



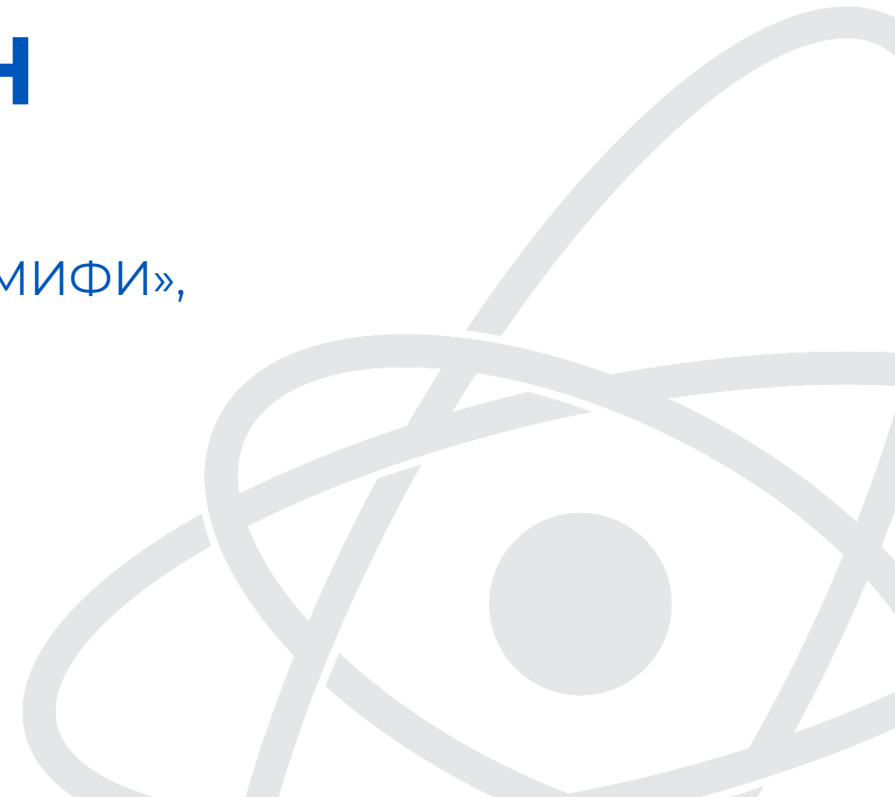
38 Всероссийская конференция по космическим лучам

Функции сбора, отклика и связи мюонного годоскопа УРАГАН

П.С. Кузьменкова, П.А. Сухова, И.А. Лагойда, И.И. Астапов

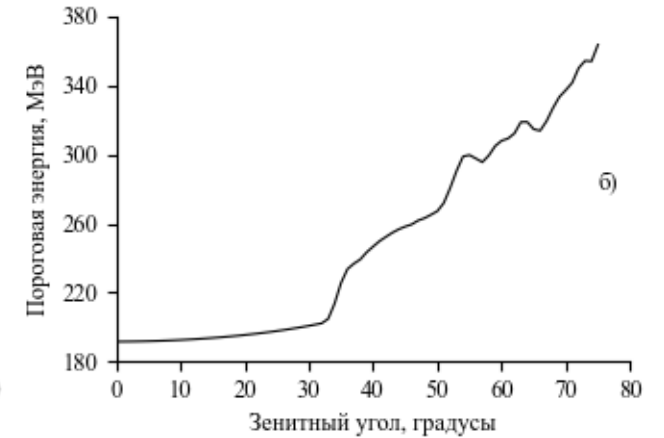
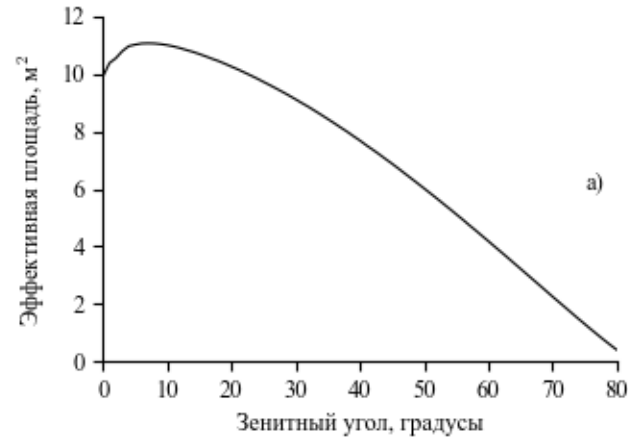
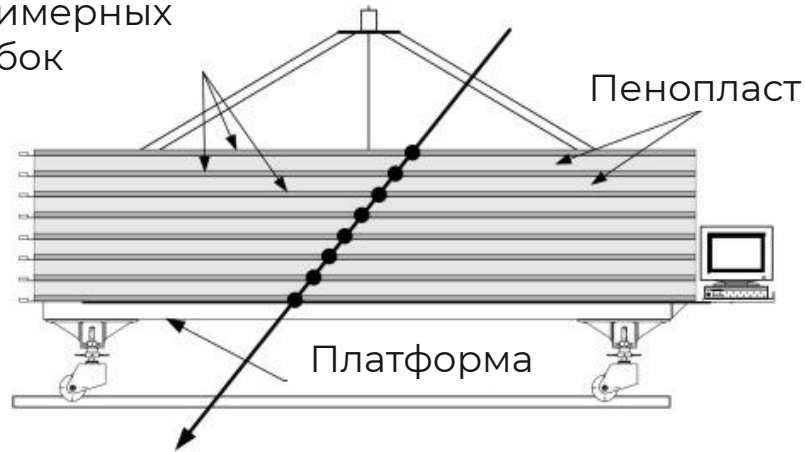
¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

