ЭФФЕКТЫ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ ЯНВАРЯ 2005 ГОДА В ЦИРКУЛЯЦИИ СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЮЖНОГО ПОЛУШАРИЯ

Веретененко С.В.

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

EFFECTS OF SOLAR PROTON EVENTS OF JANUARY 2005 ON THE MIDDLE ATMOSPHERE CIRCULATION IN THE SOUTHERN HEMISPHERE

Veretenenko S.V.

Ioffe Institute RAS, St. Petersburg, Russia

Effects of solar proton events (SPEs) of January 2005 on the middle atmosphere circulation of the Southern hemisphere were studied, the NCEP-DOE reanalysis-2 data being used. It was found that circulation disturbances associated with the studied events reveal altitudinal dependence. In the upper stratosphere (30–10 hPa), where eastern transport of air masses dominates in the whole hemisphere in summer (December-February), a noticeable weakening of eastern winds at middle and high latitudes ($>40^{\circ}\text{S}$) and a strengthening of these winds at lower latitudes were detected. Unlike the upper stratosphere, circulation of the lower stratosphere (100–50 hPa) is characterized by a pronounced western flow at middle latitudes ($30\text{--}55^{\circ}\text{S}$). In the course of the studied SPEs, a weakening of eastern winds in the lower stratosphere took place at polar latitudes ($>60^{\circ}\text{S}$), whereas a maximum of western zonal flow was found to be shifted about 10 degrees to higher latitudes. A comparative analysis of January 2005 SPE effects on the stratosphere circulation in the Northern and Southern hemispheres is presented. The circulation disturbances in both hemispheres seem to be caused by changes in the radiation-thermal balance of the polar middle atmosphere, which may be due to its chemical composition changes (ozone depletion) associated with a considerable ionization increase in the course of the studied SPEs.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-75-78

Солнечные протонные события (СПС) представляют собой резкие возрастания потока солнечных протонов на орбите Земли, которые приводят к значительному росту скорости ионизации в полярной средней атмосфере. Высокие скорости ионизации, в свою очередь, способствуют развитию целого ряда геофизических эффектов: уменьшению содержания озона в полярной атмосфере, возмущениям глобальной электрической цепи, поглощению радиоволн в полярных шапках и т.д. [1]. В работе [2] было обнаружено, что мощные СПС января 2005 г. сопровождалось значительным усилением полярного вихря в стратосфере северного полушария. Цель данной работы – исследование возмущений циркуляции в связи с указанными событиями в стратосфере южного полушария.

Серия мощных протонных событий, обусловленная всплеском вспышечной активности на Солнце, произошла в январе 2005 г. на фазе спада

23-го солнечного цикла. В ходе СПС наблюдались возрастания потока протонов с энергиями >100 МэВ (рис. 1а), достигающих высот стратосферы. Наиболее мощное событие 20 января, в ходе которого регистрировались частицы с энергиями >500 МэВ, сопровождалось возрастанием скорости счета нейтронных мониторов (Ground Level Enhancement). Исследуемые СПС привели к значительному увеличению скорости ионизации в средней атмосфере высоких широт (рис. 1б).

Рис. 1. а) Интегральные потоки частиц с энергиями >5 , >50 и >100 МэВ в ходе СПС января 2005 г. по данным спутника GOES-11; б) скорость ионизации в области геомагнитных широт $60\text{--}90^\circ$ по данным SOLARIS-NEPPA [3].

Рассмотрим эффекты СПС в динамике средней атмосферы южного полушария. Характерной особенностью циркуляции стратосферы в летний период является восточный перенос, обусловленный направлением меридионального градиента температуры от полюса к экватору. В верхней стратосфере ($30\text{--}10$ гПа) восточный перенос наблюдается на всех широтах. Тем не менее, в нижней стратосфере ($100\text{--}50$ гПа) в области широт $30\text{--}50^\circ\text{S}$ обнаруживается западный поток, связанный, по-видимому, с постоянным контрастом температуры между ледниковой поверхностью Антарктиды и более теплым океаном умеренных широт.

