30.06.2026

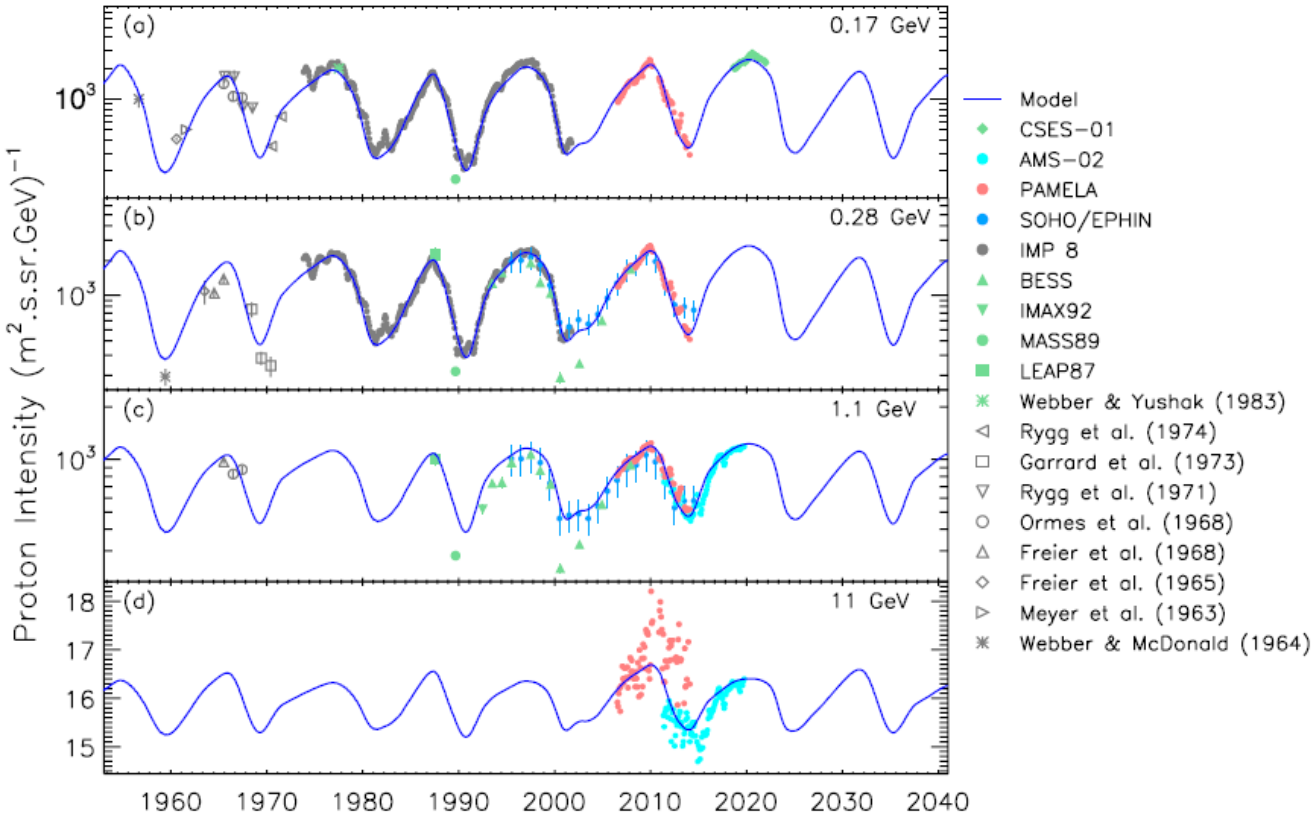
НИЯУ МИФИ

Восстановление энергетических спектров галактических космических лучей по данным сети нейтронных мониторов с помощью двухмодельной нейросетевой архитектуры

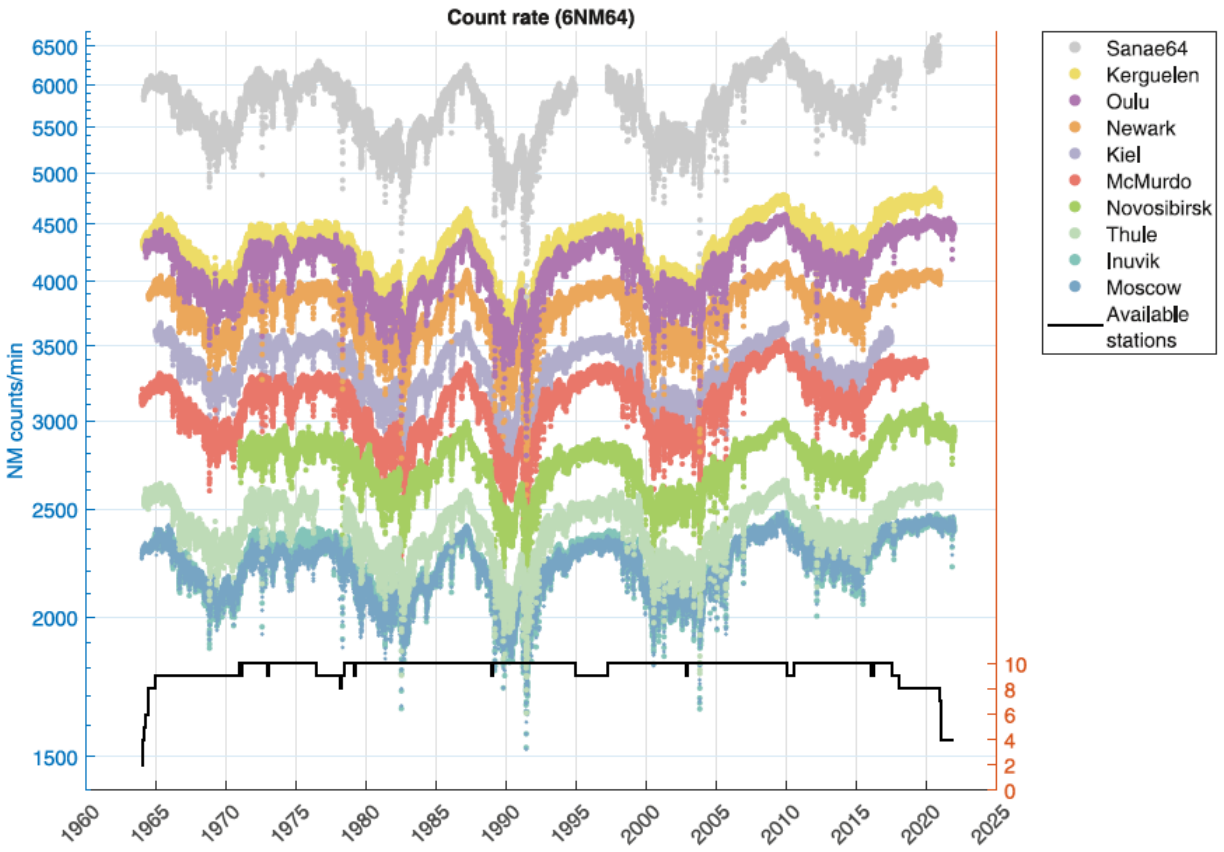
Селянский И.В., Сирук С.А., Майоров А.Г.
НИЯУ МИФИ

