

Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 251—268.
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(75):251—268.

МЕТЕОРОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 551.513.11(203.5)
doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-251-268

Исследование волновых процессов во время сложных внезапных стратосферных потеплений

**Ксения Андреевна Диденко^{1, 2}, Богдан Аминович Бикбулатов¹,
Татьяна Сергеевна Ермакова^{2, 3}, Андрей Владиславович Коваль^{2, 3}**

¹ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, didenko@izmiran.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург.

³ Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

Аннотация. Изучена эволюция нелинейных процессов в средней атмосфере, связанных с распространением стационарных планетарных волн (СПВ) во время развития сложных внезапных стратосферных потеплений (ВСП). Анализ волновых процессов основан на методе исследования возмущенной потенциальной энтропии (ПЭ), который был выполнен для зим 2003—2004 гг. и 2005—2006 гг., когда наблюдались ВСП со сложной термодинамической структурой. Показаны сходства в развитии нелинейных взаимодействий между планетарными волнами и различия во взаимодействии планетарных волн со средним потоком при формировании ВСП. Полученные оценки могут быть использованы в качестве предикторов формирования внезапных стратосферных потеплений.

Ключевые слова: стратосферный полярный вихрь, планетарные волны, нелинейные волновые взаимодействия, внезапное стратосферное потепление, энтропия, волновая активность.

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда РФФ: расчеты потоков волновой активности и нелинейных процессов, анализ слагаемых возмущенной потенциальной энтропии — в рамках гранта №23-77-01035, <https://rscf.ru/project/23-77-01035/>; обработка гидрометеорологических полей из базы данных реанализа и расчет волновых характеристик — в рамках гранта №20-77-10006-П, <https://rscf.ru/project/20-77-10006/>.

Для цитирования: Диденко К. А., Бикбулатов Б. А., Ермакова Т. С., Коваль А. В. Исследование волновых процессов во время сложных внезапных стратосферных потеплений // Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 251—268. doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-251-268.

Investigation of wave processes during complex sudden stratospheric warmings

***Kseniia A. Didenko*^{1, 2}, *Bogdan A. Bikbulatov*¹,
Tatiana S. Ermakova^{2, 3}, *Andrey V. Koval*^{2, 3}**

¹ Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation (IZMIRAN), Russian Academy of Sciences, Moscow, didenko@izmiran.ru

² Saint Petersburg State University, Saint Petersburg.

³ Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg.

Summary. The evolution of various nonlinear processes in the middle atmosphere associated with the spreading of stationary planetary waves during the development of complex sudden stratospheric warming is studied. Stationary planetary waves with constant phase surface fixed relative to the Earth propagate with group velocities, providing energy and momentum transfer from the troposphere. The wave's impact is characterized by strong nonlinearity and causes anomalies of stratospheric circulation. Waves affect the structure of the stratospheric polar vortex while interacting with the mean flux. The most pronounced effects of nonlinear interaction of waves with the mean flux, as well as waves interconnections are manifested during sudden stratospheric warming — strong thermodynamic phenomena in the winter polar stratosphere. Sudden stratospheric warming affects the whole middle atmosphere and also causes significant changes in the troposphere, mesosphere, and lower thermosphere. One of the ways to study the internal dynamic reasons of the sudden stratospheric warming development associated with the wave processes is to investigate the variability of the perturbed potential enstrophy — the potential vorticity squared. Using the MERRA-2 reanalysis data, the temporal variability of wave activity, perturbed potential enstrophy fluxes divergence and advection, the interactions of atmospheric waves with each other and with the mean flux were analyzed. Such an analysis was carried out for the winters of 2003—2004 and 2005—2006, when complex sudden stratospheric warmings were observed. This is due to the complex spatial and temporal distributions of zonal wind, temperature, and the amplitudes of planetary waves with different zonal wave numbers during their development. Similarities in the development of nonlinear interactions between planetary waves and differences in the interaction of planetary waves with the mean flux during the formation of the sudden stratospheric warmings under consideration are shown. The obtained estimates of wave processes can be used as predictors of the formation of sudden stratospheric warming.

Keywords: stratospheric polar vortex, planetary waves, nonlinear wave's interactions, sudden stratospheric warming, enstrophy, wave activity.

Acknowledgments: the research was supported by Russian Science Foundation: wave activity fluxes and nonlinear processes calculations, analysis of the terms of eddy potential enstrophy — within the framework of grant #23-77-01035, <https://rscf.ru/en/project/23-77-01035/>; processing of hydrometeorological fields from the reanalysis database and wave characteristics calculations — within the framework grant #20-77-10006-P, <https://rscf.ru/project/20-77-10006/>.

For citation: Didenko K. A., Bikbulatov B. A., Ermakova T. S., Koval A. V. Investigation of wave processes during complex sudden stratospheric warmings. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(75):251—268. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-251-268.

Введение

Планетарные волны (ПВ), генерируемые в тропосфере из-за орографических неоднородностей, баротропной/бароклинной неустойчивости, распространяются

в верхние слои атмосферы и за счет обмена импульсом и энергией с атмосферными струйными течениями оказывают существенное влияние на глобальную атмосферную циркуляцию [1]. Например, взаимодействуя со средним потоком, волны влияют на структуру стратосферного полярного вихря [2, 3]. Наиболее выраженные эффекты взаимодействия ПВ со средним потоком и между собой проявляются во время внезапного стратосферного потепления (ВСП). ВСП способны вызывать значительные изменения динамического и теплового режимов в тропосфере, мезосфере и нижней термосфере [4, 5].

Формирование ВСП связывают с усилением стационарных планетарных волн с зональными волновыми числами 1 и 2 (СПВ1 и СПВ2) [6], генерация которых в тропосфере усиливается за счет увеличения долготных контрастов притока тепла между сушей и океаном в зимний период. В работах [7, 8] обсуждается, что для изучения предпосылок и развития ВСП необходимо анализировать нелинейные взаимодействия ПВ друг с другом и со средним потоком наравне с такими внешними воздействиями, как Эль-Ниньо — Южное колебание, квазидвухлетнее колебание зонального ветра в экваториальной стратосфере, одиннадцатилетний солнечный цикл и осцилляция Маддена-Джулиана [9—13].

ВСП являются важным фактором межгодовой и внутрисезонной изменчивости стратосферного полярного вихря. Во время ВСП наблюдается расщепление или смещение стратосферного полярного вихря из полярных широт в течение нескольких дней, что сопровождается потеплением приполярной стратосферы и, как следствие, изменением направления меридионального температурного градиента. Это приводит к ослаблению или к развороту среднезонального зонального ветра [14—16]. Внезапные стратосферные потепления классифицируют в зависимости от степени развития и длительности на большое (главное, мажорное) и малое (минорное). Первый тип характеризуется положительным градиентом среднезональной температуры на 10 гПа в широтном диапазоне от 60° до 90° с.ш., а дополнительным условием является изменение направления среднезонального ветра на 60° с.ш. и высоте 10 гПа с восточного на западное. Для второго типа ВСП дополнительное условие для среднезонального ветра не выполняется. В последние годы появляется все больше работ, в которых обсуждается вопрос необходимости совершенствования определения и классификации ВСП. Это обусловлено их сложной пространственной и термодинамической структурой: наблюдаемые ВСП характеризуются большой изменчивостью как по продолжительности, так и по влиянию на циркуляцию атмосферы и состояние озонового слоя [17, 18].

Основной задачей данной работы является исследование изменчивости различных волновых процессов с целью анализа предпосылок и развития ВСП со сложной структурой на примере двух событий в течение зимних сезонов 2003—2004 гг. и 2005—2006 гг. Для этого с использованием данных реанализа MERRA-2 [19] были рассчитаны слагаемые в уравнениях баланса возмущенной потенциальной энтропии (ПЭ). Слагаемые описывают изменение волновой активности отдельных СПВ, межволновые взаимодействия и взаимодействия СПВ

со средним потоком. Такой подход к диагностике волновых взаимодействий во время ВСП был детально описан в работах [20, 21] и применялся для исследования нелинейных взаимодействий ПВ на разных стадиях ВСП со смещением и расщеплением стратосферного полярного вихря.

