

MPРНТИ 29.05.45; 29.03.77; 29.15.33; 29.15.35

<https://doi.org/10.26577/RCPH.2024.v91.i4.a3>Н.О. Ережеп<sup>1,2\*</sup>, Н.О. Садуев<sup>1,2</sup>, О.А. Каликулов<sup>1</sup>, М.А. Банщикова<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт ядерной физики, г. Алматы, Казахстан<sup>2</sup>Тянь-Шаньская высокогорная научная станция, г. Алматы, Казахстан\*[e-mail:n.yerezhpe@inp.kz](mailto:n.yerezhpe@inp.kz)

## СРАВНЕНИЕ АДРОННЫХ МОДЕЛЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ EPOS LHC И QGSJETII-04 ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ШАЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CORSIKA77410

В представленной статье проводится сравнительный анализ двух моделей высокоэнергетического адронного взаимодействия — EPOS LHC v3400 и QGSJET-II-04 — в сочетании с моделью низкоэнергетического взаимодействия GHEISHA 2002d (double precision) для первичных частиц (протон, кислород и железо) в диапазоне энергий  $10^{16}$ - $10^{19}$  эВ с использованием программы CORSIKA-7.7410. Проанализированы ключевые параметры ливней, такие как глубина максимума  $X_{max}$ , мюонное содержание, распределение энергии вторичных частиц и горизонтальное распределение.

Полученные результаты дают более глубокое понимание характеристик вторичных космических лучей на уровне наблюдений Тянь-Шаньской высокогорной научной станции (ТШВНС, 3340 м над уровнем моря) и могут быть использованы для планирования будущих экспериментов по исследованию стволов ШАЛ «Толчковой Установкой». Определены особенности каждой модели, проведена оценка их влияния на ключевые параметры ШАЛ, а также установлены области их наибольшей применимости для улучшения интерпретации экспериментальных данных.

В работе отражены основные принципы и характеристики, а также теоретические знания, необходимые для понимания моделируемых эффектов, определена область применения, показан процесс настройки данных и сложность вычислений моделей EPOS и QGSJET. Проведено сравнение общего количества частиц, как для протона, кислорода, так и для железа, в модели EPOS и QGSJET II.

**Ключевые слова:** широкие атмосферные ливни (ШАЛ), адронное взаимодействие, энергетические спектры, космические лучи.

Н.О. Ережеп<sup>1,2\*</sup>, Н.О. Садуев<sup>1</sup>, О.А. Каликулов<sup>1</sup>, М.А. Банщикова<sup>1</sup><sup>1</sup>Ядролық физика институты, Алматы қ., Қазақстан<sup>2</sup>Тянь-Шань биік таулы ғылыми станциясы, Алматы қ., Қазақстан\*[e-mail:n.yerezhpe@inp.kz](mailto:n.yerezhpe@inp.kz)

## CORSIKA-77410 көмегімен КАН модельдеу кезінде EPOS LHC және QGSJETII-04 адрондық өзара әрекеттесуінің модельдерін салыстыру

Мақалада EPOS LHC v3400 және QGSJET-II-04 жоғары энергиялы адрондық өзара әрекеттесу модельдерінің, сондай-ақ төмен энергиялы өзара әрекеттесу моделі GHEISHA 2002d (double precision) негізінде  $10^{16}$ - $10^{19}$  эВ энергия диапазонында протон, көміртек және темір сияқты алғашқы бөлшектер үшін CORSIKA-7.7410 бағдарламасын қолдану арқылы салыстырмалы талдау жүргізілді. Кең атмосфералық нөсерлер (КАН) негізгі параметрлері, мысалы, максимум тереңдігі  $X_{max}$ , мюондардың сандық таралуы, екінші реттік бөлшектердің энергиясын таралуы және көлденең таралу қимасы талданды.

Алынған нәтижелер екінші реттік ғарыштық сәулелердің Тянь-Шань биік таулы ғылыми станциясының (теңіз деңгейінен жоғары 3340 м биіктігі) бақылау деңгейіндегі сипаттамаларын тереңірек түсінуге мүмкіндік береді және «Жұлқылама Қондырғы» арқылы КАН зерттеулеріне бағытталған болашақ эксперименттерді жоспарлауға негіз бола алады. Әр модельдің ерекшеліктері анықталып, олардың ШАЛ негізгі параметрлеріне әсері мен эксперименттік деректерді түсіндіруді жақсартудағы қолдану аймақтары бағаланды.

