Эффекты мощных Солнечных Протонных Событий 23-го солнечного цикла в вариациях атмосферных характеристик высокоширотной области Северного полушария

39-я ВККЛ
Дубна
29.06 - 3.07 2026 г.
Секция ГЕО #42

Веретененко С.В.[1] , Коваль А.В.[2]

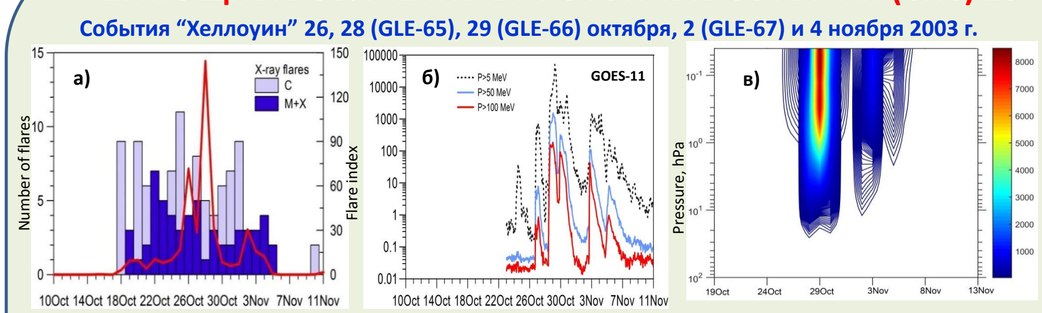
[1]*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, С. Петербург, E-mail: s.veretenenko@mail.ioffe.ru*

[2]*Санкт-Петербургский государственный университет, С. Петербург*

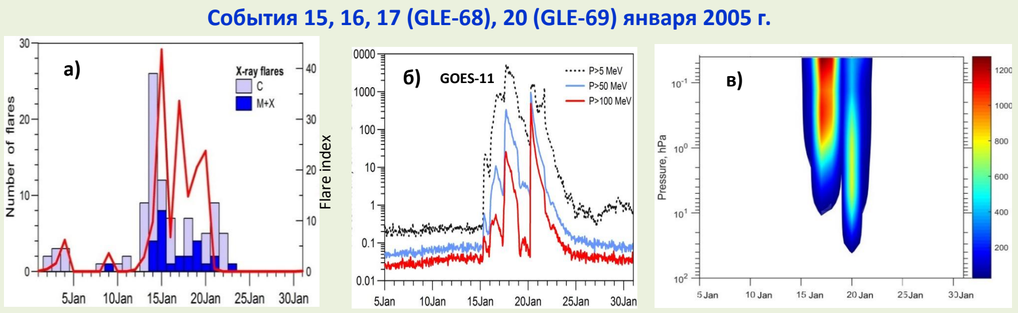
Исследованы вариации атмосферных характеристик в высоких широтах Северного полушария во время трех серий мощных солнечных протонных событий (СПС) 23-го солнечного цикла на основе данных метеорологического архива MERRA-2. Рассмотрены серии событий: «Хеллоуин» (26 октября – 4 ноября 2003 г.), 15-20 января 2005 г., 5-14 декабря 2006 г. Обнаружено, что в нижней атмосфере все исследуемые серии СПС сопровождались интенсификацией вторичного углубления (регенерации) внетропических циклонов у побережья Гренландии и возрастанием индекса Северо-Атлантической Осцилляции. В средней атмосфере наблюдалось усиление стратосферного полярного вихря, при этом наибольшее увеличение зональной скорости ветра имело место в североатлантическом регионе. В ходе всех исследуемых событий обнаружены значительные вариации волновой активности, характеризуемой амплитудой планетарных волн с зональными числами 1 и 2 и вертикальной компонентой потока Элиассена-Пальма. За интенсификацией полярного вихря, наблюдавшейся в ходе событий января 2005 г. и декабря 2006 г., последовало его резкое ослабление, которое привело к развитию стратосферного потепления. Полученные результаты позволяют сделать предположение о влиянии резких возрастаний скорости ионизации, обусловленными мощными СПС, на динамику и температурный режим высокоширотной атмосферы.

1. МОЩНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ПРОТОННЫЕ СОБЫТИЯ (СПС) 23-ГО ЦИКЛА

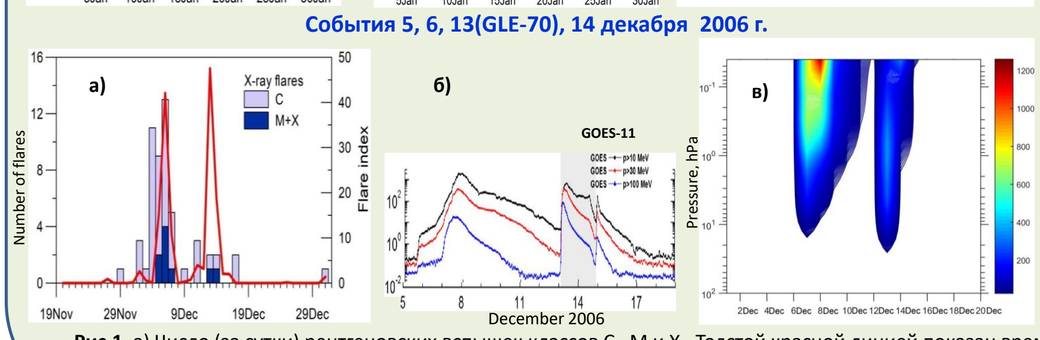
События "Хеллоуин" 26, 28 (GLE-65), 29 (GLE-66) октября, 2 (GLE-67) и 4 ноября 2003 г.



События 15, 16, 17 (GLE-68), 20 (GLE-69) января 2005 г.



События 5, 6, 13(GLE-70), 14 декабря 2006 г.



В ходе всех событий серий наблюдались возрастания потока частиц с энергиями **>100 МэВ**, т.е. достигающих высот стратосферы (**~32 км** и ниже).

В ходе 6 событий регистрировались частицы с энергиями **> 500 МэВ** (GLEs) (*Logachev et al., Catalogue of Solar Proton Events…, 2016*)

Наибольшие возрастания скорости ионизации – в **мезосфере** выше изобарического уровня **1 гПа (~50км).**

Среднесуточные значения скорости ионизации в области геомагнитных широт 60-90° выше 1 гПа:

- СПС 2005 г.: **>1000** см$^{-3}$ с$^{-1}$; Максимум: **1275** см$^{-3}$ с$^{-1}$
- Наиболее мощные СПС 2003 г. "Хэллоуин": **> 6000** см$^{-3}$ с$^{-1}$; Максимум: **8534** см$^{-3}$ с$^{-1}$
- СПС 2006 г.: **> 600** см$^{-3}$ с$^{-1}$; Максимум: **1260** см$^{-3}$ с$^{-1}$

Рис.1. а) Число (за сутки) рентгеновских вспышек классов C, M и X . Толстой красной линией показан временной ход вспышечного индекса Клечека; б) Интегральные потоки протонов по данным GOES-11 (см$^{-2}$с$^{-1}$ср$^{-1}$); в) среднесуточная скорость ионизации в области геомагнитных широт 60-90° (SOLARIS-HEPPA, https://solarisheppa.geomar.de)

2. ЭФФЕКТЫ СПС В НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЕ

2а. Вариации индекса Северо-Атлантической Осцилляции (NAO)

Январь 2005 **Октябрь-ноябрь 2003** **Декабрь 2006**

Рис.2. Вариации (отклонения от линейных трендов) индекса NAO (красная линия). Синими линиями показаны дни начала СПС.

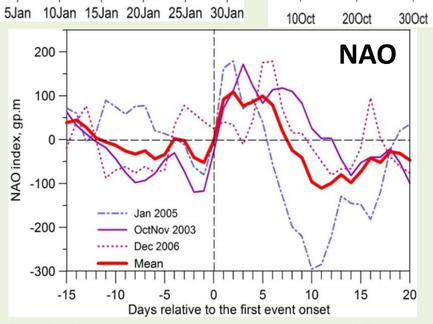


Рис.3. Средние изменения индекса NAO в ходе исследуемых серий СПС (толстая красная линия). Нулевой день – день первого события серии

Индекс NAO (North Atlantic Oscillation) характеризует градиент давления между высокими и субтропическими широтами и интенсивность зональной циркуляции в Северной Атлантике. **В ходе всех исследуемых серий СПС обнаружено возрастание индекса NAO** с максимумом на +2й…+5й день после первого события серии.

