

Эффекты форбуш-понижений космических лучей в эволюции внетропических барических систем

И. В. Артамонова

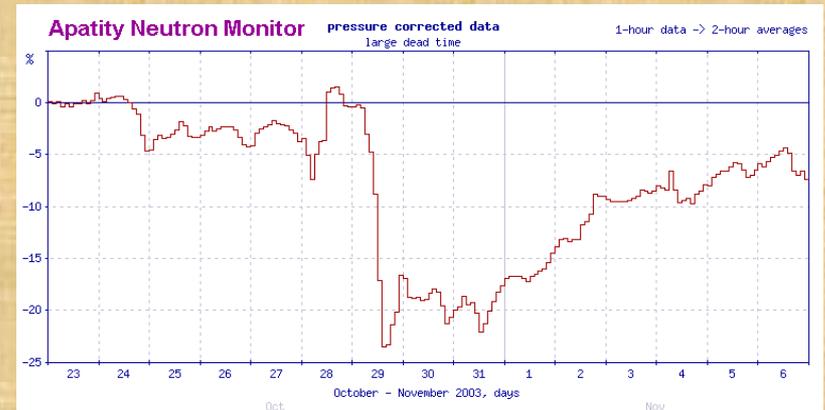
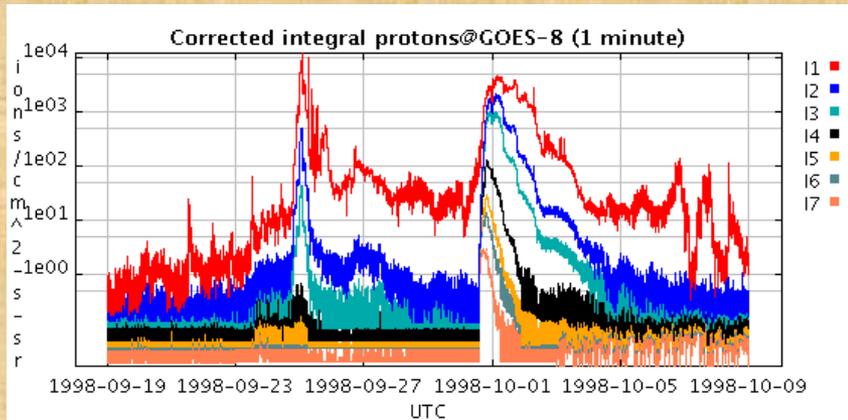
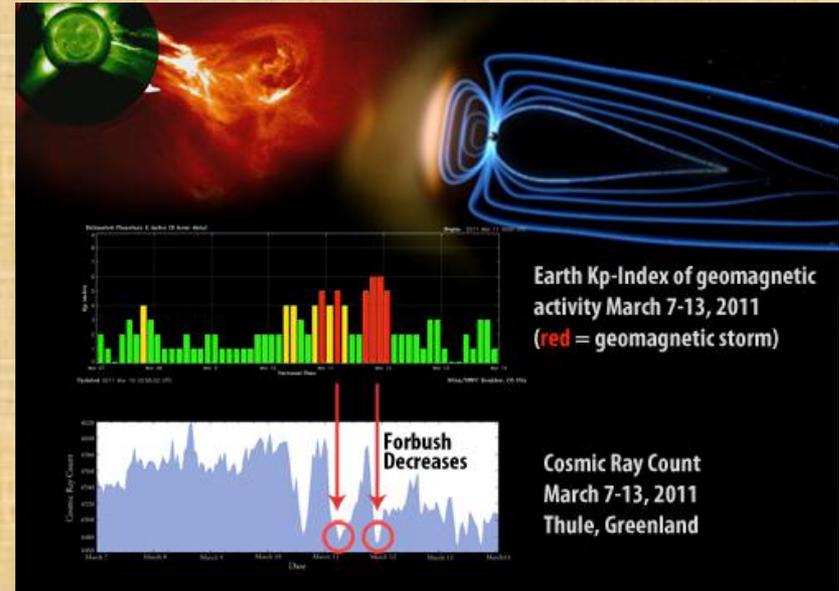
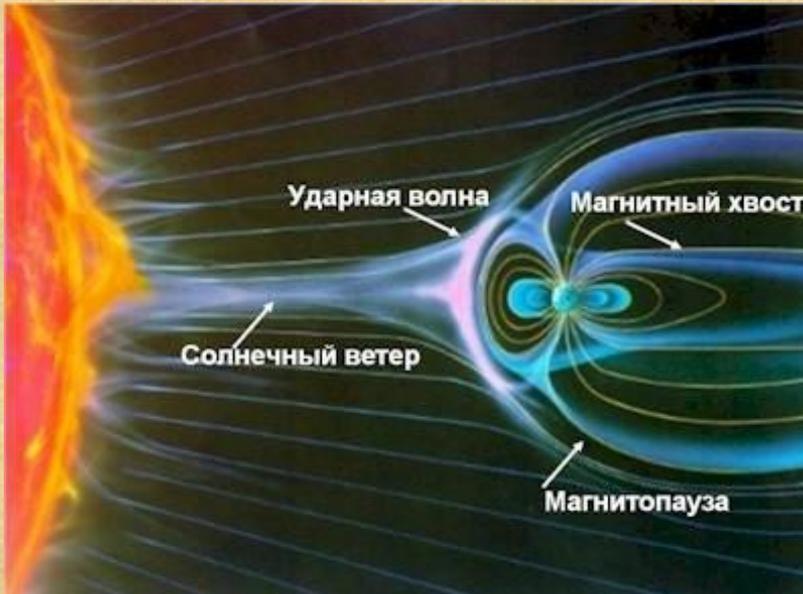
**ГГО им. А.И. Воейкова
2014**



