

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ВОЛНОВОЙ АКТИВНОСТИ ВО ВРЕМЯ ВНЕЗАПНЫХ СТРАТОСФЕРНЫХ ПОТЕПЛЕНИЙ

^{1,2}К.А. Диденко, ^{1,2}Т.С. Ермакова

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия
didenko.xeniya@yandex.ru

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

ANALYSIS OF WAVE ACTIVITY VARIATIONS DURING SUDDEN STRATOSPHERIC WARMINGS

^{1,2}K.A. Didenko, ^{1,2}T.S. Ermakova

¹Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia
didenko.xeniya@yandex.ru

²St. Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

Аннотация. Исследование сохранения волновой активности и объемного воздействия волн на средний поток в классическом подходе основывается на обобщенной теореме Элиассена—Пальма. Такой подход не включает в себя слагаемые, ответственные за нелинейные процессы обмена между волнами. В работе получено новое уравнение баланса возмущенной потенциальной энтропии с учетом слагаемых, отвечающих не только за взаимодействие волна — средний поток, но и за нелинейные взаимодействия волна—волна. Уравнение баланса позволяет изучать временную эволюцию потенциальной энтропии (квадрат потенциальной завихренности), которая является эвристической мерой волновой активности. Анализ изменения волновой активности был выполнен для внезапных стратосферных потеплений (ВСП) зимой 2008–2009 гг. и 2018–2019 гг. Показано, что эти ВСП сопровождаются существенными различиями рассматриваемых процессов.

Ключевые слова: энтропия, потенциальная завихренность, планетарные волны, волновая активность.

Abstract. The classical approach to the conservation of wave activity and waves forcing on the mean flow studies is based on the generalized Eliassen—Palm theorem. The terms responsible for the nonlinear exchange processes between waves are not included in this approach. A new balance equation of the perturbed potential enstrophy is considered. The terms, responsible both for wave-mean flow and wave—wave interactions, are involved in this equation. The balance equation us allows to study the temporal evolution of potential enstrophy (potential vorticity squared), which is a heuristic measure of wave activity. The analysis of wave activity variations during winter 2008–2009 and 2018–2019 sudden stratospheric warmings (SSW) was performed. It was shown that these SSWs are accompanied by significant differences in the processes under consideration.

Keywords: enstrophy, potential vorticity, planetary waves, wave activity.

ВВЕДЕНИЕ

Традиционный подход к оценке волновой активности и взаимодействия волн со средним потоком, называемый приближением Элиассена—Палма, был сформулирован в работе [Eliassen, Palm, 1961]. Несколько позднее в работе [Andrews, McIntyre, 1976] авторы обобщили закон сохранения волнового действия для неустановившихся волн при наличии диссипации и источников. В этом случае обобщенная теорема Элиассена—Палма имеет вид

$$\frac{\partial \hat{A}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{F}_{EP} = D, \quad (1)$$

где $\frac{\partial \hat{A}}{\partial t}$ — слагаемое, описывающее нестационарность волны; D — слагаемое, отвечающее за источники и/или стоки. Эти слагаемые представляют собой усредненные по долготе квадратичные функции от волновых характеристик. Величину \hat{A} было предложено назвать плотностью волновой активности, а \vec{F}_{EP} — потоком волновой активности Элиассена—Палма [Edmon et al., 1980]. Каждые слагаемые уравнения (1) представляют собой различные динамические и термодинамические процессы, способствующие ускорению или замедлению среднезонального потока, т. е. определяющие воздействие

волн на средний поток, а также на меридиональную циркуляцию. Такой подход в исследовании волновой активности был получен для нестационарных и неконсервативных волн и не включает в себя слагаемые, ответственные за нелинейные процессы обмена между волнами. В этой работе был применен подход, позволяющий проанализировать взаимодействие стационарных планетарных волн (СПВ) со средним потоком, т. е. влияние волн на зональную циркуляцию, а также взаимодействие волн между собой, основанный на уравнении баланса потенциальной энтропии (ПЭ) [Smith, 1983]. Для вывода уравнений баланса для СПВ1 и СПВ2 рассматривается уравнение возмущения потенциального вихря Эртеля P в log-изобарической системе координат с использованием метода генерации вторичных планетарных волн [Pogoreltsev, 2001], которое затем умножается на возмущение P :

