



Научно-образовательный центр НЕВОД



38 Всероссийская конференция по
космическим лучам

Исследование жестких спектров форбуш-эффектов в 25-м цикле солнечной активности

П.А. Сухова, И.И. Астапов, Н.С. Барбашина, П.С. Кузьменкова,

Ю.Н. Мишутина

pasukhova@mephi.ru

Москва

2024 г.



Введение

Форбуш-эффекты

- Резкое понижение интенсивности первичных космических лучей, вызванное повышенным рассеянием космических лучей возмущениями межпланетного магнитного поля.
- Спектр вариаций можно считать степенным:

$$\frac{\delta J(R, t)}{J_0(R)} = \begin{cases} A(t) \cdot R^{-\alpha(t)}, & R < R_u \\ 0, & R \geq R_u \end{cases},$$

- Значения показатель спектра $\alpha(t)$ ограничиваются диапазоном 0 до 2, верхний предел $R_u \sim 100-200$ ГВ.
- На всем диапазоне жесткостей α определяется **неоднозначным образом**.

Наземные установки

- характерные жесткости составляют десятки – сотни ГВ,
- влияние атмосферных, магнитосферных, вариаций → метод функций связи:

$$\frac{\delta N(t)}{N} = \int_{R_c}^{R_u} \frac{\delta J(R, t)}{J(R)} \cdot W(R) dR$$

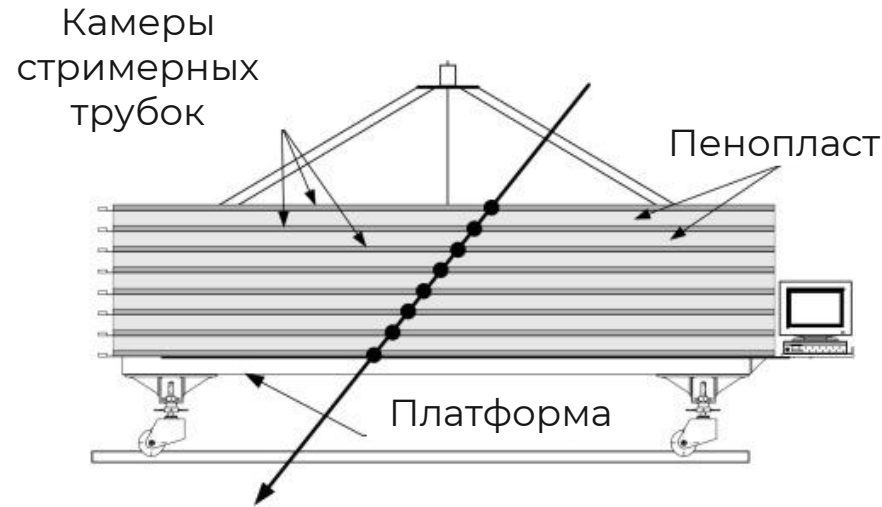
$\frac{\delta N(t)}{N}$ - вариации наземного детектора, $W(R)$ - функция связи, R_c - жесткость геомагнитного обрезания.

