ЭФФЕКТЫ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ 23-ГО СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА В ВАРИАЦИЯХ ИНТЕНСИВНОСТИ СТРАТОСФЕРНОГО ПОЛЯРНОГО ВИХРЯ

Веретененко С.В.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

EFFECTS OF ENERGETIC SOLAR PROTON EVENTS OF THE TWENTY-THIRD SOLAR CYCLE ON INTENSITY OF THE STRATOSPHERIC POLAR VORTEX

Veretenenko S.V.

Ioffe Institute RAS, St. Petersburg, Russia

Effects of solar proton events (SPEs) occurring in the 23rd solar cycle (1996–2008), with energy of particles exceeding 90 MeV, on zonal velocity of western winds in the stratosphere were studied on the base of the NCEP/NCAR reanalysis data. It was revealed that most pronounced changes of zonal wind velocity associated with the events in the cold half a year take place at latitudes 50–80°N, which is the region of formation of the stratospheric polar vortex playing an important part in the mechanism of solar-atmospheric links. A noticeable increase of zonal wind velocity in this region was detected for the events occurring in the west phase of quasi-biennial oscillations of the atmosphere. The obtained results allow suggesting that intrusions of solar protons in the middle atmosphere may contribute to the polar vortex intensification, with a possible mechanism involving changes in chemical composition and temperature regime of the polar atmosphere.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-45-48

Стратосферный полярный вихрь представляет собой крупномасштабную циклоническую циркуляцию, формирующуюся в полярной атмосфере выше уровня 500 гПа и достигающую наибольшего развития в зимние месяцы. Состояние вихря оказывает существенное влияние на взаимодействие тропосферы и стратосферы [1], эволюцию динамических процессов в нижней атмосфере [2], а также играет важную роль в формировании эффектов солнечной активности в тропосферной циркуляции [3]. Расположение вихря создает благоприятные условия для работы ряда физических механизмов солнечно-атмосферных связей, включающих изменения скорости ионизации за счет космических лучей [4–5], что делает его важным связующим звеном между солнечной активностью и состоянием нижней атмосферы. В предыдущей работе [6] было обнаружено значительное усиление вихря во время серии солнечных протонных событий (СПС) января 2005 года, в ходе которых регистрировались частицы с энергиями более 165 МэВ, достигающие высот стратосферы. В данной работе продолжено исследование эффектов высокоэнергичных СПС в вариациях интенсивности стратосферного полярного вихря с использованием данных реанализа NCEP/NCAR [7].

На рис. 1 приведены изменения скорости ионизации во время серии СПС 15, 16, 17 и 20 января 2005 г. по данным SOLARIS-HEPPA [8]. Там же показаны вариации (отклонения от среднего уровня 1–14 января) максимальных значений скорости западного ветра (направленного с запада на восток) $\Delta U_{\max}$ в области формирования вихря, осредненных за период 15–20 января. Видно, что вариации $\Delta U_{\max}$ возрастают с высотой, как и скорость ионизации. Данные на рис. 1 позволяют предположить, что изменения скорости ионизации в полярной атмосфере в связи с СПС являются возможным фактором интенсификации вихря.

Рис. 1. Среднесуточные значения скорости ионизации q в области геомагнитных широт $60\text{--}90^\circ$ в ходе СПС января 2005 г. [8] и вариации максимальных значений скорости западного ветра $\Delta U_{\max}$.

Рассмотрим зональные (осредненные вдоль круга широты) значения скорости западного ветра в ходе СПС января 2005 г. На рис. 2а показаны вариации зональной скорости ветра ΔU_{zon} (отклонения от среднего уровня 1–12 января) на изобарической поверхности 50 гПа (~ 20 км) на разных широтах. Видно, что в ходе СПС скорость ветра заметно возрастала (на $5\text{--}10\text{ м·с}^{-1}$) в области широт $50\text{--}80^\circ\text{N}$ (область формирования вихря). Увеличение зональной скорости западного ветра в области $50\text{--}80^\circ\text{N}$ в связи с СПС наблюдалось во всей стратосфере и имело наибольшую амплитуду в ее верхней части (рис. 2б).

Аналогичное возрастание скорости ветра в области широт $50\text{--}80^\circ\text{N}$ было обнаружено во время СПС 5–6 и 13–14 декабря 2006 г., в ходе которых также регистрировались частицы с энергиями выше нескольких сотен МэВ [9], достигающие высот стратосферы. На рис. 3 приводятся временные изменения зональной скорости ветра в указанной области в ноябре-декабре 2006 г. для нижней стратосферы. Видно, что после начала событий скорость зонального западного ветра возрастала, достигая максимума на 3–4-й день. Отклонения U_{zon} от трендовых значений составляли $\sim 3\text{--}3.5\text{ м·с}^{-1}$.

