

**ВАРИАЦИИ АТМОСФЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
В ВЫСОКОШИРОТНОЙ ОБЛАСТИ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ
ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ
ЯНВАРЯ 2005 ГОДА**

Веретененко С.В.

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

**VARIATIONS OF ATMOSPHERIC CHARACTERISTICS IN THE
HIGH-LATITUDINAL AREA OF THE NORTHERN HEMISPHERE
DURING SOLAR PROTON EVENTS IN JANUARY 2005**

Veretenenko S.V.

Ioffe Institute RAS, St. Petersburg, Russia

Variations in different atmospheric characteristics in the Northern Hemisphere were studied in association with a considerable surge of solar activity including a powerful series of Solar Proton Events (SPE) in January 2005. It was shown that the studied events were accompanied and followed by considerable disturbances of the entire high-latitudinal atmosphere both near the Earth's surface and the upper levels. The largest changes in the stratospheric circulation (a sharp increase in intensity of the polar vortex at the isobaric levels from 100 to 2 hPa) coincided in time with a strong increase in flare activity, as well as in ionization rate in the mesosphere and the upper stratosphere during the period 15–23 January. An intensification of the vortex resulted in a pronounced decrease in temperature by ~10 K in the high-latitudinal stratosphere. The subsequent weakening of the vortex was accompanied by a sharp temperature rise resembling a minor stratospheric warming. In the lower atmosphere, a significant re-deepening (regeneration) of North Atlantic cyclones occurred near the south-eastern Greenland coast on the days following the onset of the SPE series. The obtained results suggest a possible link between disturbances in the high-latitudinal atmosphere observed from the middle January to the early February 2005 and solar activity phenomena occurring in the middle January.

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-61-64>

В середине января 2005 года, на фазе спада 23-го солнечного цикла, произошел значительный всплеск вспышечной активности на Солнце, который привел к целому ряду мощных гелиогеофизических явлений: серии солнечных протонных событий 15, 16, 17 и 20 января (последнее событие – Ground Level Enhancement, второе по мощности после события 23.02.1956 г.), сильные магнитные бури классов G3 и G4 (с максимальным значением $\Sigma K_p = 47.3$), глубокое форбуш-понижение галактических космических лучей с амплитудой ~16%, усиление авроральной активности и т.д. В данной работе рассматриваются изменения атмосферных характеристик в высоких широтах северного полушария, наблюдавшиеся в период с середины января по середину февраля 2005 года, и их возможная связь с указанным всплеском солнечной активности.

Данные на рис. 1а показывают резкое усиление вспышечной активности на Солнце, начавшееся 13.01 и продолжавшееся по 23.01 (по данным [1]). Вспышки M8.6 и X2.6 (15.01), X3.8 (17.01) и X7.1 (20.01) привели к серии мощных солнечных протонных событий (СПС) [2], в ходе которых регистрировались частицы с энергиями >100 МэВ, достигающие высот стратосферы. Во время событий 17.01 и 20.01 также наблюдались частицы с энергиями >500 МэВ, вызывающие наземные возрастания скорости счета нейтронных мониторов (GLE). На рис. 1б показаны изменения скорости ионизации в средней атмосфере по данным SOLARIS-NEPPA [3]. Видно, что наибольшие изменения скорости ионизации ($>1000 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$) имели место в мезосфере выше изобарического уровня 1 гПа (высоты более 50 км) 16–18 января.

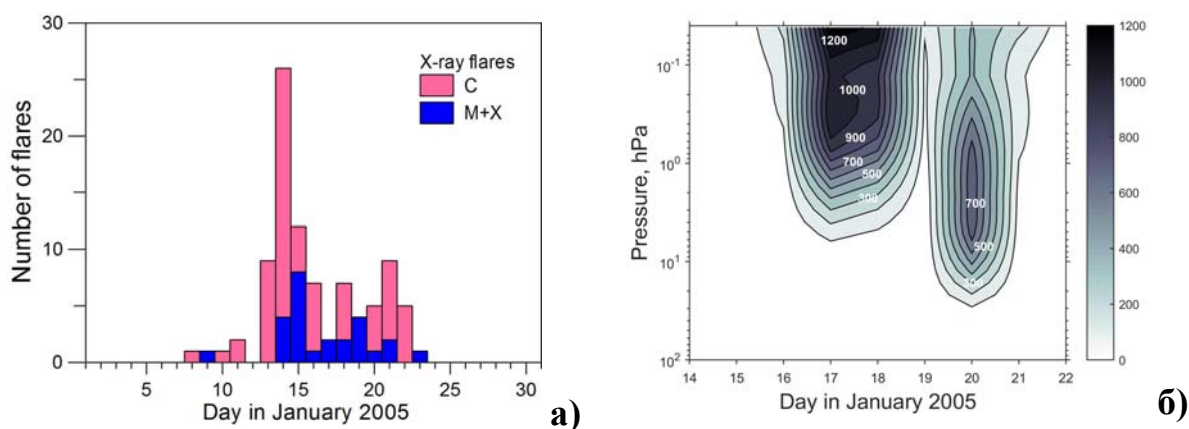


Рис. 1. а) Число (за сутки) рентгеновских вспышек классов C и M+X в январе 2005 г. б) среднесуточные значения скорости ионизации ($\text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$) в области геомагнитных широт $60\text{--}90^\circ$ во время СПС 15–20 января 2005 г. по данным [3].

