

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 XIV Международной Школы молодых ученых  
«Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника  
2–4 ноября 2020 г., г. Томск*

Scientific & Technical Translations



ИЗДАТЕЛЬСТВО

Томск – 2020

УДК 551.508; 551.510; 551.521  
Ф48

**Физика окружающей среды:** материалы XIV Международной Школы молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника. – Томск : STT, 2020. – 118 с.

ISBN 978-5-93629-654-3

Сборник включает статьи участников XIV 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**

*Рецензенты:*

Матвиенко Г.Г. – докт. физ.-мат. наук, профессор, ИОА СО РАН;  
Колесник С.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент, ТГУ.

ISBN 978-5-93629-654-3

© Авторы, 2020  
© Томский государственный университет, 2020  
© Дизайн, макет, STT<sup>TM</sup>, 2020

# АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ АТМОСФЕРНЫХ МИГРИРУЮЩИХ ПРИЛИВОВ В СТРАТОСФЕРЕ

**К.А. Диденко, А.И. Погорельцев**

*Российский государственный гидрометеорологический университет*

*Россия, 192007, г. Санкт-Петербург, Воронежская улица, 79*

*didenko.xeniya@yandex.ru*

В данной работе выполнен анализ нелинейных взаимодействий атмосферных приливов на основе уравнения баланса возмущенной потенциальной энтропии (квадрат потенциального вихря Эртеля). Подобный подход был ранее применен к исследованию стационарных планетарных волн (СПВ). С использованием комплексного вейвлет преобразования Морле были получены временные ряды амплитуд и фаз отдельных приливных компонент, которые необходимы для расчета слагаемых в уравнении баланса. С использованием данных реанализа ERA5 сделаны оценки вклада отдельных слагаемых, отвечающих за нелинейное взаимодействие между атмосферными приливами, а также между приливами и средним потоком.

Метод исследования нелинейных взаимодействий волн планетарного масштаба был представлен в работе [1]. Было показано, что в стратосфере наблюдается взаимосвязь между изменениями амплитуд стационарных планетарных волн с зональными волновыми числами  $m_{pw}=1$  и  $2$  (СПВ1 и СПВ2). Эта зависимость обусловлена, главным образом, нелинейными взаимодействиями волна-волна и волна-средний поток в стратосфере. Кроме взаимодействия СПВ1 и СПВ2 между собой, они взаимодействуют с суточными (DT) или полусуточными (SDT) мигрирующими приливами ( $m_{td}=1$  и  $2$ ). В результате возникают суточный и полусуточный немигрирующие приливы с комбинационными волновыми числами  $m = m_{td} \pm m_{pw}$  [2]. Целью настоящего исследования является изучение нелинейных взаимодействий мигрирующих атмосферных приливов на основе предложенного метода. Такой подход в дальнейшем может быть использован для изучения генерации немигрирующих приливов.

Чтобы стало возможным рассмотреть нелинейные взаимодействия приливных компонент между собой, необходимо получить амплитуды и фазы отдельных приливных составляющих. Для этого в качестве исходных данных было решено использовать данные реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ERA5 [3]. Данные поставляются с разрешением по времени один час и доступны от поверхности до высоты примерно 47 км, что делает их достаточно удобными для изучения суточных колебаний глобального масштаба. Для исследования и расчетов было решено выбрать зиму 2012-2013 года, так как в начале января наблюдалось сильное (major) внезапное стратосферное потепление (ВСП), сопровождающееся увеличением амплитуд планетарных волн и изменчивости характеристик атмосферных приливов.