pskuzmenkova@mephi.ru



Мюонный годоскоп УРАГАН

Камеры
стримерных
трубок



Мюонный годоскоп УРАГАН (НИЯУ МИФИ) – координатно-трековый детектор, который состоит из четырех независимых супермодулей ($S = 11.5 \text{ м}^2$).

Каждый супермодуль содержит **восемь** координатных XY-плоскостей.

Установка позволяет регистрировать мюоны в диапазоне зенитных углов $0 \div 84^\circ$ с точностью до 1° .

Установка обладает сложной внутренней геометрией, а также имеет систему условий триггирования и реконструкции событий. Эффективная площадь определяется методом Монте-Карло согласно выражению:

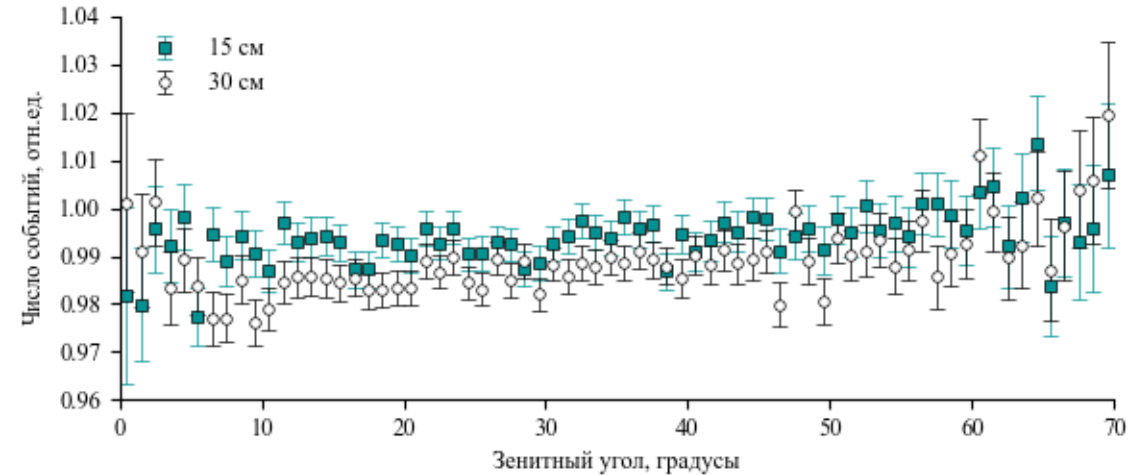
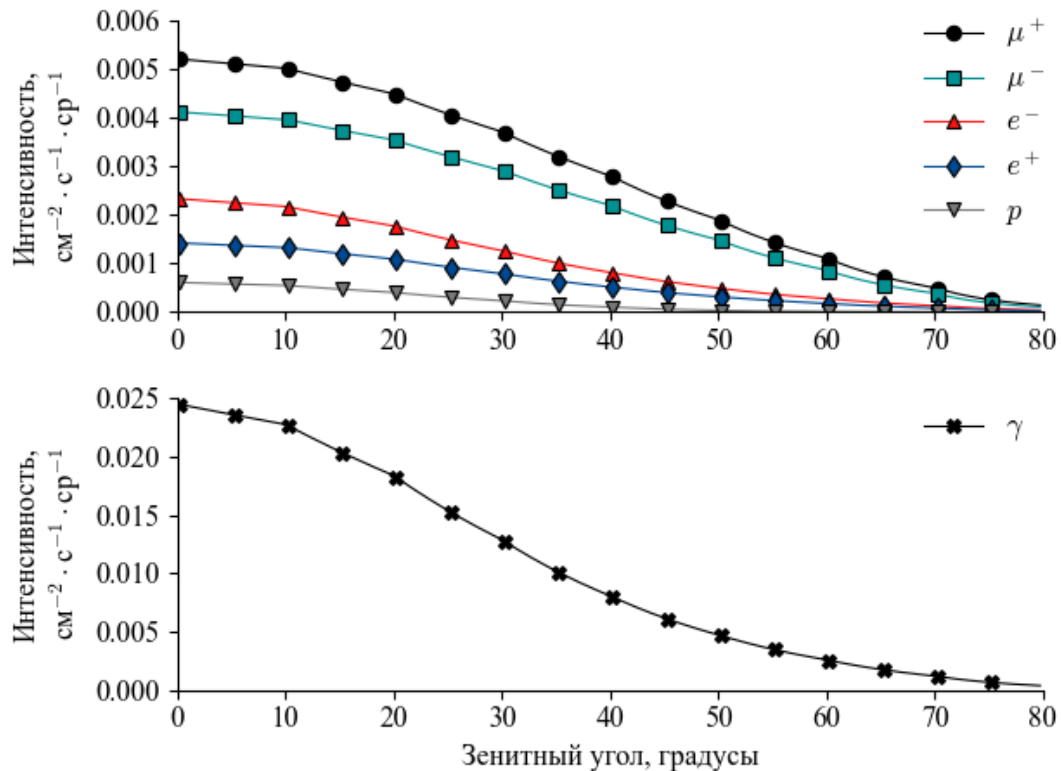
$$S(\theta, \varphi) = \int_{S_{\perp}} S_{\perp} \cdot p(x, y, \theta, \varphi) dS_{\perp}$$

Пороговая энергия вторичных частиц определяется потерями мюонов в супермодулях, стенах здания и перекрытиях.

Влияние заряженных частиц и снежного покрова

С помощью детальной модели установки и здания в Geant4 оценено влияние заряженных частиц и эффект снежного покрова

	Без здания, с ⁻¹	Со зданием, с ⁻¹
μ^+, μ^-	1266	1249
$\mu^+, \mu^-, e^-, e^+, p, \gamma$	1545	1417