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{\partial \bar{P}_1^2}{\partial t} = & -P_1' \left(\overline{\vec{V}_1 \cdot \vec{\nabla} P_2'} \right) - P_1' \left(\overline{\vec{V}_2 \cdot \vec{\nabla} P_1'} \right) - \\ & - P_1' \left(\overline{\vec{V}_2 \cdot \vec{\nabla} P_3'} \right) - P_1' \left(\overline{\vec{V}_3 \cdot \vec{\nabla} P_2'} \right) - \\ & - \frac{1}{\rho_0} \operatorname{div} \left(\rho_0 \bar{P}_1 P_1' \vec{V}_1 \right) - P_1' \left(\overline{\vec{V} \cdot \vec{\nabla} P_1'} \right) + \\ & + \bar{P} \left(\overline{\vec{V}_1 \cdot \vec{\nabla} P_1'} \right) + \bar{P}_1 S_1', \end{aligned} \quad (2)$$

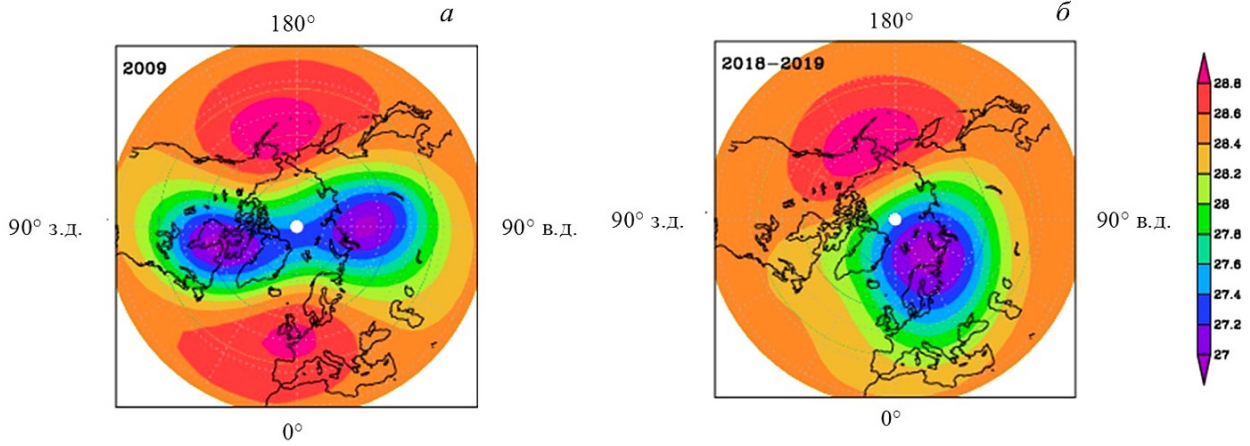


Рис. 1. Распределения геопотенциальной высоты [км] на уровне 10 гПа, усредненные за две недели развития ВСП зимой 2008–2009 гг. (а) и зимой 2018–2019 гг. (б)