Данные и метод

Метод анализа волновых процессов заключается в исследовании возмущенной ПЭ, являющейся квадратом потенциальной завихренности. Такой подход позволяет анализировать взаимодействия СПВ со средним потоком (влияние волн на зональную циркуляцию) и между собой [22]. Вывод и преобразование уравнений баланса возмущенной ПЭ для СПВ1 и СПВ2 представлены в работе [20]. При получении уравнений для описания межволнового взаимодействия была учтена генерация вторичных планетарных волн [23]. Когда сигнал от двух гармонических волн с зональными волновыми числами и частотами (m_1, ω_1) и (m_2, ω_2) проходит через нелинейную квадратичную систему, то сигналом на выходе этой системы будет являться набор вторичных волн со следующими параметрами: $(2m_1, 2\omega_1)$, $(2m_2, 2\omega_2)$, $(m_1 - m_2, \omega_1 - \omega_2)$ и $(m_1 + m_2, \omega_1 + \omega_2)$. Следуя этой теории, вторичная СПВ2 будет генерироваться в результате нелинейных взаимодействий СПВ3—СПВ1 и в случае самовзаимодействия СПВ1, а вторичная СПВ1 — при взаимодействии СПВ2—СПВ1 и СПВ3—СПВ2. Преобразование уравнений позволило описать не только нелинейные волновые процессы, как показано в работах [22, 24], но и дивергенцию, и адвекцию потока ПЭ. Уравнения баланса возмущенной ПЭ для СПВ1 и СПВ2, (1) и (2) соответственно:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \overline{P_1'^2}}{\partial t} = -\overline{P_1'(\overline{V_1'} \cdot \nabla P_2')} - \overline{P_1'(\overline{V_2'} \cdot \nabla P_1')} - \overline{P_1'(\overline{V_2'} \cdot \nabla P_3')} - \overline{P_1'(\overline{V_3'} \cdot \nabla P_2')} - \frac{1}{\rho_0} \operatorname{div} \left(\rho_0 \overline{P P_1' \overline{V_1'}} \right) - \overline{P_1'(\overline{V} \cdot \nabla P_1')} + \overline{P(\overline{V_1'} \cdot \nabla P_1')} + \overline{P_1' R_1'}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \overline{P_2'^2}}{\partial t} = -\overline{P_2'(\overline{V_1'} \cdot \nabla P_1')} - \overline{P_2'(\overline{V_1'} \cdot \nabla P_3')} - \overline{P_2'(\overline{V_3'} \cdot \nabla P_1')} - \frac{1}{\rho_0} \operatorname{div} \left(\rho_0 \overline{P P_2' \overline{V_2'}} \right) - \overline{P_2'(\overline{V} \cdot \nabla P_2')} + \overline{P(\overline{V_2'} \cdot \nabla P_2')} + \overline{P_2' R_2'}. \quad (2)$$

Черта сверху означает зональное усреднение, штрихи — возмущения, т.е. отклонения от зонально усредненных значений, а подстрочные индексы — зональное волновое число m . В уравнениях (1) и (2) P — потенциальная завихренность Эртеля, \overline{V} — вектор скорости ветра, ρ_0 — плотность ($\rho_0 \equiv \rho_s \exp(-z/H)$), ρ_s — плотность у поверхности, z — вертикальная координата, H — высота однородной атмосферы), R — диссипативные слагаемые и неадиабатические источники. Слагаемое в левой части уравнений описывает временную изменчивость волновой активности [24, 25]. Первые четыре слагаемых уравнения (1) и первые три

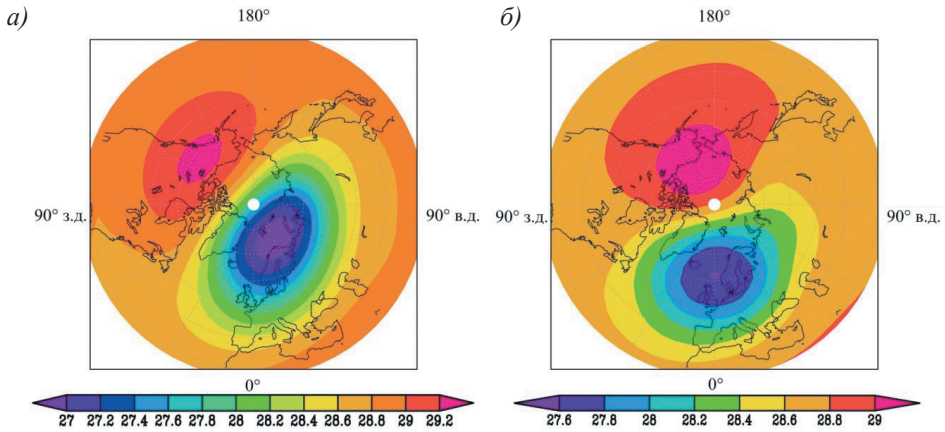


Рис. 1. Распределения геопотенциальной высоты в км, на уровне 10 гПа, усредненные за две недели развития ВСП.

- a) внезапное стратосферное потепление зимой 2003—2004 гг.,
- б) внезапное стратосферное потепление зимой 2005—2006 гг.

Fig. 1. Composites of geopotential height, at the level of 10 hPa, averaged over two weeks of SSW development.

- a) 2003—2004 sudden stratospheric warming,
- b) 2005—2006 sudden stratospheric warming.

слагаемых уравнения (2) в правой части описывают нелинейную генерацию СПВ, теория которой описана выше, далее три обменных слагаемых, описывающих дивергенцию, адвекцию потока ПЭ и взаимодействие волны со средним потоком, последнее слагаемое — диссипация ПЭ.

Для исследования выполнения баланса возмущенной ПЭ, т.е. вклада различных слагаемых в уравнениях (1) и (2), были использованы данные о температуре, скорости зонального и меридионального ветра, давлении и геопотенциальной высоте из базы реанализа метеорологической информации MERRA-2. Расчеты были проведены для двух зим 2003—2004 гг. и 2005—2006 гг., когда наблюдались внезапные стратосферные потепления со сложной структурой, сопровождавшиеся смещением стратосферного полярного вихря (рис. 1).

Рассмотренные нами ВСП классифицируются как главные. Согласно работам [26—28], они являются примерами сложных ВСП. Это обусловлено сложными пространственно-временными распределениями зонального ветра, температуры, а также амплитуд планетарных волн с различными зональными волновыми числами на разных этапах развития ВСП. На рис. 2 и 3 показан временной ход среднезонального ветра, отклонений среднезональной температуры от средних значений за январь-апрель, а также амплитуд СПВ с зональными волновыми числами $m = 1—3$ зимой 2003—2004 гг. Рост температуры начинается в середине декабря 2003 г. на уровне верхней стратосферы, нижней мезосферы, постепенно спускаясь на уровень 10 гПа (рис. 2 б). К 26 декабря