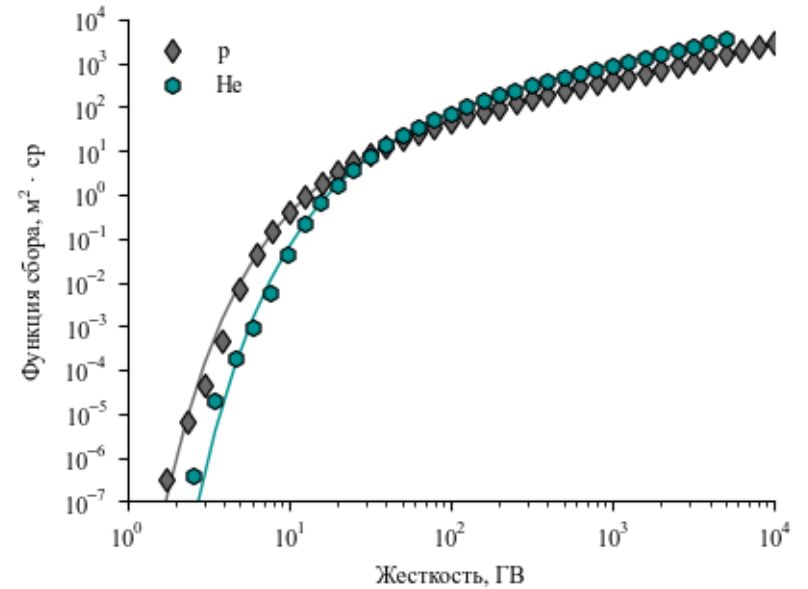
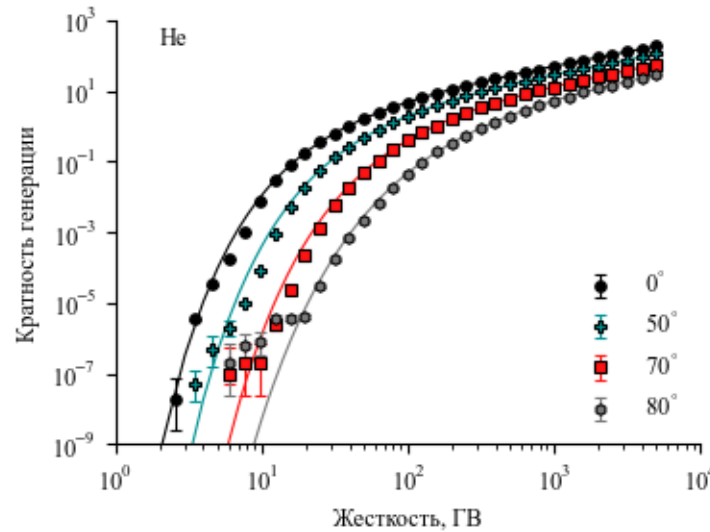
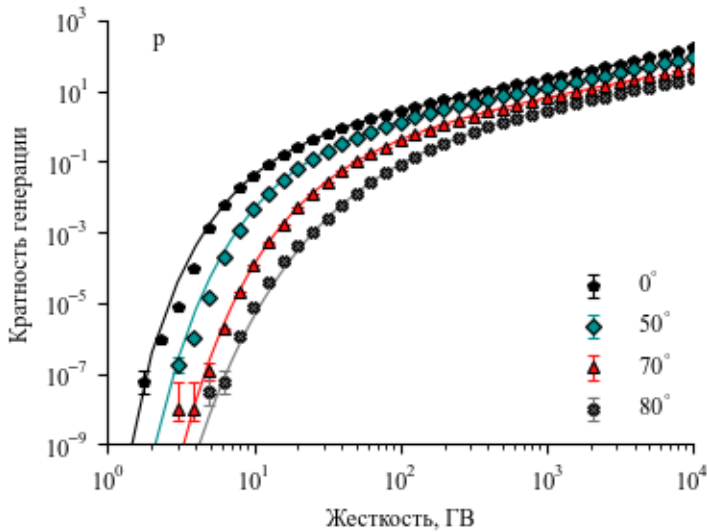
- Установка регистрирует **~11.9%** не мюонов.
- Без учета здания доля не мюонов составляет **~18.1%**.
- Следовательно, **6.2%** не мюонов поглощается в стенах и крыше, хотя в ней также могут образовываться вторичные заряженные частицы.
- Снег плотностью **0.3 г/см³** и высотой **15 см** приводит у уменьшению скорости счета на **0.5%**.
- Снег плотностью **0.3 г/см³** и высотой **30 см** приводит у уменьшению скорости счета на **1%**.
- Вне зависимости от высоты снежного покрова форма угловых распределений остается неизменной.

Функция сбора МГ УРАГАН

Функция сбора $Y(R)$ - число вторичных частиц, образованных одной число вторичных частиц, зарегистрированных в геометрии детектора с эффективной площадью $S(\theta, \varphi)$, образованных от одной первичной частицы:

$$Y(R) = \int_{\Omega} m(R, \theta) \cdot S(\theta, \varphi) d\Omega$$

где $m(R, \theta)$ - кратность генерации мюонов.



Программный пакет CORSIKA 7.7500, модели адронных взаимодействий FLUKA 2021.2.9 + QGSJET-II-04, энергия перехода 80 ГэВ.