Космические лучи как агент солнечной активности

- Энергии КЛ варьируются в диапазоне от $\sim 10^3$ эВ до $\sim 10^{19}$ эВ.
- Низкоэнергичная компонента КЛ, с энергиями от 10^5 эВ до 10^9 эВ достаточно сильно модулируются солнечной активностью и может выпадать в высокоширотных областях Земли.
- Максимум ионизации атмосферы вследствие влияния ГКЛ наблюдается на высотах $h \sim 10-25$ км, для СКЛ на высотах $h \sim 20-80$ км [Bazilevskaya, 2005].
- КЛ испытывают вариации на временных шкалах от нескольких минут до тысячелетий (в 11-летнем солнечном цикле - до 60%, в ходе ФПКЛ – до 30% [Bazilevskaya, 2000]).
- Т.о., КЛ можно рассматривать как один из наиболее вероятных агентов, обеспечивающим перенос возмущений от Солнца в атмосферу Земли.

Солнечные протонные события и форбуш-понижения ГКЛ



Эффекты короткопериодных вариаций космических лучей

Солнечные протонные события (СПС)

Усиление циклонической завихренности в Северной Атлантике (рост VAI индекса), рост индекса Блиновой, уменьшение зонального давления в поясе 50-75°с.ш.

[Tinsley, Deen, 1991; Veretenenko, Thjell, 2004; Пудовкин и Бабушкина 1992; Веретененко и Пудовкин, 1993]

Интенсификация североатлантических циклонов у юго-восточного побережья Гренландии

[Veretenenko and Thjell, JASTP 2004; Adv.Space Res. 2005; Geom.Aeron. 2008]

Форбуш-понижения ГКЛ (ФПКЛ)

Ослабление циклонической завихренности в Северной Атлантике (уменьшение VAI индекса), уменьшение индекса Блиновой, рост зонального давления в поясе 50-75°с.ш.



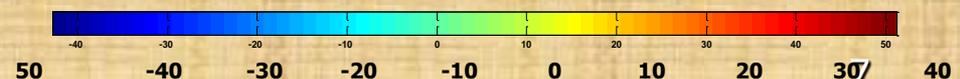
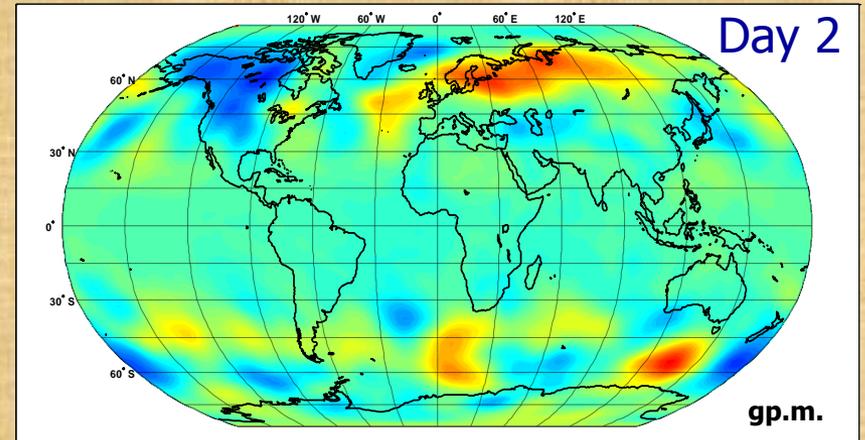
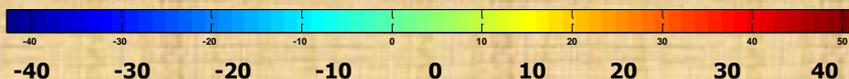
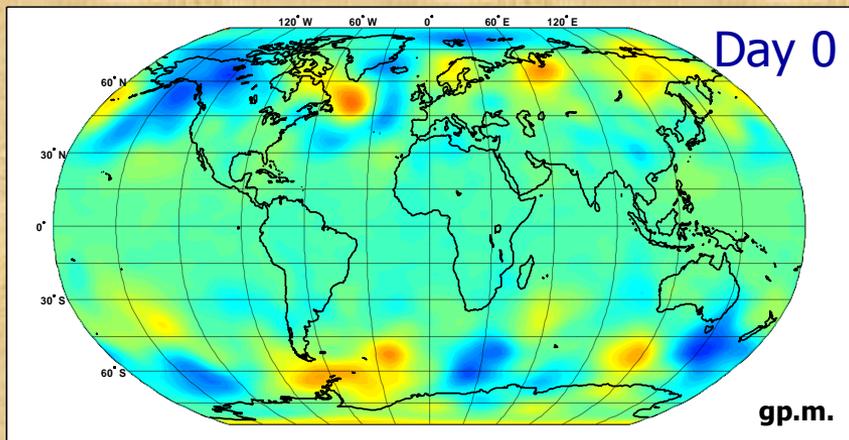
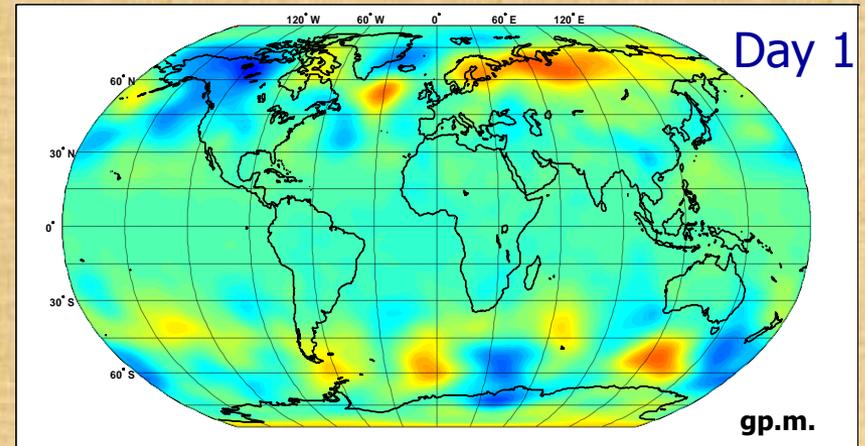
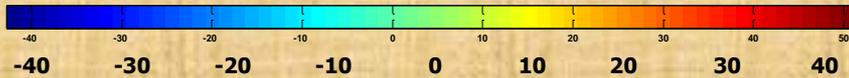
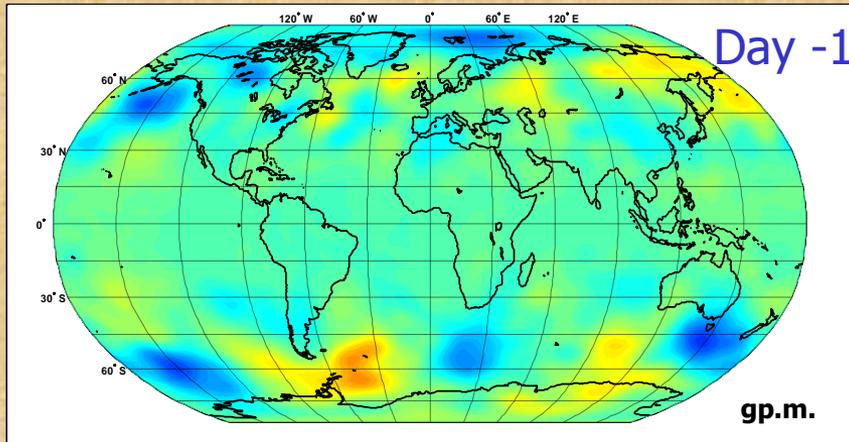
Цели работы:

- Исследование пространственного распределения вариаций приземного давления в северном и южном полушариях в ходе форбуш-понижений ГКЛ
- Синоптическая интерпретация наблюдаемых эффектов форбуш-понижений ГКЛ
- Сравнительный анализ барического отклика нижней атмосферы североатлантического региона на форбуш-понижения ГКЛ и всплески СКЛ

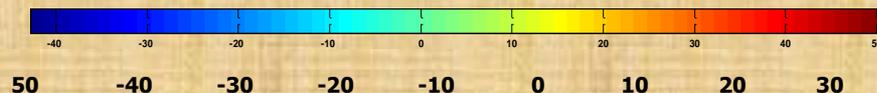
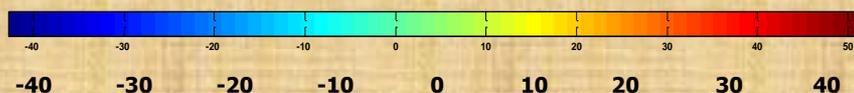
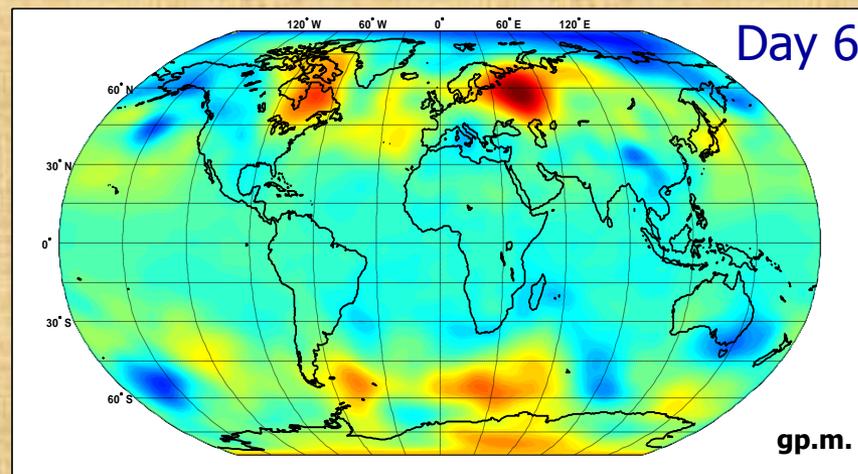
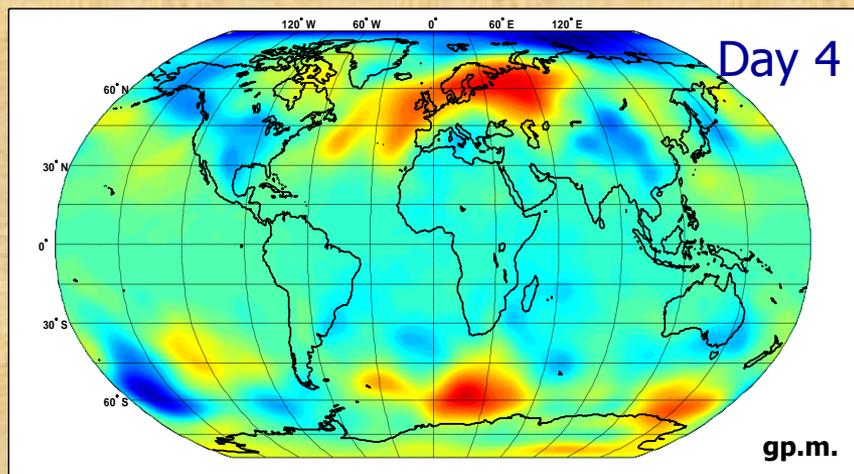
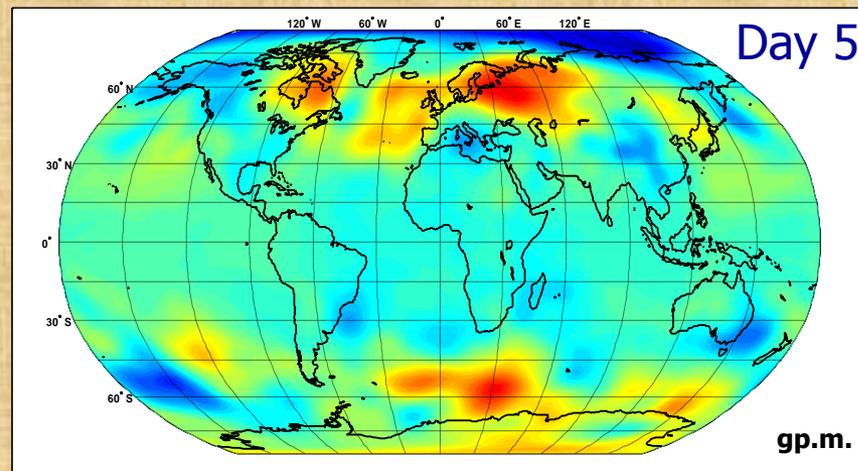
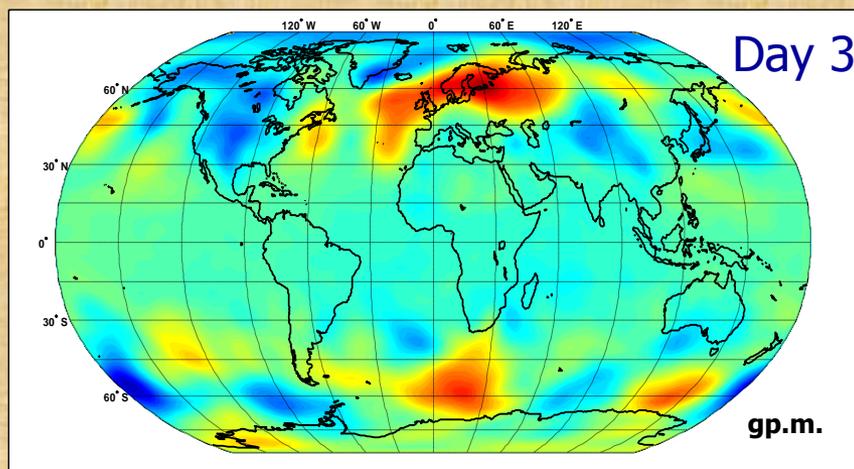
Данные, использованные в работе

- ✓ **Исследование проводилось методом наложения эпох:**
 - даты начала ФПКЛ являлись нулевыми днями для МНЭ.
- ✓ **Критерии отбора Форбуш-понижений:**
 - использовались данные нейтронного монитора ст. Апатиты (67°N, 33°E, геомагнитная широта 63°N);
 - период 1980-2006 г (октябрь-март);
 - отобрано 48 форбуш-понижений с амплитудой $\delta N/N > 2,5\%$,
 - отсутствие всплесков солнечных протонов с интенсивностью $I > 100$ протон•см⁻²•с⁻¹•ср⁻¹ для частиц с энергиями $E_p > 10$ МэВ в промежутке ± 3 дня относительно начала ФПКЛ.
- ✓ **Вариации давления:**
 - ежедневные данные реанализа NCEP/NCAR [Kalnay et al., 1996];
 - в узлах сетки 2.5x2.5 град;
 - вариации высоты (в гп.м.) изобарического уровня 1000 гПа.
- ✓ **Критерии отбора событий:**
 - использовались данные за октябрь-март, поскольку в данный период в северном полушарии на полярном и арктическом фронтах наблюдаются высокие градиенты температуры (до $\sim 1.5-1.7^\circ\text{C}/100$ км) и, как следствие, усиление процессов циклогенеза. В южном полушарии полярном и антарктическом фронтах в октябре-марте также наблюдаются достаточно высокие градиенты температуры (до $\sim 1-1.2^\circ\text{C}/100$ км), что способствует интенсивному циклогенезу.