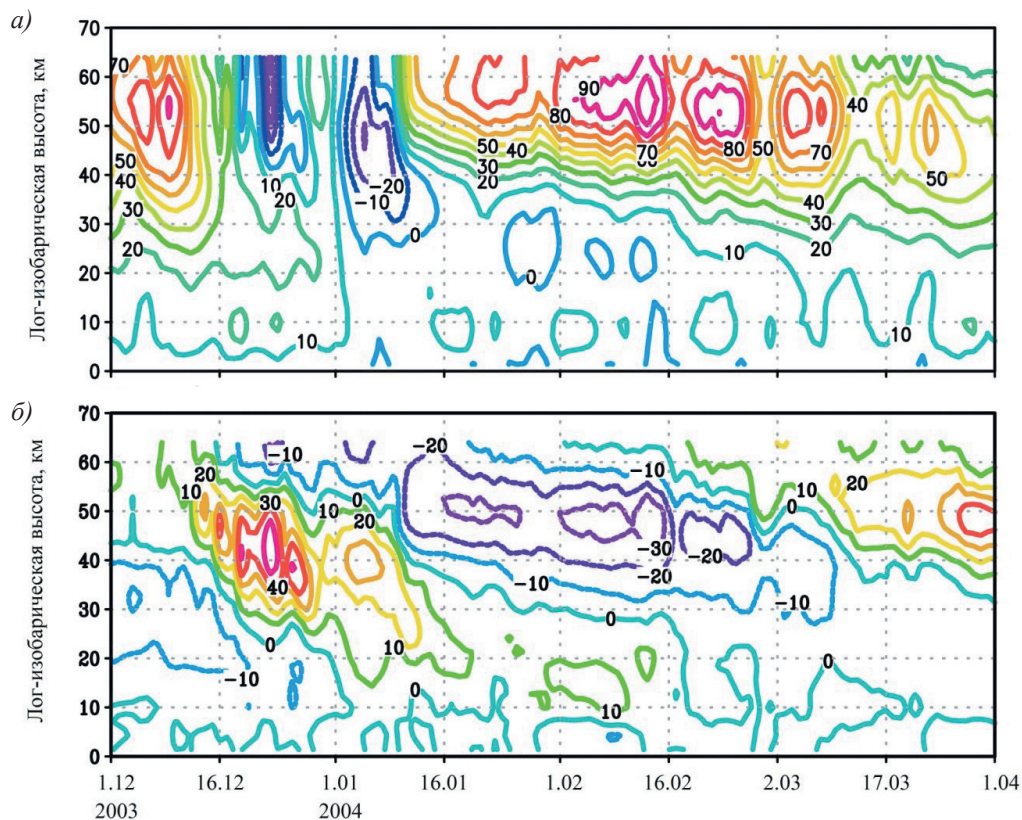


Рис. 2. Высотно-временные распределения зимой 2003—2004 гг.

a) средний зональный ветер (м/с) на $62,5^\circ$ с. ш., *б)* отклонения средней зональной температуры (К) от усредненной за январь—апрель 2004 г. в поясе северных широт $85\text{--}90^\circ$.

Fig. 2. The time-altitude cross-sections of the mean zonal wind (m/s) at latitude 62.5°N (*a*), the zonal mean temperature deviations (K) from averaged over January—April 2004 at 87.5°N (*b*) during winter 2003—2004.

2003 г. аномалия температуры на этом уровне составила 45 К и достигла максимального значения, а среднезональный ветер сменил направление (рис. 2 *a*). В начале января после непродолжительного понижения температуры и восстановления направления ветра на уровне 10 гПа, наблюдался второй максимум температуры, сопровождавшийся изменением направления среднезонального ветра. Внезапному стратосферному потеплению 26 декабря 2003 г. предшествовало сильное увеличение амплитуды СПВ1 на высоте 40—60 км с начала декабря (рис. 3 *a*). Кроме этого, наблюдались аномально сильные увеличения амплитуд СПВ2 и СПВ3 на тех же уровнях с 7 по 24 декабря 2003 г. (рис. 3 *б* и рис. 3 *в*). После ВСП значения амплитуд СПВ1 и СПВ2 оставались аномально большими.

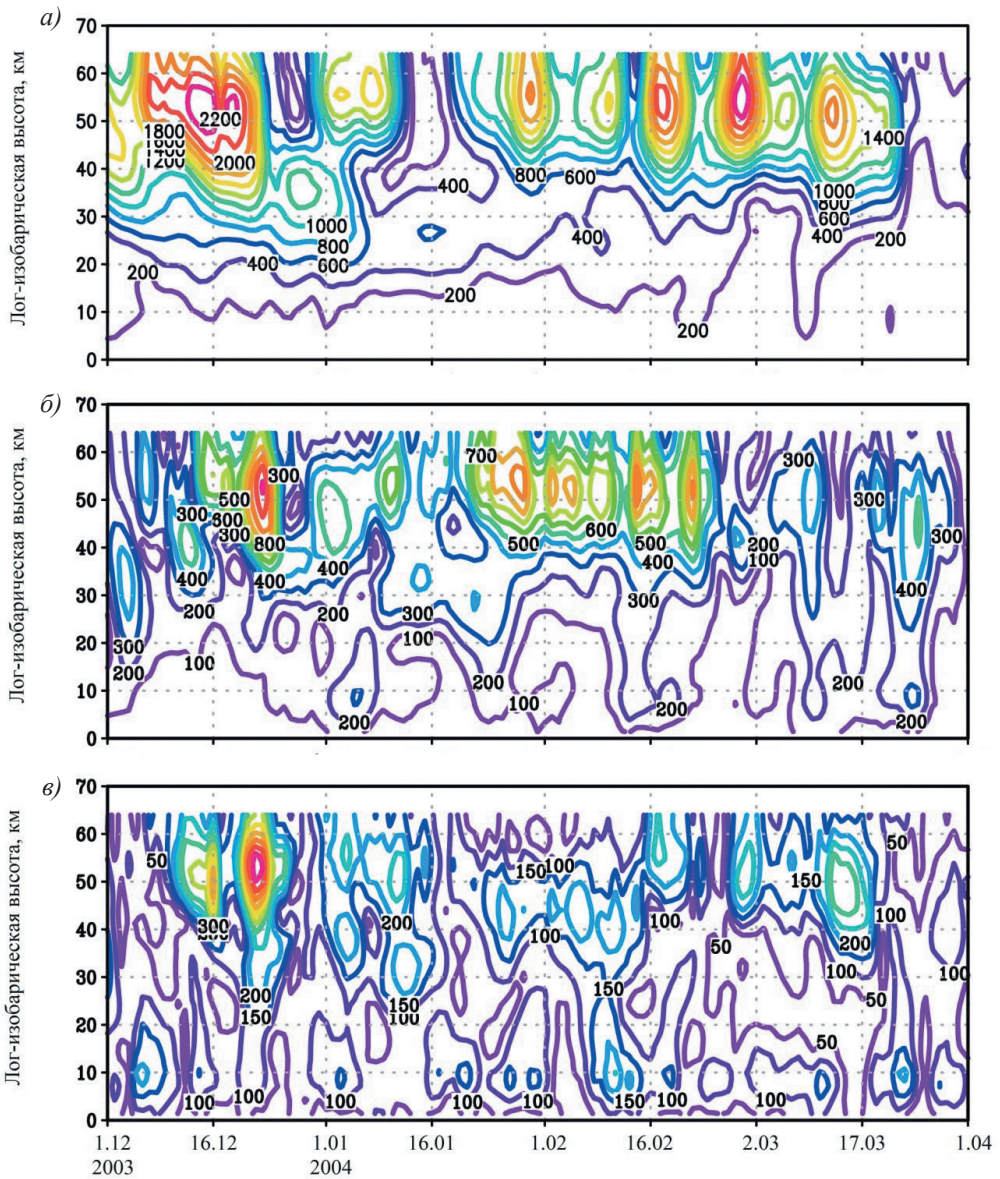


Рис. 3. Высотно-временное распределение амплитуд СПВ в поле геопотенциальной высоты (м) на $62,5^\circ$ с. ш. зимой 2003—2004 гг.

a) зональное волновое число $m = 1$, б) зональное волновое число $m = 2$,
в) зональное волновое число $m = 3$.

Fig. 3. The time-altitude cross-sections of the amplitude planetary wave in the geopotential height at latitude 62.5°N , winter 2003—2004.

a) zonal wavenumber $m = 1$, b) zonal wavenumber $m = 2$, c) zonal wavenumber $m = 3$

