

Министерство образования и науки Российской Федерации
Сибирское отделение Российской Академии наук
Национальный исследовательский Томский государственный университет
Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН
ООО «ТОМИОН»

ФИЗИКА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

*Материалы XIII Международной Школы молодых ученых
«Физика окружающей среды» им. А. Г. Колесника, посвященной
140-летию Томского государственного университета*

9–16 сентября 2018 г., г. Томск

Томск
2018

УДК 551.508; 551.510; 551.521

Рецензенты:

Г. Г. Матвиенко, д-р физ.-мат. наук, проф., ИОА СО РАН

С. А. Колесник, канд. физ.-мат. наук, доцент, ТГУ

Физика окружающей среды:

Ф50 Материалы XIII Международной Школы молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А. Г. Колесника. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2018. – 230 с.

ISBN 978-5-91302-184-7

Сборник включает статьи участников XIII Международной Школы молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А. Г. Колесника. Обсуждаются результаты теоретических и экспериментальных исследований по следующим направлениям: физика атмосферы, ионосферы и магнитосферы, физика солнечно-земных связей, физическая экология, распространение электромагнитных волн в атмосфере, ионосфере и океане, физика и химия атмосферного аэрозоля, радиация и климат, физические основы, методы и аппаратура оптического, радиоволнового и акустического зондирования окружающей среды.

Для специалистов в области физики, оптики атмосферы и океана, радиофизики, метеорологии и экологии.

УДК 551.508; 551.510; 551.521

ISBN 978-5-91302-184-7

© Авторы статей, 2018

© Томский государственный университет, 2018

© Издательство «ТМЛ-Пресс», 2018

НЕЛИНЕЙНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СРЕДНЕЙ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ

К. А. Диденко¹, А. И. Погорельцев^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

²Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург
ул. Пражская, д. 13, кв. 709, д. Кудрово, Всеволожский р-н, Ленинградская обл., 188691
didenko.xeniya@yandex.ru

В стратосфере наблюдается взаимосвязь между изменениями амплитуд стационарных планетарных волн с зональными волновыми числами 1 и 2 (СПВ1 и СПВ2). Эта зависимость обусловлена, главным образом, нелинейными взаимодействиями волна-волна в стратосфере. Для того, чтобы объяснить наблюдаемую изменчивость амплитуд СПВ, можно рассмотреть вклад различных нелинейных слагаемых в уравнении баланса возмущенной потенциальной энтрофии.

Используя общую форму уравнения баланса возмущенной потенциальной энтрофии (квадрат потенциального вихря), можно рассчитать эволюцию СПВ и оценить вклад различных нелинейных слагаемых, описывающих нелинейные взаимодействия:

$$\frac{\partial \overline{q'^2}}{\partial t} + \frac{\overline{q'u'}}{a \cos \varphi} \frac{\partial q'}{\partial \lambda} + \frac{\overline{q'v'}}{a} \frac{\partial q'}{\partial \varphi} + \frac{\overline{q'v'}}{a} \frac{\partial \bar{q}}{\partial \varphi} = \overline{q'Q'}, \quad (1)$$

где q' – возмущение квазигеострофического потенциального вихря, u' и v' – возмущения зональной и меридиональной составляющей скорости геострофического ветра, Q' является возмущением diabatic источников и стоков, черта сверху означает зональное усреднение. Все прочие символы имеют общепринятые значения. Первое слагаемое в левой стороне уравнения описывает эволюцию волны. Два последующих слагаемых – взаимодействия по типу волна-волна. Последнее слагаемое в левой части уравнения описывает изменения возмущения потенциальной энтрофии, вызванные взаимодействием волны со средним потоком. Правая часть уравнения описывает изменения за счет diabatic нагрева и диссипации в уравнении импульса, включая вклад со стороны гравитационных и инерционно-гравитационных волн.

