



Санкт-Петербургский
государственный
университет

АНАЛИЗ ВАРИАЦИЙ ВОЛНОВОЙ АКТИВНОСТИ И ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ ВО ВРЕМЯ СЛОЖНЫХ ВСП

Диденко К.А.*, Бикбулатов Б.А., Ермакова Т.С., Коваль А.В.
*didenko.xeniya@yandex.ru

V Всероссийская конференция с международным участием «Турбулентность, динамика атмосферы и климата», посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова г. Москва, 19–21 ноября 2024 г.

Обзор:

- Стационарные планетарные волны (СПВ) распространяются от своих источников в тропосфере, переносят энергию и импульс, оказывают существенное влияние на глобальную атмосферную циркуляцию.
- Увеличение амплитуд СПВ в зимний период может приводить к формированию внезапных стратосферных потеплений (ВСП).
- Основные типы ВСП: большое или малое, сопровождающееся расщеплением или смещением стратосферного полярного вихря.
- В последние годы все чаще поднимается вопрос необходимости совершенствования определения и классификации ВСП.

Цели и задачи:

- Проанализировать предпосылки и развитие ВСП со сложной структурой.
- Исследовать изменчивости различных волновых процессов во время развития ВСП зимой 2003-2004 и 2005-2006 гг.
- Рассчитать слагаемые в уравнениях баланса возмущенной потенциальной энтропии, описывающие изменение волновой активности отдельных СПВ, межволновые взаимодействия и обмен СПВ со средним потоком.

ВСП зимой 2003-2004 и 2005-2006 гг.

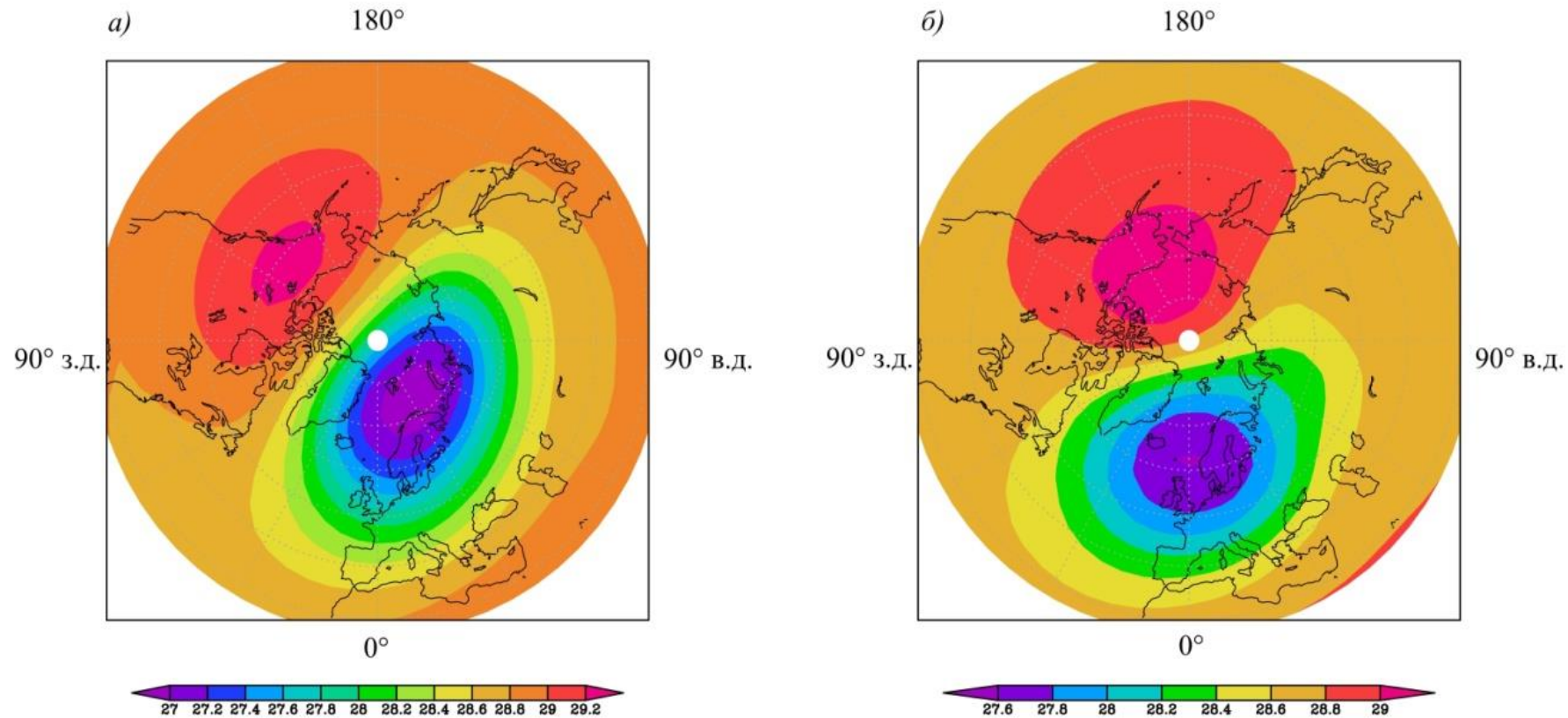


Рис. 1. Распределения геопотенциальной высоты в км, на уровне 10 гПа, усредненные за две недели развития ВСП: *а)* внезапное стратосферное потепление зимой 2003-2004 гг., *б)* внезапное стратосферное потепление зимой 2005-2006 гг.

Распределения зонального ветра и температуры зимой 2003-2004 и 2005-2006 гг.