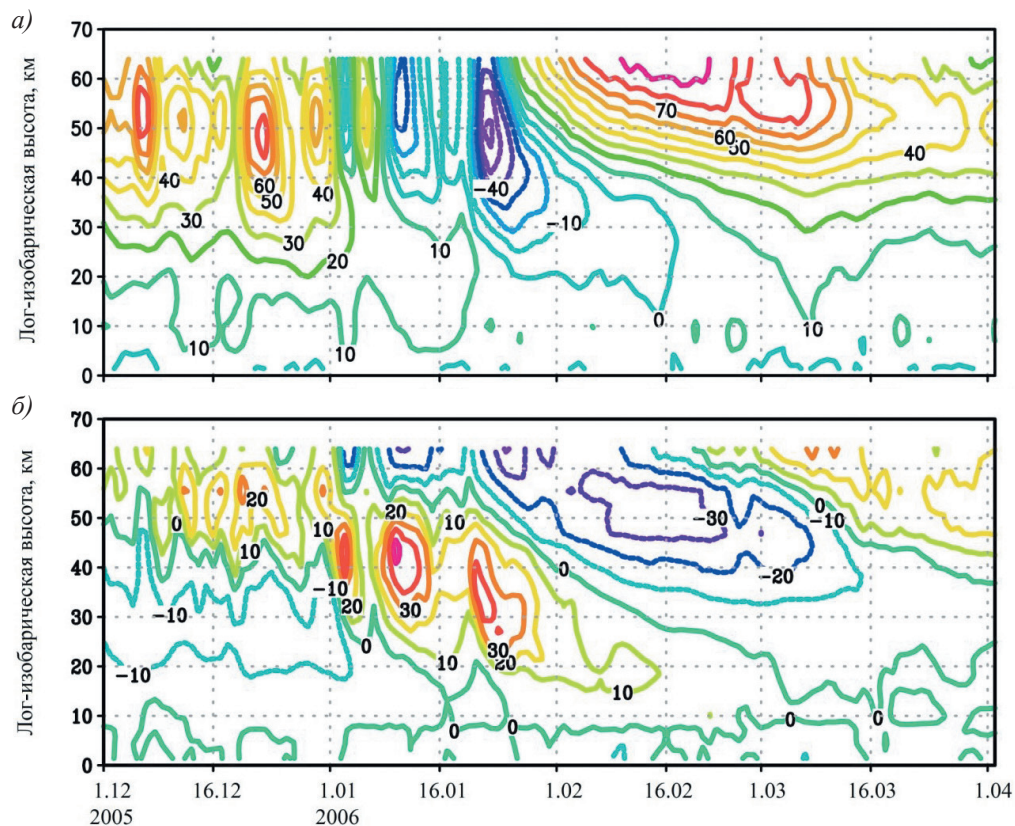


Рис. 4. Высотно-временные распределения зимой 2005—2006 гг.

a) средний зональный ветер (м/с) на $62,5^\circ$ с. ш., *б)* отклонения средней зональной температуры (К) от усредненной за январь—апрель 2006 г. в поясе северных широт 85° — 90° .

Fig. 4. The time-altitude cross-sections of the mean zonal wind (m/s) at latitude 62.5°N (*a*), the zonal mean temperature deviations (K) from averaged over January—April 2006 at 87.5°N (*b*) during winter 2005—2006.

Распределения полей среднезонального ветра, температуры и амплитуд СПВ1-3 зимой 2005—2006 гг. представлены на рис. 4 и рис. 5. Характер вариаций температуры и зональной компоненты ветра при развитии этого ВСП схож с распределениями при ВСП зимой 2003—2004 гг. Рост температуры начинается с конца декабря 2005 г. на уровне верхней стратосферы, нижней мезосферы, постепенно спускаясь на уровень 10 гПа (рис. 4 б). На уровне 10 гПа температура начинает расти с 1 января, и с колебаниями ± 20 К достигает максимальных значений 21 января, что сопровождается изменением направления среднезонального ветра. Внезапному стратосферному потеплению 21 января 2006 г. предшествовало сильное увеличение амплитуд СПВ1, СПВ2 и СПВ3 на 40—60 км с начала декабря (рис. 5).

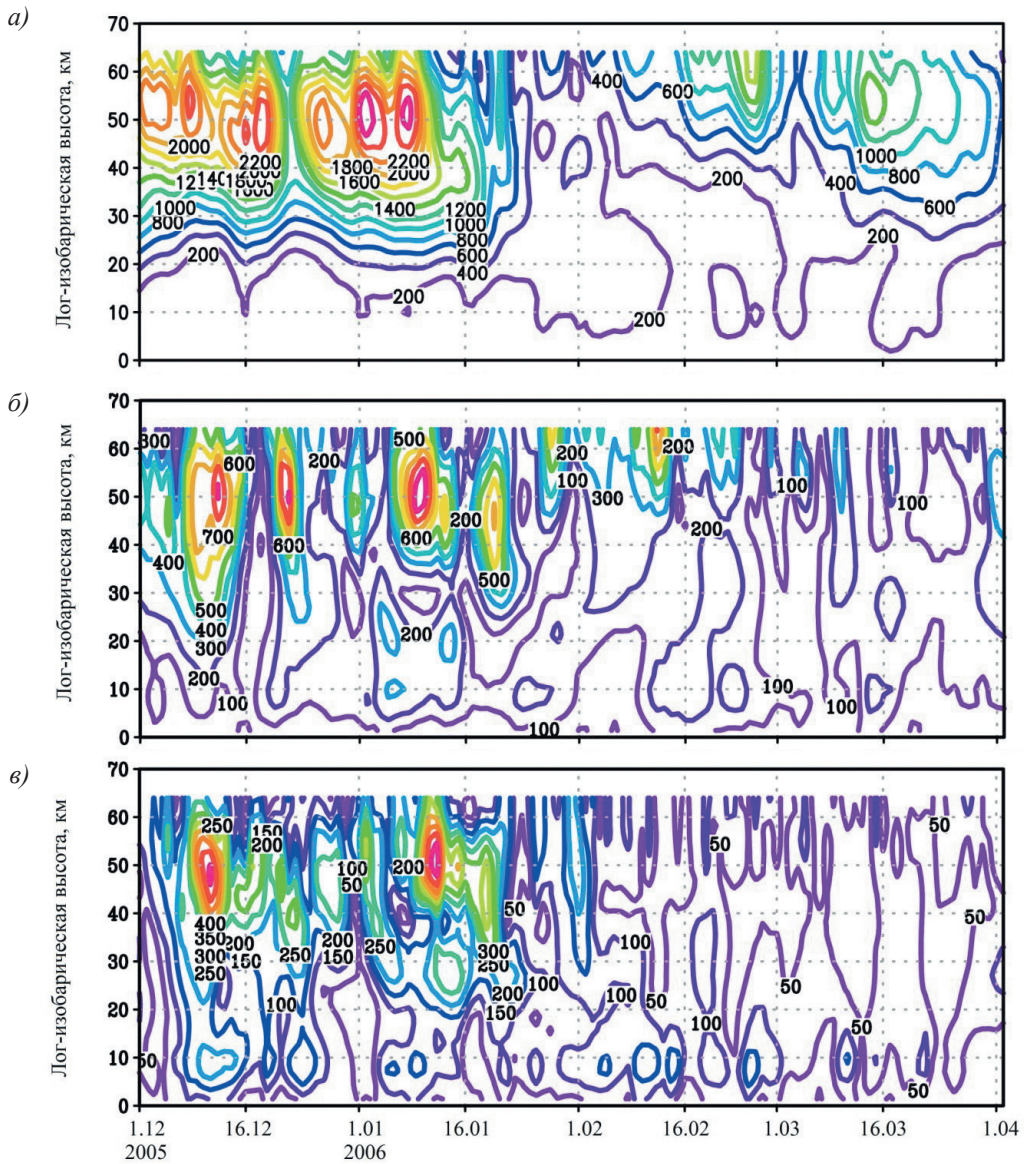


Рис. 5. Высотно-временное распределение амплитуд СПВ в поле геопотенциальной высоты (м) на $62,5^\circ$ с. ш. зимой 2005—2006 гг.

a) зональное волновое число $m = 1$, б) зональное волновое число $m = 2$,
в) зональное волновое число $m = 3$.

Fig. 5. The time-altitude cross-sections of the amplitude of planetary wave in the geopotential height at latitude 62.5°N , winter 2005—2006.

a) zonal wavenumber $m = 1$, b) zonal wavenumber $m = 2$, c) zonal wavenumber $m = 3$.

Результаты исследований

Расчеты и оценки вкладов различных слагаемых в уравнения баланса возмущенной ПЭ для СПВ1 и СПВ2 — уравнение 1 и 2, соответственно, были выполнены с использованием данных реанализа MERRA-2 для уровня 50 км. На этом уровне наблюдаются максимальные значения амплитуд планетарных волн с зональными волновыми числами $m = 1—3$. Расчеты были произведены для периода с 6 декабря 2003 г. по 11 января 2004 г. (левые панели на рис. 6—8) и для периода с 1 января по 5 февраля 2006 г. (правые панели на рис. 6—8), т. е. анализ проводился для двух временных интервалов: 3 недели до и 2 недели после ВСП. Синяя вертикальная пунктирная линия — дата ВСП. Результаты усреднены в полосе $52,5^\circ—62,5^\circ$ с.ш. На рис. 6—8 значения приведены в единицах $10^{12}(\text{кг}\cdot\text{м}^{-3})^2\cdot\text{PVU}^2/\text{сутки}$, где $1\text{PVU} = 10^{-6} \text{ К}\cdot\text{м}^2\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$ [29].