Результаты для уравнения (1) можно получить с использованием q' (как было предложено в работе [1]) или, отказавшись от квазигеострофического приближения, с использованием возмущения потенциального вихря Эртеля – P' :

$$\frac{\partial \overline{P'^2}}{\partial t} + \frac{\overline{P'u'}}{a \cos \varphi} \frac{\partial P'}{\partial \lambda} + \frac{\overline{q'v'}}{a} \frac{\partial P'}{\partial \varphi} + \frac{\overline{P'v'}}{a} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \varphi} + \overline{P'w'} \frac{\partial P'}{\partial z} + \overline{P'w'} \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} = \overline{P'Q'}, \quad (2)$$

где последние два слагаемых в левой части уравнения являются добавками для расчета взаимодействия волна-волна и волна-средний поток, содержащими возмущение вертикальной составляющей скорости ветра w' .

Для правильного описания нелинейных взаимодействий необходимо отказаться от использования геострофического приближения (по крайней мере для исследования процессов в средних широтах зимней стратосферы, когда наблюдается сильное нелинейное взаимодействие по типу волна-волна) [3]. Квазигеострофический потенциальный вихрь, возмущение которого используется для расчета возмущения потенциальной энтропии, не является приближением потенциального вихря Эртеля. Это просто его аналог (даже единицы измерения отличаются, правильно его нужно бы называть псевдо-потенциальный вихрь [4]). Учитывая выражение для абсолютной завихренности $\vec{\omega}_a = \text{rot}\vec{V} + 2\vec{\Omega}, \vec{\Omega} = \{0, \vec{\Omega} \cos \varphi, \vec{\Omega} \sin \varphi\}$, можно получить выражение для потенциального вихря Эртеля $P = \vec{\omega}_a \cdot \vec{\nabla}\theta/\rho_0$, которое обычно используют в атмосферных приложениях, когда работают с «примитивными» уравнениями в сферической системе координат [4]. Для сопоставления результатов, полученных в геострофическом приближении и с использованием потенциального вихря Эртеля, в уравнениях баланса возмущения потенциальной энтропии используем $q'\overline{\theta}_z$ или $P'\rho_0$ (вид соответствующих выражений для вихря позволяет ввести корректировку, необходимую для корректного сравнения результатов).

Чтобы показать поведение разных слагаемых в балансе потенциальной энтропии с использованием $q'\overline{\theta}_z$ или $P'\rho_0$, было решено рассмотреть результат моделирования с использованием МСВА (модель средней и верхней атмосферы), когда наблюдалось (моделировалось) сильное внезапное стратосферное потепление (ВСП). Во время этого явления волновая активность обычно усиливается. На рис. 1 показаны результаты моделирования с помощью МСВА (был получен ансамбль решений для условий Эль-Ниньо и выбран один из членов ансамбля). Наблюдается сильное увеличение амплитуд СПВ1 10 января, что сопровождалось событием ВСП и, как следствие, изменением среднего зонального потока в стратосфере.

Используя результаты моделирования, были рассчитаны и представлены на рисунках слагаемые уравнений (1) и (2). Значения были получены для высоты 30 км и усреднены в полосе широт 52,5N–62,5N. Результаты на рис. 2 а и 3 а показывают, что временные изменения вихревой потенциальной энтропии для СПВ1 и СПВ2 практически не зависят от типа используемого потенциального вихря. Вид кривой, показывающей взаимодействие волн с разными волновыми числами, выглядит аналогичным (используя выражение $q'\overline{\theta}_z$ или $P'\rho_0$), но амплитуды вариаций заметно отличается. Наиболее интересная ситуация возникает при рассмотрении взаимодействия СПВ1 или СПВ2 со средним потоком. На панелях (d) рис. 2 и 3 видно, что значения членов

с использованием квазигеострофической потенциальной завихренности и потенциального вихря Эртеля находятся практически в противофазе.