Спутниковые эксперименты

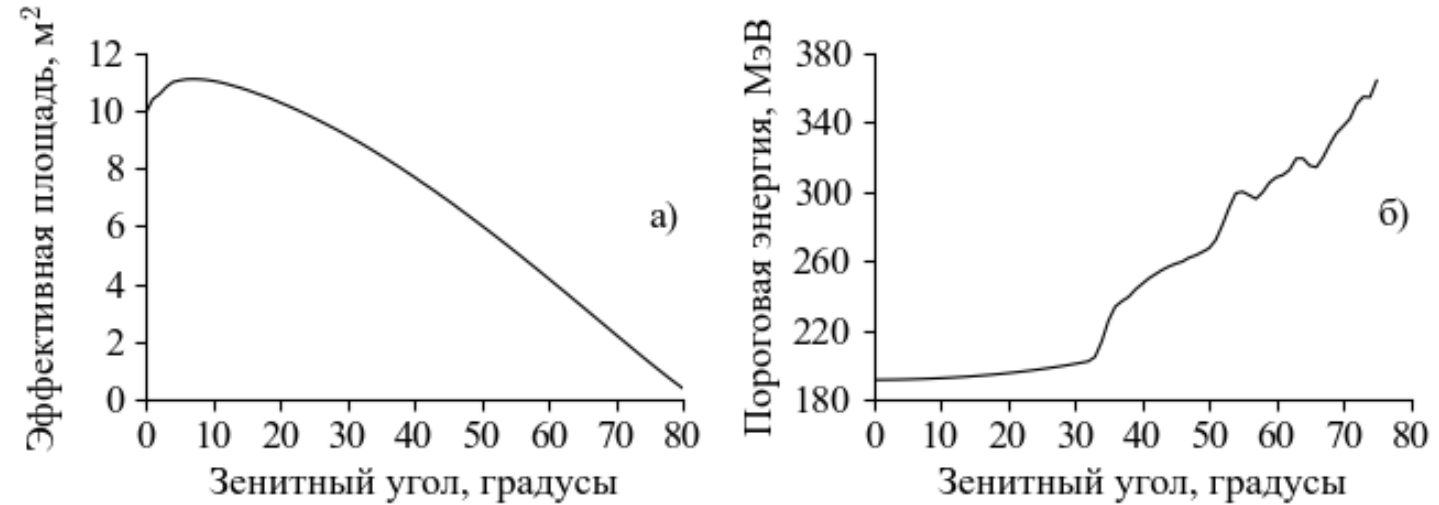
- статистически обеспечены на жесткостях, составляющих десятки ГВ,
- прямые измерения вариаций первичного спектра.

Для анализа жесткостных характеристик в широком диапазоне жесткостей требуется совместный анализ.

Мюонный годоскоп УРАГАН



- Координатно-трековый детектор, регистрирующий мюоны космических лучей в диапазоне от 0° до 84° .
- Состоит из четырех супермодулей площадью $S_0 = 11.5 \text{ м}^2$ каждый.
- Диапазоны зенитных углов с приблизительно равной статистикой: $0^\circ - 17^\circ$, $17^\circ - 26^\circ$, $26^\circ - 34^\circ$, $34^\circ - 44^\circ$, $44^\circ - 84^\circ$.