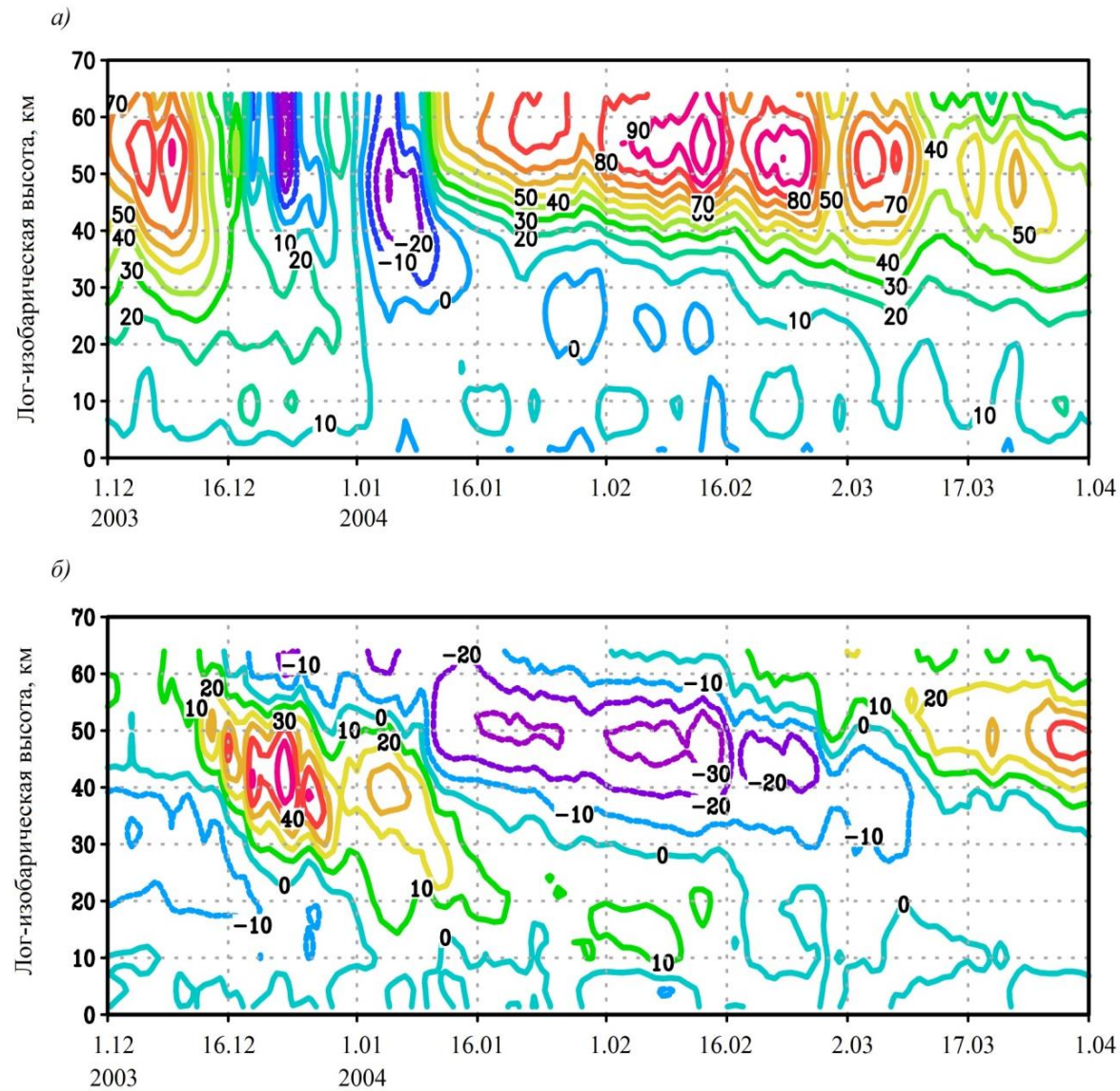


Рис. 2. Высотно-временные распределения среднего зонального ветра (м/с) на 62,5° с. ш. – а) и отклонений средней зональной температуры (K) от усредненной за январь-апрель 2004 г. в поясе северных широт 85-90° – б) **зимой 2003-2004 гг.**

