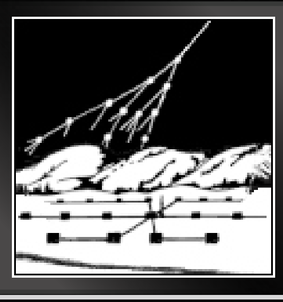
Якутский научный центр
Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН

Лебедев К.Г., Сабуров А.В., Боякинов А.Ф., Монастырев А.С., Глушков А.В., Неустроев Н.И.

Гибридное моделирование ШАЛ сверхвысоких энергий с использованием генеративной нейросети: разработка подхода



Моделирование широких атмосферных ливней методом Монте-Карло в CORSIKA при энергиях выше 10^{18} эВ является крайне ресурсоемкой задачей, особенно при необходимости получать большие статистические выборки без прореживания и с сохранением флуктуаций каскада. В данной работе предлагается суррогатный подход, в котором часть расчета развития ливня заменяется генеративной нейросетевой моделью, обученной на результатах непрореженного моделирования субливней.

Цель: снижение вычислительных затрат при контролируемом воспроизведении пространственных, энергетических и временных характеристик вторичных частиц.

Esub_max > Esub > Esub_min

MULTITHIN

частица с весом w ≥ 1

частицы, не выживающие при прореживании w < 0

Первичная частица

$18.5 < \mathrm{Log}E_0 < 19.5$
Theta < 60°
gamma, p, Fe

Монте-Карло развития ШАЛ от E_0 до E_{sub_max} (CORSIKA)

Остановка моделирования по ECUTS = E_{sub_min} для непопавших в диапазон (CORSIKA)

Извлечение субливней $E_{sub_max} > E_{sub} > E_{sub_min}$ в отдельные файлы без передачи на исполнение в MPI slave (mpi_runner.c)

CORSIKA + Модифицированный mpi_runner

Репрезентативная выборка из списка субливней — Скрипт на python

$E_{sub_max} = 10^{17.5}$ эВ
$E_{sub_min} = 10^{16.5}$ эВ

Полное Монте-Карло субливней до уровня наземной установки с опцией **MULTITHIN** — CORSIKA MPI — Кластер SLURM

Монте-Карло субливня в режиме **THINNING** до уровня наземной установки — CORSIKA MPI — Кластер SLURM

передача исходного списка субливней | Формирование THINNING массива частиц на поверхности | Формирование полного массива частиц на поверхности — Скрипт на python

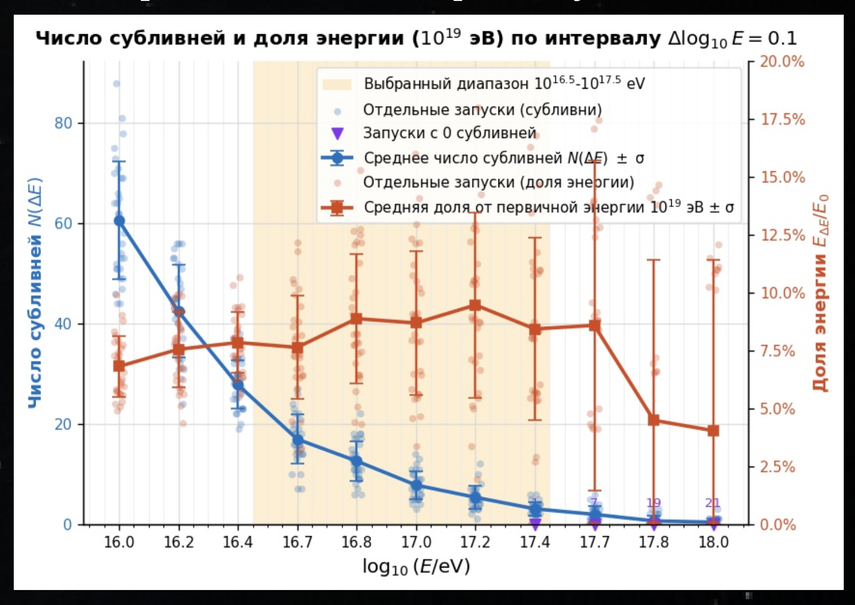
передача исходного списка субливней | Формирование THINNING массива частиц на поверхности — Скрипт на python

Обучение модели

Инференс: Формирование полного массива частиц на поверхности

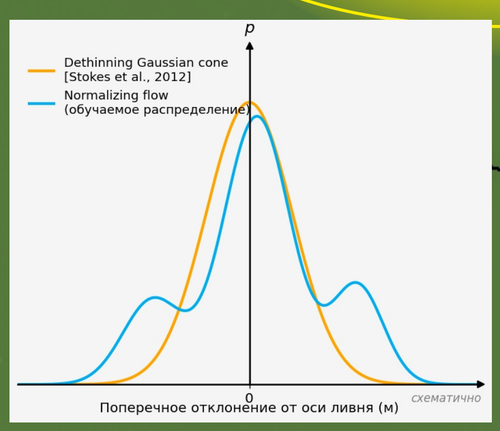
Нейросеть

Выбор диапазона энергий субливней



Ожидаемые результаты

- Целевое ускорение генерации ливня: до (10^3–10^4) раз относительно полного непрореженного моделирования.
- Сохранение физически значимых флуктуаций развития ШАЛ и ключевых распределений вторичных частиц.
- Проверка качества суррогатной модели по распределениям частиц на уровне наблюдения в модели и по откликам детекторов Якутской установки ШАЛ.



Результаты CaloFlow(Krause, Shih, 2023; arXiv:2106.05285v3) показывают, что модели на основе Normalizing flows способны точнее воспроизводить распределения и корреляции в задачах генерации калориметрических ливней GEANT4, чем GAN-подход.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №26-22-20064, https://rscf.ru/project/26-22-20064/

yakutsk-array.ru