Временные ряды амплитуд и фаз стоячих и распространяющихся на восток/запад планетарных волн, включая атмосферные приливы были получены с использованием комплексно-

го вейвлет преобразования Морле. Так как вейвлет преобразование является полосовым фильтром с известной функцией-ответом (функция вейвлета), с его помощью можно восстанавливать исходные временные ряды, учитывая только определенные гармоники [4]. Восстановленный временной ряд  $x_n(t)$  рассчитывается по полуэмпирической формуле [5]:

$$x_n(t) = \frac{\delta j \delta t^{1/2}}{C_\delta \psi_0(0)} \sum_{j=0}^J \frac{\text{Re}\{W_n(s_j)\}}{s_j^{1/2}}, \quad (1)$$

где суммирование производится по выбранным масштабам (периодам),  $J$  – наибольший период,  $\delta t$  – обратный временной интервал,  $\delta j$  – интервал масштаба,  $\text{Re}\{W_n(s_j)\}$  – реальная часть непрерывного вейвлет спектра мощности временного ряда,  $s_j$  – соответствующий период. Эмпирические коэффициенты и их соответствующие значения для вейвлет преобразования Морле  $C_\delta = 0,776$ ;  $\delta_{j0} = 0,6$ ;  $\psi_0(0) = \pi^{-1/4}$  преобразуют спектр мощности в амплитудный спектр и учитывают масштабирование энергии.

С использованием выражения (1) были восстановлены поля температуры, зонального, меридионального ветра, вертикальной скорости и возмущения потенциального вихря Эртеля для отдельных приливных компонент [4]. Эти поля необходимы для расчета слагаемых, отвечающие за взаимодействие мигрирующих атмосферных приливов между собой и со средним потоком в уравнении баланса вихревой потенциальной энтропии. В общем виде уравнение баланса возмущенной потенциальной энтропии в log-изобарической системе координат:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \overline{P'^2/2} \right) = -\overline{P'(\vec{V}' \cdot \vec{\nabla} P')} - \overline{P'(\vec{V} \cdot \vec{\nabla} P')} - \overline{P'(\vec{V}' \cdot \vec{\nabla} P)} + \overline{P'R'}, \quad (2)$$

где  $P$  – потенциальный вихрь Эртеля, равный скалярному произведению абсолютной завихренности на градиент потенциальной температуры, разделенному на фоновую плотность;  $V$  – вектор скорости ветра;  $R$  – вклад неадиабатических притоков тепла и/или диссипативных слагаемых, которые не могут быть оценены из наблюдений. Черта сверху означает зональное осреднение, а штрихи – возмущения, т.е. отклонения от зонально осредненных значений.

Чтобы получить уравнения баланса возмущения потенциальной энтропии для суточного и полусуточного мигрирующего прилива, необходимо учитывать метод генерации планетарных волн. Когда сигнал, состоящий из двух косинусоидальных волн с зональными волновыми числами и частотами  $(m1, \omega1)$  и  $(m2, \omega2)$ , проходит через некоторую нелинейную квадратичную систему, то сигналом на выходе этой системы будет являться вторичные волны  $(2m1, 2\omega1)$ ,  $(2m2, 2\omega2)$ ,  $(m1-m2, \omega1-\omega2)$  или  $(m1+m2, \omega1+\omega2)$  [6]. Таким образом, суточный прилив будет генерироваться в результате нелинейных взаимодействий SDT – DT и восьми-часового прилива (8hT, mtd=3) с SDT, а полусуточный прилив – при самовзаимодействии DT

и  $8hT - DT$ . В результате уравнения баланса возмущения потенциальной энтропии для суточного и полусуточного мигрирующего прилива:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \overline{P_1'^2/2} \right) = -\overline{P_1'(\vec{V}_1' \cdot \vec{\nabla} P_2')} - \overline{P_1'(\vec{V}_2' \cdot \vec{\nabla} P_1')} - \overline{P_1'(\vec{V}_2' \cdot \vec{\nabla} P_3')} - \overline{P_1'(\vec{V}_3' \cdot \vec{\nabla} P_2')} - \overline{P_1'(\vec{V} \cdot \vec{\nabla} P_1')} - \overline{P_1'(\vec{V}_1' \cdot \vec{\nabla} P)} + \overline{P_1'R_1'}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \overline{P_2'^2/2} \right) = -\overline{P_2'(\vec{V}_1' \cdot \vec{\nabla} P_1')} - \overline{P_2'(\vec{V}_1' \cdot \vec{\nabla} P_3')} - \overline{P_2'(\vec{V}_3' \cdot \vec{\nabla} P_1')} - \overline{P_2'(\vec{V} \cdot \vec{\nabla} P_2')} - \overline{P_2'(\vec{V}_2' \cdot \vec{\nabla} P)} + \overline{P_2'R_2'}. \quad (4)$$