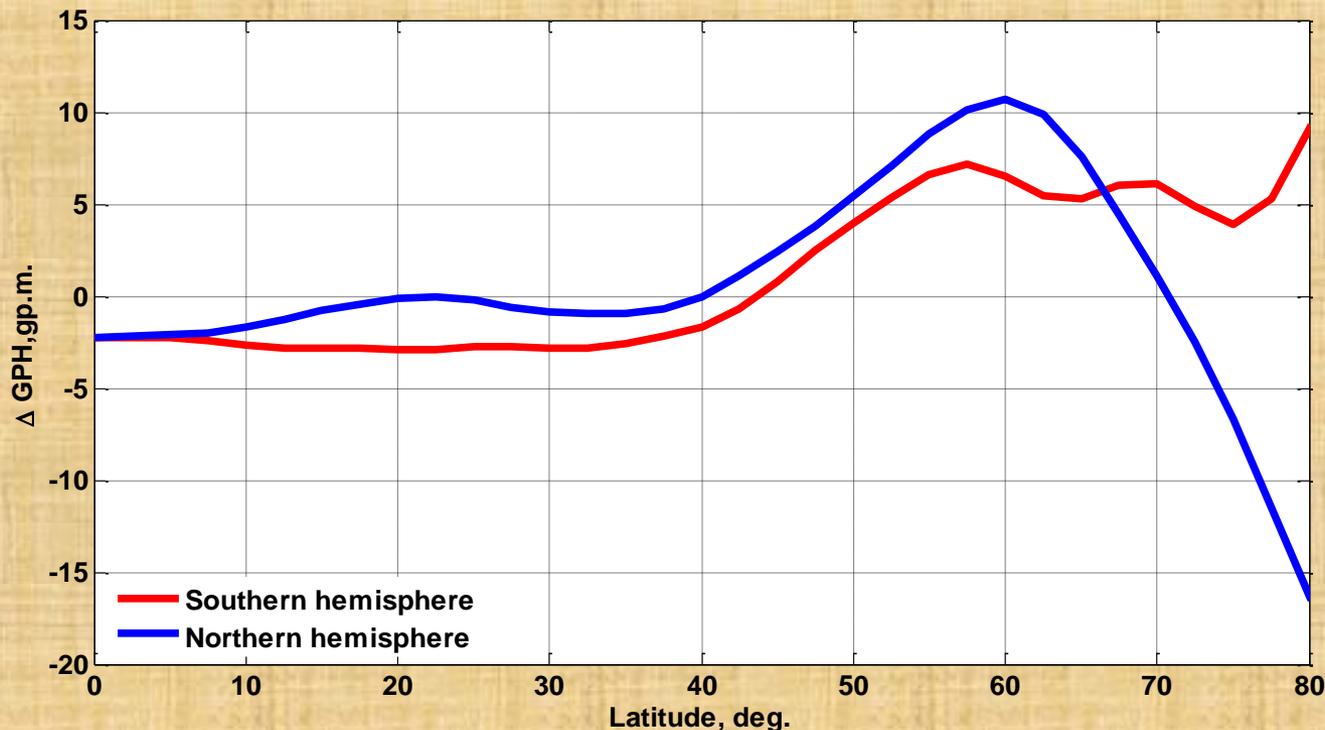
Отклонения приземного давления ΔP_{1000} от среднего уровня в ходе развития ФПКЛ