Рис. 2. а) Отклонения зональной скорости западного ветра от невозмущенного уровня в ходе серии СПС января 2005 г. (поверхность 50 гПа); б) временной ход зональной скорости ветра в области широт 50–80°N в стратосфере в зимние месяцы 2004/2005 гг.

Рис. 3. Временной ход зональной скорости западного ветра в области широт 50–80°N на разных уровнях нижней стратосферы в ноябре–декабре 2006 г. (после вычета линейных трендов). Вертикальные линии показывают дни СПС (5, 6, 13 и 14 декабря 2006 г.).

Для дальнейшего исследования эффектов СПС методом наложения эпох были выбраны события, в ходе которых регистрировались возрастания потоков частиц с энергиями $E > 100$ МэВ, за 23-й солнечный цикл по данным каталога [9]. Согласно оценкам по формуле $E = a \cdot r \cdot b$, где E – энергия протона в МэВ, r – пробег в воздухе в г·см⁻², $a = 29.4$, $b = 0.57$ [10], частицы с энергиями $E \sim 100$ МэВ достигают стратосферного уровня 10 гПа (~30 км). События выбирались для холодного полугодия (октябрь–март), когда полярный вихрь наиболее интенсивен. За нулевой момент принимались дни начала СПС, для которых в течение 5 предыдущих суток аналогичные события не наблюдались. События, произошедшие на фоне внезапных стратосферных потеплений (разрушение вихря) исключались.

Исследование показало, что эффекты СПС в вариациях зональной скорости западного ветра, как правило, наиболее четко выражены для событий, имевших место при западной фазе квазидвухлетних осцилляций (КДО) атмосферы. Согласно [11], фаза КДО, определяемая по направлению ветров в экваториальной стратосфере, оказывает влияние на состояние полярного вихря (при западной фазе имеется тенденция к усилению вихря). На рис. 4 приведены средние вариации зональной скорости ветра в

области 50–80°N после вычета трендов для событий при западной фазе КДО. Данные показывают усиление западного ветра в области формирования вихря с максимумом на 4–5-й день после начала СПС. Увеличение скорости ветра составляет $\sim 3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ в верхней стратосфере (10 гПа) и $\sim 1.6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ в нижней (50 гПа).

Рис. 4. Средние изменения зональной скорости ветра в области широт 50–80°N на поверхностях 10 и 50 гПа для СПС с энергиями частиц $E > 100 \text{ МэВ}$ (западная фаза КДО). Число событий $N = 10$. Момент $\Delta t = 0$ соответствует дню начала события.

Возможной причиной усиления вихря являются изменения температурного режима полярной стратосферы вследствие изменения химического состава. Рост ионизации в связи с СПС способствует более интенсивному образованию окислов азота, участвующих в каталитическом разрушении озона [4]. Уменьшение содержания озона, который в условиях полярной ночи действует как парниковый газ, приводит к выхолаживанию полярной стратосферы, что, в свою очередь, может вызвать увеличение температурных контрастов между высокими и умеренными широтами и, соответственно, увеличение скорости западного ветра.

Таким образом, результаты исследования показали, что солнечные протонные события с энергиями частиц, достаточными для достижения высот стратосферы, могут влиять на циркуляцию средней атмосферы и способствовать интенсификации стратосферного полярного вихря.

Литература

1. Baldwin M.P., Dunkerton T.J. // Science, 2001, **294**, 581-584.
2. Walter K., Graf H.-F. // Atmos. Chem. Phys., 2005, **5**, 239-248.
3. Veretenenko S., Ogurtsov M. // Adv. Space Res., 2019, **64(1)**, 104-116.
4. Кривошук А.А., Репнев А.И. Воздействие космических факторов на озоносферу Земли. – М.: ГЕОС, 2009.
5. Tinsley B.A. // Rep. Progr. Phys., 2008, **71 (6)**, 66801.
6. Veretenenko S.V., Ogurtsov M.G. // Geomagn. Aeron., 2020, **60 (7)**, in press
7. Kalnay E. et al. // Bull. Amer. Meteorol. Soc., 1996, **77**, 437-472.
8. SOLARIS-HEPPA, <https://solarisheppageomar.de/solarprotonfluxes>
9. Logachev Y.I. et al. Catalogue of Solar Proton Events in the 23rd cycle of solar activity (1996–2008). – Moscow: 2016.
10. Базилевская Г.А. и др. // Геом. Аэрон., 2003, **43(4)**, 442-452.
11. Holton J.R., Tan H.C. // J. Atmos. Sci., 1980, **37**, 2200-2208.