39-я Всероссийская конференция по космическим лучам, г. Дубна, 29 июня – 3 июля 2026 г.

Измерения вариаций потока ГКЛ в прямых и наземных экспериментах

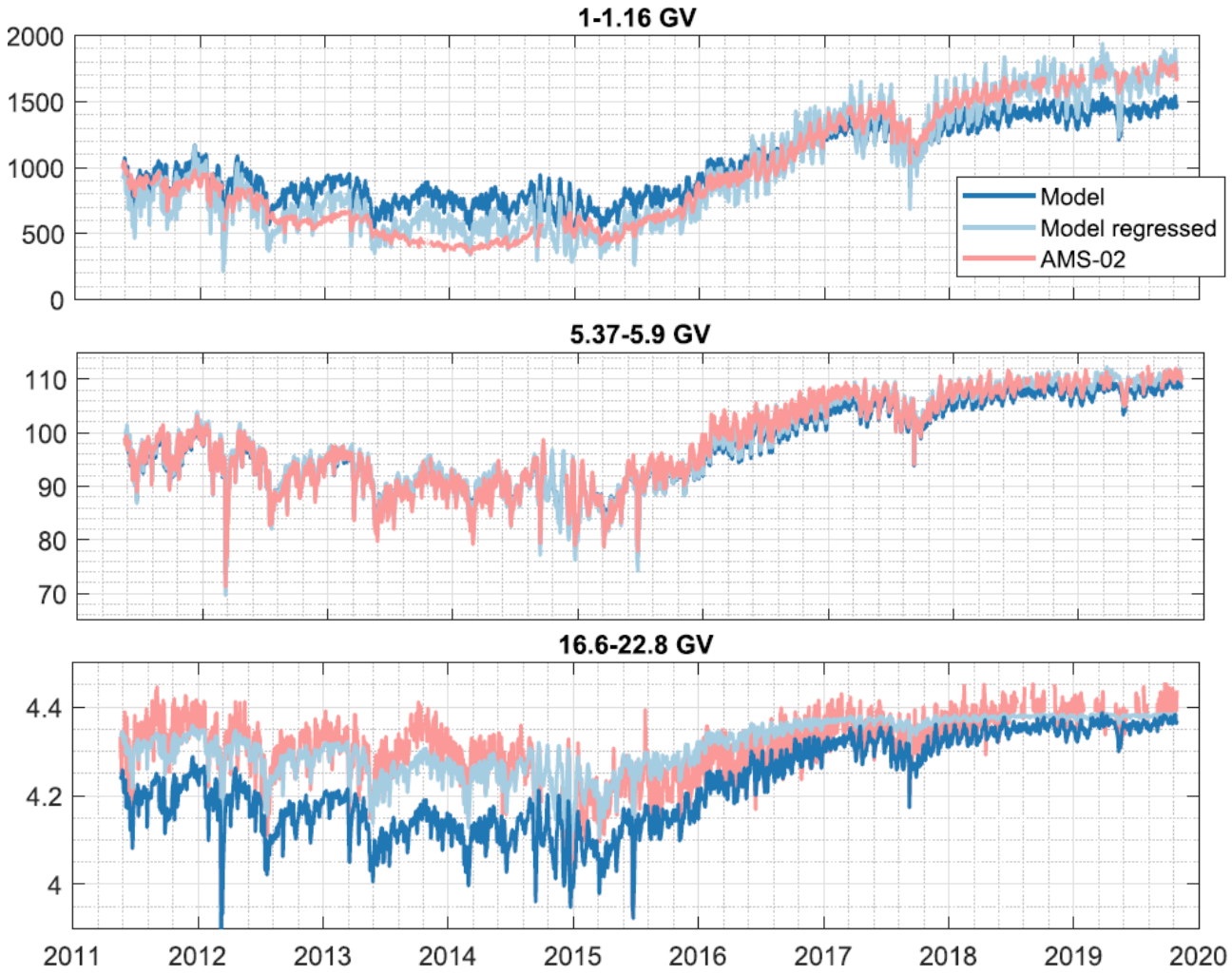


Shen et al. (2025) The Astrophysical Journal, 988:262 (25pp)