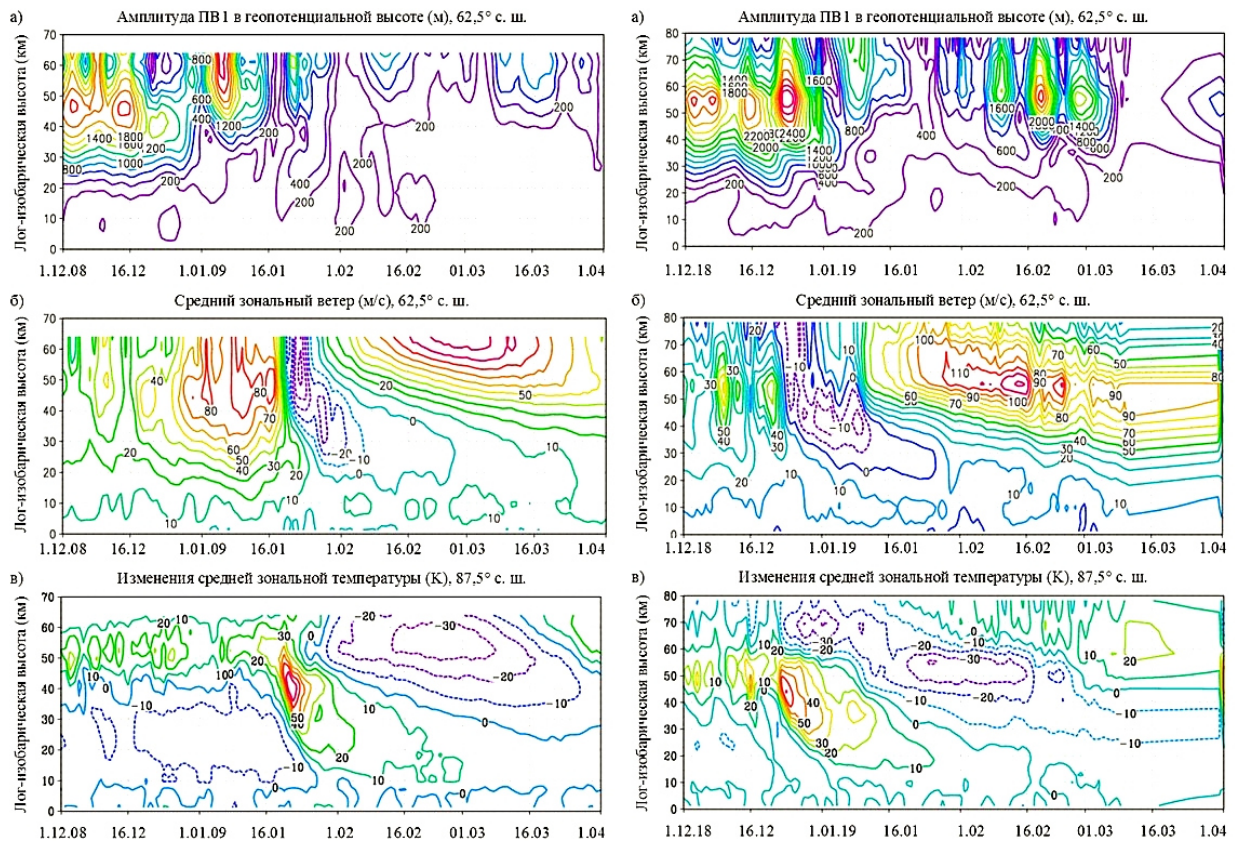


Рис. 2. Распределение амплитуд зональных гармоник в геопотенциальной высоте [м] с волновым числом $m=1$; распределение среднего зонального ветра; изменения средней зональной температуры зимой 2008–2009 г. (слева) и зимой 2018–2019 гг. (справа)

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{\partial \bar{P}_2^2}{\partial t} = & -\bar{P}_2' \left(\bar{V}_1' \cdot \bar{\nabla} P_1' \right) - \bar{P}_2' \left(\bar{V}_1' \cdot \bar{\nabla} P_3' \right) - \\ & - \bar{P}_2' \left(\bar{V}_3' \cdot \bar{\nabla} P_1' \right) - \frac{1}{\rho_0} \operatorname{div} \left(\rho_0 \bar{P} P_2' \bar{V}_2' \right) - \\ & - \bar{P}_2' \left(\bar{V} \cdot \bar{\nabla} P_2' \right) + \bar{P} \left(\bar{V}_1' \cdot \bar{\nabla} P_1' \right) + \bar{P}_2' S_2'. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь (2) — баланс возмущенной ПЭ для СПВ1, (3) — для СПВ2. В этих уравнениях S — вклад неадиабатических притоков тепла и/или диссипативных слагаемых, которые не могут быть оценены из наблюдений; \vec{V} — вектор скорости ветра. Черта сверху означает зональное усреднение, штрихи — возму-

щения, т. е. отклонения от зонально усредненных значений. В (2) и (3) левая часть определяется как мера изменчивости волновой активности во времени. Первые четыре слагаемых (2) и первые три слагаемых (3) в правой части описывают нелинейное взаимодействие по типу волна—волна (вторичные СПВ с зональным волновым числом 2 будут генерироваться в результате нелинейных взаимодействий СПВ1—СПВ3 и в случае самовзаимодействия СПВ1 — слагаемые в уравнении (3), а вторичные СПВ1 — при взаимодействии СПВ1—СПВ2 и СПВ2—СПВ3 — слагаемые в уравнении (2)); далее дивергенция потока, адвективное слагаемое, взаимодействие волны со средним потоком и диссипация.

НАБЛЮДЕНИЕ ВСП ЗИМОЙ 2008–2009 гг. И 2018–2019 гг.

Для того чтобы исследовать изменение волновой активности, т. е. левую часть уравнения возмущенной ПЭ, были использованы данные реанализа UK Met Office. Расчеты проводились для ситуаций, ко-

гда наблюдалось ВСП зимой 2008–2009 гг., сопровождавшееся расщеплением стратосферного полярного вихря (рис. 1, а), и зимой 2018–2019 гг., сопровождавшееся смещением стратосферного полярного вихря (рис. 1, б).