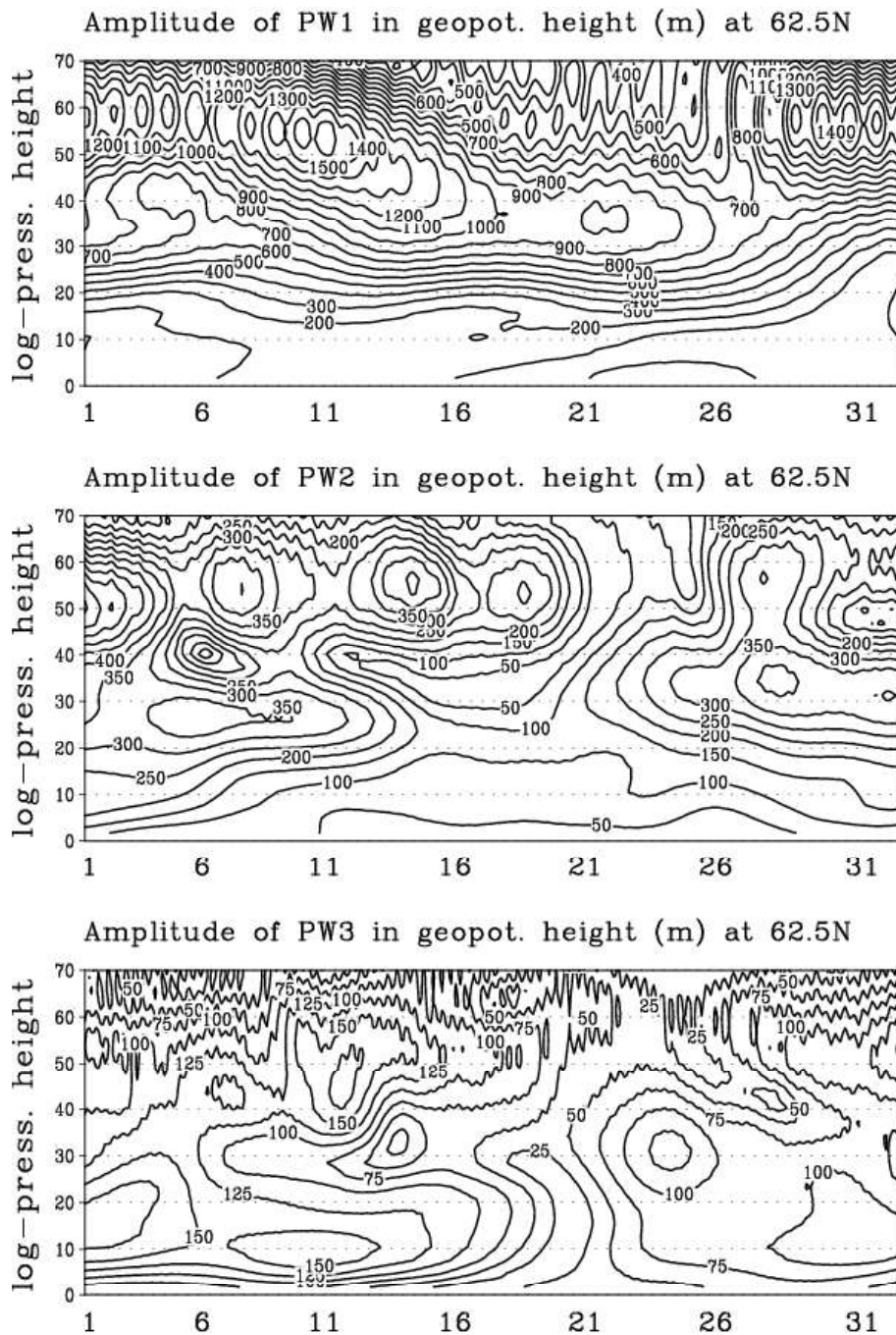


Рис. 1. Высотно-временное представление амплитуд зональных гармоник в геопотенциальной высоте с волновым числом $m = 1$ (верхняя панель), $m = 2$ (средняя панель) и $m = 3$ (нижняя панель) на 62,5N в январе. Данные МСВА

Результаты расчета слагаемых в уравнении баланса возмущенной потенциальной энтропии демонстрируют различия при использовании квазигеострофического приближения и при

использовании потенциального вихря Эртеля. В дальнейшем необходимо более подробно рассмотреть взаимодействие СПВ1 и СПВ2 со средним потоком. Более того, члены, содержащие вертикальную скорость (два последних члена в левой части уравнения (2)), не рассматривались в настоящей работе. Эти слагаемые могут вносить существенный вклад в баланс во время событий ВСП и/или в случае рассмотрения нелинейных взаимодействий высокочастотных планетарных волн (например, атмосферных приливов). Эта задача будет предметом дальнейших исследований.