В уравнениях (3) и (4) подстрочные индексы означают зональное волновое число, а левая часть определяется, как мера изменчивости волновой активности во времени. Первые четыре слагаемых уравнения (3) и первые три слагаемых уравнения (4) в правой части описывают взаимодействие по типу волна – волна; далее взаимодействие волны со средним потоком и диссипация, которая не может быть оценена из наблюдений.

На Рис. 3 – 4 представлены результаты расчета слагаемых в уравнениях 3 – 4 на высоте 47 км и усреднены в полосе  $52,5 - 62,5^\circ$  с.ш. с весом косинус широты. На панелях (а) показано изменение волновой активности во времени; на (b) и (c) – взаимодействие между мигрирующими приливами; на (d) – взаимодействие прилива со средним потоком. Значения по оси ординат приведены в единицах  $10^{12}(\text{кг} \cdot \text{м}^{-3})^2 \cdot \text{PVU}^2/\text{сут}$ ,  $1\text{PVU}$  (Potential Vorticity Unit) =  $10^{-6} \text{К} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ .

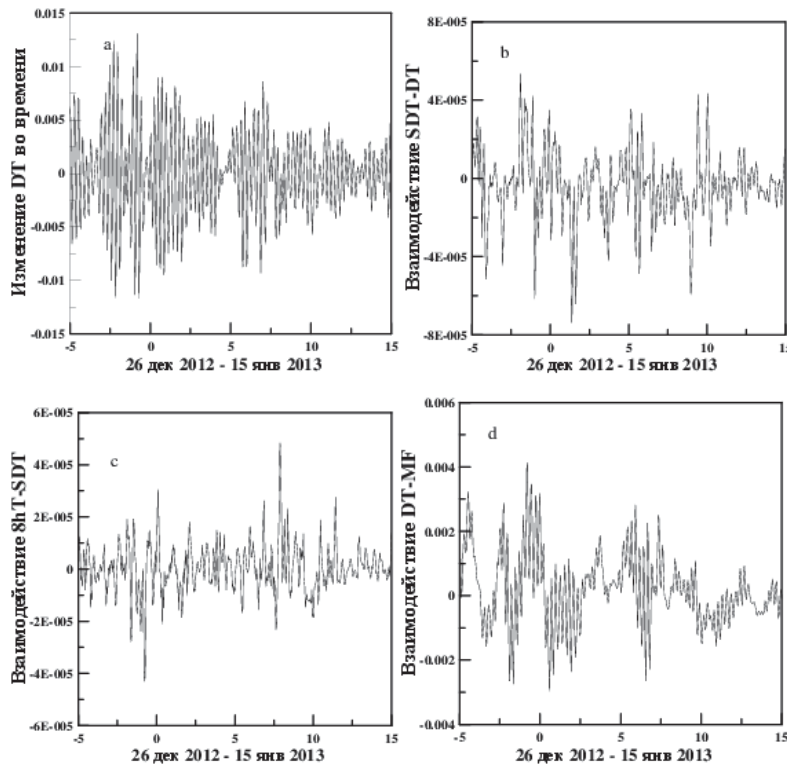


Рис. 3. Слагаемые, отвечающие за вклад в баланс возмущенной потенциальной энтропии для суточного мигрирующего прилива

