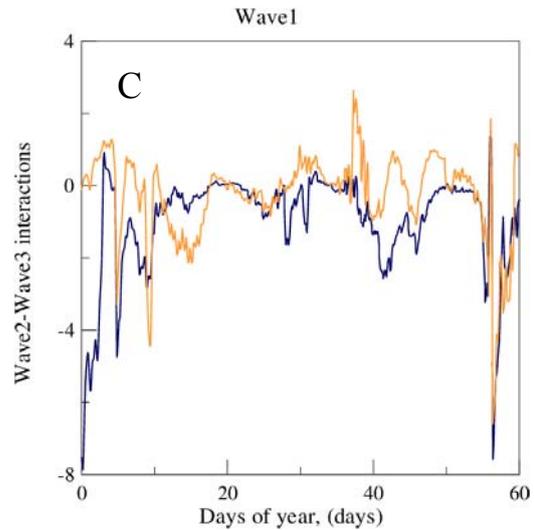
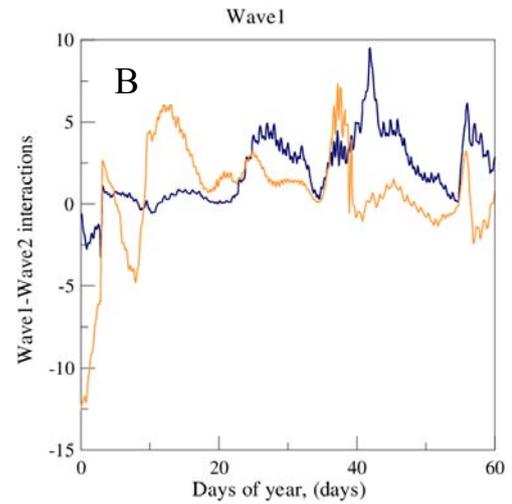
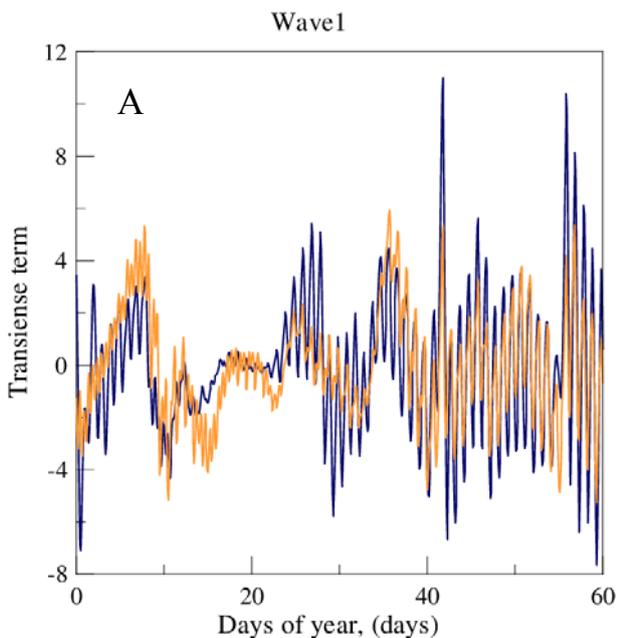


Рис. 1. Сравнение слагаемых из уравнения (1) при использовании выражений для возмущения квази-геострофической завихренности (синяя линия) и потенциального вихря Эртеля (оранжевая линия) для волны 1. А — эволюционное слагаемое, В — слагаемое, отвечающее за взаимодействие волны 1 и волны 2, С — слагаемое, описывающее взаимодействие волны 2 и волны 3, D — слагаемое описывающее взаимодействие волны 1 со средним потоком. Графики приведены в единицах 10^{-15} c^{-3} , по горизонтальной оси отложены дни года (период с января по февраль)