Аппроксимация (Fujimoto, 1977):

$$m(R, \theta) = A(\theta) \cdot R^{\alpha(\theta)} \cdot \exp\left(-\frac{\beta(\theta)}{R^{\delta(\theta)}}\right)$$

Скорость счета детектора:

$$N(R_c, t) = \int_{R_c(t)}^{\infty} J(R, t) \cdot Y(R) dR$$

где $J(R, t)$ – дифференциальный спектр первичного излучения

Процедура верификации функции сбора

Прямые измерения

	$R < 100$ ГВ	$R > 100$ ГВ
p	AMS-02, суточные спектры	CALET, осредненный (10.2015 - 12.2021)
He	AMS-02, суточные спектры	AMS-02, осредненный (05.2011 - 10.2019)

Ожидаемые скорости счета

$$n_{ex} = \frac{\int_{R_c}^{R_u} J_p(R, t) Y_p(R) dR + \int_{R_c}^{R_u} (1 + \kappa(R)) J_{He}(R, t) Y_{He}(R) dR}{\int_{R_c}^{R_u} J_{p_0}(R) Y_p(R) dR + \int_{R_c}^{R_u} (1 + \kappa(R)) J_{He_0}(R) Y_{He}(R) dR}$$

где $J_p(R, t)$ и $J_{He}(R, t)$ - прямые суточные измерения, $Y_p(R)$ и $Y_{He}(R)$ - функции сбора МГ УРАГАН для протонов и гелия соответственно,

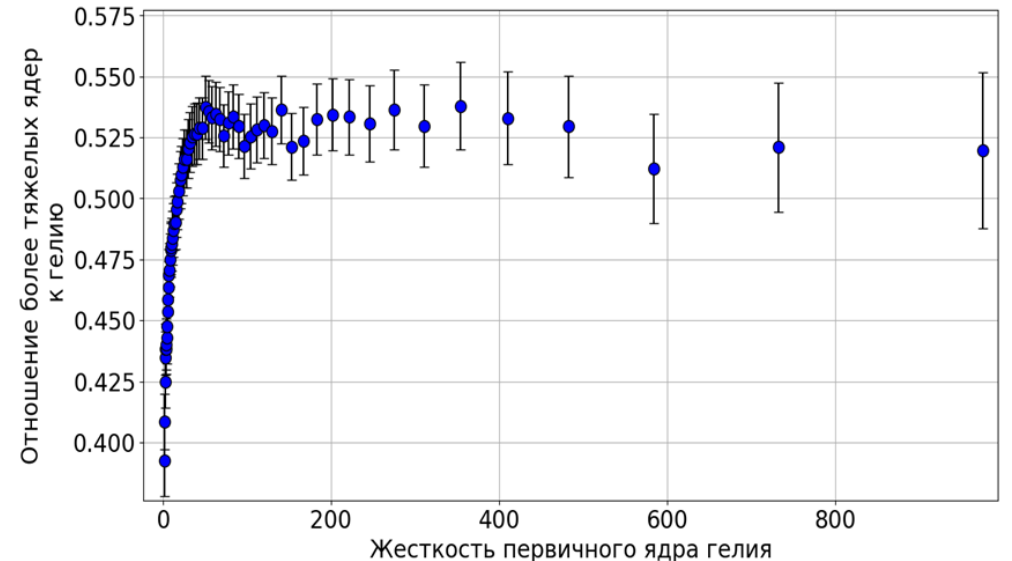
$J_{p_0}(R)$ и $J_{He_0}(R)$ - средние спектры протонов и гелия за 2019 год

$\kappa(R)$ - масштабный фактор для учета более тяжелых ядер.