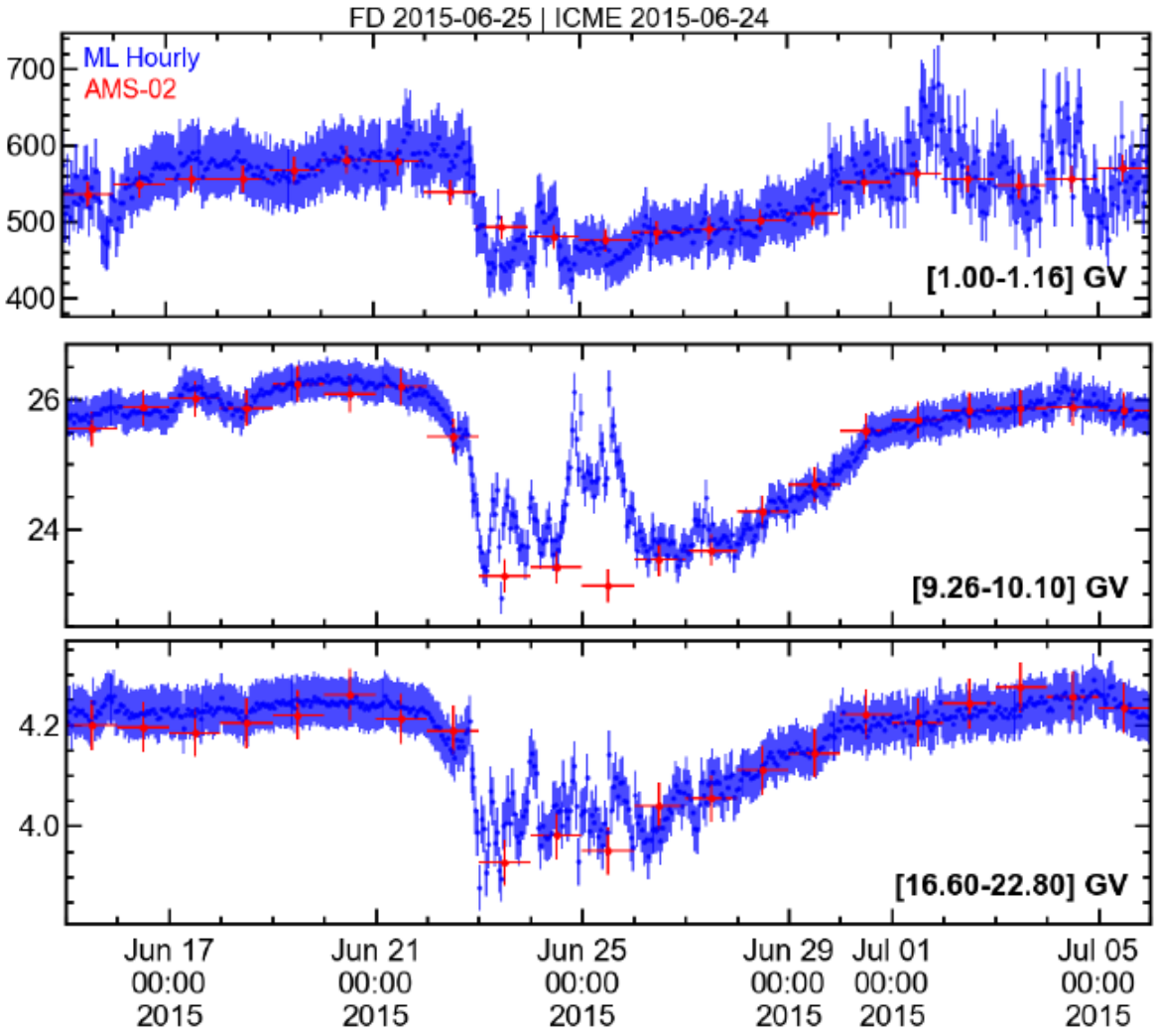


Väisänen et al. (2023). Journal of Geophysical Research: Space Physics, 128, e2023JA031352.