Для исследования характеристик атмосферы использовались данные MERRA-2 [4]. Обнаружено, что в середине января 2005 г. произошло резкое усиление стратосферного полярного вихря. На рис. 2 показаны максимальные значения зональной (направленной вдоль круга широты) скорости ветра в вихре (после вычета линейного тренда) в январе. Видно, что увеличение скорости ветра имело места на уровнях стратосферы от 70 до ~ 2 гПа ($\sim 18\text{--}48$ км), при этом наибольшие отклонения от тренда ($\sim 20\text{--}24 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$) наблюдались на уровнях 10–7 гПа ($\sim 30\text{--}33$ км) 18–19 января. Сопоставление с данными на рис. 1 показывает, что начало интенсификации вихря совпало по времени с резким усилением вспышечной активности, а также со значительным возрастанием ($>1000 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$) скорости ионизации в мезосфере. После 20 января максимальные значения зональной скорости ветра в вихре начинают уменьшаться.

На рис. 3 показан временной ход зонально-осредненных (осредненных вдоль круга широты) значений зональной скорости ветра в умеренных и высоких широтах на изобарическом уровне 7 гПа, где наиболее ярко вы-

ражена интенсификация вихря. Видно, что наибольшее увеличение скорости ветра (на $\sim 25 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$) имело место на широтах $\sim 60\text{--}64^\circ\text{N}$. Усиление вихря в период 15–20 января вызвало понижение температуры (на $\sim 8\text{--}10 \text{ K}$) в области широт $> 60^\circ\text{N}$ (рис. 3а) в связи с уменьшением теплообмена между высокими и средними широтами. Последующее ослабление вихря в конце января привело к значительному повышению температуры стратосферы в области широт $> 70^\circ\text{N}$. Ослабление вихря и быстрый рост температуры (на $\sim 15\text{--}25 \text{ K}$ за неделю) указывают на развитие процесса, близкого по характеристикам к небольшому стратосферному потеплению.

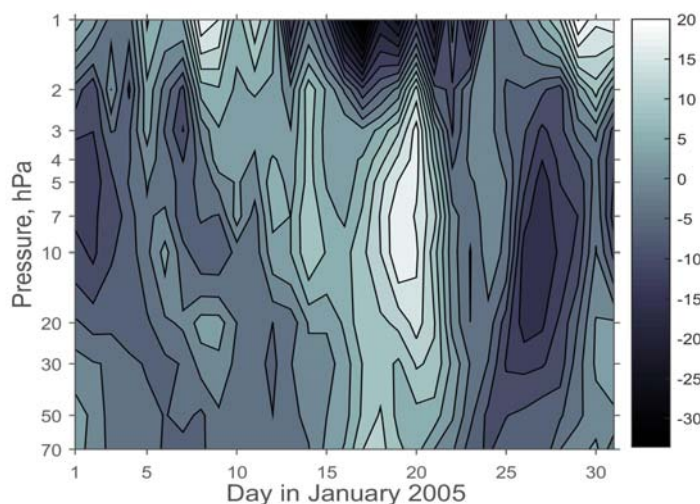


Рис. 2. Максимальные значения зональной скорости ветра ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$) в области $50\text{--}80^\circ\text{N}$ на разных уровнях стратосферы в январе 2005 г. (после вычета линейных трендов).