Обнаруженное увеличение NAO согласуется с **усилением зональной циркуляции** в умеренных широтах всего Северного полушария, характеризуемой индексом Блиновой, в ходе СПС с энергиями частиц >90 МэВ (*Веретененко и Пудовкин, Геом. Аэрон., 1993*)

2б. Интенсификация углубления циклонов у берегов Гренландии

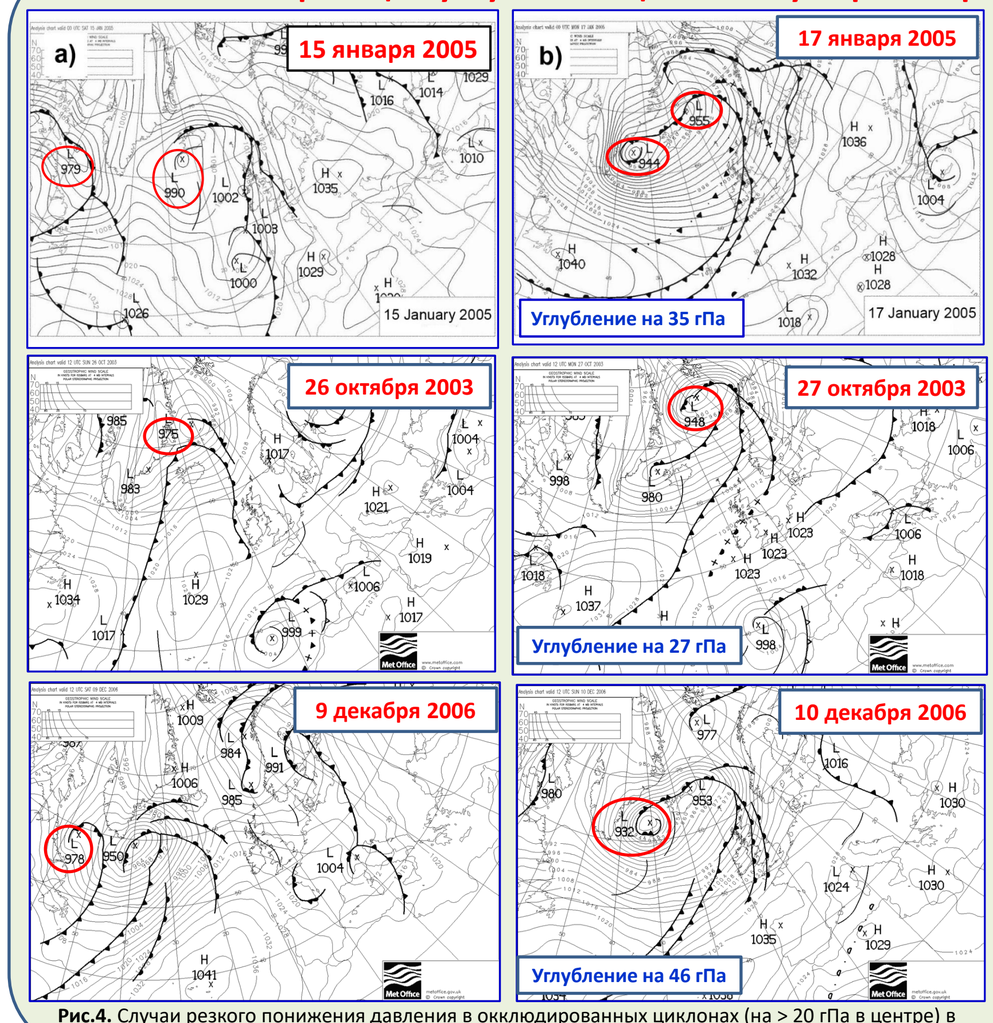


Рис.4. Случаи резкого понижения давления в окклюдированных циклонах (на > 20 гПа в центре) в ходе исследуемых серий СПС. Красным выделены центры углубляющихся циклонов.