Вариации потока ГКЛ на разных временных масштабах

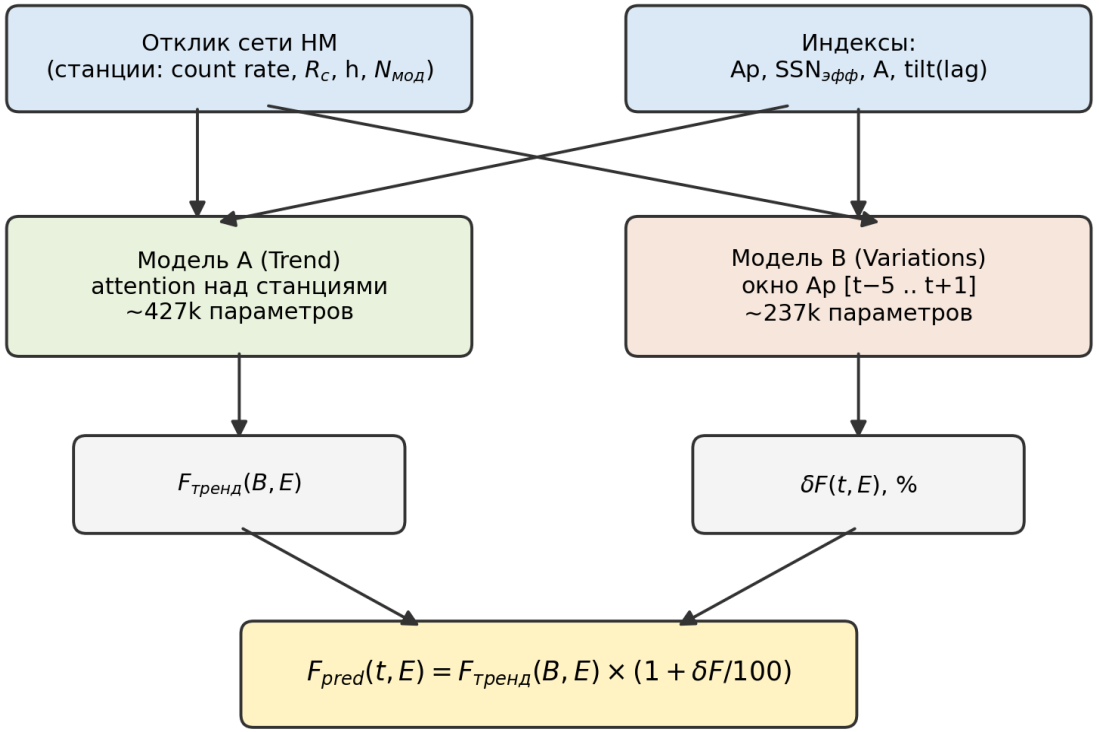


Vaisanen, P. Et al. (2025). Journal of Geophysical Research: Space Physics, *130*, e2025JA033805



Zhao P., Feng J. arXiv preprint arXiv:2604.06857. – 2026.

Идея метода. Данные для обучения моделей

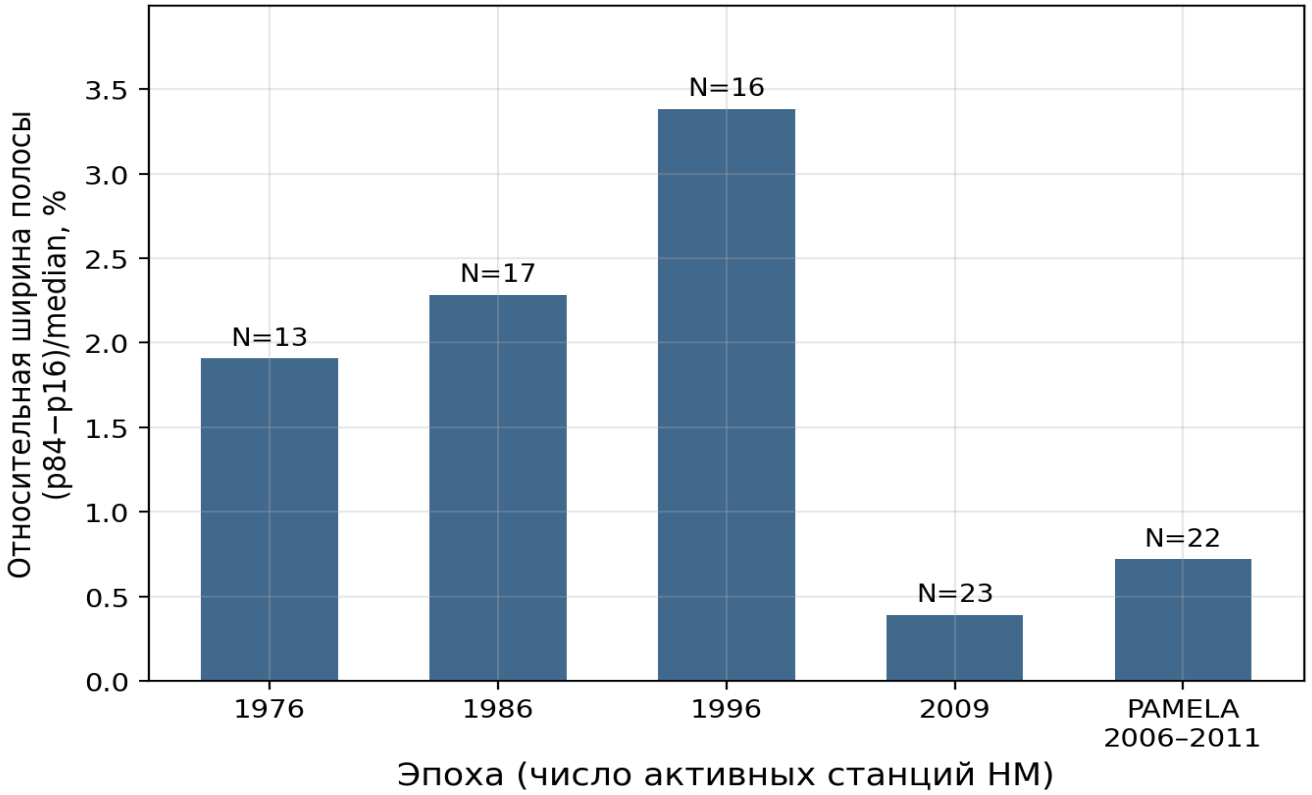


Модель A в эпоху AMS не используется (тренд = $F_{d_BR_avg}$);
в истории 1965–2010 — экстраполятор тренда по наземным НМ.