Жұмыста EPOS және QGSJET модельдерінің негізгі қағидаттары, олардың теориялық негізі, қолдану салалары, модельденетін эффектілер, деректерге баптау және есептеулердің күрделілігі көрсетілді.

Протон, оттегі және темір үшін бөлшектердің жалпы саны EPOS және QGSJET-II модельдерінде салыстырылды.

**Түйін сөздер:** кең атмосфералық нөсер (КАН), адрондық әсерлесу, энергия спектрлері, ғарыштық сәулелер.

N. Yerezhep<sup>1,2\*</sup>, N. Saduyev<sup>1</sup>, O. Kalikulov<sup>1</sup>, M. Banshchikova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Tien-Shan High Altitude Science Station (TSHASS), Almaty, Kazakhstan

\*[e-mail:n.yerezhep@inp.kz](mailto:n.yerezhep@inp.kz)

## Comparison of hadron interaction models of EPOS LHC and QGSJETII-04 in the simulation of EAS using CORSIKA-77410

The article presents a comparative analysis of two high-energy hadronic interaction models, EPOS LHC v3400 and QGSJET-II-04, combined with the low-energy interaction model GHEISHA 2002d (double precision), for primary particles such as protons and iron in the energy range of  $10^{16}$ - $10^{19}$  eV using the CORSIKA-7.7410 program. Key air shower parameters, including the depth of maximum  $X_{max}$ , muon distributions, energy distribution of secondary particles, and horizontal distribution, were analyzed. The results reveal the strengths and limitations of each model, providing recommendations for their application in cosmic ray research.

The results provide a deeper understanding of the characteristics of secondary cosmic rays at the observation level of the Tien Shan High-Altitude Scientific Station (3340 m above sea level) and are intended to support future experiments focused on EAS core studies by the «Burst Detector». The features of each model were determined, and their influence on key EAS parameters, as well as their applicability in improving the interpretation of experimental data, were assessed.

The study outlines the fundamental principles and characteristics, as well as the theoretical knowledge required to understand the simulated effects. The scope of application is defined, and the data calibration process and computational complexity of the EPOS and QGSJET models are described. A comparison of the total number of particles for protons, oxygen, and iron between the EPOS and QGSJET-II models is provided.

**Keywords:** extensive air showers (EAS), hadronic interaction, energy spectra, cosmic rays.

### Введение

Широкие атмосферные ливни (ШАЛ), возникающие при взаимодействии высокоэнергетических космических лучей с атмосферой Земли, предоставляют уникальную возможность изучать физику адронных взаимодействий при энергиях, значительно превышающих возможности современных коллайдеров. Для интерпретации данных экспериментов по ШАЛ критически важным является моделирование процессов высокоэнергетических столкновений, которое выполняется с использованием специализированных программных пакетов, таких как CORSIKA [1, 2].

CORSIKA (от англ. COsmic Ray SIMulations for KAscade), как и большинство программ для моделирования, работающих с большими массивами данных, в своей основе имеет метод Монте-Карло. Для описания взаимодействий в данном программном пакете используется несколько моделей. Такие модели адронных взаимодействий, как EPOS LHC [3, 4] и QGSJETII-04 [5-8] играют ключевую роль в симуляции развития ШАЛ. Они описывают физические процессы,

происходящие на разных стадиях ливня, включая генерацию вторичных частиц, их взаимодействие с атмосферой и пространственное распределение. EPOS LHC и QGSJETII-04 широко применяются в задачах космической физики, но их предсказания для определённых параметров ШАЛ, таких как глубина максимума  $X_{max}$ , число мюонов и профили энергии, могут заметно отличаться. Эти различия обусловлены разницей в теоретической основе и подходах к описанию процессов взаимодействия.

В настоящей работе проводится сравнительный анализ моделей EPOS LHC и QGSJETII-04 при моделировании ШАЛ с использованием CORSIKA 7.7410. Цель исследования – выявить особенности каждой модели, оценить их влияние на ключевые параметры ШАЛ и определить области их наибольшей применимости. Это позволит внести вклад в улучшение интерпретации экспериментальных данных и более точное понимание природы космических лучей, а также может быть использовано для планирования будущих экспериментов по исследованию стволов ШАЛ «Толковой Установкой» на уровне

наблюдений Тянь-Шаньской высокогорной научной станции (ТШВНС, 3340 м над уровнем моря) [9-13].