Более тяжелые ядра

Для учета влияния более тяжелых ядер используется масштабирование (Koldobskiy, 2019), основанное на предположении, что гелиосферная модуляция всех более тяжелых ядер подобна гелиевой. Масштабный фактор:

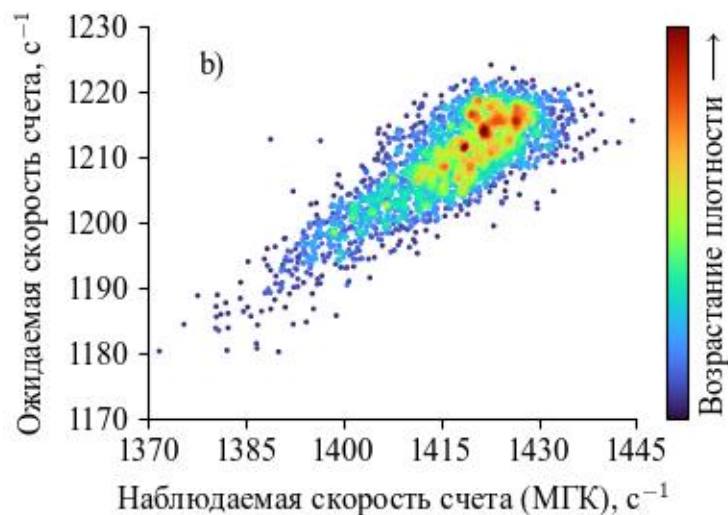
$$\kappa(R) = \frac{1}{4} \sum_i A_i \frac{\langle J_i(R) \rangle}{\langle J_{He}(R) \rangle}$$



Верификация

Коррекция методом барометрических и дифференциальных температурных коэффициентов $r = 0.67$

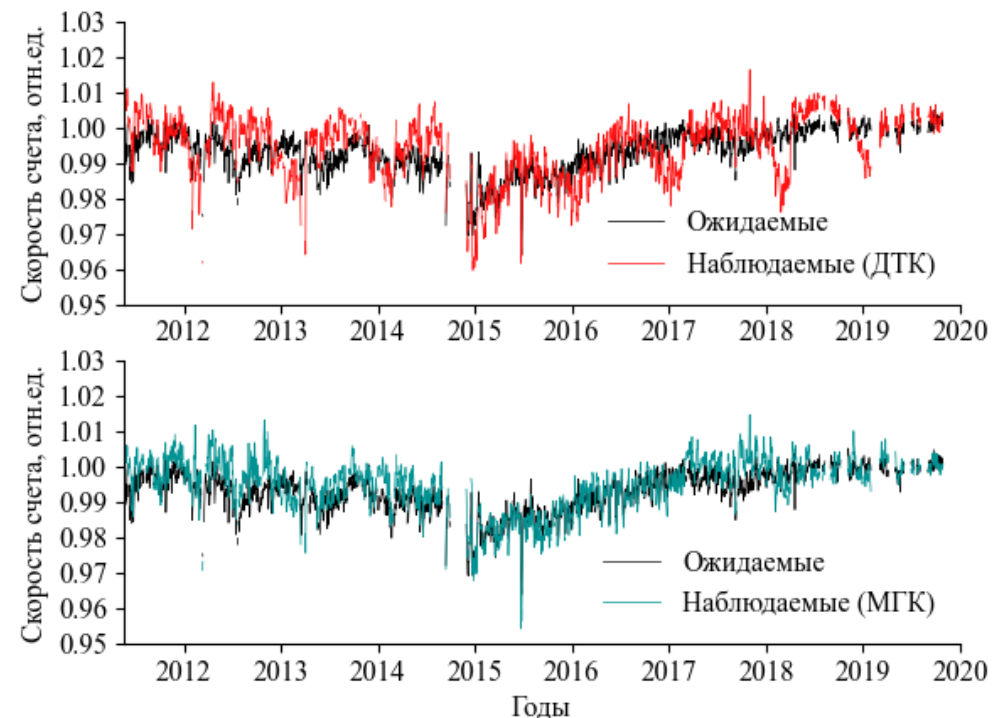
Коррекция методом главных компонент:
 $r = 0.82$



Отношение ожидаемой скорости счета к наблюдаемой составляет ~ 0.85 .

Согласно оценкам в Geant4, влияние прочих заряженных частиц составляет **11.9%**.

Оставшиеся **3.1%** различий между скоростями счета можно объяснить допущениями при масштабировании тяжелых ядер, неопределенностями, вносимыми использованием усредненных спектров для $R > 100$ ГВ, аппаратными вариациями.