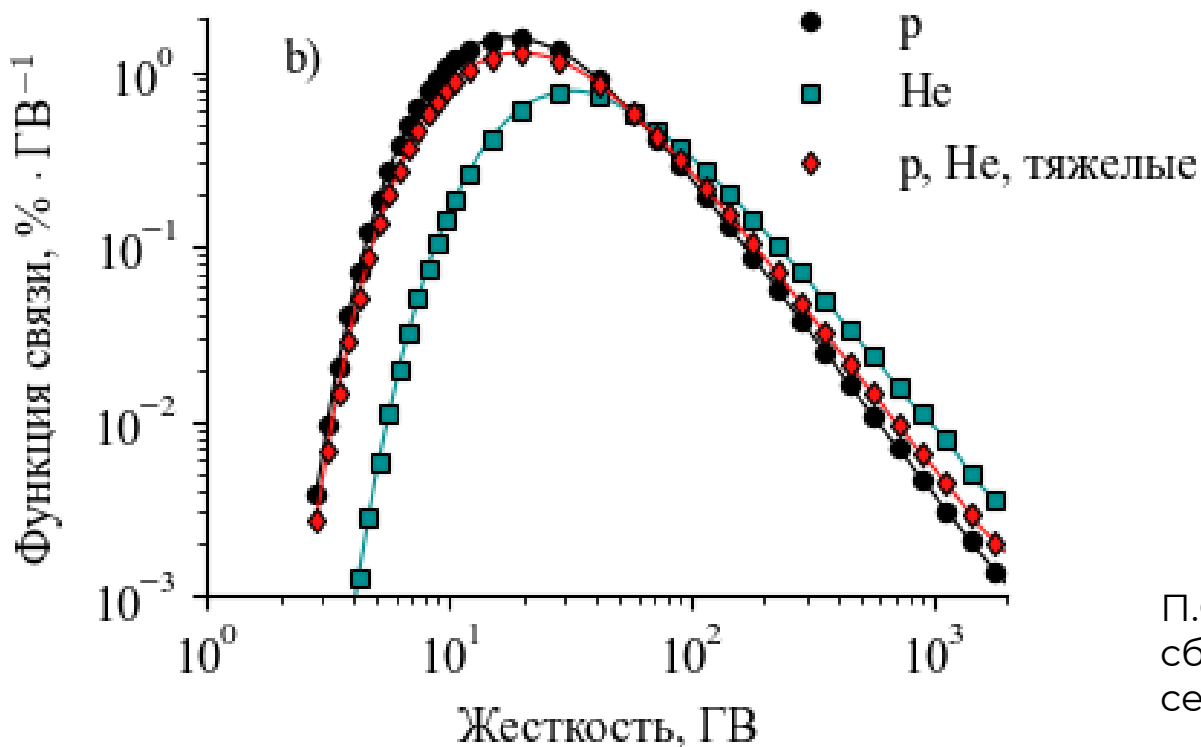


- Эффективная площадь определена методом Монте-Карло с учетом геометрии детектора, условий триггирования и реконструкции событий.
- Пороговые энергии частиц определяются потерями мюонов в супермодулях, стенах здания и перекрытиях.

Функции связи МГ УРАГАН

$$W(R) = \frac{100\% \cdot \langle J(R) \rangle}{\int \int_{\Omega} m(R, \theta) \cdot S(\theta, \varphi) \cdot \langle J(R) \rangle d\Omega dR} \cdot \int_{\Omega} m(R, \theta) \cdot S(\theta, \varphi) d\Omega,$$

где $m(R, \theta)$ – кратность генерации мюонов, $\langle J(R) \rangle$ – дифференциальный спектр первичных частиц, $S(\theta, \varphi)$ – эффективная площадь.



- Показывают относительный вклад вариаций первичного спектра в наблюдаемые вариации.
- Рассчитаны для различных диапазонов зенитных углов с приблизительно равной статистикой.

П.С. Кузьменкова, П. Сухова, И. Лагойда, И. Астапов «Функции сбора, отклика и связи мюонного годоскопа УРАГАН» #45, секция МН.

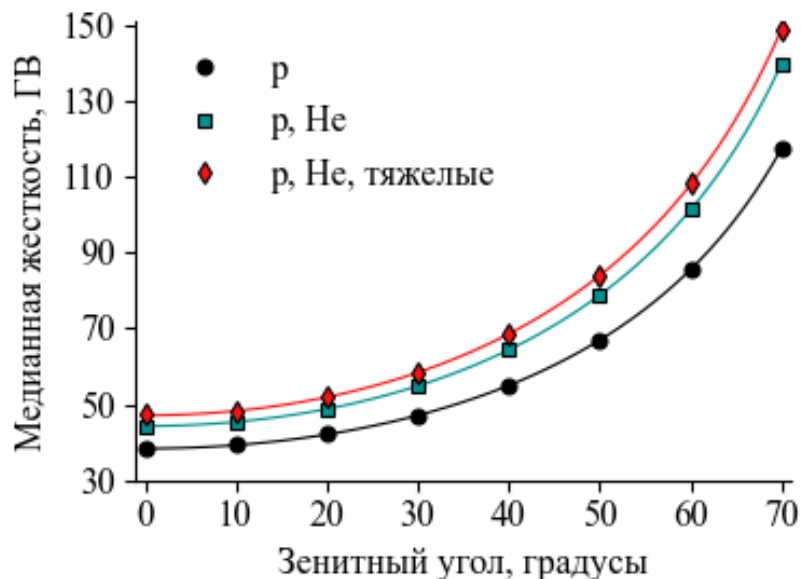
Характерные жесткости МГ УРАГАН

Медианные жесткости

- Медианные жесткости R_m устойчивы к вариациям первичного спектра:

$$\int_{R_c}^{R_m} W(R) dR = \int_{R_m}^{\infty} W(R) dR$$

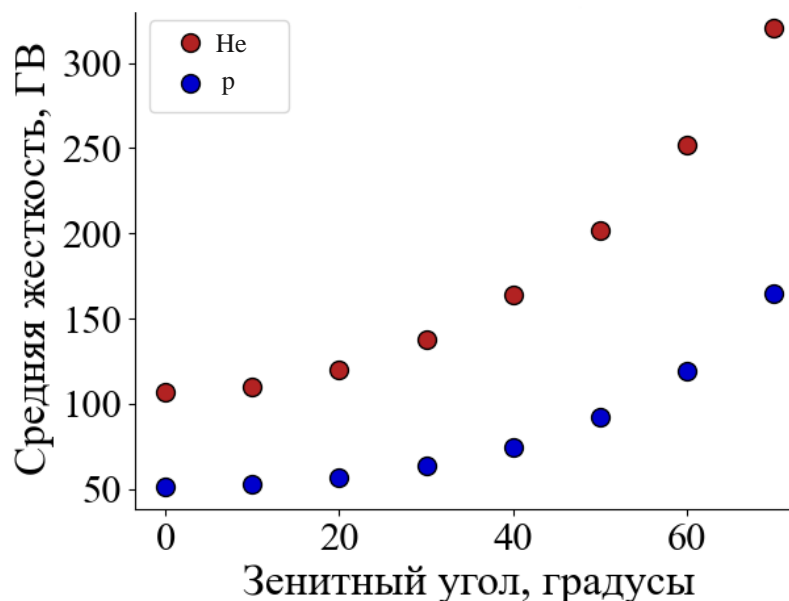
- Используются при исследовании жесткостных характеристик ФП.



Средние жесткости

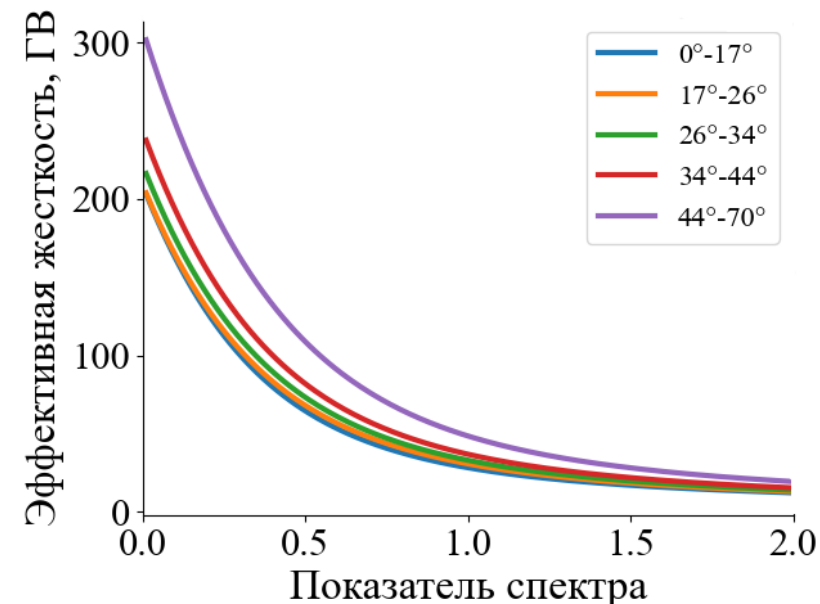
$$R_a = \frac{1}{0.9} \cdot \int_{R_c}^{R_{0.9}} R \cdot W(R) dR$$

- Рассчитаны для 90-го перцентиля.
- Используются для расчета асимптотических направлений первичных частиц.



Эффективные жесткости

- Рассчитаны из предположения, что регистрируемые вариации равны вариациям первичного спектра.
- Могут быть использованы при исследовании событий GLE.



Определение регистрируемых вариаций

- Относительные вариации A^k за каждый k -й час:

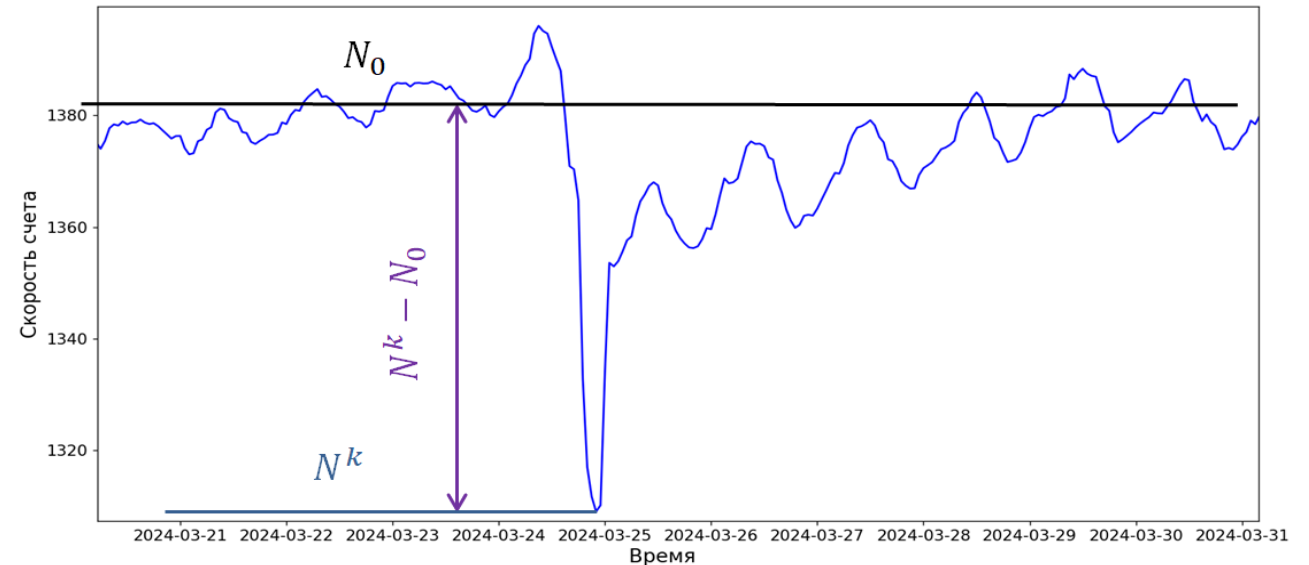
$$A^k = \frac{N^k - N_0}{N_0},$$

где N_0 - базовое значение скорости счета.

Базовое значение скорости счета

– среднее арифметическое за ближайшие к форбуш-эффекту **спокойные сутки**,

- в спокойные сутки влияние атмосферных, магнитосферных, аппаратных вариаций незначительно,
- поиск базового периода осуществлялся за **1-3 дня** до форбуш-понижения,

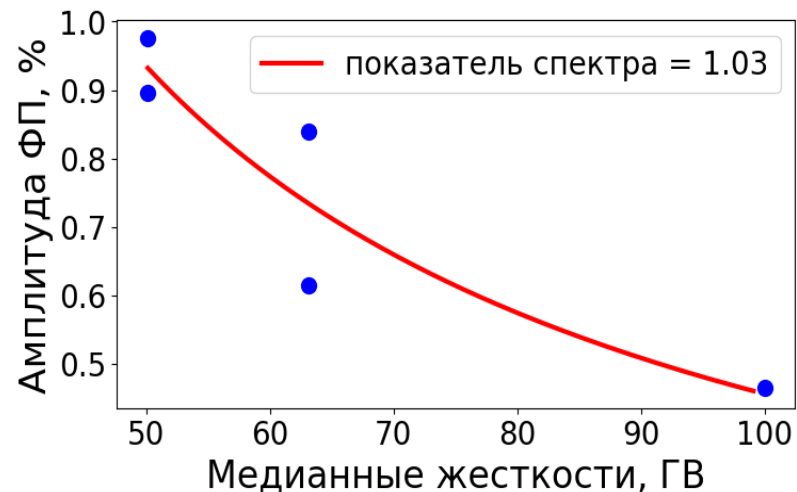


- сутки считаются спокойными, если незначительно отклонение:
 - изотропной части скорости счета от линейной аппроксимации,
 - суточной анизотропии от аппроксимации первыми двумя гармониками ряда Фурье.