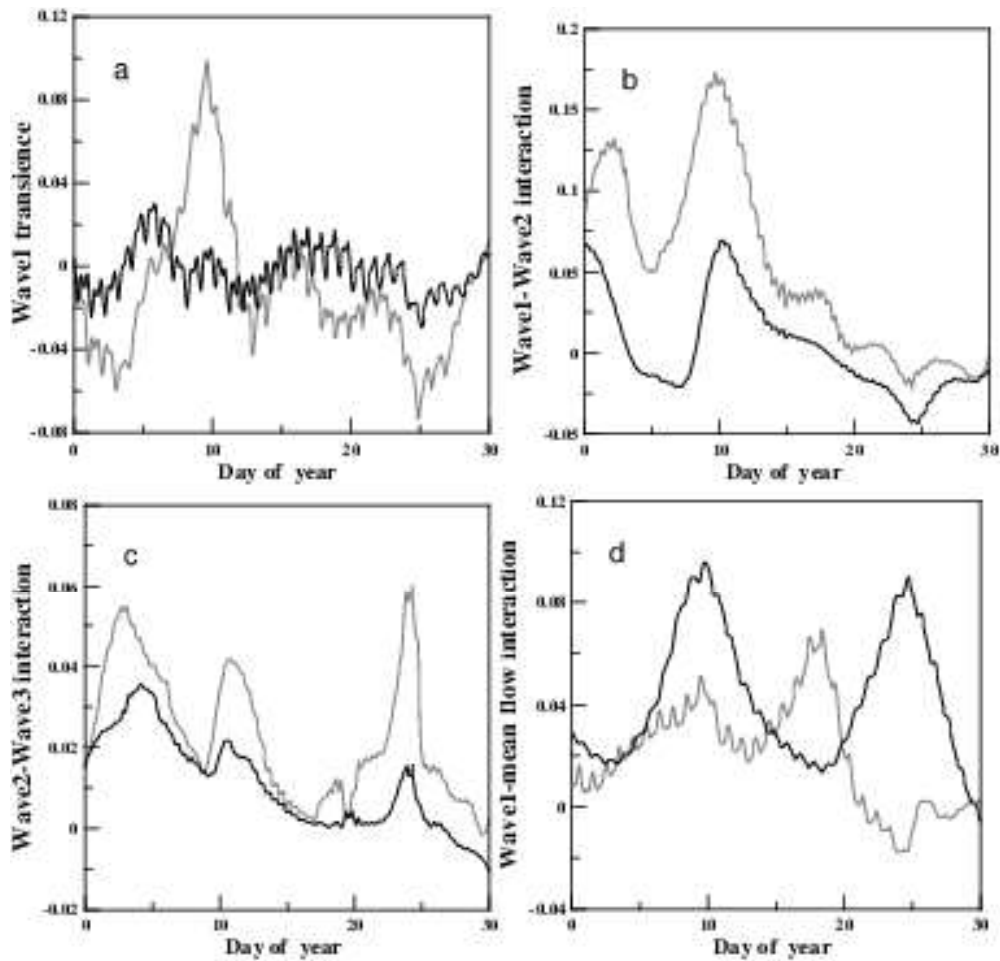


Рис. 2. Члены, отвечающие за вклад в баланс возмущенной потенциальной энтропии (с использованием квазигеострофического приближения – серые линии, потенциального вихря Эртеля – черные линии) для СПВ1 на 30 км в январе: (a) эволюция волны, (b) взаимодействие волна 1 – волна 2, (c) взаимодействие волна 2 – волна 3 и (d) взаимодействие волна 1 – средний поток. Графики приведены в единицах $10^{12}(\text{кг м}^{-3})^2\text{PVU}^2/\text{день}$, где $1\text{PVU} = 10^{-6}\cdot\text{К м}^2\text{кг}^{-1}\text{с}^{-1}$