В ходе исследуемых серий СПС наблюдалась **более интенсивная регенерация циклонов** в Северной Атлантике. *Регенерация – вторичное углубление циклонов, достигших стадии максимального развития (окклюзии).* Этот процесс происходит у побережья Гренландии (области высоких контрастов температуры, создающих условия для адвекции холода), при этом циклоны обычно углубляются на **5-10 гПа**.

На фоне **резкого и значительного возрастания скорости ионизации в ходе СПС** произошло 6 событий **вторичного углубления циклонов с падением давления более чем на 15 гПа.**

Обнаруженное усиление регенерации циклонов согласуется с ранее полученными результатами для СПС с энергиями >90 МэВ *(Veretenenko and Thejll, JASTP, 2004; Adv. Space Res., 2005; Geomagn. Aeron., 2008)*

3. ЭФФЕКТЫ СПС В СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ

3а. Усиление стратосферного полярного вихря

После начала серии СПС в средней атмосфере происходило **увеличение зональной** (направленной вдоль круга широты) **скорости ветра** (на ~6-8 м/с на уровне 50 гПа) **в широтном поясе 50-70°N** с максимумом на +3-й …+5-й день.

Широтный пояс 50-70°N – область формирования стратосферного полярного вихря

Январь 2005 **Октябрь-ноябрь 2003** **Декабрь 2006**

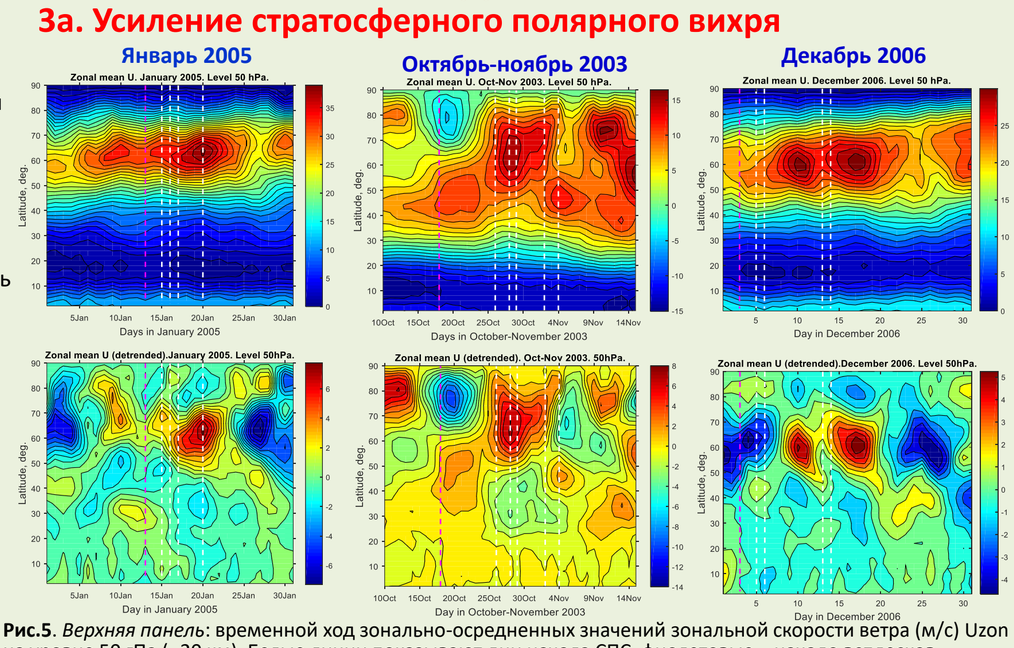


Рис.5. *Верхняя панель*: временной ход зонально-осредненных значений зональной скорости ветра (м/с) Uzon на уровне 50 гПа (~20 км). Белые линии показывают дни начала СПС, фиолетовые – начало всплесков вспышечной активности. *Нижняя панель*: то же, но после вычета трендов.