### Метод моделирования

Моделирование широких атмосферных ливней (ШАЛ) проводится с использованием программного пакета CORSIKA (COsmic Ray Simulations for KASCADE), который является стандартным инструментом для детального анализа каскадов частиц, возникающих при взаимодействии космических лучей с атмосферой Земли. Этот пакет позволяет учитывать как физику высокоэнергетических взаимодействий, так и сложные процессы, связанные с распространением вторичных частиц в атмосфере.

Программа CORSIKA это универсальный программный пакет для детального моделирования широких атмосферных ливней (ШАЛ) в эксперименте KASCADE [14]. Данная программа разработана в Институте физики ядерных частиц Карлсруэ (KIT) и поддерживает широкий спектр моделей взаимодействий, а также несколько моделей адронных взаимодействий для высоко- и низкоэнергетических процессов. Для описания высокоэнергетических процессов доступны такие модели как EPOS LHC [15], QGSJETII-04 [16], SIBYLL [17-20], DPMJET [21-23], VENUS [20], NEXUS [21] и другие. Низкоэнергетические взаимодействия моделируются с использованием пакетов FLUKA [26], GHEISHA [27-29]. Такие алгоритмы как NKG [30] и EGS4 [31] используются для расчёта электромагнитного каскада. Эта гибкость позволяет адаптировать программу для различных задач, связанных с космическими лучами, а также учитывать особенности первичных частиц, включая протоны, альфа-частицы, ядра различных элементов, гамма-кванты, мюоны и нейтрино. Диапазон энергий может достигать десятков ГэВ до сверхвысоких энергий  $10^{21}$  эВ. Включает различные модели атмосферы для корректного описания взаимодействий на разных высотах, например, стандартная атмосфера США (USA), основанная на измерениях плотности, температуры и давления на разных высотах. Процессы генерации вторичных частиц учитывают все стадии ливня, начиная от генерации вторичных частиц (пионы, каоны, мюоны) до их распространения и взаимодействий. Рассчитываются траектории частиц в магнитном поле Земли и их энергетические потери при прохождении через атмосферу.

При изучении физики адронных взаимодействий ШАЛ в диапазоне энергий  $10^{16}$ -

$10^{19}$  использованы две модели высокоэнергетических взаимодействий — EPOS LHC и QGSJETII-04 и получено сравнение адронных моделей взаимодействия для версии CORSIKA77410. Используемые модели адронных взаимодействия учитывают нелинейные эффекты и насыщение партонов.

### Особенности моделей адронных взаимодействий EPOS и QGSJET

Обе модели EPOS и QGSJET, как упоминалось ранее, являются основными инструментами для моделирования адронных взаимодействий при высоких энергиях в CORSIKA. Они активно используются в задачах моделирования широких атмосферных ливней (ШАЛ), вызванных космическими лучами, а также в анализе экспериментальных данных с ускорителей, таких как Большой адронный коллайдер (LHC). Каждая из моделей имеет свои уникальные теоретические основы и подходы к описанию физических процессов, что делает их дополняющими друг друга для различных задач.

Обе модели используют схожие подходы к описанию процессов, таких как партонные каскады и многократные рассеяния. Однако EPOS делает акцент на учёте коллективных эффектов и гидродинамических процессах, в то время как QGSJET-II-04 ориентирована на точное описание нелинейных взаимодействий в рамках обмена померонами. Это различие приводит к различным предсказаниям для параметров ШАЛ, включая глубину максимума  $X_{max}$ , количество мюонов и распределение энергии вторичных частиц. Для задач моделирования ШАЛ выбор модели может существенно повлиять на результаты, поэтому их сравнительный анализ, проведённый в данной работе, позволяет выявить сильные и слабые стороны каждой из них и определить наиболее подходящую модель для конкретной задачи.