Отклонения приземного давления ΔP_{1000} от среднего уровня в ходе развития ФПКЛ

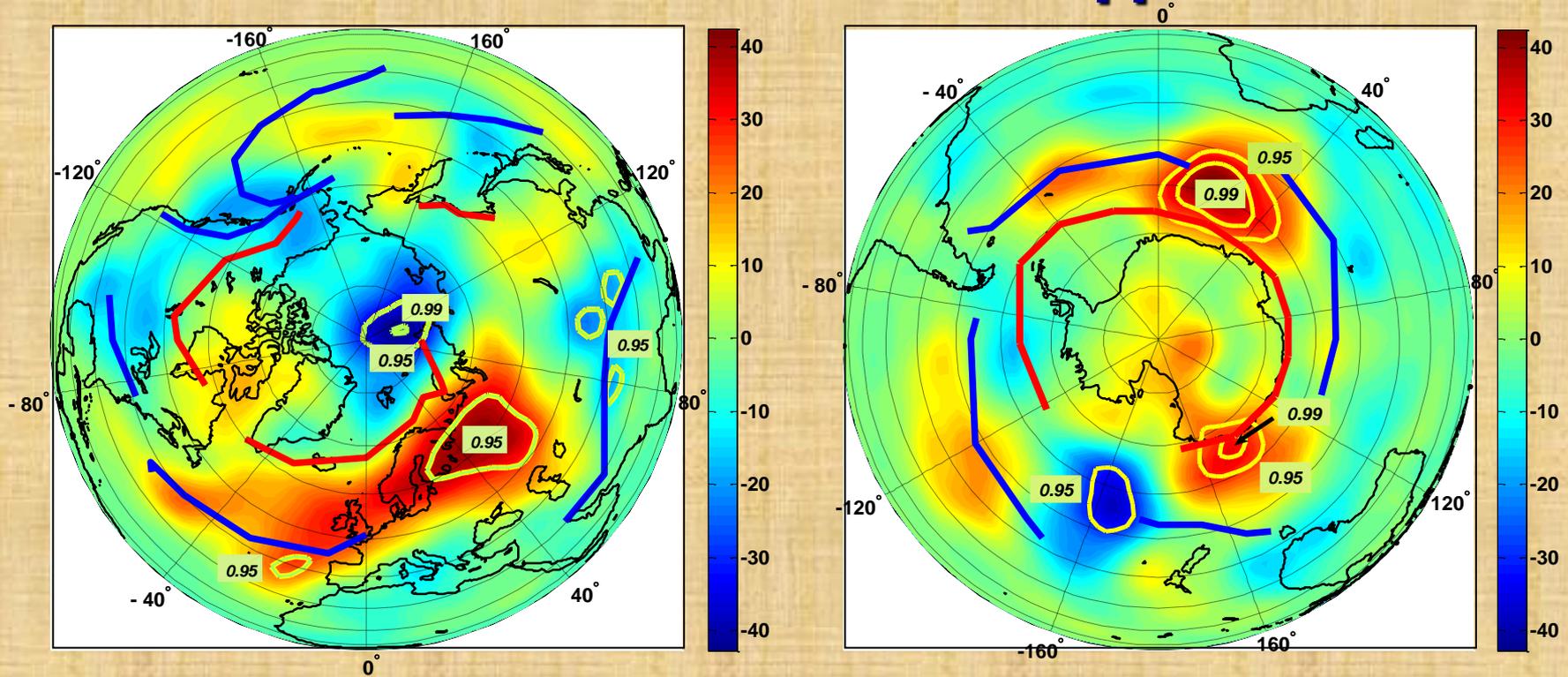


Отклонения осредненных по долготе высот геопотенциальной поверхности 1000 гПа на 4^й день после начала ФПКЛ



Северное полушарие: максимум $\Delta P \sim 10$ гп.м на широте $\sim 60^\circ$ N.
Южное полушарие: максимум $\Delta P \sim 7$ гп.м на широте $\sim 55^\circ$ S.

Пространственное распределение отклонений давления на 4^й день после ФПКЛ и положение основных климатических фронтов



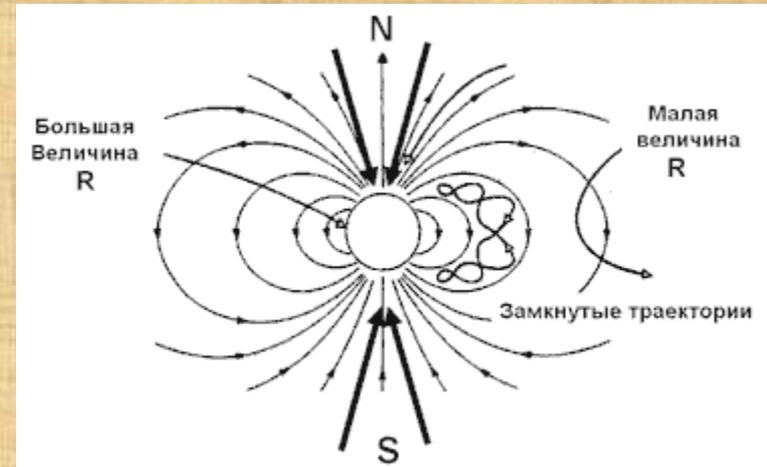
Области максимальных вариаций давления связаны с положением полярных (синие линии) и арктических/антарктических (красные линии) атмосферных фронтов. Основные атмосферные фронты являются областями высоких температурных контрастов, необходимых для развития внетропических барических образований.

Жесткость геомагнитного обреза

Согласно теории Штермера, движение заряженной частицы в магнитном поле Земли определяется ее жесткостью R , т.е. способностью двигаться перпендикулярно силовым линиям магнитного поля:

$$R = \frac{pc}{ze}$$

где p – импульс,
 c – скорость света,
 z – заряд частицы,
 e – заряд электрона
[напр., Дорман, 1975].