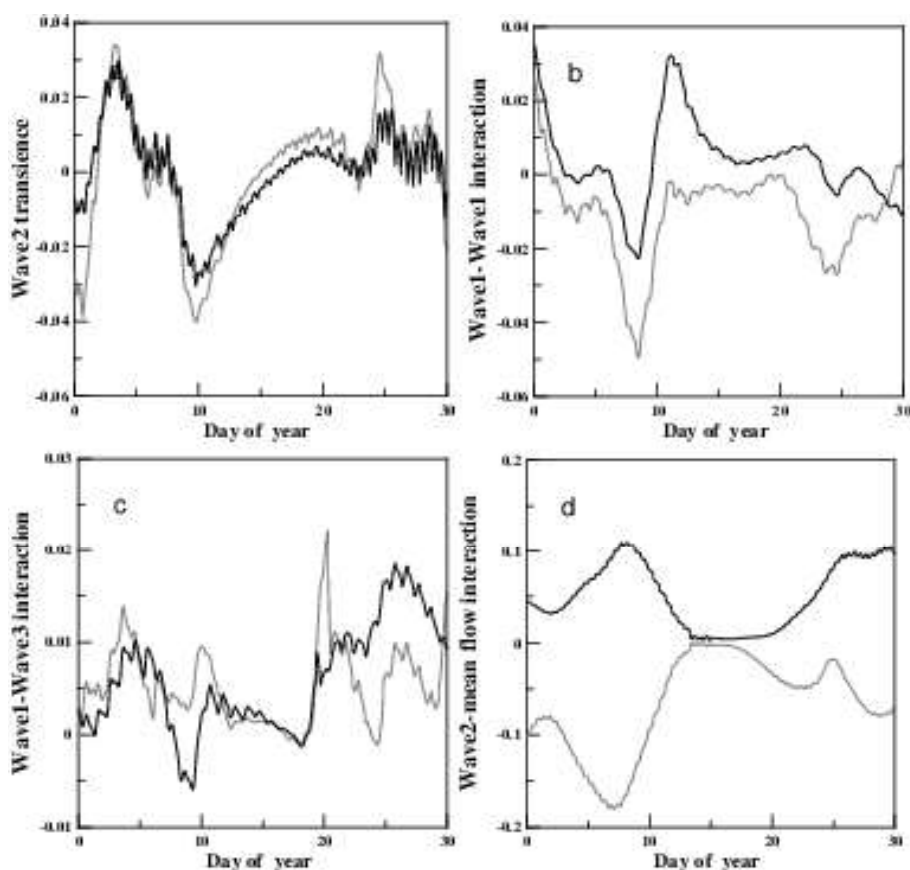


Рис. 3. Члены, отвечающие за вклад в баланс возмущенной потенциальной энтропии (с использованием квазигеострофического приближения - серые линии, потенциального вихря Эртеля – черные линии) для СПВ2 на 30 км в январе: (a) эволюция волны, (b) взаимодействие волна 1 – волна 1, (c) взаимодействие волна 1 – волна 3 и (d) взаимодействие волна 2 – средний поток. Графики приведены в единицах $10^{12}(\text{кг м}^{-3})^2\text{PVU}^2/\text{день}$, где $1\text{PVU} = 10^{-6}\text{К м}^2\text{кг}^{-1}\text{с}^{-1}$

Литература

1. *Smith A. K.* Observation of Wave-Wave interactions in the Stratosphere // *J. Atmos. Sci.* – 1983. – Vol. 40. – С. 2484–2493.
2. *Smith A. K.* Wave-Wave Interactions in the Stratosphere: Observations during Quiet and Active Wintertime Periods // *J. Atmos. Sci.* – 1984. – Vol. 41. – С. 365.
3. *Pogoreltsev A. I., Savenkova E. N., Aniskina O. G., Ermakova T. S. и др.* Interannual and inter-seasonal variability of stratospheric dynamics and stratosphere-troposphere coupling during northern winter // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* – 2015. – № 136. – С. 191–194.
4. *Andrews D. G., Holton J. R., Conway B. L.* Middle Atmospheric Dynamics. Orlando: Academic press, 1987. – Vol. 40. – С. 113–122.