Совокупность характеристик EPOS и QGSJET делает их незаменимыми инструментами для изучения высокоэнергетических взаимодействий. Эти модели дополняют друг друга, предоставляя исследователям гибкость в выборе подхода в зависимости от природы изучаемого явления и экспериментальных условий (таблица 1). Таким образом, QGSJET-II — эффективен для задач, где важны нелинейные эффекты в динамике и точность при экстремально высоких энергиях. EPOS — предпочтителен в исследованиях, где требуется учитывать коллективные явления (например, в тяжелых ионных столкновениях). Отличие в времени вычисления были сравнены нами в работе [32].

**Таблица 1** – Сравнение EPOS и QGSJET

Характеристика	QGSJET-II	EPOS
Теоретическая база	Квантовая теория полей	Партонные каскады, гидродинамика
Область применения	Широкие атмосферные ливни	Космические лучи, тяжелые ионы
Моделируемые эффекты	Нелинейные эффекты насыщения	Коллективные эффекты (flow)
Настройка на данные	Косвенно через эксперименты по космическим лучам	Прямо через данные LHC
Сложность вычислений	Быстрее, проще	Более сложные вычисления

### Модель QGSJET (Quark-Gluon String Jet Model)

QGSJET (Quark-Gluon String Jet Model) представляет собой теоретически строгую модель, основанную на теории поля Грибова [33], которая описывает взаимодействия в терминах обмена померонами. Модель QGSJET-II, и особенно её версия QGSJETII-04, расширяет описание взаимодействий, учитывая нелинейные эффекты, такие как насыщение партонных и взаимодействие померон-померон [34, 35]. Эти эффекты играют ключевую роль при экстремально высоких энергиях, где плотность партонных становится значительной, а их взаимодействия начинают существенно влиять на динамику процесса. QGSJET-II-04 также улучшает описание зарядового обмена в столкновениях с  $\pi$ -мезонами, что приводит к более точным предсказаниям содержания мюонов в широких атмосферных ливнях. Одним из ключевых преимуществ модели является её способность описывать не только адрон-адронные взаимодействия, но и столкновения ядер, что делает её полезной для задач космической физики, связанных с изучением состава первичных космических лучей.

*Базовые принципы:* модель основана на теории Грибова, которая описывает взаимодействия в терминах «обмена партонных»; предполагается, что партонные являются эффективным описанием каскадов партонных (кварков и глюонов) в высокоэнергетических столкновениях; модель включает как мягкие (непертурбативные), так и полумягкие процессы (с участием умеренно высоких переданных импульсов).

*Расширенная версия QGSJET-II:* учитываются нелинейные эффекты, такие как насыщение партонных и взаимодействие померон-померон; Улучшено описание процессов обмена

зарядом и генерация мюонов, что имеет важное значение для симуляций широких атмосферных ливней; Данная версия ориентирована на обработку как адрон-адронных, так и ядро-ядерных взаимодействий.

*Применение:* используется в моделировании характеристик ШАЛ, таких как распределение мюонов, глубина максимума  $X_{max}$ , продольные и поперечные профили ливней; Сильная сторона модели — точное описание многократных рассеяний при сверхвысоких энергиях.

### Модель EPOS (Energy-conserving Parton-based Object-oriented Simulation)

Модель EPOS (Energy-conserving Parton-based Object-oriented Simulation) разработана для точного описания многократных взаимодействий и учёта коллективных эффектов, таких как гидродинамическое расширение (flow) в столкновениях протонов, ядер и других частиц. EPOS основана на подходе партонных каскадов, где взаимодействия описываются в терминах мягких и полумягких померонов, с явным учётом сохранения энергии на всех этапах моделирования. Одной из уникальных особенностей модели является включение остатков ядра (remnants), что улучшает предсказания для тяжёлых ядерных взаимодействий и позволяет точнее моделировать странные частицы и мультичастичные потоки. Версия EPOS LHC оптимизирована для учёта данных LHC [36], полученных в экспериментах ALICE [37], CMS [38] и ATLAS [39], что обуславливает актуальность ее применения для решения задач современной физики высоких энергий. Особое внимание уделено описанию квазиабсолютных столкновений с малым поперечным импульсом, что важно для задач, связанных с описанием коллективных эффектов и изучением кварк-глюонной плазмы.

*Базовые принципы:* модель основана на подходе каскадов кварков и глюонов, подобно QGSJET, но включает несколько уникальных аспектов; проводит учет коллективных эффектов, таких как гидродинамическое расширение (flow), что особенно важно для тяжелых ионов; энергия сохраняется на всех этапах взаимодействия, включая генерацию вторичных частиц и каскадов.