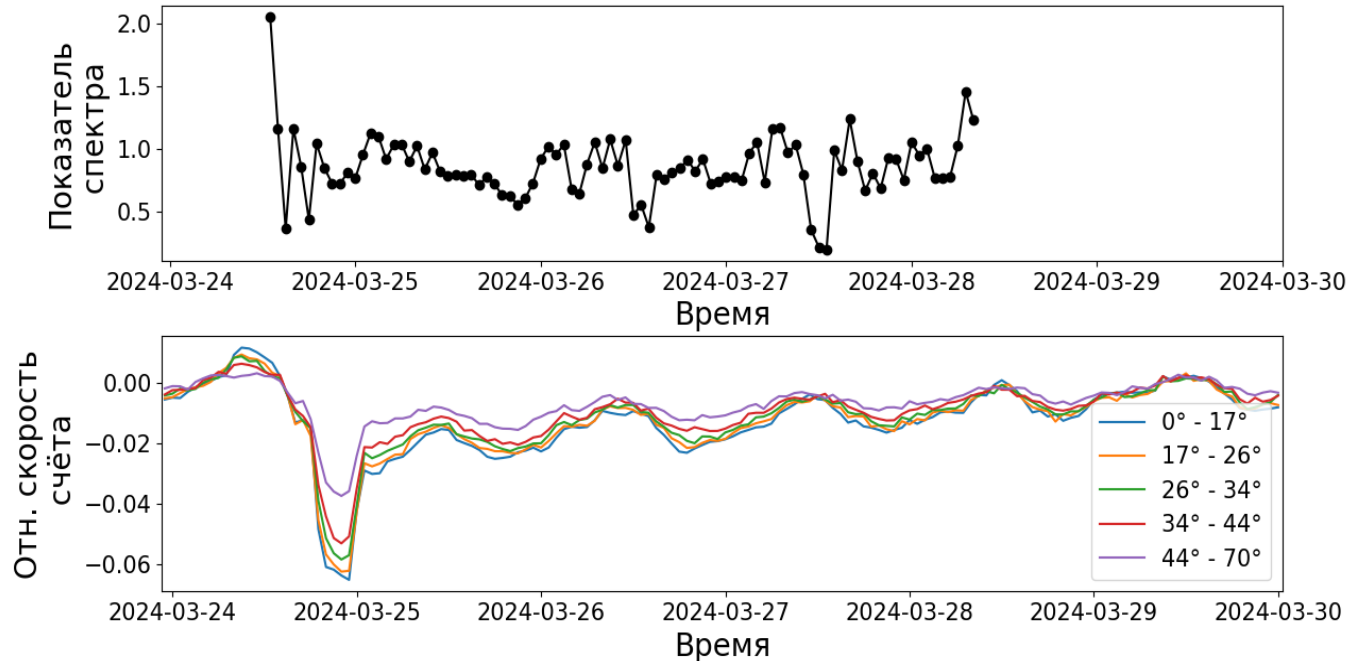
Метод медианных жесткостей

1. Для каждого из диапазонов зенитных углов с приблизительно равной статистикой определяется амплитуда ФП.
2. Строится зависимость амплитуды ФП от медианной жесткости и аппроксимируется **степенной функцией**.
3. Оптимальный показатель спектра определяется методом наименьших квадратов.

Пример определения показателя спектра



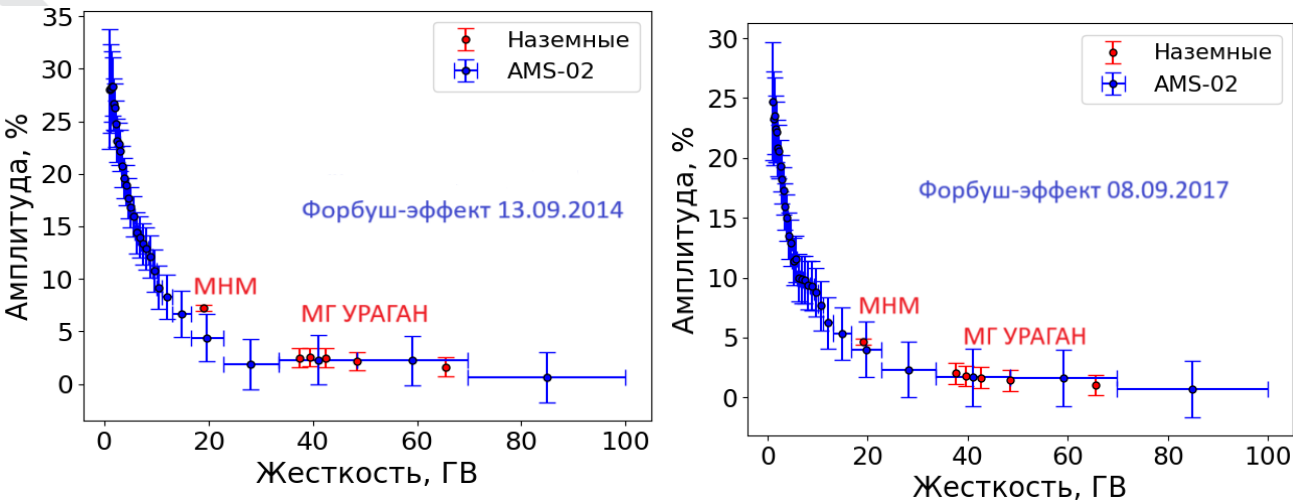
Динамика изменения показателя спектра



Мягкий спектр на фазе падения и более жесткий на фазе восстановления.