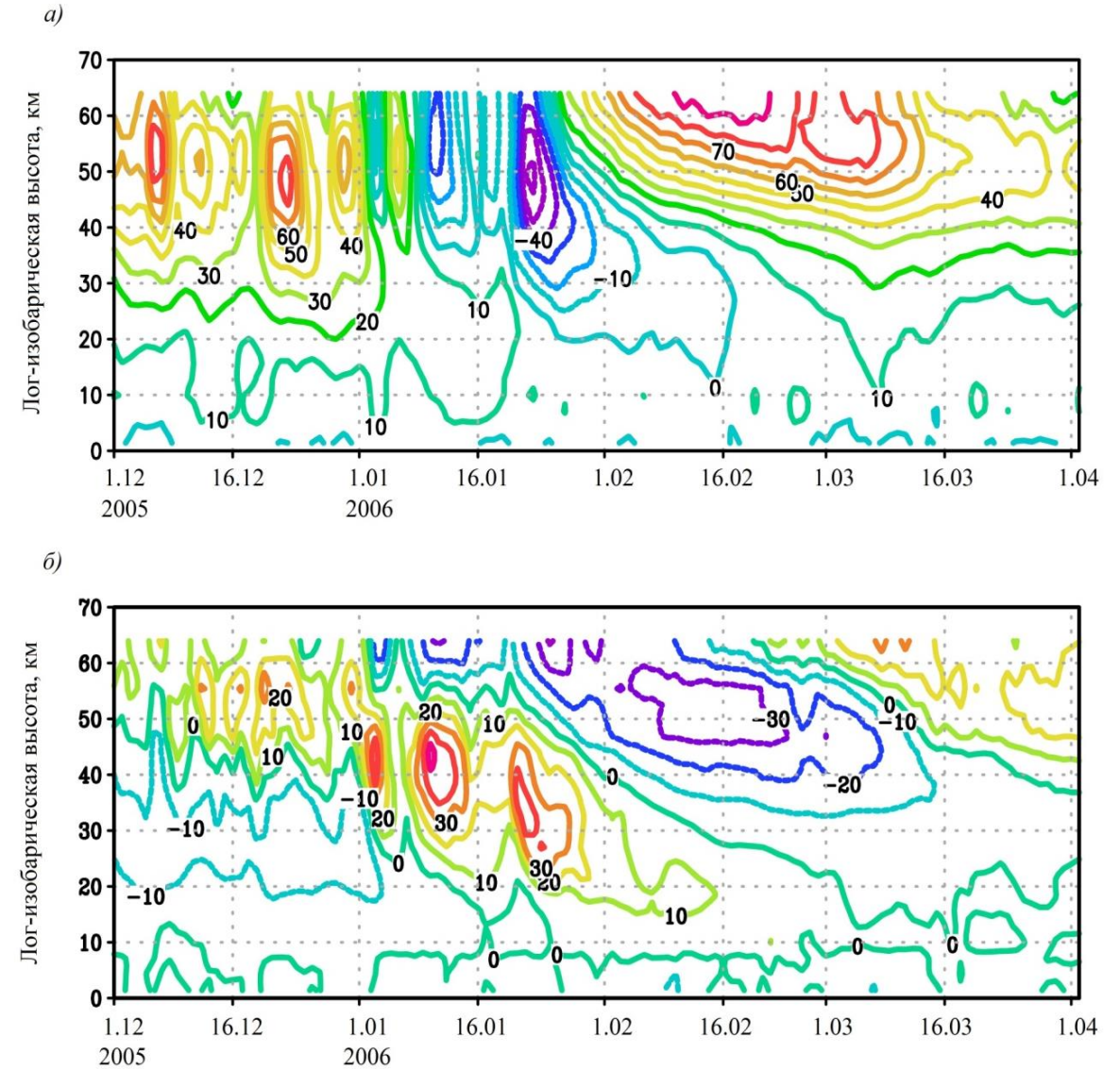


Рис. 3. Высотно-временные распределения среднего зонального ветра (м/с) на 62,5° с. ш. – а) и отклонений средней зональной температуры (K) от усредненной за январь-апрель 2006 г. в поясе северных широт 85-90° – б) **зимой 2005-2006 гг.**

Распределения амплитуд СПВ зимой 2003-2004 и 2005-2006 гг.

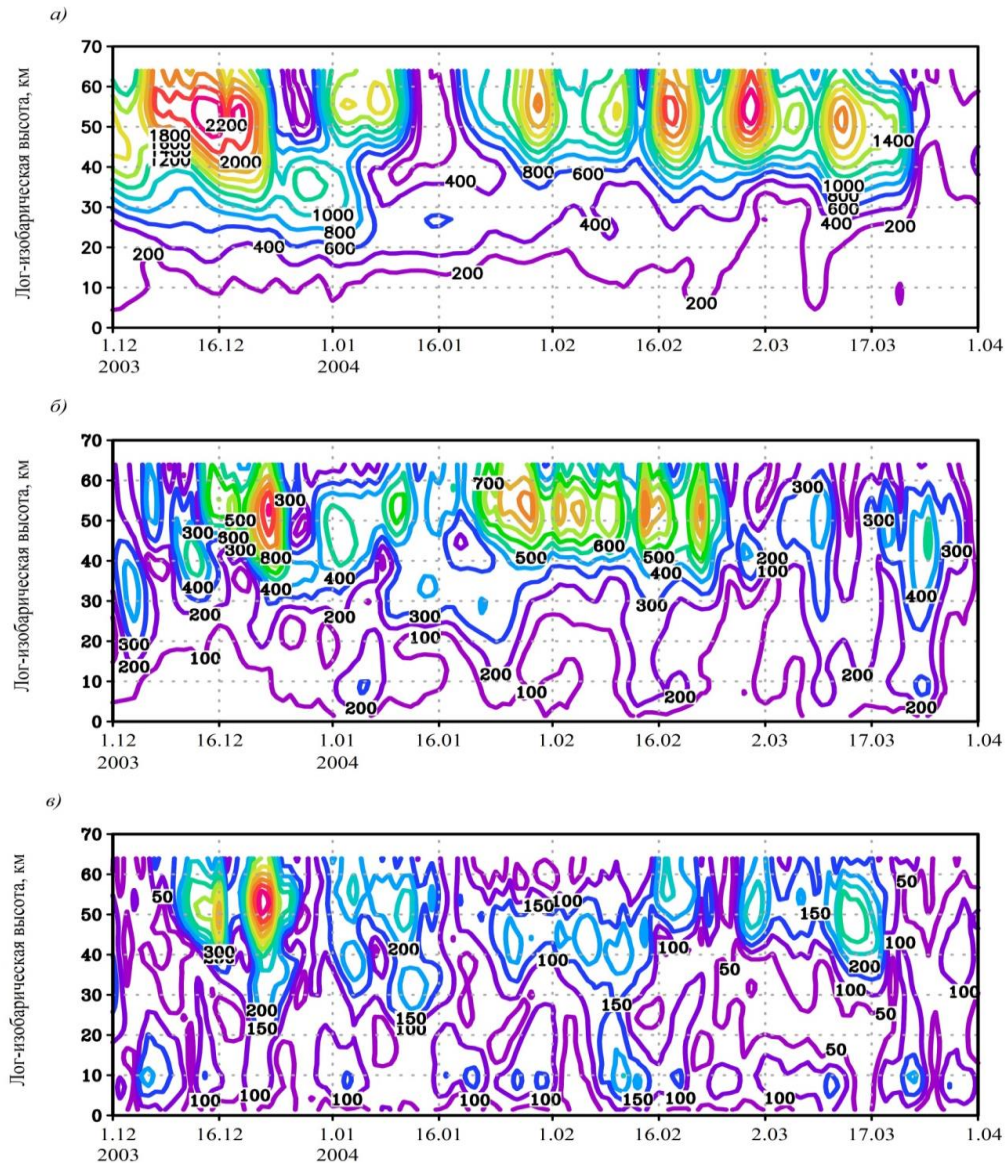


Рис. 4. Высотно-временное распределение амплитуд СПВ в поле геопотенциальной высоты (м) на $62,5^\circ$ с. ш. **зимой 2003-2004 гг.:** а) – зональное волновое число $m = 1$, б) – зональное волновое число $m = 2$, в) – зональное волновое число $m = 3$.