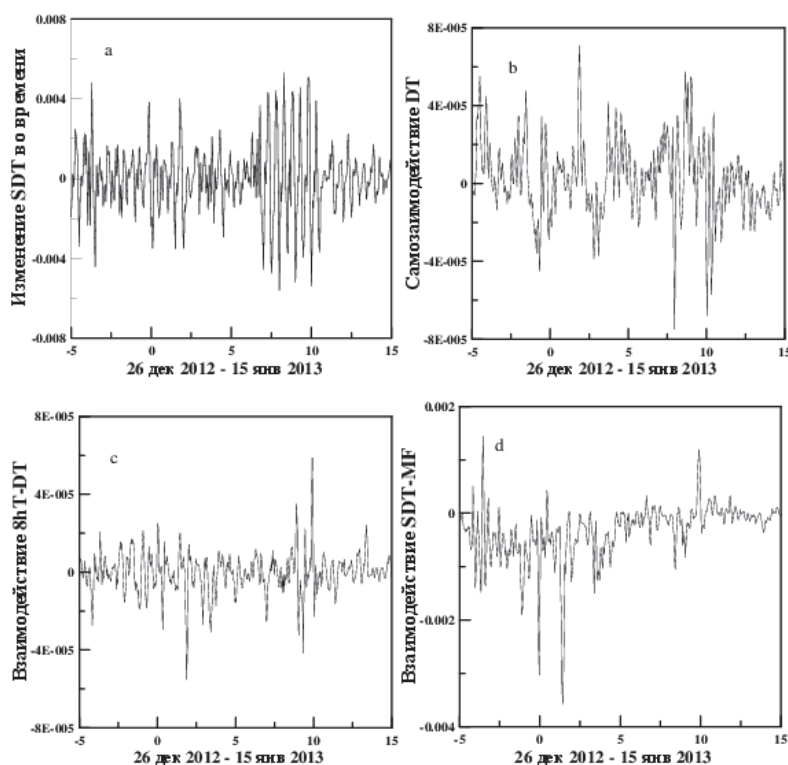


Рис. 4. Слагаемые, отвечающие за вклад в баланс возмущенной потенциальной энтропии для полусуточного мигрирующего прилива

Полученные результаты демонстрируют наибольший вклад в баланс возмущения потенциальной энтропии слагаемых, отвечающих за изменение волны во времени и взаимодействие мигрирующих приливов со средним потоком, особенно во время развития ВСП. Взаимодействие по типу волна-волна в случае немигрирующих приливов на высотах стратосферы незначительно. Стоит отметить, что с увеличением высоты амплитуды приливных колебаний существенно усиливаются и на высотах мезосферы и нижней термосферы они могут на порядок и более превосходить соответствующие амплитуды в стратосфере. Таким образом, вклад нелинейных взаимодействий по типу волна-волна могут быть сопоставимы и/или даже превосходить вклад от нелинейных взаимодействий волна-средний поток. В дальнейшем для расчетов необходимо использовать данные доступные до больших высот (например, полученные в результате численного моделирования).

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ  
в рамках проекта № 20-77-10006.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Диденко К.А., Ермакова Т.С., Коваль А.В., Погорельцев А.И. Диагностика нелинейный взаимодействий стационарных планетарных волн. Ученые записки РГГМУ, № 56, 2019. С. 19-29. doi:10.33933/2074-2762-2019-56-19-29.
2. Pogoreltsev A.I., Vlasov A.A., Froehlich K., Jacobi Ch. Planetary waves in coupling the lower and upper atmosphere. J. Atmos. Solar-Terr. Phys., vol. 69, 2007. С. 2083–2101.
3. The ERA5 global reanalysis / H. Hersbach [et al.]. Q. J. Roy. Meteorolo. Soc., vol. 146, 2020. P. 1999–2495.

4. Диденко К. А, Погорельцев А. И., Шевчук Н. О. Внутрисезонная изменчивость мигрирующих и немигрирующих приливов. Доклады Третьей международной научной конференции с элементами научной школы (Ставрополь), 2018. С. 50–54.
5. Torrence C., Compo P.G. A Practical Guide to Wavelet Analysis. Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 79, 1998. С. 65–67.
6. Spizzichino A. Etude des interactions entre les differentes composantes du vent dans la haute atmosphere. Ann. Geophys., 25, 1969. P. 773–783.