Блок-схема двухмодельной архитектуры

Набор	Период	Роль
AMS-02 суточные (p, He)	2011–2019	Обучение Модели B
AMS-02 бартельс-усреднённые	2011–2022	Обучение Модели A
PAMELA (p, He), Усредненные за 1-3 месяца	2006–2014	Обучение и валидация Модели A
BESS-97, BESS-Polar II	1997; 2007/08	Валидация Модели A
Сеть НМ	1965–2026	вход обеих моделей
Индексы Ap, SSN, A, наклон токового слоя	1965–2026	вспомогательные входы

Оценка неопределенности восстановления

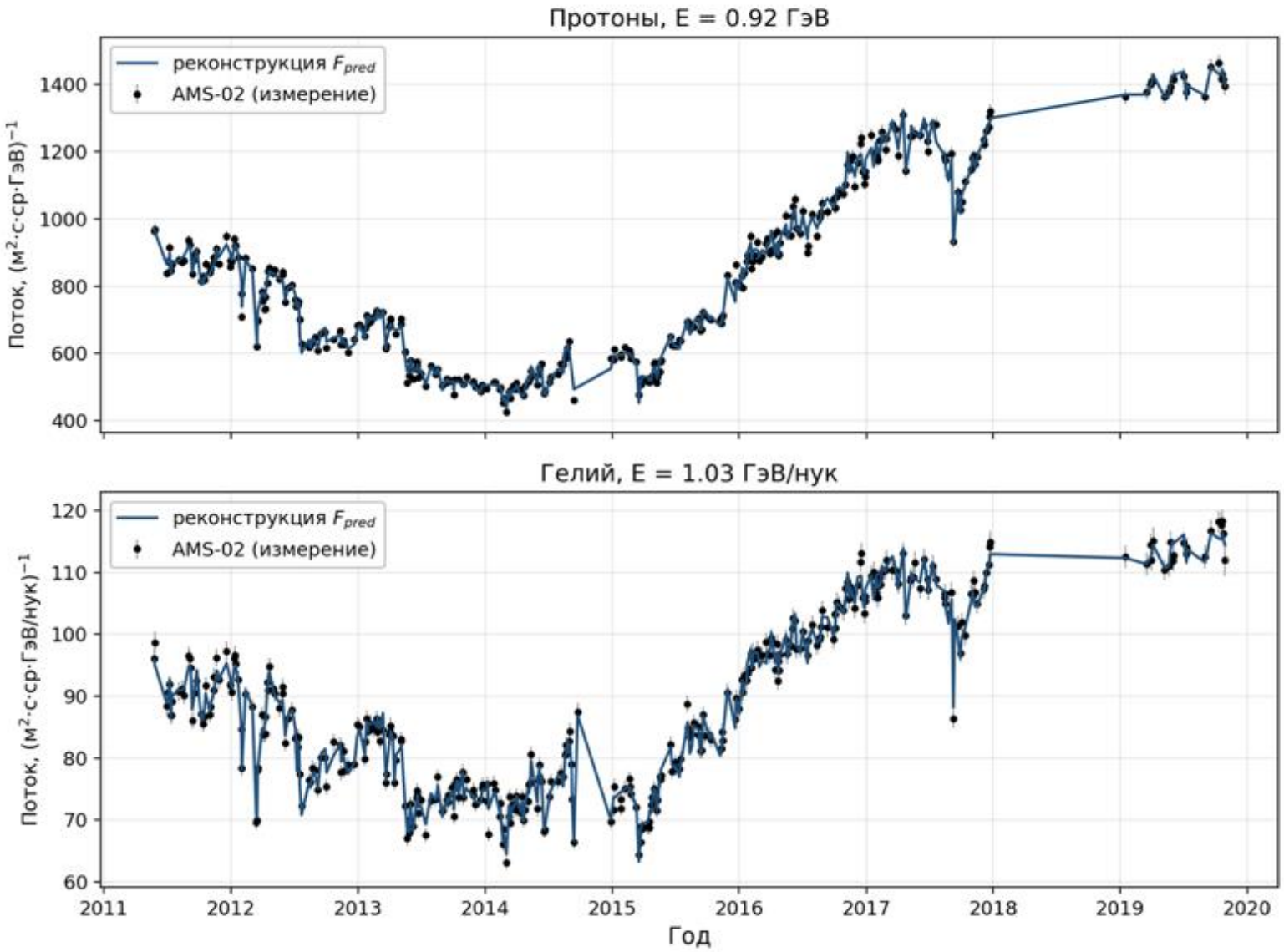


Относительная ширина доверительной полосы реконструкции в зависимости от эпохи и состава сети нейтронных мониторов, где N – число активных станций

Оценка неопределенности восстановленного значения, обусловленной непостоянством набора используемых НМ, реализована путем многократного прогона реконструкции со случайным «выключением» части станций (NM-dropout)