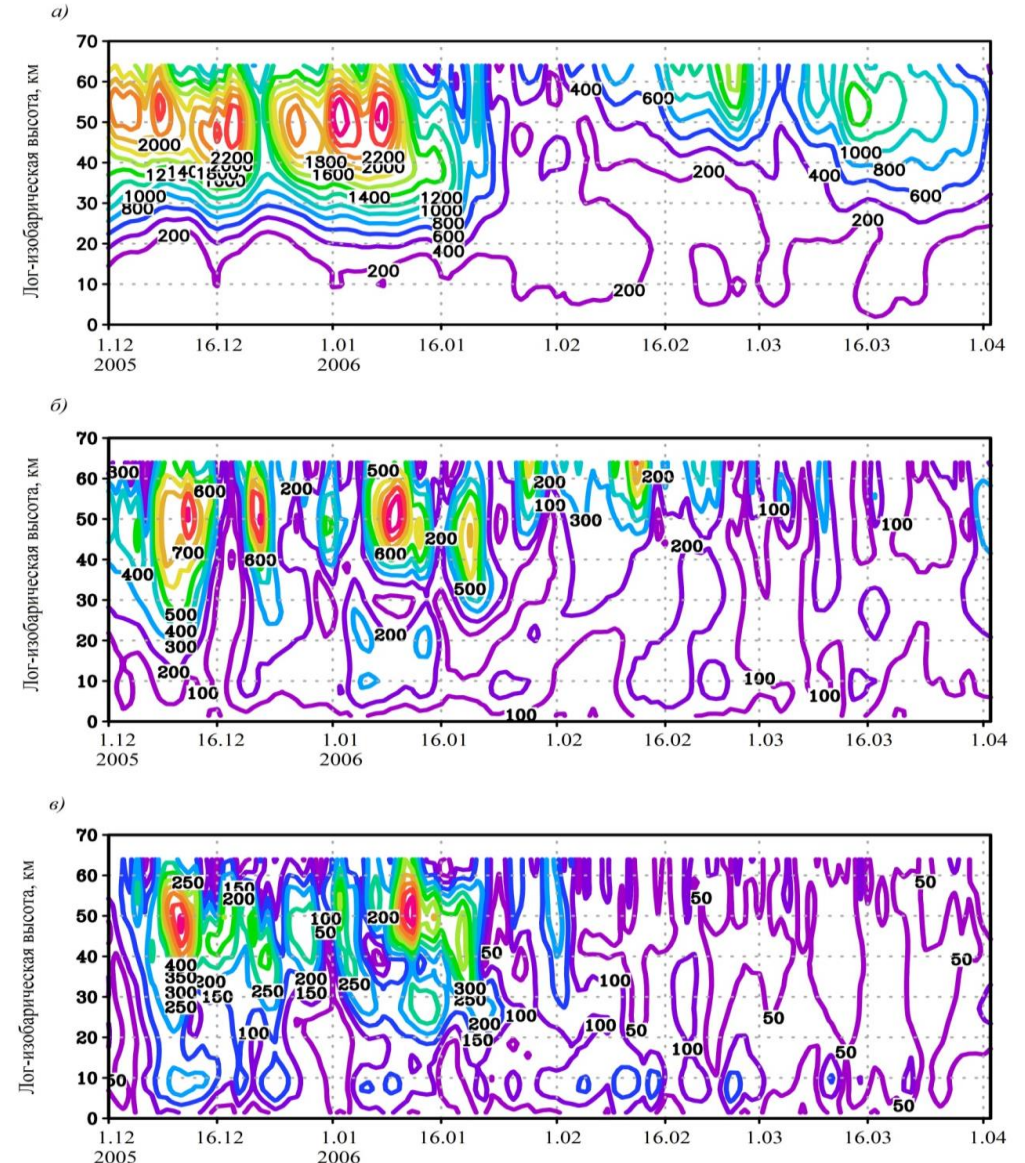


Рис. 5. Высотно-временное распределение амплитуд СПВ в поле геопотенциальной высоты (м) на $62,5^\circ$ с. ш. **зимой 2005-2006 гг.:** а) – зональное волновое число $m = 1$, б) – зональное волновое число $m = 2$, в) – зональное волновое число $m = 3$.

Метод исследования: баланс возмущенной потенциальной энтропии и генерация вторичных СПВ

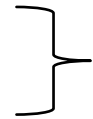
$$\frac{1}{2} \frac{\partial \overline{P_1'^2}}{\partial t} = \overline{-P_1' (\vec{V}_1' \cdot \vec{\nabla} P_2')} - \overline{P_1' (\vec{V}_2' \cdot \vec{\nabla} P_1')} - \overline{P_1' (\vec{V}_2' \cdot \vec{\nabla} P_3')} - \overline{P_1' (\vec{V}_3' \cdot \vec{\nabla} P_2')} -$$

$$- \frac{1}{\rho_0} \operatorname{div} (\rho_0 \bar{P} \overline{P_1' \vec{V}_1'}) - \overline{P_1' (\vec{V} \cdot \vec{\nabla} P_1')} + \overline{\bar{P} (\vec{V}_1' \cdot \vec{\nabla} P_1')} + \overline{P_1' S_1'}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \overline{P_2'^2}}{\partial t} = \overline{-P_2' (\vec{V}_1' \cdot \vec{\nabla} P_1')} - \overline{P_2' (\vec{V}_1' \cdot \vec{\nabla} P_3')} - \overline{P_2' (\vec{V}_3' \cdot \vec{\nabla} P_1')} -$$