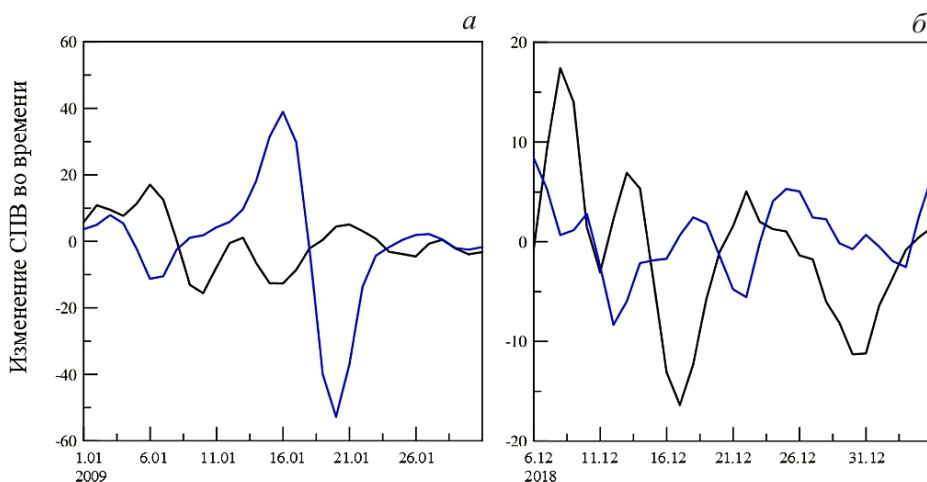


Рис. 3. Слагаемые, отвечающие за изменение волновой активности, 50 км, январь 2009 г. (а) и период 6 декабря 2018 г. – 5 января 2019 г. (б). СПВ1 — черная кривая, СПВ2 — синяя

На рис. 2 показаны амплитуда планетарной волны с зональной гармоникой $m=1$, распределения среднего зонального ветра и изменения средней зональной температуры зимой 2008–2009 гг. (слева) и зимой 2018–2019 гг. (справа). ВСП 20 января 2009 г. предшествует аномально сильное увеличение амплитуд СПВ. Зимой 2018–2019 гг. увеличение амплитуды СПВ1 наблюдается 24 декабря, одновременно наблюдаются обращения среднезонального потока в стратосфере и ВСП.

ЭВОЛЮЦИЯ ВОЛНОВОЙ АКТИВНОСТИ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ ВСП

По данным реанализа были рассчитаны слагаемые уравнений (2) и (3). На рис. 3 представлено изменение волновой активности во времени, значения приведены в единицах $10^{12}(\text{кг}\cdot\text{м}^{-3})^2\cdot\text{PVU}^2/\text{сут}$, $1\text{PVU}=10^{-6}\text{ К}\cdot\text{м}^2\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$. ВСП с расщеплением предшествует увеличению с последующим уменьшением перед потеплением волновой активности СПВ2. Волновая активность СПВ1 меняется слабо. ВСП со смещением сопровождается изменением волновой активности СПВ1, но порядок величин в два раза меньше, чем изменение волновой активности СПВ2 в 2008–2009 гг. После потепления с расщеплением изменение волновой активности не наблюдается, при потеплении со смещением наблюдается обратная ситуация.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведена диагностика изменения волновой активности и оценен вклад различных процессов в это изменение. Из полученных результатов можно заключить, что ВСП с расщеплением и со смещением стратосферного полярного вихря сопровождаются существенными различиями рассматриваемых про-

цессов. Изменения волновой активности обусловлены как взаимодействиями по типу волна—волна, так и взаимодействием волны со средним потоком. При ВСП с расщеплением наибольший вклад вносит взаимодействие СПВ2 со средним потоком за неделю до потепления. Но увеличению этого взаимодействия СПВ1 предшествует увеличение взаимодействия СПВ1 со средним потоком. Потепление со смещением сопровождается взаимодействием волны со средним потоком как до, так и после потепления.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 20-77-10006) и Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSZU-2020-0009).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Andrews D.G., McIntyre M.E. Planetary waves in horizontal and vertical shear: the generalized Eliassen–Palm relation and zonal acceleration. *J. Atmos. Sci.* 1976. Vol. 33. P. 2031–2053.
- Edmon H.J., Hoskins B.J., McIntyre M.E. Eliassen—Palm cross section for the troposphere. *J. Atmosph. Sci.* 1980. Vol. 37. P. 2600–2616.
- Eliassen A., Palm E. On the transfer of energy in stationary mountain waves. *Geophys. Publ.* 1961. Vol. 22. P. 1–23.
- Pogoreltsev A.I. Numerical simulation of secondary planetary waves arising from the nonlinear interaction of the normal atmospheric modes. *Phys. Chem. Earth (Part C)*. 2001. Vol. 26, no. 6. P. 395–403.
- Smith A.K. Observation of wave–wave interactions in the stratosphere. *J. Atmos. Sci.* 1983. Vol. 40. P. 2484–2493.