Результаты расчета межволновых взаимодействий при генерации СПВ представлены на рис. 6. При развитии исследуемых ВСП самовзаимодействие СПВ1 при генерации СПВ2 вносит наибольший вклад за 3 недели до потепления — черная линия на рис. 6в и рис. 6г. Взаимодействие СПВ1—СПВ2 при генерации СПВ1 наблюдается за 10 дней до ВСП в обоих случаях — черная линия на рис. 6а и рис. 6б. В тоже время в 2005—2006 гг. наблюдается еще одно максимальное значение этого слагаемого за 3 недели до ВСП. Вклад СПВ3 в межволновые взаимодействия больше во время ВСП 2003—2004 гг. (синие линии на рис. 6).

После достижения максимальной температуры во время ВСП в стратосфере взаимодействия между планетарными волнами практически не наблюдаются, несмотря на то, что, как было указано выше, значительные амплитуды планетарных волн регистрировались на протяжении всей зимы (например, зима 2003—2004 гг.).

Адвекция потока ПЭ вносит наименьший вклад в баланс возмущенной ПЭ, при этом она максимальна за 8—12 дней до наступления ВСП (рис. 7, черная линия). Взаимодействие волны со средним потоком балансируется дивергенцией потока ПЭ (рис. 7, зеленая и синяя линии, соответственно).

Поведение обменных слагаемых, в отличие от межволновых взаимодействий, индивидуально для двух ВСП. После наступления ВСП взаимодействия волны со средним потоком и дивергенция потока ПЭ наблюдаются на протяжении ~10 дней. Взаимодействия СПВ1 и СПВ2 со средним потоком максимальны за 10 дней до ВСП 2003—2004 гг., а дивергенция потока ПЭ за 3 недели (рис. 7а и рис. 7в). Взаимодействие СПВ1 со средним потоком максимально за 2 недели до ВСП 2005—2006 гг. (рис. 7б).

Вклад основных процессов в баланс возмущенной ПЭ и, как следствие, в изменение волновой активности представлен на рис. 8.

Развитие рассматриваемых ВСП сопровождается вариациями волновой активности СПВ1, а изменения волновой активности СПВ2 больше во время ВСП зимой 2005—2006 гг. Уменьшение волновой активности СПВ1 сопровождается уменьшением волновой активности СПВ2, т. е. эти слагаемые не уравновешивают друг друга.

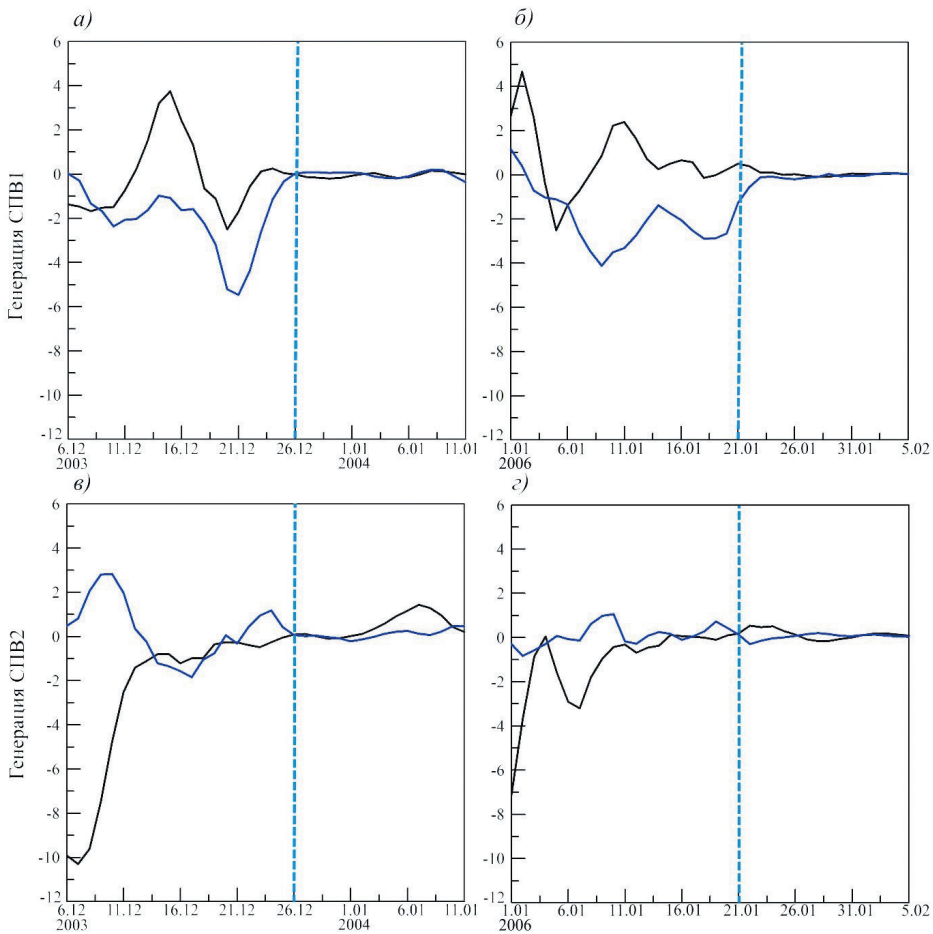


Рис. 6. Слагаемые, отвечающие за межволновые взаимодействия, в балансе возмущенной потенциальной энтропии.

a) генерация СПВ1 при развитии ВСП зимой 2003—2004 гг. (взаимодействие СПВ1—СПВ2 — черная линия, СПВ2—СПВ3 — синяя), *б)* генерация СПВ1 при развитии ВСП зимой 2005—2006 гг. (взаимодействие СПВ1—СПВ2 — черная линия, СПВ2—СПВ3 — синяя), *в)* генерация СПВ2 при развитии ВСП зимой 2003—2004 гг. (самовзаимодействие СПВ1 — черная линия, СПВ1—СПВ3 — синяя), *г)* генерация СПВ2 при развитии ВСП зимой 2005—2006 гг. (самовзаимодействие СПВ1 — черная линия, СПВ1—СПВ3 — синяя).

Fig. 6. Terms responsible for wave—wave interactions in the balance of perturbed potential enstrophy.

a) SPW1 generation during the SSW 2003—2004 winter development (interaction of SPW1—SPW2 — black line, SPW2—SPW3 — blue), *b)* SPW1 generation during the SSW 2005—2006 winter development (interaction of SPW1—SPW2 — black line, SPW2—SPW3 — blue), *c)* SPW2 generation during the SSW 2003—2004 winter development (SPW1 self-interaction of — black line, SPW1—SPW3 — blue), *d)* SPW2 generation during the SSW 2005—2006 winter development (SPW1 self-interaction of — black line, SPW1—SPW3 — blue).