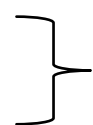
$$- \frac{1}{\rho_0} \operatorname{div} (\rho_0 \bar{P} \overline{P_2' \vec{V}_2'}) - \overline{P_2' (\vec{V} \cdot \vec{\nabla} P_2')} + \overline{\bar{P} (\vec{V}_2' \cdot \vec{\nabla} P_2')} + \overline{P_2' S_2'}. \quad (2)$$

СПВ1 – СПВ2
СПВ2 – СПВ3



вторичная СПВ1

самовзаимодействие СПВ1
СПВ1 – СПВ3



вторичная СПВ2

Взаимодействия между СПВ

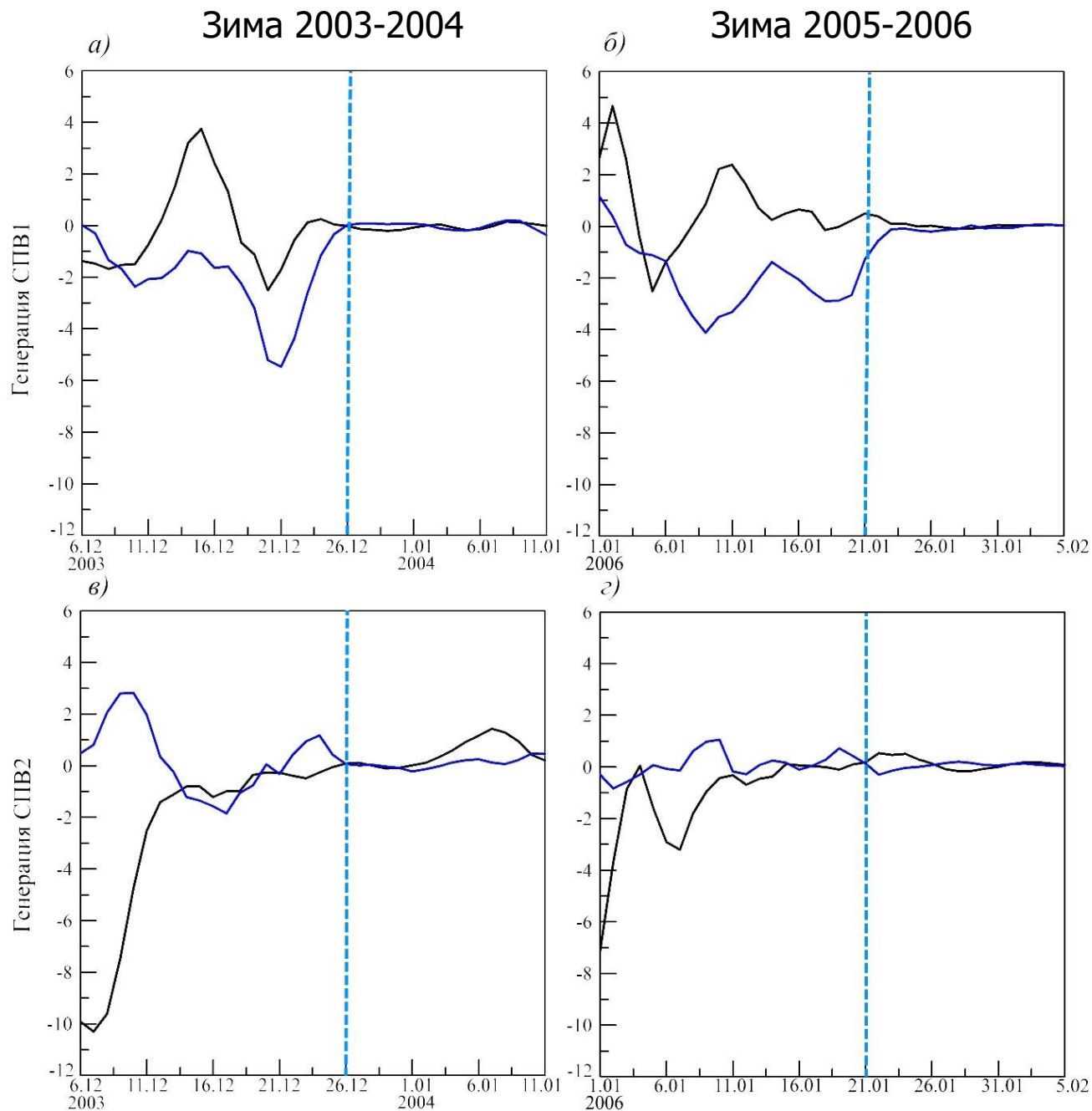


Рис. 6. Слагаемые, отвечающие за межволновые взаимодействия, в балансе возмущенной потенциальной энтропии. Генерация СПВ1 – а) и б): взаимодействие СПВ1-СПВ2 – **черная** линия, СПВ2-СПВ3 – **синяя**. Генерация СПВ2 – в) и г): самовзаимодействие СПВ1 – **черная** линия, СПВ1-СПВ3 – **синяя**. Значения приведены в единицах $10^{12}(\text{кг}\cdot\text{м}^{-3})^2\cdot\text{PVU}^2/\text{сутки}$, где $1\text{PVU}=10^{-6}\text{K}\cdot\text{м}^2\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$.