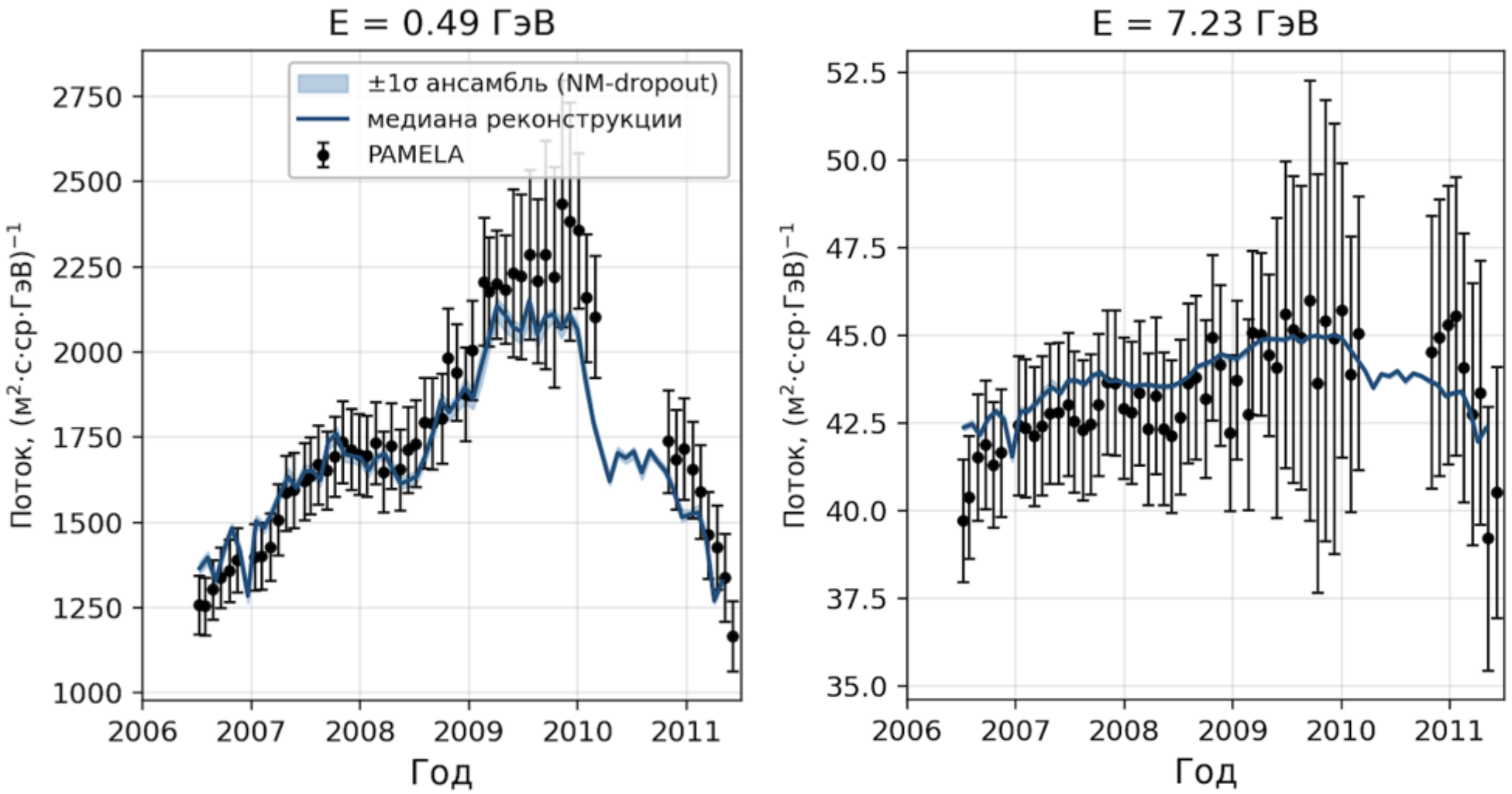
Зависимость не строго пропорциональна числу станций. Ширину определяет полнота покрытия в целом — состав станций, их жёсткости геомагнитного обрезания и другим параметрам токена