Анализ жесткостных характеристик форбуш-эффектов

Проверка метода по данным AMS-02



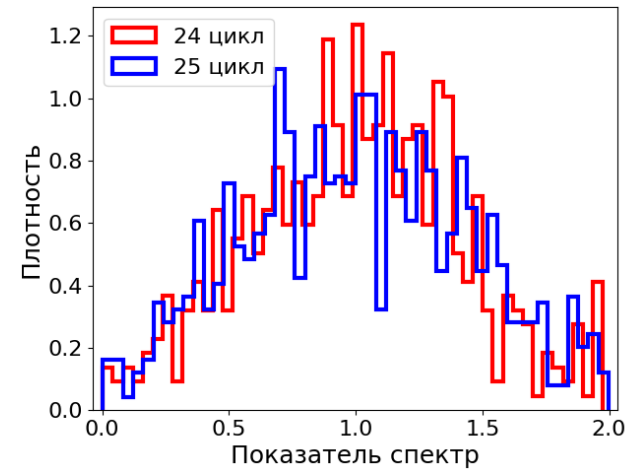
Спектр вариаций не может быть однозначно описан степенной функцией в широком диапазоне жесткостей:

$$\langle \alpha \rangle = \begin{cases} 0.5, & R < 20 \text{ ГВ} \\ 1.0, & R \geq 20 \text{ ГВ} \end{cases}$$

где для $R < 20$ ГВ использованы данные AMS-02 и МНМ, для больших жесткостей – AMS-02, МНМ и МГ УРАГАН.

Жесткостные характеристики ФП на фазах роста 24-го и 25-го солнечных

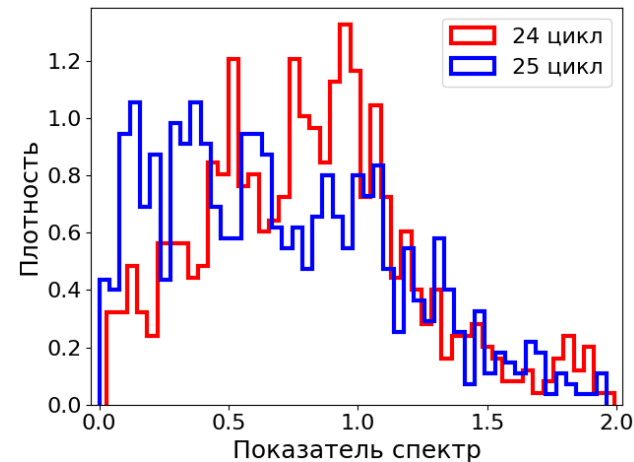
По данным МГ



Средний показатель спектра:

24-й цикл солнечной активности: $\langle \alpha \rangle = 1.0$,
25-й цикл солнечной активности: $\langle \alpha \rangle = 1.0$.

По данным МГ И МНМ



Средний показатель спектра:

24-й цикл солнечной активности: $\langle \alpha \rangle = 0.81$,
25-й цикл солнечной активности: $\langle \alpha \rangle = 0.70$.

Заключение

- Характерные жесткости мюонного годоскопа УРАГАН составляют десятки-сотни ГВ, что позволяет проводить совместный анализ модуляционных явлений с нейтронными мониторами и спутниковыми экспериментами.
- Реализован метод определения базового периода, в качестве которого выбирались ближайшие к форбуш-эффекту спокойные сутки. В алгоритме не учитывалось состояние межпланетного магнитного поля.
- Метод медианных жесткостей проверен по данным AMS-02. Предварительно продемонстрирован кусочно-степенной характер спектра форбуш-понижений.
- Проанализированы спектры форбуш-эффектов на фазах роста 24-го и 25-го солнечных циклов. Получен более жесткий спектр на фазе роста 25-го цикла по сравнению с фазой роста 24-го цикла по данным совместного анализа.

Спасибо за внимание!