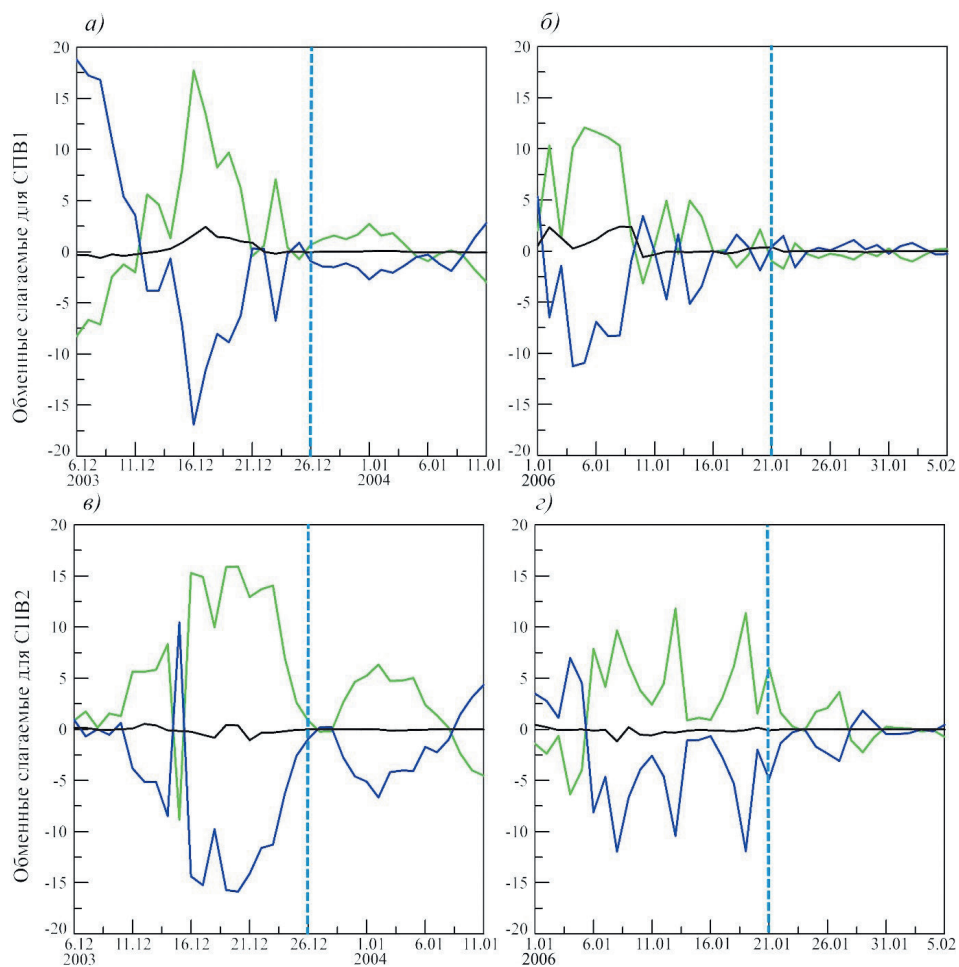


Рис. 7. Обменные слагаемые в балансе возмущенной потенциальной энтропии (адвективные слагаемые — черная линия, дивергенция — синяя линия и взаимодействие волны со средним потоком — зеленая).

- a)* обменные слагаемые для СПВ1 при развитии ВСП зимой 2003—2004 гг.,
- б)* обменные слагаемые для СПВ1 при развитии ВСП зимой 2005—2006 гг.,
- в)* обменные слагаемые для СПВ2 при развитии ВСП зимой 2003—2004 гг.,
- г)* обменные слагаемые для СПВ2 при развитии ВСП зимой 2005—2006 гг.

Fig. 7. Exchange terms in the balance of perturbed potential enstrophy (advective terms — black line, the divergence — blue line and wave—mean flow interaction — green one).

- a)* SPW1 exchange terms during the SSW 2003—2004 winter development,
- b)* SPW1 exchange terms during the SSW 2005—2006 winter development,
- c)* SPW2 exchange terms during the SSW 2003—2004 winter development,
- d)* SPW2 exchange terms during the SSW 2005—2006 winter development.

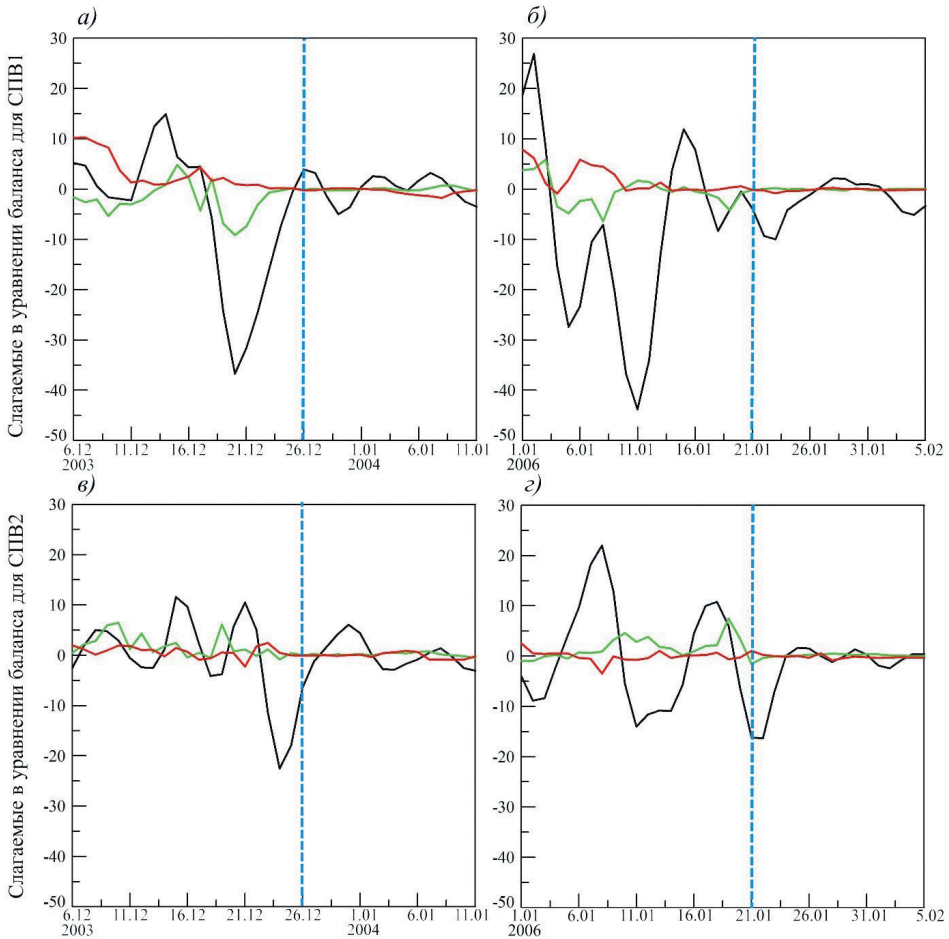


Рис. 8. Слагаемые в балансе возмущенной потенциальной энтропии (изменение волновой активности во времени — черная линия, сумма обменных слагаемых — красная линия и сумма слагаемых, отвечающих за генерацию волны — зеленая).

- a) слагаемые для СПВ1 при развитии ВСП зимой 2003—2004 гг.,
- б) слагаемые для СПВ1 при развитии ВСП зимой 2005—2006 гг.,
- в) слагаемые для СПВ2 при развитии ВСП зимой 2003—2004 гг.,
- г) слагаемые для СПВ2 при развитии ВСП зимой 2005—2006 гг.

Fig. 8. Terms in the balance of perturbed potential enstrophy (wave activity time variations — black line, the exchange terms sum — red line and wave generation terms sum — green one).

- a) SPW1 terms during the SSW 2003—2004 winter development,
- b) SPW1 terms during the SSW 2005—2006 winter development,
- c) SPW2 terms during the SSW 2003—2004 winter development,
- d) SPW2 terms during the SSW 2005—2006 winter development.

Волновая активность планетарных волн начинает меняться за 2 недели до ВСП зимой 2003—2004 гг. (рис. 8 *a* и рис. 8 *в*) и за 3 недели до ВСП зимой 2005—2006 гг. (рис. 8 *б* и рис. 8 *з*). Во время формирования рассматриваемых ВСП вклад слагаемых, ответственных за взаимодействие между СПВ и СПВ со средним потоком, сопоставим (рис. 8, красные и зеленые линии).

Заключение

Данная работа посвящена исследованию процессов, вызванных распространением планетарных волн и волновой активностью при формировании и развитии внезапных стратосферных потеплений со сложной временной и пространственной структурой. С этой целью был проанализирован вклад различных слагаемых в уравнения баланса возмущенной потенциальной энтропии (ПЭ). Такой подход позволяет оценить изменение волновой активности во времени, взаимодействие стационарных планетарных волн между собой и со средним потоком, дивергенцию и адвекцию потока ПЭ. С использованием данных реанализа слагаемые были рассчитаны для ВСП, которые наблюдались зимой 2003—2004 гг. 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 двух сложных ВСП зимой 2003—2004 гг. и 2005—2006 гг. В частности, было впервые показано, что при формировании исследуемых внезапных стратосферных потеплений самовзаимодействия СПВ1 могут вносить наибольший вклад в межволновые взаимодействия за 3 недели до ВСП, а взаимодействия СПВ1—СПВ2 за 10 дней до ВСП. Кроме этого, после наступления ВСП межволновые взаимодействия в стратосфере средних широт в рассмотренных случаях не наблюдались.