Валидация на данных AMS-02



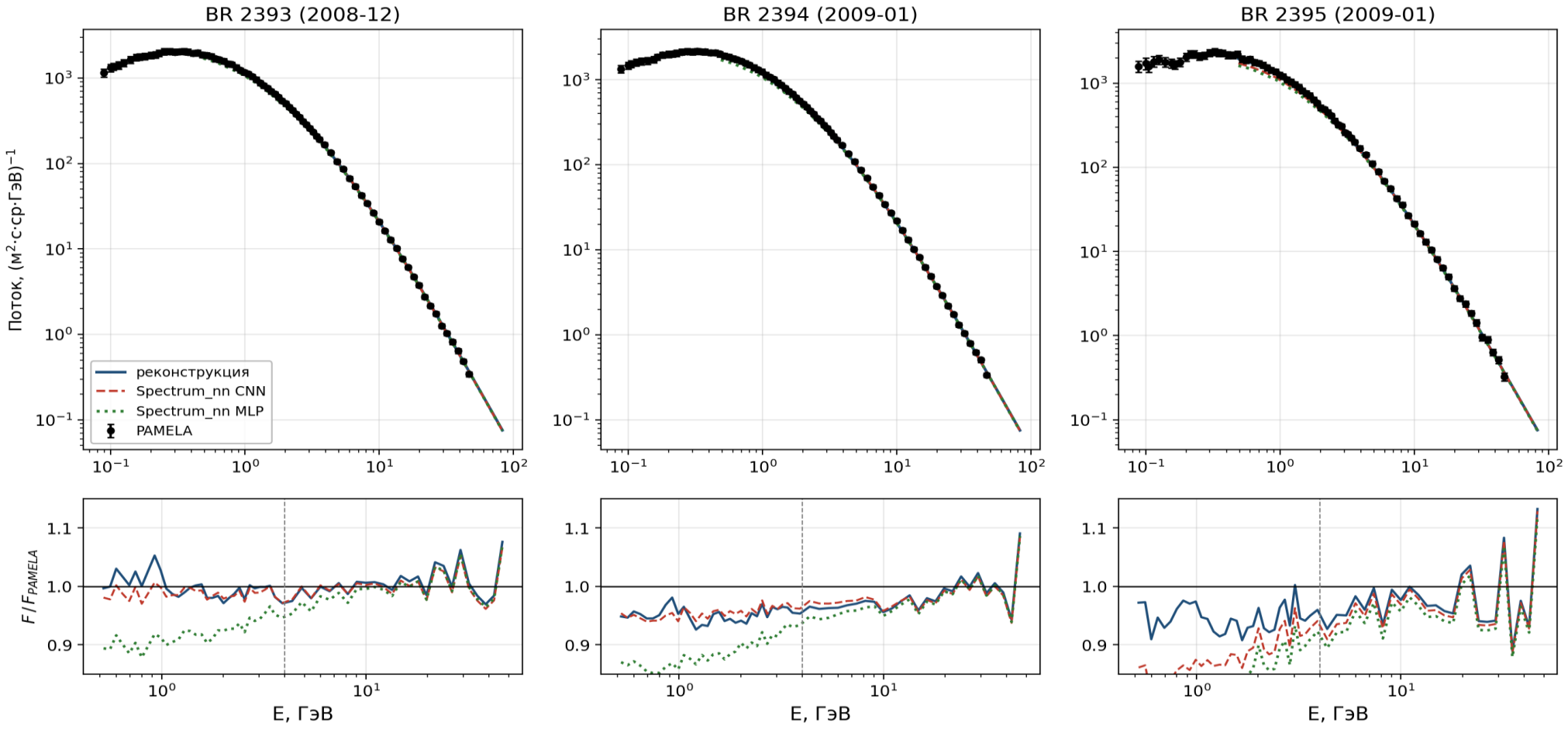
На рисунке изображены восстановленные временные ряды потока протонов и ядер гелия в сравнении с данными AMS-02 тестовой выборки, не участвовавшей в обучении. Результат валидации : коэффициент корреляции для протонов 0,92, гелия – 0,75. Воспроизводятся и медленный тренд (солнечный цикл), и быстрые Форбуш-понижения.

Валидация на данных PAMELA



Восстановленный поток протонов с доверительной полосой ±1σ ансамбля NM-dropout (заштрихована) поверх измерений PAMELA

Результаты сравнения в минимуме 23/24 циклов солнечной активности

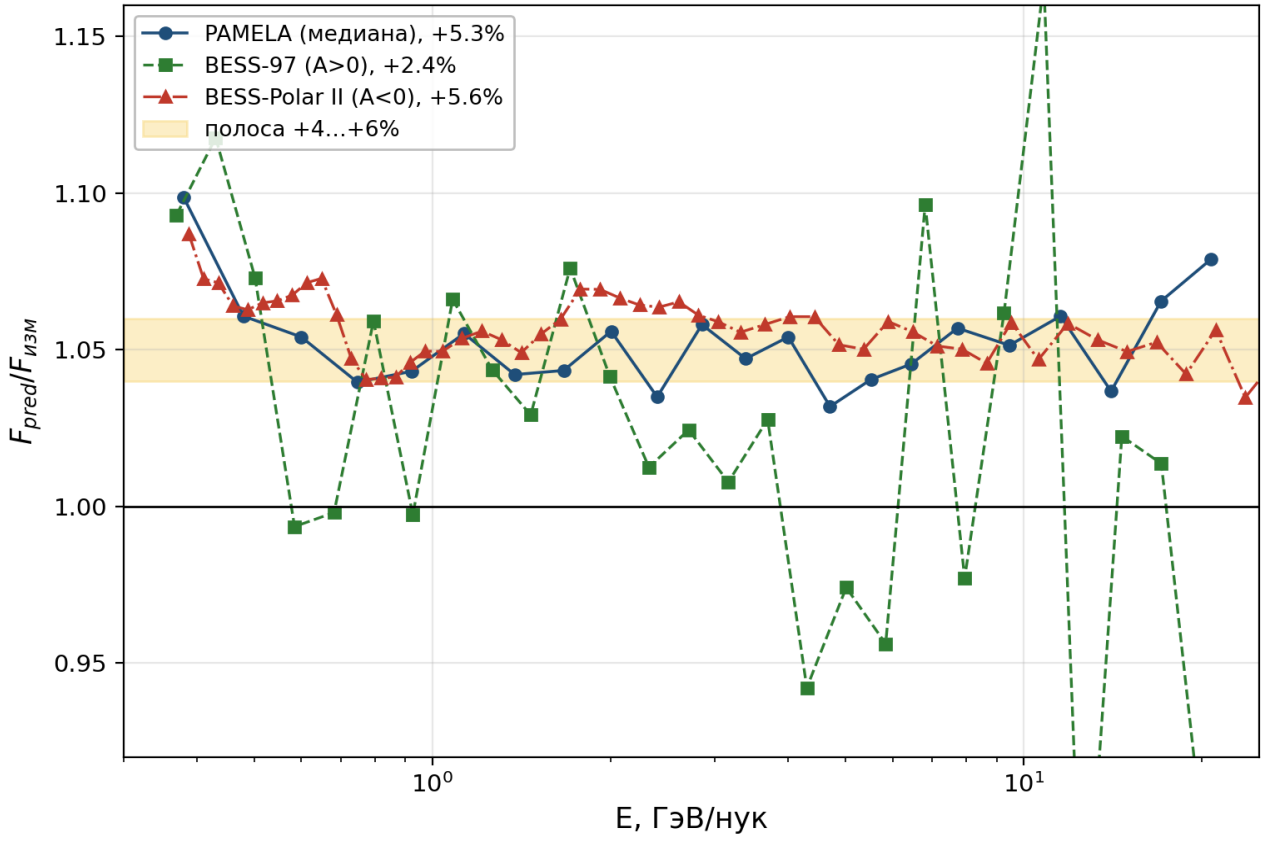


Сопоставление восстановленного спектра протонов с данными PAMELA и предыдущей версии модели для оборотов минимума 2009 года; нижние панели — отношение к PAMELA.