Взаимодействия СПВ со средним потоком

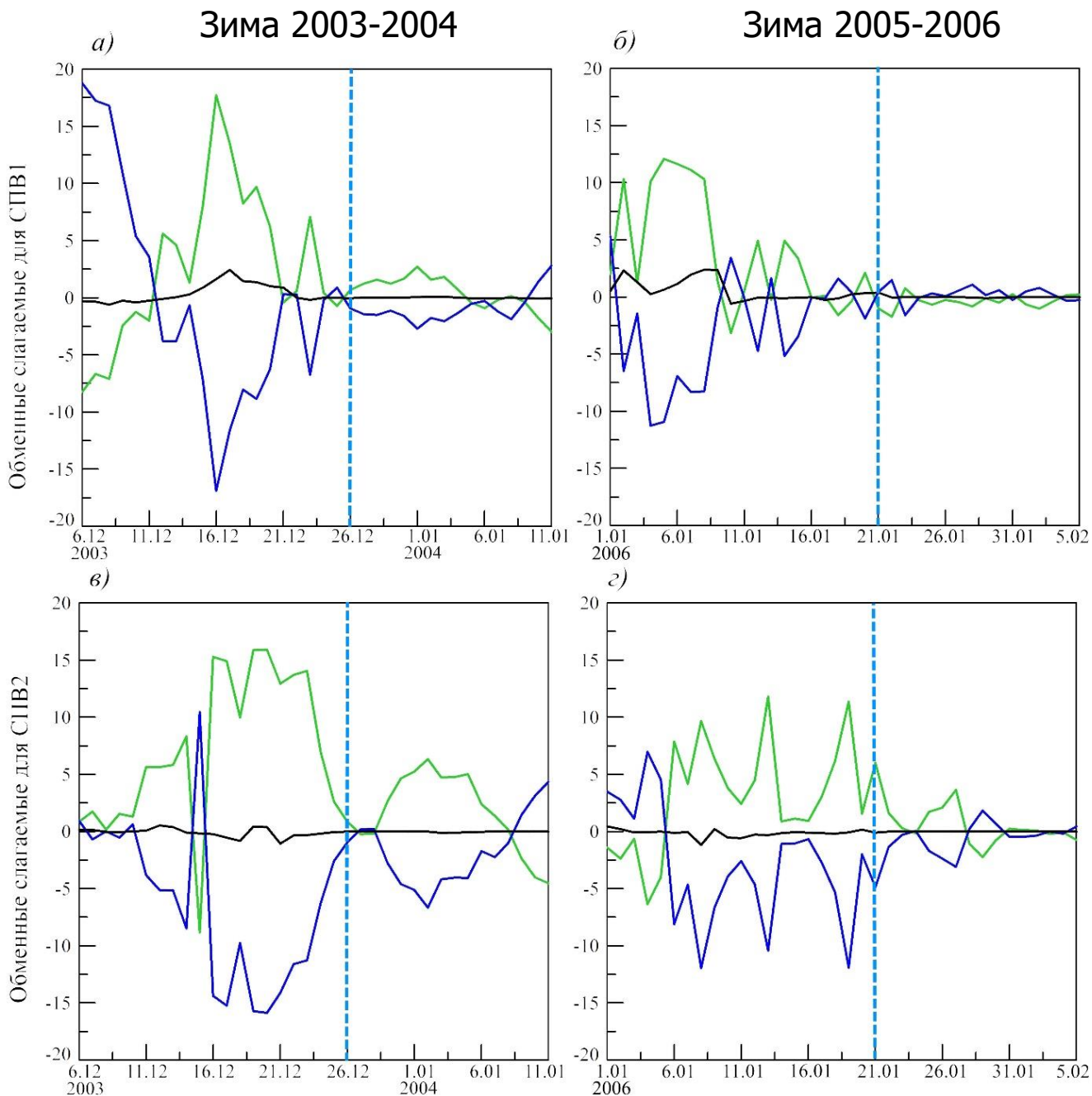


Рис. 7. Обменные слагаемые в балансе возмущенной потенциальной энтропии для СПВ1 – *а)* и *б)*, для СПВ2 – *в)* и *г)*: адвективные слагаемые – **черная** линия, дивергенция – **синяя** линия и взаимодействие волны со средним потоком – **зеленая**. Значения приведены в единицах $10^{12}(\text{кг}\cdot\text{м}^{-3})^2\cdot\text{PVU}^2/\text{сутки}$, где $1\text{PVU}= 10^{-6} \text{ К}\cdot\text{м}^2\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$.