Взаимодействия планетарных волн со средним потоком различны для двух ВСП. Несмотря на то, что вклад адвекции потока ПЭ наблюдается за 8—12 дней до наступления ВСП, ее вклад в баланс возмущенной ПЭ — минимальный. 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.

Результаты исследования продемонстрировали, что при анализе похожих ВСП (по положению стратосферного полярного вихря, по величине и характеру изменения температуры, по увеличению амплитуд СПВ), наблюдаются схожие тенденции в изменении некоторых нелинейных волновых процессов, т. е. просматривается некий универсальный механизм. Временная эволюция волновой активности различается и, очевидно, должна балансироваться диссипативными процессами. Это важная и актуальная задача для дальнейшего детального изучения.

Список литературы

1. Hoskins B. J., Pierce R. P. Large-Scale Dynamical Processes in the Atmosphere / Eds. Hoskins B. J., Pierce R. P. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1983. 397 p.

2. Chen P., Robinson W. Propagation of planetary waves between the troposphere and stratosphere // *J. Atmos. Sci.* 1992. Vol. 49, No. 24. P. 2533—2545.
3. Reichler T., Kushner P. J., Polvani L. M. The coupled stratosphere-troposphere response to impulsive forcing from the troposphere // *J. Atmos. Sci.* 2005. Vol. 62. P. 3337—3352.
4. Baldwin M., Ayarzagueno B., Birner T. et al. Sudden stratospheric warmings // *Rev. Geophys.* 2021. Vol. 58. P. 1—37. doi: 10.1002/essoar.10502884.1.
5. Варгин П. Н., Володин Е. М., Карпечко А. Ю., Погорельцев А. И. О стратосферно-тропосферных взаимодействиях // *Вестник РАН.* 2015. Т. 85. № 1. С. 39—46. doi: 10.7868/S0869587315010181.
6. Matsuno T. A. Dynamical model of stratospheric warmings // *J. Atmos. Sci.* 1971. Vol. 28. P. 1479—1494.
7. Labitzke K., Kunze M. On the remarkable Arctic winter in 2008/2009 // *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114. P. 1—9. doi: 10.1029/2009jd012273.
8. Pogoreltsev A. I., Savenkova E. N., Aniskina O. G. et al. Interannual and intraseasonal variability of stratospheric dynamics and stratosphere-troposphere coupling during northern winter // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2015. Vol. 136. P. 187—200. doi: 10.1016/j.jastp.2015.08.008.
9. Кандиева К. К., Анискина О. Г., Погорельцев А. И. Влияние осцилляции Маддена — Джулиана на интенсивность и структуру полярного вихря // *Ученые записки РГГМУ.* 2018. № 50. С. 18—27.
10. Кандиева К. К., Анискина О. Г., Погорельцев А. И. и др. Влияние осцилляции Маддена — Джулиана и квазидвухлетнего колебания на динамику внетропической стратосферы // *Геомagnetизм и аэрoномия.* 2019. Т. 59. № 1. С. 114—124. doi: 10.1134/S0016794018060068.
11. Ermakova T. S., Aniskina O. G., Statnaya I. A. et al. Simulation of the ENSO influence on the extra-tropical middle atmosphere // *Earth, Planets and Space.* 2019. Vol. 71:8. doi: 10.1186/s40623-019-0987-9.
12. Garfinkel C. I., Benedict J. J., Maloney E. D. Impact of the MJO on the boreal winter extratropical circulation // *Geophys. Res. Lett.* 2014. Vol. 41. P. 6055—6062. doi: 10.1002/2014gl061094.
13. Kuroda Y., Kodera K. Effect of solar activity on the polar-night jet oscillation in the Northern and Southern Hemisphere winter // *Journal of the Meteorological Society of Japan.* 2002. Vol. 80. P. 973—984. doi: 10.2151/jmsj.80.973.
14. Butler A. H., Seidel D. J., Hardiman S. C. et al. Defining sudden stratospheric warmings // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2015. Vol. 96. P. 1913—1928. doi: 10.1175/BAMS-D-13-00173.1.
15. Charlton-Perez A. J., Polvani L. M. A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: Climatology and modeling benchmarks // *J. Clim.* 2007. Vol. 20. P. 449—469. doi: 10.1175/JCLI3996.1.
16. Seviour W. J. M., Gray L. J., Mitchell D. M. Stratospheric polar vortex splits and displacements in the high-top CMIP5 climate models // *J. Geophys. Res.: Atmospheres.* 2016. Vol. 121. P. 1—14. doi: 10.1002/2015JD024178.
17. Manney G. L., Lawrence Z. D., Santee M. L. et al. A minor sudden stratospheric warming with a major impact: Transport and polar processing in the 2014/2015 Arctic winter // *Geophys. Res. Lett.* 2015. Vol. 42. P. 7808—7816. doi: 10.1002/2015GL065864.
18. Wright C. J., Hall R. J., Banyard T. P. et al. Dynamical and surface impact of the January 2021 sudden stratospheric warming in novel Aeolus wind observations, MLS and ERA5 // *Weather and Climate Dynamics Discussions.* 2021. doi: 10.5194/wcd-2021-16.
19. Gelaro R., McCarty W., Suarez M. J. et al. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2) // *J. Clim.* 2017. Vol. 30, No. 13. P. 5419—5454. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
20. Диденко К. А., Ермакова Т. С., Коваль А. В., Погорельцев А. И. Диагностика нелинейных взаимодействий стационарных планетарных волн // *Ученые записки РГГМУ.* 2019. № 56. С. 19—29. doi: 10.33933/2074-2762-2019-56-19-29.
21. Didenko K. A., Koval A. V., Ermakova T. S., Lifar V. D. Interactions of stationary planetary waves during winter 2008—2009 and 2018—2019 sudden stratospheric warmings // *Proc. of SPIE, 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics.* 2022. doi: 10.1117/12.2644458.
22. Smith A. K. Observation of wave-wave interactions in the stratosphere // *J. Atmos. Sci.* 1983. Vol. 40. P. 2484—2493.
23. Pogoreltsev A. I. Numerical simulation of secondary planetary waves arising from the nonlinear interaction of the normal atmospheric modes // *Physics and Chemistry of the Earth (Part C).* 2001. Vol. 26, No. 6. P. 395—403.

24. Smith A. K., Gille J. C., Lyjak L. V. Wave-wave interactions in the stratosphere: Observations during quiet and active wintertime periods // *J. Atmos. Sci.* 1984. Vol. 41. P. 363—373.
25. White I. P., Hua L., Mitchell N. J., Phillips T. Dynamical response to the QBO in the Northern winter stratosphere: signatures in wave forcing and eddy fluxes of potential vorticity // *J. Atmos. Sci.* 2015. Vol. 72. P. 4487—4507. doi: 10.1175/JAS-D-14-0358.
26. Butler A. H., Sjoberg J. P., Seidel D. J., Rosenlof K. H. A sudden stratospheric warming compendium // *Earth System Science Data*. 2017. Vol. 9. P. 63—76. doi: 10.5194/essd-9-63-2017.
27. Choi H., Kim B., Choi W. Type classification of sudden stratospheric warming based on pre- and post-warming periods // *J. Clim.* 2019. Vol. 32, No. 8. P. 2349—2367. doi: 10.1175/JCLI-D-18-0223.1.
28. Li Y., Kirchengast G., Schwaerz M., Yuan, Y. Monitoring sudden stratospheric warmings under climate change since 1980 based on reanalysis data verified by radio occultation // *Atmos. Chem. Phys.* 2023. Vol. 23. P. 1259—1284, doi: 10.5194/acp-23-1259-2023.
29. McIntyre M. E. Dynamical meteorology: potential vorticity // *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. Second Edition. 2014. Vol. 2. P. 375—383. doi: 10.1016/b978-0-12-382225-3.00140-7.