Январь 2005 **Октябрь-ноябрь 2003** **Декабрь 2006**

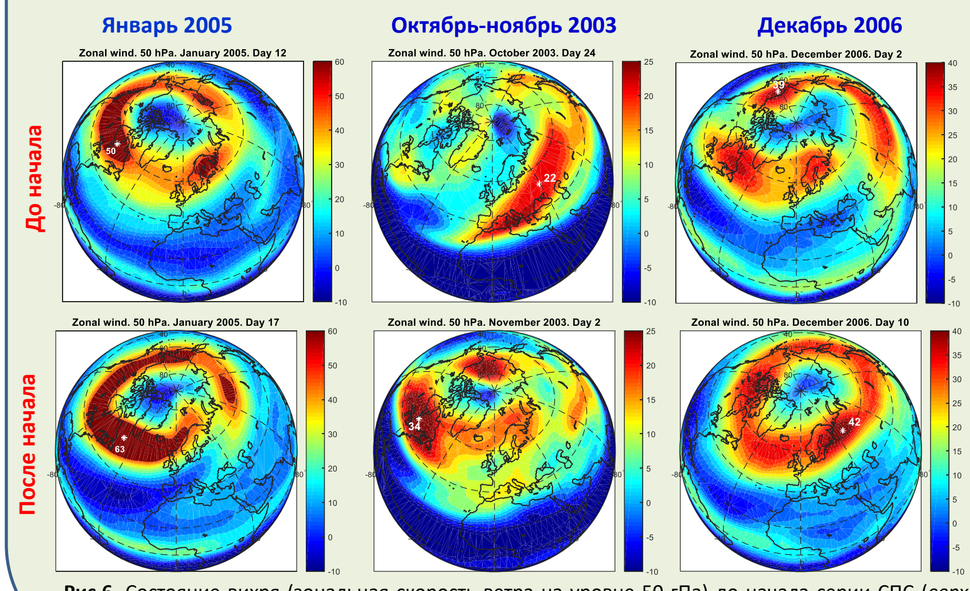


Рис.6. Состояние вихря (зональная скорость ветра на уровне 50 гПа) до начала серии СПС (*верхняя панель*) и через несколько дней после начала (*нижняя панель*). Темно-коричневым выделена область, где скорость превышает 40 м/с. Белые звездочки показывают максимумы скорости ветра.

Усиление полярного вихря наблюдалось в ходе всех трех серий СПС :

- Вихрь принимал более **компактную кольцевую форму**,
- **зональная скорость ветра возрастала**.

В ходе событий 2003 г. вихрь переместился из восточного в западное полушарие. **Наибольший рост скорости ветра** в вихре наблюдался **над Северной Атлантикой**.