Баланс возмущенной потенциальной энтропии

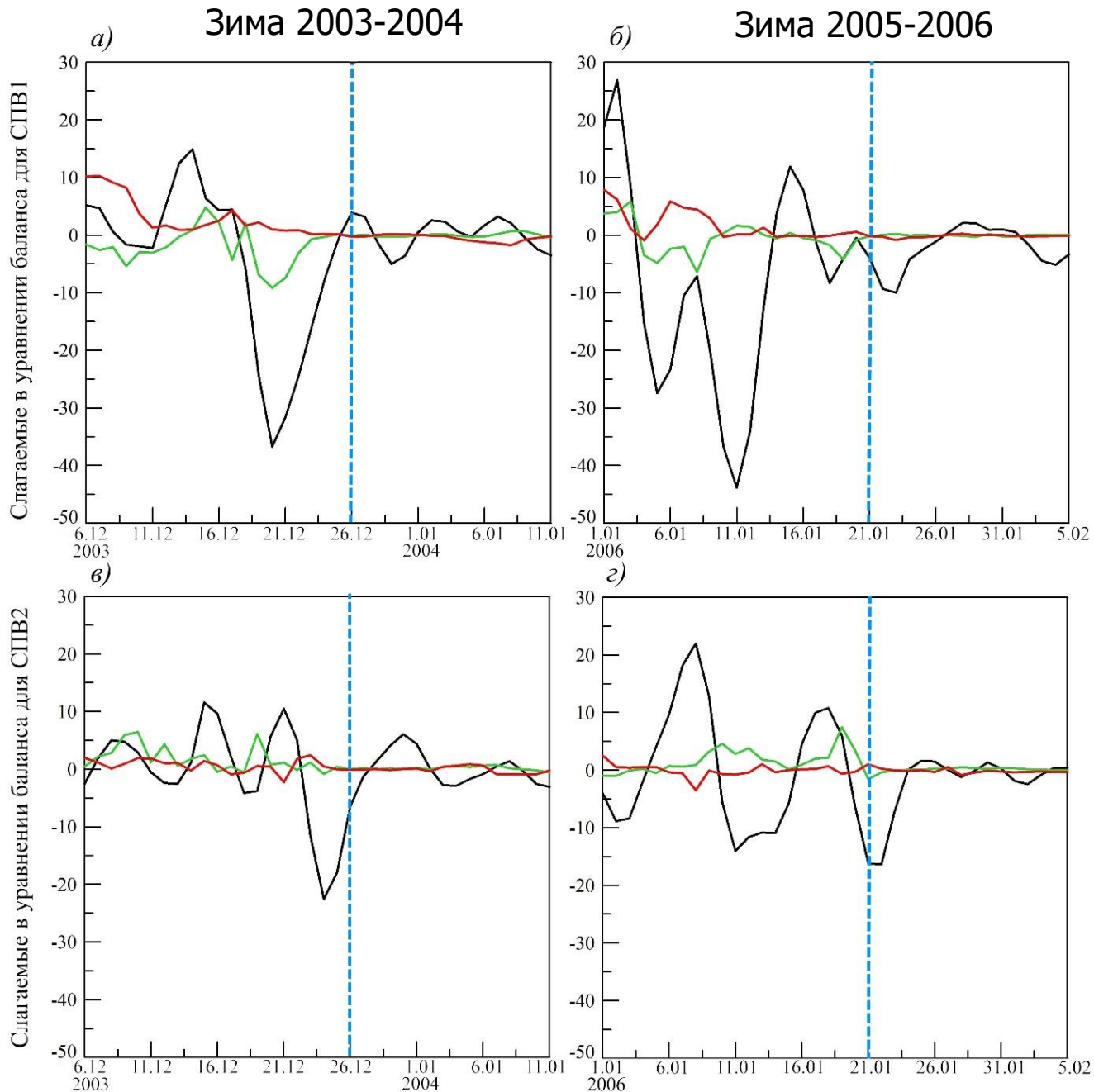
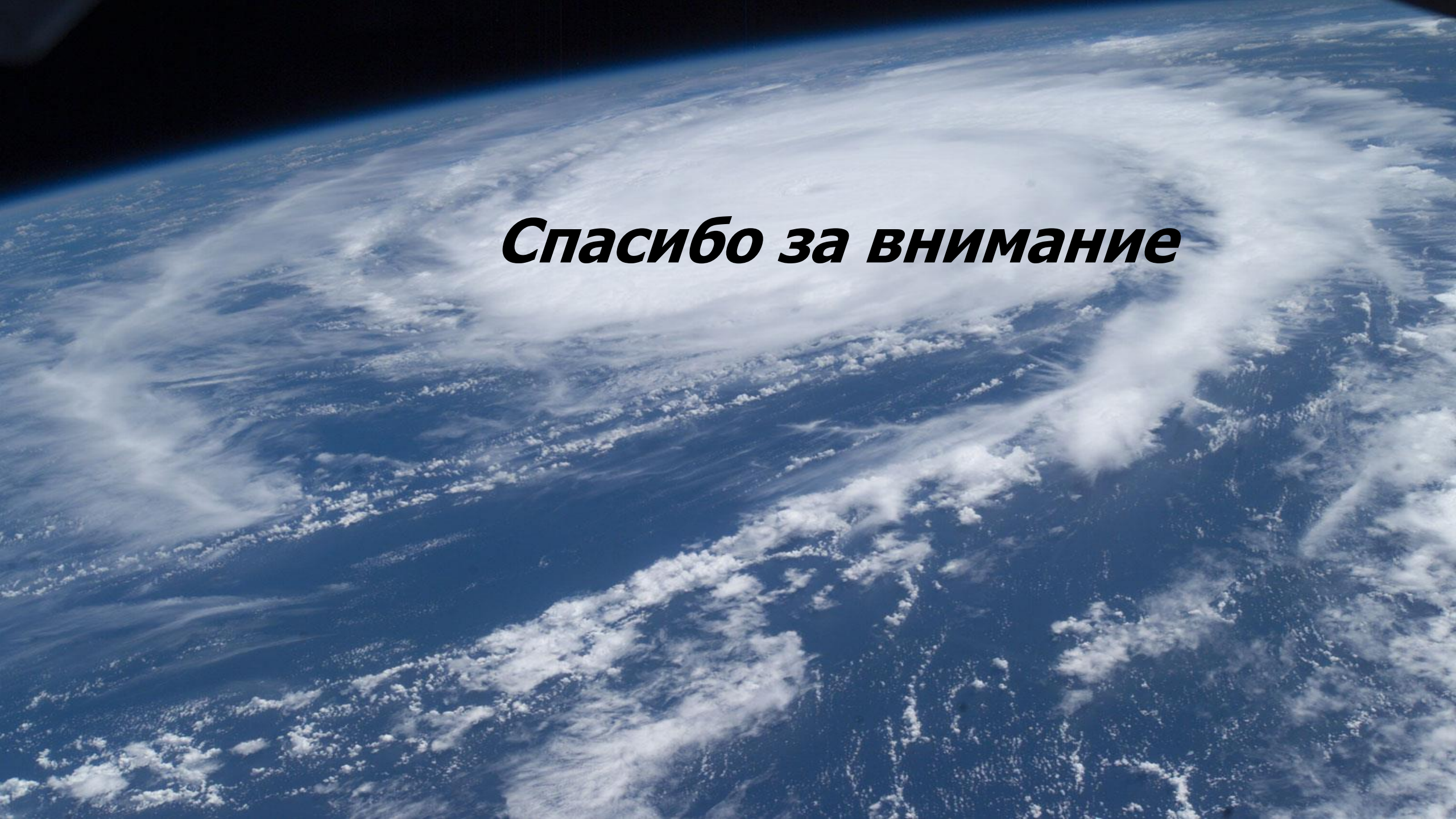


Рис. 8. Слагаемые в балансе возмущенной потенциальной энтропии для СПВ1 – а) и б), для СПВ2 – в) и г): изменение волновой активности во времени – **черная** линия, сумма обменных слагаемых – **красная** линия и сумма слагаемых, отвечающих за генерацию волны – **зеленая**. Значения приведены в единицах $10^{12}(\text{кг}\cdot\text{м}^{-3})^2\cdot\text{PVU}^2/\text{сутки}$, где $1\text{PVU}=10^{-6}\text{К}\cdot\text{м}^2\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$.