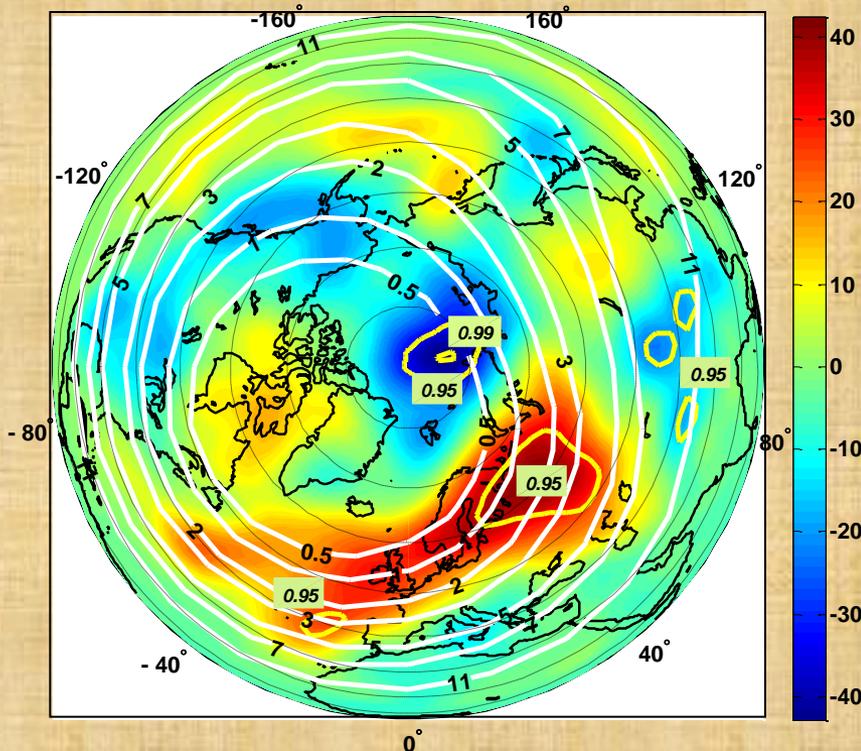


Кинетическая энергия частицы связана с её жесткостью формулой:

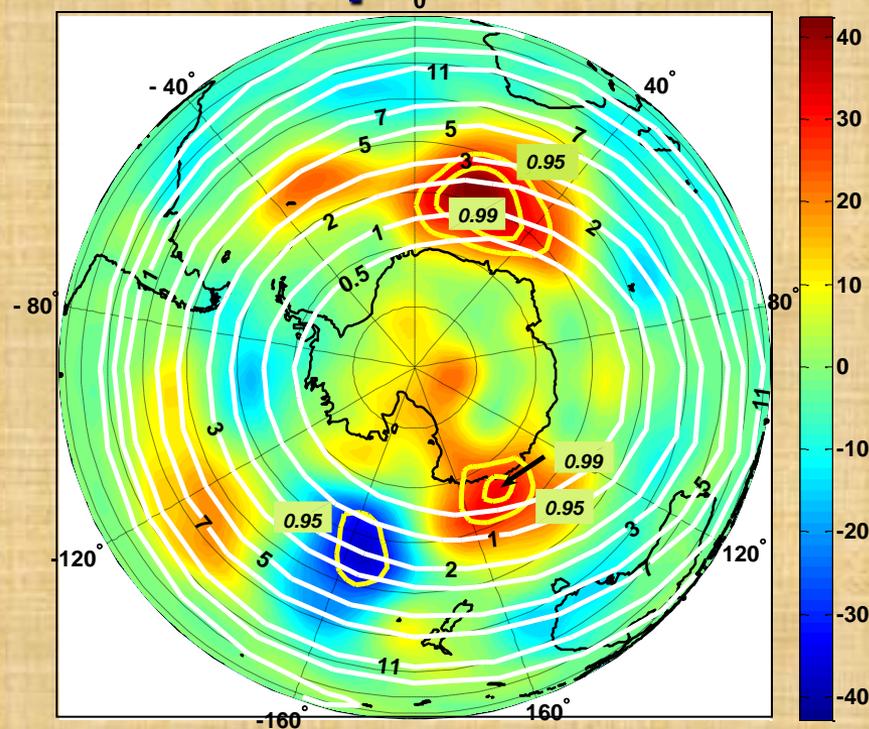
$$E_{кин} = \sqrt{E_0^2 + e^2 R^2} - E_0$$

где E_0 – энергия покоя частицы
 $E_0 = m_0 c^2$, m_0 – масса частицы,
 c – скорость света, e – заряд частицы,
 R – геомагнитная жесткость.

Пространственное распределение отклонений давления на 4^й день ФПКЛ и жесткости геомагнитного обрезания



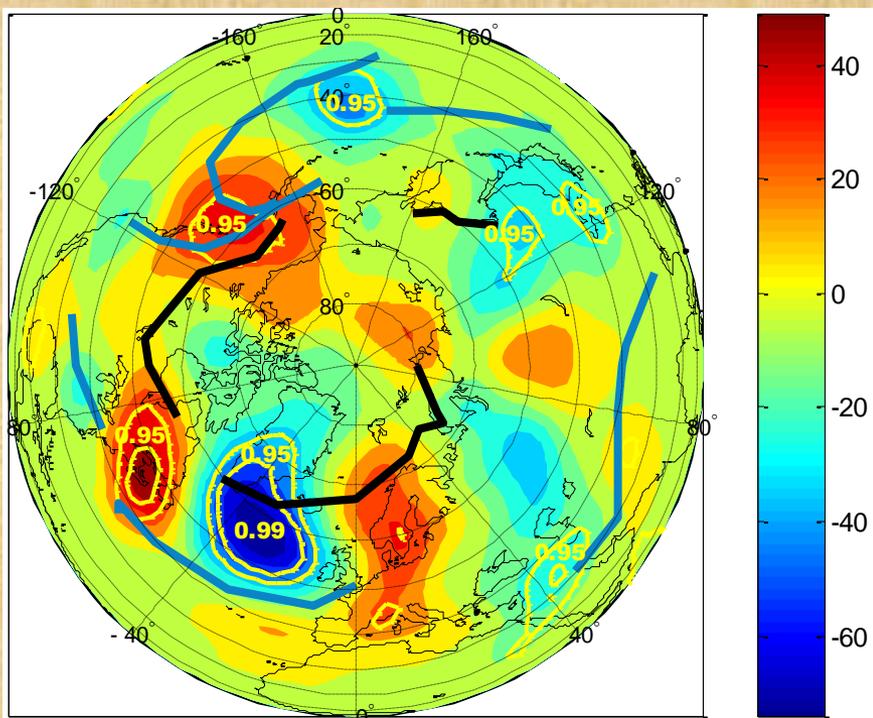
$R \sim 0,7 - 3,5$ ГВ; $E_{min} \sim 0,2 - 2,7$ ГэВ



