Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 229–232.

УДК 551.513.11
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-229
Orcid Автора 0009-0001-7333-0022

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ ВО ВРЕМЯ РАЗВИТИЯ ВНЕЗАПНЫХ СТРАТОСФЕРНЫХ ПОТЕПЛЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ: СЛУЧАИ РАСЩЕПЛЕНИЯ И СМЕЩЕНИЯ СТРАТОСФЕРНОГО ПОЛЯРНОГО ВИХРЯ

К.А. Диденко [1, 2], А.В. Коваль [1], Т.С. Ермакова [1, 3], Е.А. Маурчев [2]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия, didenko.xeniya@yandex.ru
[2]Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской Академии наук, Троицк, Москва, Россия
[3]Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия

DYNAMIC PROCESSES IN THE MIDDLE ATMOSPHERE DURING THE DEVELOPMENT OF SUDDEN STRATOSPHERIC WARMING OF VARIOUS TYPES: CASES OF SPLITTING AND DISPLACEMENT OF THE STRATOSPHERIC POLAR VORTEX

K.A. Didenko [1, 2], A.V. Koval [1], T.S. Ermakova [1, 3], E.A. Maurchev [2]

[1]St. Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia, didenko.xeniya@yandex.ru
[2]Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation Russian Academy of Sciences, Troitsk, Russia
[3]The Federal State Budgetary Institution “Voeikov Main Geophysical Observatory”, Saint Petersburg, Russia

Аннотация. На основе данных MERRA-2 исследована внутренняя динамика главных внезапных стратосферных потеплений со смещением и расщеплением стратосферного полярного вихря с помощью явного расчета нелинейных волновых процессов. Показано, что развитие ВСП с расщеплением стратосферного полярного вихря не всегда сопровождается преобладающими изменениями волновой активности стационарной планетарной волны с зональным волновым числом 2 (СПВ2), а определяется наиболее сильными взаимодействиями СПВ2 со средним потоком. Для группы ВСП со смещением стратосферного полярного вихря установлено, что межволновые взаимодействия при генерации вторичной стационарной планетарной волны с зональным волновым числом 1 (СПВ1) достигают максимума за 1-2 недели до даты ВСП, а при генерации вторичной СПВ2 – за 5-10 дней до ВСП.

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

Abstract. Using MERRA-2 reanalysis data, we examined the internal dynamics of major sudden stratospheric warmings (SSWs) accompanied by displacement and splitting of the stratospheric polar vortex by explicitly computing nonlinear wave processes. We show that the development of SSWs with polar vortex splitting is not always associated with dominant changes in the wave activity of the stationary planetary wave with zonal wavenumber 2 (SPW2), but is instead governed by the strongest interactions between SPW2 and the mean flow. For the group of SSWs characterized by polar vortex displacement, wave-wave interactions during the generation of the secondary stationary planetary wave with zonal wavenumber 1 (SPW1) were found to peak 1-2 weeks before the SSW date; those associated with the generation of secondary SPW2, 5-10 days before the event.

Keywords: sudden stratospheric warming, atmospheric planetary waves, stratospheric polar vortex, wave activity, nonlinear wave processes.

ВВЕДЕНИЕ

Внезапные стратосферные потепления (ВСП) – наиболее яркие события зимней полярной стратосферы, определяющие структуру и интенсивность полярного вихря [Butler et al., 2015; Варгин и др., 2015]. Они характеризуются резким ростом температуры в полярной стратосфере; при реверсе западного зонального ветра на восточный ВСП классифицируют как главное, без реверса – как малое. По типу деформации стратосферного полярного вихря ВСП делят на события со смещением и расщеплением.

Для поиска предикторов формирования ВСП разных типов в работе анализируется их внутренняя динамика через прямой расчет нелинейных взаимодействий планетарных волн между собой и со средним потоком. С использованием данных MERRA-2 оценены вклады компонентов в уравнения возмущенной потенциальной энстрофии, что позволяет изучить эволюцию волновой активности отдельных СПВ, межволновых взаимодействий, СПВ со средним потоком, а также дивергенцию и адвекцию потока возмущенной ПЭ на этапах формирования и развития ВСП различных типов.