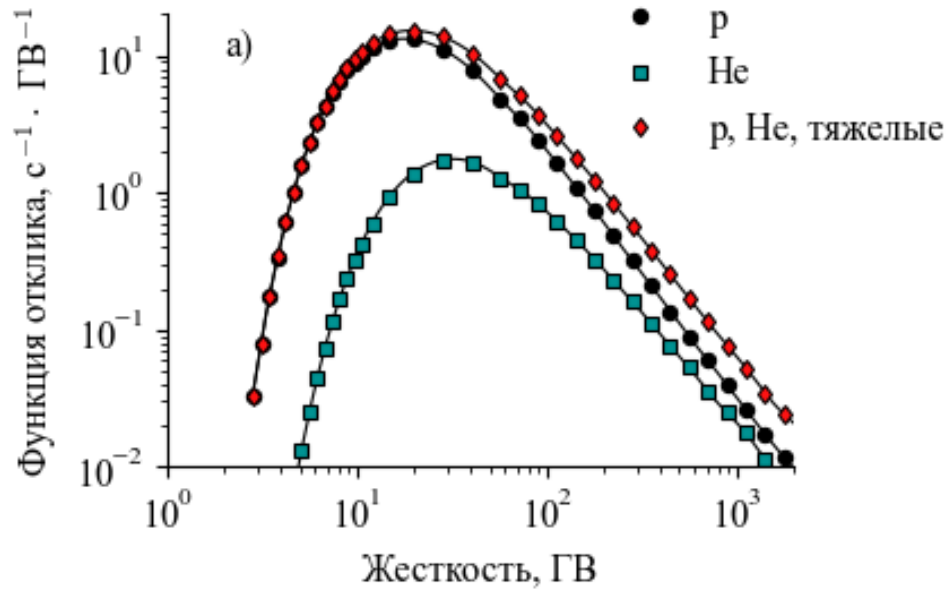


Функции отклика и связи

Функция отклика

$$W_T(R) = \langle J(R) \rangle \cdot Y(R)$$

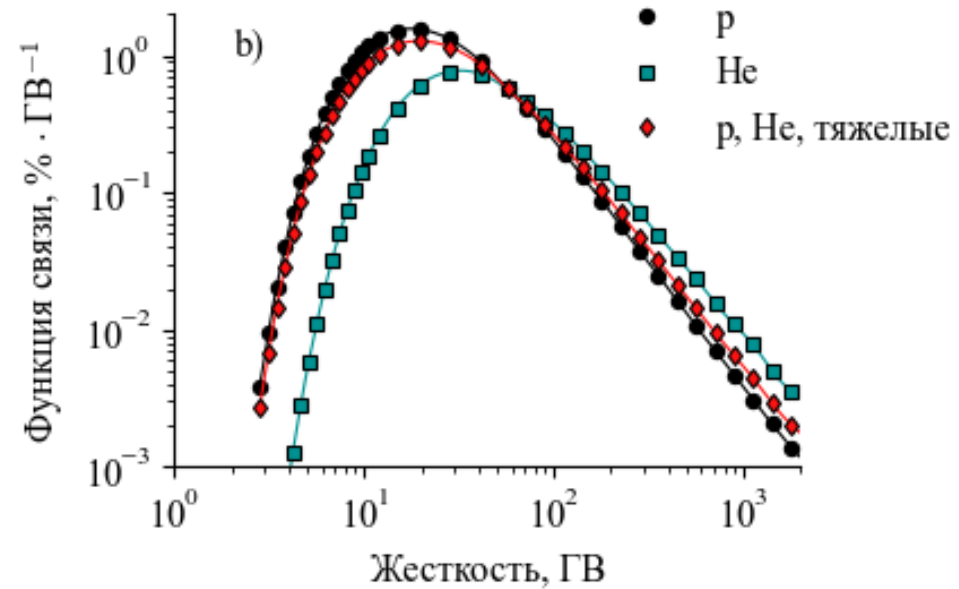
показывает абсолютный вклад первичных частиц в скорость счета детектора



Функция связи

$$W(R) = \frac{\langle J(R) \rangle \cdot Y(R)}{\int W_T(R) dR}$$

показывает относительный вклад вариаций первичного спектра в наблюдаемые вариации