3б. Вариации волновой активности и стратосферные потепления

Январь 2005 **Октябрь-ноябрь 2003** **Декабрь 2006**

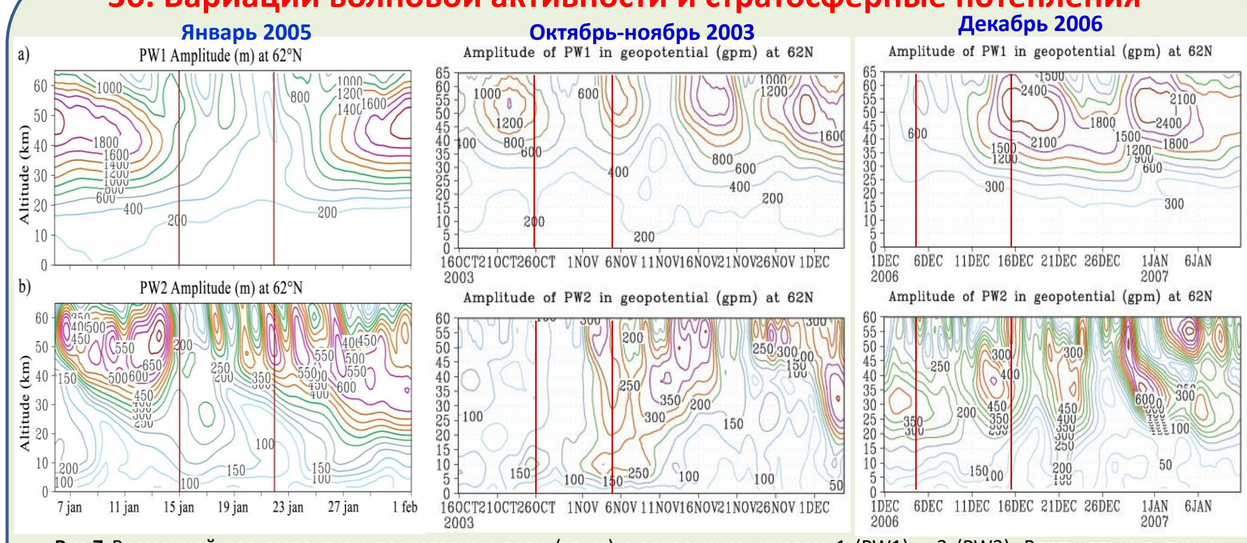
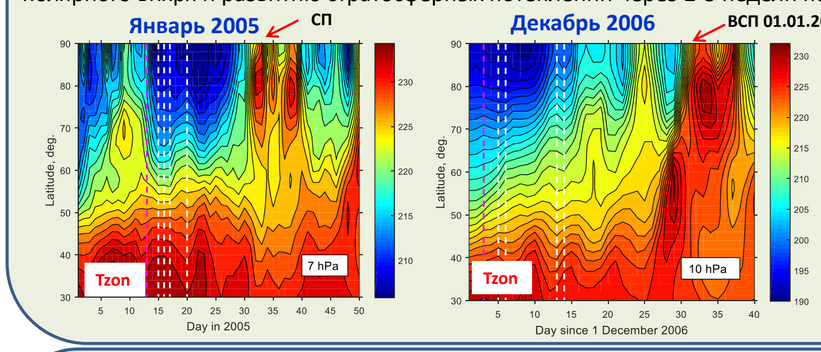


Рис.7 Временной ход амплитуды планетарных волн (гп. м) с зональным числом 1 (PW1) и 2 (PW2). Вертикальные линии показывают период повышенной скорости ионизации в средней атмосфере.

Усиление полярного вихря в первые дни после начала серий СПС происходило на фоне **ослабления волновой активности**: уменьшения амплитуды планетарных волн PW1 и PW2, а также уменьшения вертикальной компоненты потока Элиассена-Пальма, характеризующей обмен импульсом между волной и зональным потоком в стратосфере. В последующие дни наблюдалось **увеличение волновой активности**, чему могло способствовать усиление циклонических процессов (раздел 2б). Усиленная генерация планетарных волн привела к ослаблению полярного вихря и развитию стратосферных потеплений через 2-3 недели после начала серий СПС 2005 и 2006 гг.

Январь 2005 СП **Декабрь 2006** ВСП 01.01.2007



Развитие **стратосферных потеплений** (СП) наблюдалось в области широт **>60°N** после серий СПС 2005 и 2006 гг. (рис.8). Более мощное потепление, начавшееся 01.01.2007, отнесено к классу внезапных стратосферных потеплений (ВСП) минорного типа.

Рис.8. Временной ход зонально-осредненной температуры Tzon на разных широтах (стратосферные уровни 7 и 10 гПа). Вертикальные линии показывают дни начала СПС.

4. ВЫВОДЫ

В ходе исследуемых серий мощных Солнечных Протонных Событий, сопровождавшихся значительными возрастаниями скорости ионизации в мезосфере и верхней стратосфере, в высокоширотной области Северного полушария наблюдались возмущения, охватывающие как нижнюю, так и среднюю атмосферу:

- **Возрастание индекса Северо-Атлантической Осцилляции**
- **Интенсификация вторичного углубления (регенерации) циклонов у побережья Гренландии**
- **Усиление стратосферного полярного вихря**
- **Вариации волновой активности**
- **Развитие стратосферных потеплений (после серий СПС 2005 и 2006 гг.)**

Полученные результаты позволяют сделать предположение о влиянии резких возрастаний скорости ионизации в связи с СПС на динамику и температурный режим высокоширотной атмосферы. Возможный физический механизм включает изменения химического состава (содержание озона) и состояния облачности в высокоширотной области.