Валидация на данных PAMELA и BESS

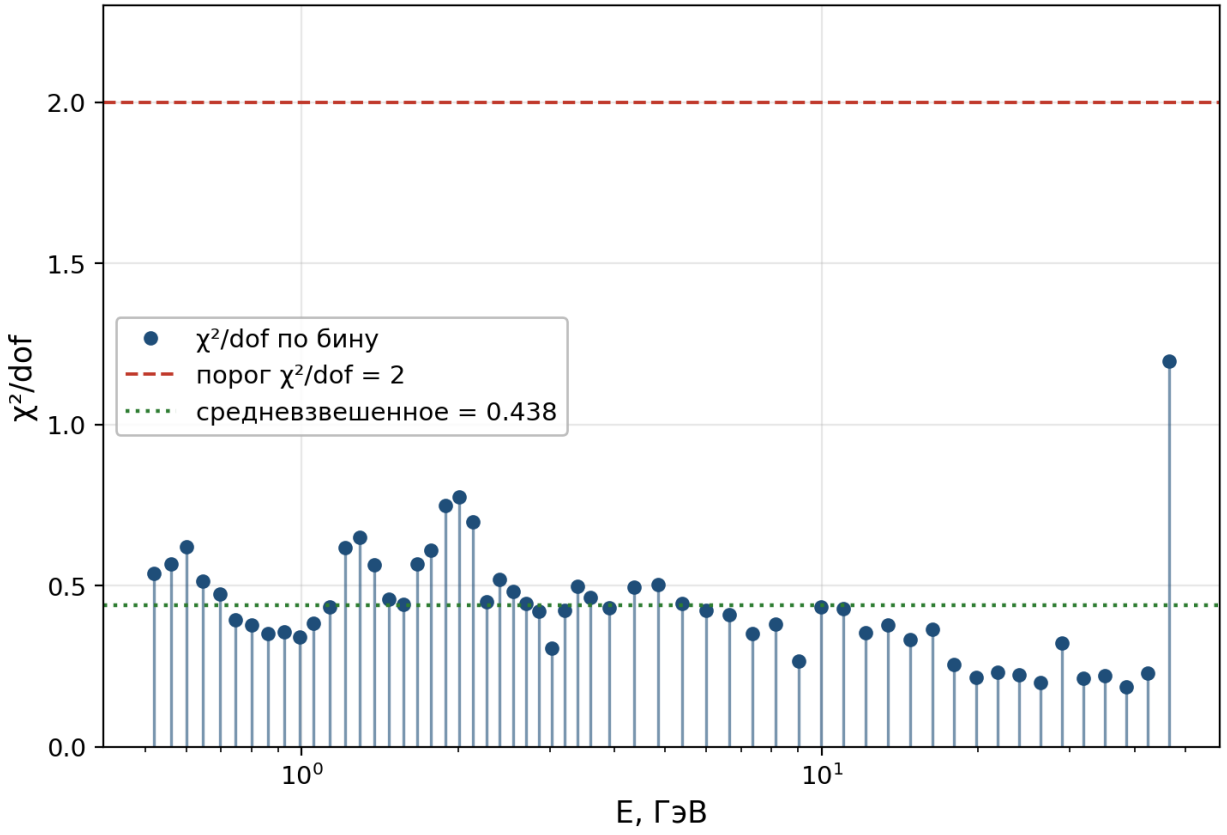
Для гелия выявлен систематический сдвиг абсолютной шкалы: восстановленный поток превышает измеренные PAMELA и BESS в среднем на 4,9 %, причём отношение плоское по энергии — его разброс по бинам составляет около 0,015

Прибор	Полярность A	Отношение F_pred/F_obs
PAMELA	A < 0	1,053 (+5,3 %)
BESS-97	A > 0	1,024 (+2,4 %)
BESS-Polar II	A < 0	1,056 (+5,6 %)



Отношение потока He, восстановленного моделью, к потоку, измеренному приборами PAMELA, BESS-97 и BESS-Polar II

Метрики качества восстановления



χ^2/dof по энергетическим бинам для протонов (валидация против PAMELA); штриховая линия — порог

Модель	p: χ^2/dof	He: χ^2/dof
Настоящая работа	0,438	4,96
Spectrum_nn (CNN)	0,856	3,82
Spectrum_nn (MLP)	1,354	2,56

Заключение

- Разработана двухмодельная архитектура (тренд × вариации) с технологией гибкого ввода НМ;
- Восстановленные спектры валидированы в сравнении с данными AMS-02, PAMELA и BESS;
- Обнаружено систематическое завышение предсказываемого потока ядер гелия, по всей видимости, обусловленное константами калибровки экспериментов;
- В дальнейшем планируется распространить реконструкцию на весь период работы сети нейтронных мониторов и провести строгую валидацию на полностью независимых данных.

МИФИ

Национальный
исследовательский
ядерный университет

Спасибо за внимание!

Эл. почта: ivan@seliansky.com