МЕТОДОЛОГИЯ

Поля зонального ветра и температуры из базы данных реанализа MERRA-2 [Gelaro et al., 2017] с 1980 г. были проанализированы с целью уточнения даты и типа ВСП. Выявлено пять ВСП с расщеплением стратосферного полярного вихря: зимой 1984-1985 (дата ВСП – 01.01.1985), 2008-2009 (дата ВСП – 23.01.2009), 2012-2013 (дата ВСП – 05.01.2013), 2017-2018 (дата ВСП – 12.02.2018) и 2018-2019 гг. (дата ВСП – 27.12.2018). Все зарегистрированные ВСП с расщеплением стратосферного полярного вихря были главными. Для группы ВСП со смещением стратосферного полярного вихря было отобрано пять событий с

наиболее близкими характеристиками (положение стратосферного полярного вихря, величина и характер изменения температуры, рост амплитуд стационарных планетарных волн (СПВ)): зимой 1983-1984 (дата ВСП – 23.02.1984), 1986-1987 (дата ВСП – 19.01.1987), 2000-2001 (дата ВСП – 01.02.2001), два ВСП 2001-2002 гг. в декабре и феврале (даты ВСП – 28.12.2001 и 19.02.2002).

Для исследования вариаций волновой активности СПВ и нелинейных процессов, вызванных волновой активностью, в работе используется подход, заключающийся в анализе возмущенной потенциальной энстрофии (ПЭ – квадрат потенциальной завихренности) [Smith, 1983; Диденко и др., 2024]. Такой подход позволяет изучать эволюцию различных нелинейных процессов в средней атмосфере, связанных с распространением стационарных планетарных волн во время развития сложных ВСП, например, взаимодействия волн со средним потоком и между собой, дивергенцию и адвекцию потока ПЭ.

Для выявления предикторов формирования ВСП, сопровождающихся расщеплением и смещением стратосферного полярного вихря, и исследования внутренней динамики этого события были рассчитаны слагаемые в уравнениях баланса возмущенной ПЭ для СПВ1 и СПВ2. Для двух групп были выполнены построения временной изменчивости волновой активности и нелинейных волновых процессов. Оценивались три недели до и неделя после ВСП.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 и 2 представлены результаты расчета отдельных слагаемых для двух групп ВСП относительно даты события. Результаты на рис. 1а и 1в показывают, что при ВСП с расщеплением вклад СПВ1 и СПВ2 в изменчивость волновой активности обычно сопоставим, тогда как для ВСП со смещением вихря такая картина нехарактерна. В большинстве случаев при смещении вихря доминирует СПВ1, причем ее вариации в 2-4 раза превосходят изменения СПВ2; исключение составляют события 2012–2013, 2017–2018 и 2018–2019 гг., где вклад СПВ2 возрастает. Активность СПВ1 сохраняется до трех недель до ВСП, тогда как СПВ2 заметна примерно за 1,5 недели до события, что может быть связано с ролью СПВ1 в генерации вторичной СПВ2.

Изменения волновой активности связаны с межволновыми взаимодействиями при генерации вторичных СПВ. Результаты расчетов взаимодействий по типу волна-волна показали, что вклад межволновых процессов обычно меньше или сопоставим со слагаемыми, отвечающими за взаимодействие волны со средним потоком (показаны на рис. 2). Исключение составляет баланс возмущенной ПЭ для СПВ2 при ВСП с расщеплением вихря, где межволновой вклад достигает лишь около 10% от вклада взаимодействия волна-средний поток.