На рис. 2 представлено распределение скорости ветра (U-компоненты, имеющей положительное направление с запада на восток) в верхней стратосфере (10 гПа) за 2 дня до начала и на 4-й день после начала исследуемой серии СПС. Видно, что в ходе СПС произошло усиление восточных ветров на низких широтах (расширение области ветров с $U < -20$ м·с $^{-1}$). В умеренных и высоких широтах $>40^\circ\text{S}$ наблюдалось заметное ослабление восточных ветров (уменьшение области, где скорость ветра $-20 \leq U \leq -15$ м·с $^{-1}$, и увеличение области с меньшими скоростями восточного ветра $-15 \leq U \leq -10$ м·с $^{-1}$). В нижней стратосфере (рис. 3) ослабление восточных ветров ограничено полярной областью $>60^\circ\text{S}$, при этом западный поток распространяется на более высокие широты. Данные на рис. 4 (изменения зональных значений скорости ветра U_{zon} в связи с СПС) показывают, что максимум зонального западного потока в нижней стратосфере смещается на $\sim 10^\circ$ в сторону южного полюса.

Рис. 2. Скорость ветра ($\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$) в верхней стратосфере (уровень 10 гПа) за 2 дня до начала серии СПС (а) и на 4-й день после начала (б) по данным реанализа-2 NCEP-DOE [4].

Рис. 3. То же, что на рис. 2, но для нижней стратосферы (уровень 50 гПа).

Рис.4. Зональная скорость ветра (U_{zon}) в верхней (а) и нижней (б) стратосфере до начала серии СПС (13 января) и на 4-й день после начала (18 января).

Сравнительный анализ эффектов СПС января 2005 г. в циркуляции стратосферы северного и южного полушарий приводится в таблице.

	Северное полушарие	Южное полушарие
Сезон	зима	лето
Характерная циркуляция	Стратосферный полярный вихрь (западный перенос в области 50-80°N на всех уровнях стратосферы)	Верхняя стратосфера: восточный перенос на всех широтах. Нижняя стратосфера: западный перенос в области широт 30-55°S
Эффекты СПС	Интенсификация полярного вихря на всех уровнях стратосферы	Верхняя стратосфера: Ослабление восточных ветров в области широт >40°S. Нижняя стратосфера: Ослабление восточных ветров в полярной области >60°S; смещение максимума западного потока к высоким широтам.
Возможный механизм	Разрушение озона в мезосфере и верхней стратосфере	
	Уменьшение поглощения в ИК области (полоса 9.6 мкм) Охлаждение полярной средней атмосферы Увеличение меридионального градиента температуры Усиление западного ветра	Уменьшение поглощения в УФ области (полоса Хартли) Охлаждение полярной средней атмосферы Уменьшение меридионального градиента температуры Ослабление восточного ветра

Возможной причиной наблюдаемых эффектов СПС является изменение химического состава полярной атмосферы. Рост скорости ионизации способствует образованию окислов азота и водорода, участвующих в каталитических циклах разрушения озона. Заметное уменьшение содержания озона в ходе СПС января 2005 г. отмечено в [5]. Озон может поглощать УФ излучение Солнца в широкой полосе Хартли (200–320 нм), а также уходящее излучение Земли и атмосферы в ряде колебательно-вращательных полос в ИК области (наиболее сильная полоса 9,6 мкм). Уменьшение содержания озона способствует изменению температурного режима полярной средней атмосферы, что в свою очередь может привести к изменениям циркуляции. Обнаруженные эффекты СПС согласуются с результатами численного моделирования [6].

Таким образом, проведенное исследование показало, что СПС января 2005 года сопровождалось возмущениями стратосферной циркуляции не только в северном (зимнем), но и в южном (летнем) полушарии.

Литература

1. Miroshnichenko L.I. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., 2008, **70**(2-4), 450-466.
2. Veretenenko S. // Adv. Space Res., 2021, **68**(4), 1814-1824.
3. SOLARIS-HEPPA, <https://solarisheppageomar.de/solarprotonfluxes>
4. Kanamitsu M. et al. // Bull. Amer. Meteorol. Soc., 2002, **83** (11), 1631-1644.
5. Jackman C.H. et al. // Atm. Chem. Phys., 2011, **11**, 6153-6166.
6. Krivolutsky A.A. et al. // Adv. Space Res., 2006, **37** (8), 1602-1613.