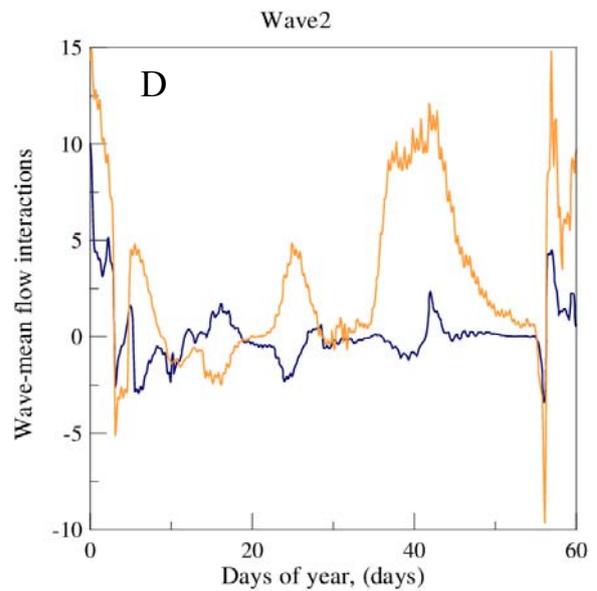
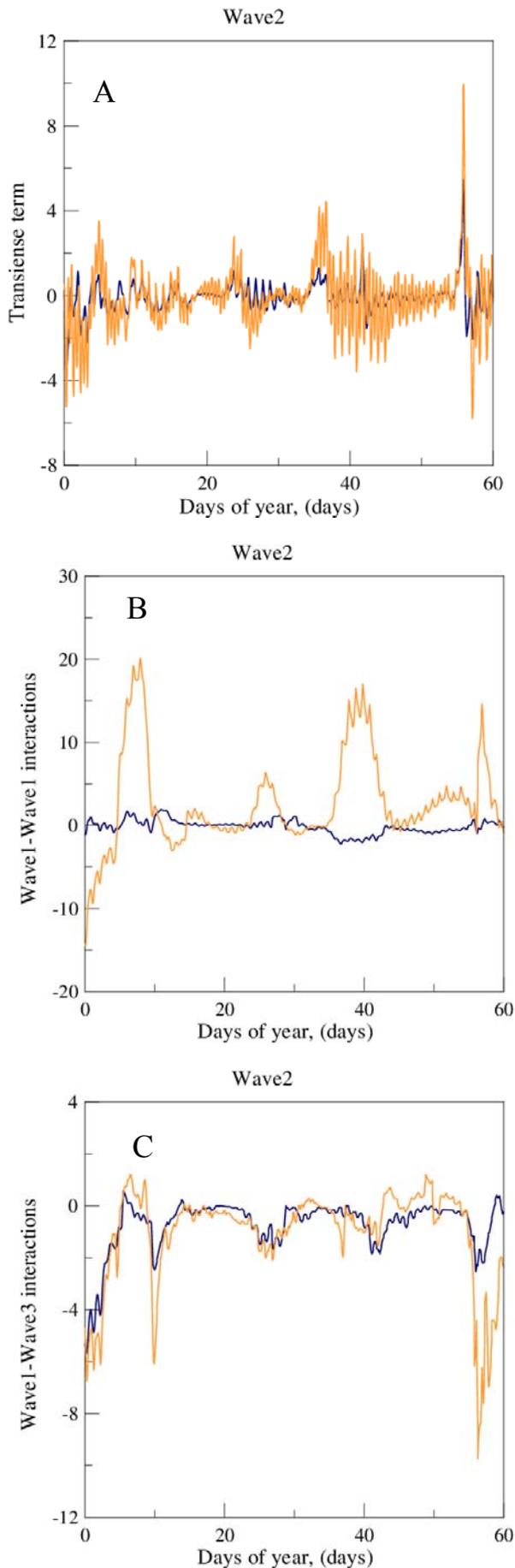


Рис. 2. Сравнение слагаемых из уравнения (1) при использовании выражений для возмущения квазигеострофической завихренности (синяя линия) и потенциального вихря Эртеля (оранжевая линия) для волны 2. А — эволюционное слагаемое, В — слагаемое, отвечающее за взаимодействие волны 1 и волны 1, С — слагаемое, описывающее взаимодействие волны 1 и волны 3, D — слагаемое описывающее взаимодействие волны 2 со средним потоком. Графики приведены в единицах 10^{-15} с^{-3} , по горизонтальной оси отложены дни года (период с января по февраль)

льного вихря (синие линии) и с использованием выражения (5) — оранжевые линии. Результаты были получены для высоты 50 км и усреднены в полосе широт 52.5–62.5 N. Полученные результаты показывают, что в области сильных нелинейных взаимодействий (средние широты верхней стратосферы) использование приближения геострофичности не оправдано [Pogoreltsev, Savenkova, et al, 2015].

Список литературы

Andrews D.G. On the interpretation of the Eliassen-Palm flux divergence, *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 1987. V. 113. P. 323–338.

Pogoreltsev A.I., Savenkova E.N., Aniskina O.G. Interannual and interseasonal variability of stratospheric dynamics and stratosphere-troposphere coupling during northern winter // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2015. P. 5–8.

Smith A.K. Observation of wave-wave interaction in the stratosphere. // *J. Atmos. Sci.* 1983. P. 40.

Smith A.K., Gille J.C., Lyjak L.W. Wave-wave interactions in the stratosphere: Observations during quiet and active wintertime period. // *J. Atmos. Sci.* 1984. V. 41. P. 363–373.