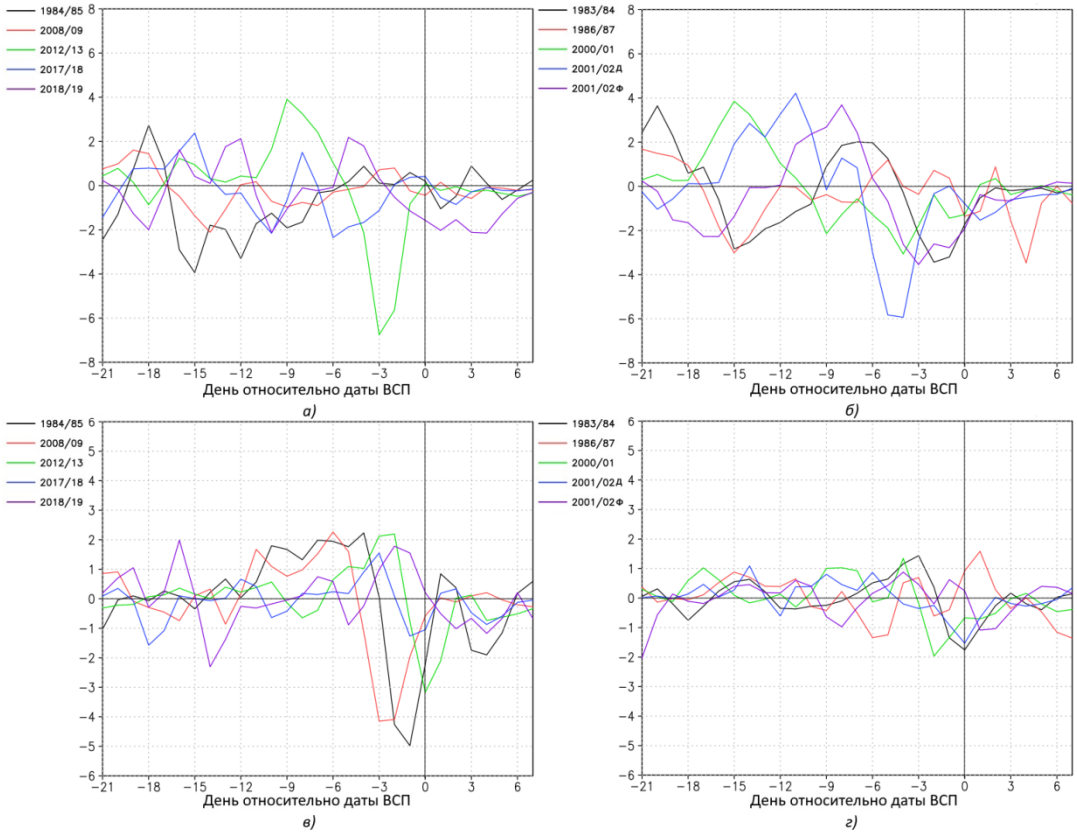

Рис. 1. Изменения волновой активности СПВ1 и СПВ2, усредненные в поясе 50-80° с.ш. и для высот 40-60 км, относительно даты ВСП с расщеплением (слева) и со смещением (справа): а) и б) – волновая активность СПВ1, в) и г) – волновая активность СПВ2

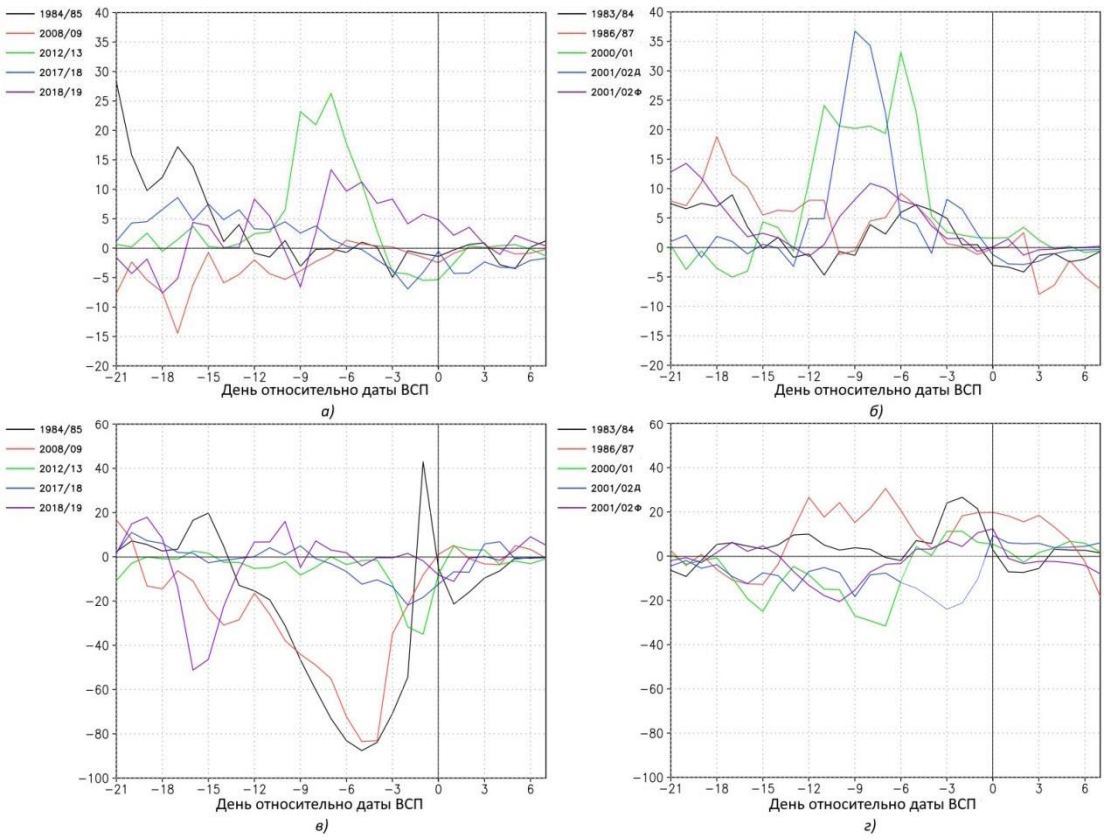

Рис. 2. Изменения взаимодействия СПВ1 и СПВ2 со средним потоком, усредненные в поясе 50-80° с.ш. и для высот 40-60 км, относительно даты ВСП с расщеплением (слева) и со смещением (справа): а) и б) – взаимодействие СПВ1-средний поток, в) и г) – взаимодействие СПВ2-средний поток