$R \sim 0,5 - 3$ ГВ; $E_{min} \sim 0,1 - 2,2$ ГэВ

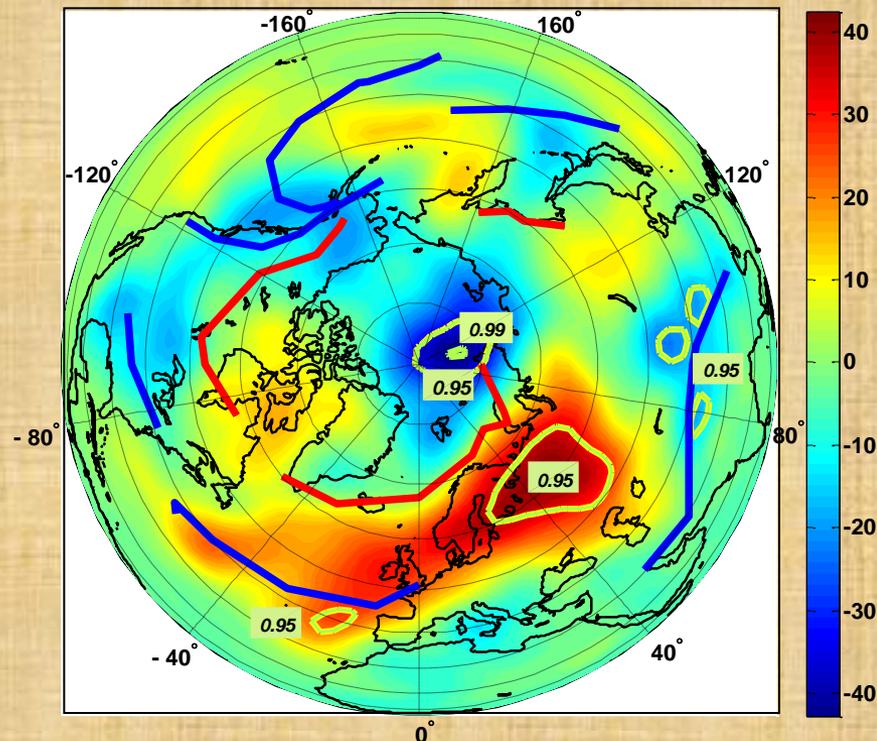
Наибольшие вариации давления в ходе ФПКЛ в северном и южном полушариях наблюдаются в высокоширотных областях с низкими пороговыми значениями жесткости геомагнитного обрезания. Высыпающаяся в указанных областях низкоэнергичная компонента ГКЛ в высокой степени модулируется солнечной активностью. В тихоокеанском секторе эффекты ФПКЛ не были обнаружены, т.к. жесткости геомагнитного обрезания в районе тихоокеанской ветви полярного фронта составляют $R \sim 2-9$ ГВ, что соответствует пороговым энергиям космических лучей $E_{min} \sim 1.3-6.1$ ГэВ.

Различия тропосферного отклика на: Солнечные протонные события Форбуш-понижения ГКЛ



- рост скорости ионизации атмосферы;
- тах понижение давления ~ 100 гп. м на изобарическом уровне 300 гПа (9 км) в 1^й день после начала SPE;
- фаза восстановления давления 2-3 дня;
- причина - регенерация циклонов в Северной Атлантике.

[Veretenenko, Thejll, 2013]



- уменьшение скорости ионизации;
- тах рост давления ~ 50 гп. м на изобарическом уровне 1000 гПа (0 км) на 3^й-4^й день после начала события;
- фаза восстановления давления 5-6 д.;
- причина – интенсификация блокирующих антициклонов.

[Artamonova, Veretenenko, 2014]

Основные результаты работы

- Обнаружено повышение атмосферного давления в умеренных широтах северного и южного полушарий в связи с ФПКЛ.
- Согласно результатам синоптического анализа, наблюдаемый рост давления обусловлен ослаблением циклонической и усилением антициклонической активности на арктических/антарктических и полярных фронтах умеренных и высоких широт.
- Проведена оценка минимальных энергий частиц космических лучей, которые выпадают в областях основных атмосферных фронтов и могут принимать участие в процессах, влияющих на эволюцию барических систем умеренных и высоких широт.
- Проведен сравнительный анализ барического отклика атмосферы на короткопериодные вариации солнечных и галактических космических лучей. Показано, что в ходе ФПКЛ скорость реакции атмосферы и амплитуда вариации давления меньше, чем при всплесках СКЛ.
- Показано, что форбуш-понижения ГКЛ и солнечные протонные события, дающие противоположные по знаку изменения скорости ионизации, приводят к интенсификации внетропических барических систем противоположных типов (циклонов и антициклонов).

Спасибо за внимание!