Результаты и выводы:

- Представлен анализ сложных ВСП, которые наблюдались зимой 2003-2004 и 2005-2006 гг.
- Результаты расчета слагаемых в уравнениях баланса возмущенной ПЭ для СПВ1 и СПВ2 показали сходства в развитии нелинейных взаимодействий между планетарными волнами и различия во взаимодействии планетарных волн со средним потоком при развитии исследуемых ВСП.
- Вклад слагаемых ответственных за межволновые взаимодействия в вариации волновой активности сопоставим с вкладом обменных со средним потоком слагаемых. Развитие этих ВСП сопровождалось в основном вариациями волновой активности СПВ1.



Спасибо за внимание

The conservation equations of Ertel's potential vorticity (EPV) for SPW1 and SPW2:

$$\frac{\partial P'_1}{\partial t} = -\overrightarrow{V'_1} \cdot \vec{\nabla} P'_2 - \overrightarrow{V'_2} \cdot \vec{\nabla} P'_1 - \overrightarrow{V'_2} \cdot \vec{\nabla} P'_3 - \overrightarrow{V'_3} \cdot \vec{\nabla} P'_2 - \overrightarrow{V'_1} \cdot \vec{\nabla} \bar{P} - \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} P'_1 + S'_1, \quad (3)$$

$$\frac{\partial P'_2}{\partial t} = -\overrightarrow{V'_1} \cdot \vec{\nabla} P'_1 - \overrightarrow{V'_1} \cdot \vec{\nabla} P'_3 - \overrightarrow{V'_3} \cdot \vec{\nabla} P'_1 - \overrightarrow{V'_2} \cdot \vec{\nabla} \bar{P} - \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} P'_2 + S'_2. \quad (4)$$

The eddy potential enstrophy balance equations:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \overline{P'^2_1}}{\partial t} = \underbrace{-\overline{P'_1 (\overrightarrow{V'_1} \cdot \vec{\nabla} P'_2)} - \overline{P'_1 (\overrightarrow{V'_2} \cdot \vec{\nabla} P'_1)} - \overline{P'_1 (\overrightarrow{V'_2} \cdot \vec{\nabla} P'_3)} - \overline{P'_1 (\overrightarrow{V'_3} \cdot \vec{\nabla} P'_2)}}_{\text{red box}} - \underbrace{\overline{P'_1 (\overrightarrow{V'_1} \cdot \vec{\nabla} \bar{P})} - \overline{P'_1 (\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} P'_1)}}_{\text{green box}} + \overline{P'_1 S'_1}, \quad (5)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \overline{P'^2_2}}{\partial t} = \underbrace{-\overline{P'_2 (\overrightarrow{V'_1} \cdot \vec{\nabla} P'_1)} - \overline{P'_2 (\overrightarrow{V'_1} \cdot \vec{\nabla} P'_3)} - \overline{P'_2 (\overrightarrow{V'_3} \cdot \vec{\nabla} P'_1)}}_{\text{red box}} - \underbrace{\overline{P'_2 (\overrightarrow{V'_2} \cdot \vec{\nabla} \bar{P})} - \overline{P'_2 (\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} P'_2)}}_{\text{green box}} + \overline{P'_2 S'_2}. \quad (6)$$

Transformed balance equation of eddy potential enstrophy:

$$\pm \bar{P} \overline{(\vec{V}'_1 \cdot \vec{\nabla} P'_1)}, \quad (7)$$

$$\pm \bar{P} \overline{(\vec{V}'_2 \cdot \vec{\nabla} P'_2)}, \quad (8)$$

$$P' \bar{P} \operatorname{div}(\rho_0 \vec{V}') / \rho_0 = 0, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \boxed{\frac{1}{2} \frac{\partial \bar{P}'^2_1}{\partial t}} = & \boxed{-P'_1 \overline{(\vec{V}'_1 \cdot \vec{\nabla} P'_2)} - P'_1 \overline{(\vec{V}'_2 \cdot \vec{\nabla} P'_1)} - P'_1 \overline{(\vec{V}'_2 \cdot \vec{\nabla} P'_3)} - P'_1 \overline{(\vec{V}'_3 \cdot \vec{\nabla} P'_2)}} - \\ & - \frac{1}{\rho_0} \operatorname{div}(\rho_0 \bar{P} P'_1 \vec{V}'_1) - P'_1 \overline{(\vec{V} \cdot \vec{\nabla} P'_1)} + \boxed{\bar{P} \overline{(\vec{V}'_1 \cdot \vec{\nabla} P'_1)}} + \bar{P}'_1 S'_1, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \boxed{\frac{1}{2} \frac{\partial \bar{P}'^2_2}{\partial t}} = & \boxed{-P'_2 \overline{(\vec{V}'_1 \cdot \vec{\nabla} P'_1)} - P'_2 \overline{(\vec{V}'_1 \cdot \vec{\nabla} P'_3)} - P'_2 \overline{(\vec{V}'_3 \cdot \vec{\nabla} P'_1)}} - \\ & - \frac{1}{\rho_0} \operatorname{div}(\rho_0 \bar{P} P'_2 \vec{V}'_2) - P'_2 \overline{(\vec{V} \cdot \vec{\nabla} P'_2)} + \boxed{\bar{P} \overline{(\vec{V}'_2 \cdot \vec{\nabla} P'_2)}} + \bar{P}'_2 S'_2. \end{aligned} \quad (11)$$