При ВСП со смещением вихря максимальные взаимодействия СПВ1–СПВ2 при генерации вторичной СПВ1 наблюдаются за 1-2 недели до события. Для этой же группы также характерны пики взаимодействий СПВ1–СПВ1 и СПВ1–СПВ3 при генерации вторичной СПВ2 за 5-10 дней и примерно за 10 дней до ВСП соответственно. Для ВСП с расщеплением вихря межволновые взаимодействия индивидуальны для каждого случая; при этом в большинстве процессов заметен наибольший вклад СПВ3.

Расчеты на рис. 2 показывают, что взаимодействия СПВ со средним потоком при двух типах ВСП выражены более отчетливо, чем вариации волновой активности. Для ВСП с расщеплением вихря вклад обменных слагаемых, связанных с СПВ2, обычно превышает вклад СПВ1; в отдельных случаях он больше в 3-4 раза. Для ВСП со смещением вихря вклады СПВ1 и СПВ2 со средним потоком, как правило, сопоставимы.

В работах по исследованию развития ВСП и их влияния на динамику и/или химические процессы отдельных атмосферных слоев анализ часто ограничивается 2 неделями, что, как показали результаты расчетов в этой работе, не всегда оправдано. Например, для ВСП со смещением вихря максимум взаимодействий СПВ1 со средним потоком обычно приходится на 5-9 дней до события, но в ряде случаев дополнительный максимум возникает за 17-20 дней. Для ВСП с расщеплением вихря максимум вклада СПВ2 со средним потоком, как правило, наблюдается за несколько дней до ВСП, за исключением зимы 2018–2019 гг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью выявления предикторов формирования главных ВСП со смещением и расщеплением стратосферного полярного вихря выполнен расчет в явном виде волновой активности СПВ, нелинейных межволновых взаимодействий и взаимодействий планетарных волн со средним потоком. На основе данных MERRA-2 для двух групп событий, включающих по пять ВСП, рассчитаны члены уравнений возмущенной потенциальной энстрофии для СПВ1 и СПВ2 за три недели до даты ВСП и неделю после.

Получено, что при ВСП с расщеплением вихря изменения волновой активности СПВ1 и СПВ2 обычно сопоставимы, тогда как при ВСП со смещением доминирует СПВ1. Отдельные межволновые взаимодействия вносят заметный вклад в баланс возмущенной ПЭ и в ряде случаев сопоставимы с обменными слагаемыми, хотя для СПВ2 при расщеплении вихря их вклад снижается до 10% от вклада взаимодействий со средним потоком. Для ВСП со смещением вихря максимум взаимодействий СПВ1–СПВ2 при генерации вторичной СПВ1 наблюдается за 1-2 недели до события, а СПВ1–СПВ1 при генерации вторичной СПВ2 – за 5-10 дней.

Взаимодействия волны со средним потоком также демонстрируют устойчивые режимы: при расщеплении вихря вклад СПВ2 со средним потоком обычно максимален, а при смещении вихря вклады СПВ1 и СПВ2 в целом сопоставимы. При этом ограничение анализа двухнедельным интервалом не всегда достаточно, поскольку максимумы взаимодействий могут возникать раньше. В целом результаты показывают, что различия между ВСП двух типов определяются не только волновой активностью, но и характером их взаимодействий со средним потоком.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда РНФ, грант №25-47-00122, https://rscf.ru/project/25-47-00122/.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.

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.

Butler A.H., Seidel D.J., Hardiman S.C., Butchart N., Birner T., Match A. Defining Sudden Stratospheric Warmings // Bull. Am. Meteor. Soc. 2015. V. 96. P. 1913–1928.

Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., et al. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2) // J. Clim. V. 2017. V. 30, N 13. P. 5419–5454.

Smith A.K. Observation of wave—wave interactions in the stratosphere // J. Atmos. Sci. 1983. V. 40. P. 2484–2493.