References

1. Hoskins B. J., Pierce R. P. Large-Scale Dynamical Processes in the Atmosphere / Eds. Hoskins B. J., Pierce R. P. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1983: 397 p.
2. Chen P., Robinson W. Propagation of planetary waves between the troposphere and stratosphere. *J. Atmos. Sci.* 1992; 49(24): 2533—2545.
3. Reichler T., Kushner P. J., Polvani L. M. The coupled stratosphere-troposphere response to impulsive forcing from the troposphere. *J. Atmos. Sci.* 2005; (62): 3337—3352.
4. Baldwin M., Ayrarzaguen B., Birner T. et al. Sudden stratospheric warmings. *Rev. Geophys.* 2021; (58): 1—37. doi: 10.1002/essoar.10502884.1.
5. Vargin P. N., Volodin E. M., Karpechko A. Yu., Pogoreltsev A. I. Stratosphere-troposphere interactions. *Herald Russ. Acad. Sci.* 2015; 85(1): 56—63. doi: 10.7868/S0869587315010181.
6. Matsuno T. A. Dynamical model of stratospheric warmings. *J. Atmos. Sci.* 1971; (28): 1479—1494.
7. Labitzke K., Kunze M. On the remarkable Arctic winter in 2008/2009. *J. Geophys. Res.* 2009; (114): 1—9. doi: 10.1029/2009jd012273.
8. Pogoreltsev A. I., Savenkova E. N., Aniskina O. G. et al. Interannual and intraseasonal variability of stratospheric dynamics and stratosphere-troposphere coupling during northern winter. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2015; (136): 187—200. doi: 10.1016/j.jastp.2015.08.008.
9. Kandieva K. K., Aniskina O. G., Pogoreltsev A. I. Influence of the Madden-Julian oscillation on the polar vortex. *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2018; (50): (18—27). [In Russ.].
10. Kandieva K. K., Aniskina O. G., Pogoreltsev A. I. et al. Effect of the Madden-Julian oscillation and quasi-biennial oscillation on the dynamics of extratropical stratosphere. *Gemagnetizm I Aeronomiya = Geomagnetism and Aeronomy*. 2019; 59(1): (114—124). doi: 10.1134/S0016794018060068. [In Russ.].
11. Ermakova T. S., Aniskina O. G., Statnaya I. A. et al. Simulation of the ENSO influence on the extra-tropical middle atmosphere. *Earth, Planets and Space*. 2019; 71(8). doi: 10.1186/s40623-019-0987-9.
12. Garfinkel C. I., Benedict J. J., Maloney E. D. Impact of the MJO on the boreal winter extratropical circulation. *Geophys. Res. Lett.* 2014; (41): 6055—6062. doi: 10.1002/2014gl061094.
13. Kuroda Y., Kodera K. Effect of solar activity on the polar-night jet oscillation in the Northern and Southern Hemisphere winter. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. 2002; (80): 973—984. doi: 10.2151/jmsj.80.973.
14. Butler A. H., Seidel D. J., Hardiman S. C. et al. Defining sudden stratospheric warmings. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2015; (96): 1913—1928. doi: 10.1175/BAMS-D-13-00173.1.
15. Charlton-Perez A. J., Polvani L. M. A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: Climatology and modeling benchmarks. *J. Clim.* 2007; (20): 449—469. doi: 10.1175/JCLI3996.1.
16. Seviour W. J. M., Gray L. J., Mitchell D. M. Stratospheric polar vortex splits and displacements in the high-top CMIP5 climate models. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*. 2016; (121): 1—14. doi: 10.1002/2015JD024178.

17. Manney G. L., Lawrence Z. D., Santee M. L. et al. A minor sudden stratospheric warming with a major impact: Transport and polar processing in the 2014/2015 Arctic winter. *Geophys. Res. Lett.* 2015; (42): 7808—7816. doi:10.1002/2015GL065864.
18. Wright C. J., Hall R. J., Banyard T. P. et al. Dynamical and surface impact of the January 2021 sudden stratospheric warming in novel Aeolus wind observations, MLS and ERA5. *Weather and Climate Dynamics Discussions*. 2021. <https://doi.org/10.5194/wcd-2021-16>.
19. Gelaro R., McCarty W., Suarez M. J. et al. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *J. Clim.* 2017; 30(13): 5419—5454. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
20. Didenko K. A., Ermakova T. S., Koval A. V., Pogoreltsev A. I. Diagnostics of nonlinear interactions of stationary planetary waves. *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2019; (56): (19—29). doi: 10.33933/2074-2762-2019-56-19-29. [In Russ.].
21. Didenko K. A., Koval A. V., Ermakova T. S., Lifar V. D. Interactions of stationary planetary waves during winter 2008—2009 and 2018—2019 sudden stratospheric warmings. *Proc. of SPIE, 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics*. 2022. doi: 10.1117/12.2644458.
22. Smith A. K. Observation of wave—wave interactions in the stratosphere. *J. Atmos. Sci.* 1983; (40): 2484—2493.
23. Pogoreltsev A. I. Numerical simulation of secondary planetary waves arising from the nonlinear interaction of the normal atmospheric modes. *Physics and Chemistry of the Earth (Part C)*. 2001; (26): 395—403.
24. Smith A. K., Gille J. C., Lyjak L. V. Wave—wave interactions in the stratosphere: Observations during quiet and active wintertime periods. *J. Atmos. Sci.* 1984; (41): 363—373.
25. White I. P., Hua L., Mitchell N. J., Phillips T. Dynamical response to the QBO in the Northern winter stratosphere: signatures in wave forcing and eddy fluxes of potential vorticity. *J. Atmos. Sci.* 2015; (72): 4487—4507. doi: 10.1175/JAS-D-14-0358.
26. Butler A. H., Sjoberg J. P., Seidel D. J., Rosenlof K. H. A sudden stratospheric warming compendium. *Earth System Science Data*. 2017; (9): 63—76. doi: 10.5194/essd-9-63-2017.
27. Choi H., Kim B., Choi W. Type classification of sudden stratospheric warming based on pre- and post-warming periods. *J. Clim.* 2019; 32(8): 2349—2367. doi: 10.1175/JCLI-D-18-0223.1.
28. Li Y., Kirchengast G., Schwaerz M., Yuan Y. Monitoring sudden stratospheric warmings under climate change since 1980 based on reanalysis data verified by radio occultation. *Atmos. Chem. Phys.* 2023; (23): 1259—1284, doi: 10.5194/acp-23-1259-2023.
29. McIntyre M. E. Dynamical meteorology: potential vorticity. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences. Second Edition*. 2014; (2): 375—383. doi: 10.1016/b978-0-12-382225-3.00140-7.

Информация об авторах

Диденко Ксения Андреевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Центр прогнозов космической погоды, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), didenko@izmiran.ru.

Бикбулатов Богдан Аминович, научный сотрудник, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН (ИЗМИРАН), bogdan.bikbulatov1@gmail.com.

Ермакова Татьяна Сергеевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры метеорологических прогнозов, Российский государственный гидрометеорологический университет, taalika@mail.ru.

Коваль Андрей Владиславович, доктор физико-математических наук, доцент кафедры физики атмосферы, Санкт-Петербургский государственный университет, a.v.koval@spbu.ru.

Information about authors

Kseniia Andreevna Didenko, candidate of Science in Physics and Mathematics, senior researcher, Space Weather Prediction Center, Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation (IZMIRAN), Russian Academy of Sciences.

Bogdan Aminovich Bikbulatov, researcher, Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation (IZMIRAN), Russian Academy of Sciences.

Tatiana Sergeevna Ermakova, candidate of Science in Physics and Mathematics, assistant professor, Department of Meteorological Forecasts, Russian State Hydrometeorological University.

Andrey Vladislavovich Koval, doctor of Science in Physics and Mathematics, associate professor, Atmospheric physics department, associate professor, Saint Petersburg State University.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 01.02.2024

Принята к печати после доработки 08.05.2024

The article was received on 01.02.2024

The article was accepted after revision on 08.05.2024