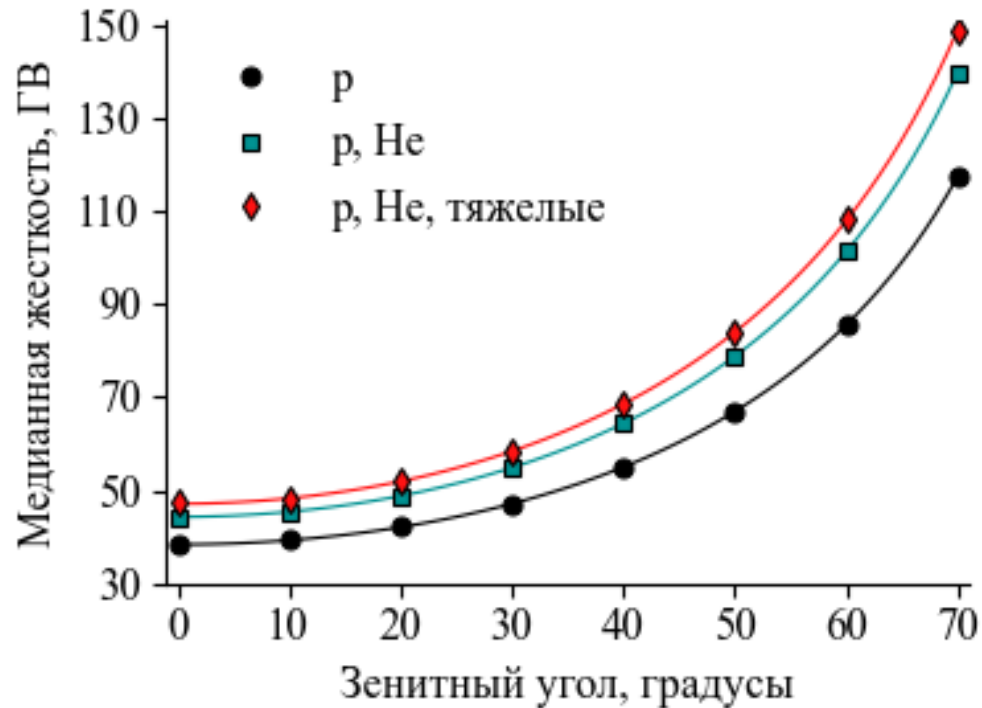


Сравнивая интегралы функции отклика $W_T(R)$ для различных составов первичного излучения, можно оценить:

Вклад ядер гелия в скорость счета МГ УРАГАН – **19%**.

Вклад более тяжелых ядер – **10%**.

Медианные жесткости



При исследовании модуляционных явлений, таких как Форбуш-эффекты, 27-дневные вариации (доклад Суховой П.А. 05.07, 12:00) по данным МГ УРАГАН возможно проведение независимого анализа вариаций в различных диапазонах зенитных углов.

Каждому диапазону можно поставить в соответствие медианную жесткость первичных частиц R_m :

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

Зависимость медианной жесткости МГ УРАГАН от зенитного угла для каждого состава первичного излучения:

$$R_m \sim \cos^{-0.39} \theta$$

Заключение

- Рассчитанные с использованием программного пакета CORSIKA 7.7500 и моделей адронных взаимодействий FLUKA 2021.2.9, QGSJET-II-04 функции сбора верифицированы по данным экспериментов AMS-02 и CALET. Учтено влияние тяжелых ядер.
- Выполнено сравнение двух методов атмосферной коррекции. Коэффициент корреляции между ожидаемыми и ДТК-скорректированными скоростями счета составляет **0.67**. Для МГК-коррекции коэффициент корреляции равен **0.82**.
- Вероятно, ДТК-коррекция не учитывает температурный эффект полностью. Основной недостаток МГК-коррекции – отсутствие физической связи между главными компонентами и параметрами атмосферы.
- Вклад ядер гелия в скорость счета МГ УРАГАН – **19%**. Вклад более тяжелых ядер – **10%**.
- Медианные жесткости могут использоваться для исследований спектра Форбуш-эффектов и 27-дневных вариаций, но, вероятно, только совместно с данными нейтронных мониторов.
- Верифицированные функции отклика и связи будут использоваться для расчета приемных коэффициентов МГ УРАГАН и адаптации метода глобальной съемки.

Спасибо за внимание!