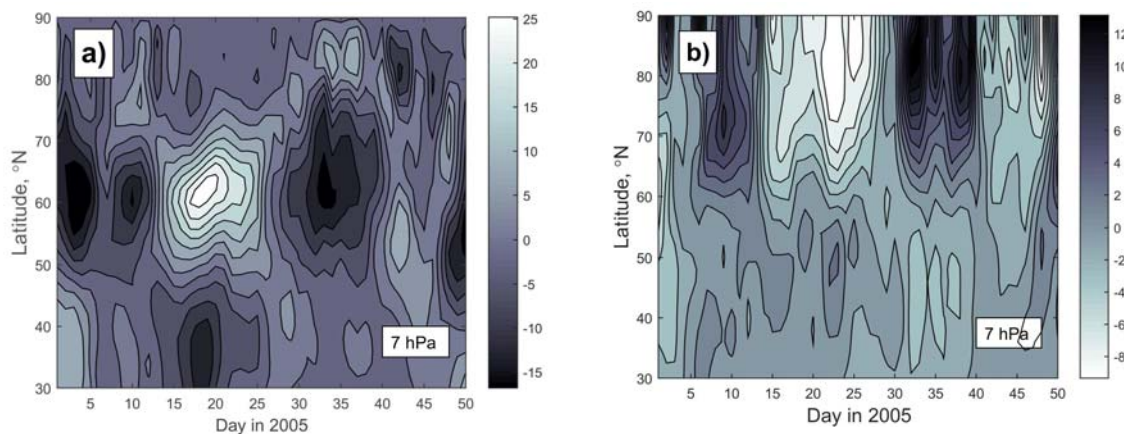


Рис. 3. а) Вариации (отклонения от линейных трендов) зонально-осредненных характеристик атмосферы на разных широтах в январе-феврале 2005 г. (изобарический уровень 7 гПа): а) зональная скорость ветра ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$); б) температура (K).

Одновременно с усилением вихря в стратосфере, в нижней атмосфере в период с 15 по 17 января у берега Гренландии произошло резкое вторичное углубление (регенерация) двух циклонов, достигших стадии максимального развития (рис. 4). На синоптической карте 15 января можно видеть два окклюдированных циклона с давлением в центрах 979 и 990 гПа.

17 января давление в центрах циклонов упало на 35 гПа, до 944 и 955 гПа, соответственно. Обнаруженный эффект согласуется с данными работы [5], где показано, что в ходе СПС с энергиями частиц >90 МэВ наблюдается более интенсивная регенерация циклонов у юго-восточного берега Гренландии (циклоны углубляются чаще и давление в них понижается больше, чем при невозмущенных условиях).

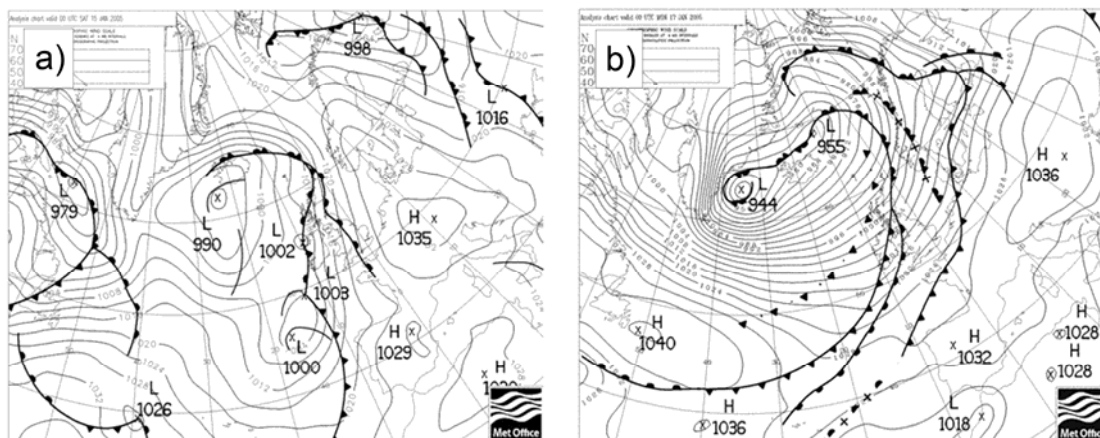


Рис. 4. Вторичное углубление циклонов у берега Гренландии в ходе серии СПС 15–20 января 2005 г.: а) положение циклонов на синоптической карте 15 января 2005 г.; б) то же 17 января 2005 г.

Приведенные выше данные показывают, что с середины января по середину февраля 2005 г. в стратосфере высоких широт наблюдались значительные возмущения циркуляции (вариации интенсивности полярного вихря) и соответствующие изменения температуры. В нижней атмосфере во время серии СПС 15–20 января имела место интенсификация вторичного углубления циклонов. Возможное влияние на развитие указанных возмущений оказали явления, связанные с резким усилением вспышечной активности на Солнце в период 13–23 января 2005 г., в том числе серия мощных солнечных протонных событий, вызвавшая значительный рост ионизации в средней атмосфере. Физический механизм обнаруженных эффектов может включать изменения скорости ионизации и связанные с ними изменения химического состава и температуры полярной атмосферы, а также проводимости и вертикальных электрических токов, влияющих на формирование облачности.

Литература

1. <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs/>
2. Logachev Yu.I. et al. Catalogue of Solar Proton Events in the 23rd Cycle of Solar Activity (1996-2008). Moscow: 2016.
3. SOLARIS-HEPPA, <https://solarisheppageomar.de/solarprotonfluxes>
4. Gelaro R., McCarty W., Suarez M.J. et al. // J. Climate, 2017, **30**, 5419-5454.
5. Веретененко С.В., Тайл П. // Геомагн. Аэрон., 2008, **48**, 542-552.