*Особенности EPOS LHC:* модель настроена на данные экспериментов LHC (например, ALICE, CMS, ATLAS); подразумевает улучшенное описание потоков частиц, возникающих в столкновениях протонов, протон-ядер и ядер-ядер; использует подход трех объектов: партонные лестницы, остатки (remnants) ядра и их взаимодействие.

*Применение:* Важна для задач, где требуется точное описание мультиплетных взаимодействий, таких как генерация странных частиц или потоков при низких поперечных импульсах; применяется как в космических исследованиях (моделирование EAS), так и в физике тяжелых ионов.

### Результаты моделирования. Обсуждение

Для сравнения моделей EPOS LHC и QGSJETII-04 были выбраны следующие ключевые параметры ШАЛ:

- 1) Глубина максимума  $X_{max}$ : уровень, на котором достигается наибольшее развитие ливня.
- 2) Число мюонов: общее количество мюонов на наблюдательном уровне.
- 3) Распределение энергии: распределение вторичных частиц по энергии.
- 4) Продольное распределение: распределение вторичных частиц в ливне на уровне наблюдения.

В результате моделирования широких атмосферных ливней (ШАЛ) с использованием программного пакета CORSIKA 7.7410 и моделей адронных взаимодействий EPOS LHC и QGSJETII-04 были получены данные о ключевых параметрах, таких как глубина максимума  $X_{max}$ , мюонное содержание, распределение энергии вторичных частиц и горизонтальные распределения. Эти параметры позволяют проанализировать различия в подходах моделей и их влиянии на характеристики ливней. В качестве первичных частиц используются протоны, ядро кислорода (O) и ядра железа (Fe), покрывающие диапазон энергий от  $10^{15}$  до  $10^{19}$  эВ. Уровень наблюдения – поверхность земли с учётом высоты ТШВНС (3340 м над уровнем моря) и геомагнитного поля согласно координатам 29.69 долготы и 47.45 широты. Использована стандартная модель атмосферы. Обработки

данных Corsika выполнялось на python [40] с импортированием библиотек ROOT CERN [41] для построения графиков и получения фитов.

### Глубина максимума $X_{max}$

Глубина максимума, определяющая положение точки наибольшей плотности вторичных частиц в атмосфере, является одним из наиболее чувствительных параметров для определения природы первичных частиц.

Глубина максимума ливня  $X_{max}$  содержит информацию как о массе первичной космической частицы, инициирующей ливень, так и о свойствах адронных взаимодействий, участвующих в процессе развития каскада. Среднее значение  $X_{max}$  зависит от энергии первичной частицы  $E$  и количества нуклонов  $A$  в её составе, что выражается уравнением:

$$X_{max} = \beta(\ln E - \ln A) + \alpha, \quad (1)$$

где  $\beta$  и  $\alpha$  зависят от особенностей адронных взаимодействий, если первичная частица фиксирована. Эти параметры очень чувствительны к изменениям в сечении взаимодействия, мультиплетности и упругости. Уравнение (1) может быть выведено из простой обобщённой каскадной модели для адронных первичных частиц, но оно также находится в хорошем согласии с описанием эволюции  $X_{max}$ , предсказанной современными адронными моделями.

Уравнение (1) также можно представить в следующей форме:

$$X_{max} = ER_{10}(\lg E - \lg A) + X_{init}, \quad (2)$$

где  $ER_{10}$  и  $X_{init}$  — параметры, зависящие от энергии и начальных условий формирования ливня.

Средние значения глубины максимума  $X_{max}$  для двух моделей показаны в зависимости от энергии на рисунке 1. Как и ожидалось, более тяжёлая первичная частица формирует максимум ливня на меньшей глубине по сравнению с более лёгкой частицей.

Значение  $X_{max}$  и наклон кривой для протона в модели EPOS немного выше, чем в QGSJET. Аналогично, для железа наклон кривой также выше в EPOS, в то время как значения для кислорода наклон кривой выше в энергиях  $10^{17}$  и ниже с возрастанием до  $10^{19}$ . И это скорее всего обусловлено недостаточностью количества итерации при моделировании, связи с нехваткой

постоянной памяти. Подобранные значения наклона  $ER_{10}$  и перехвата  $X_{init}$  приведены в таблице 2.

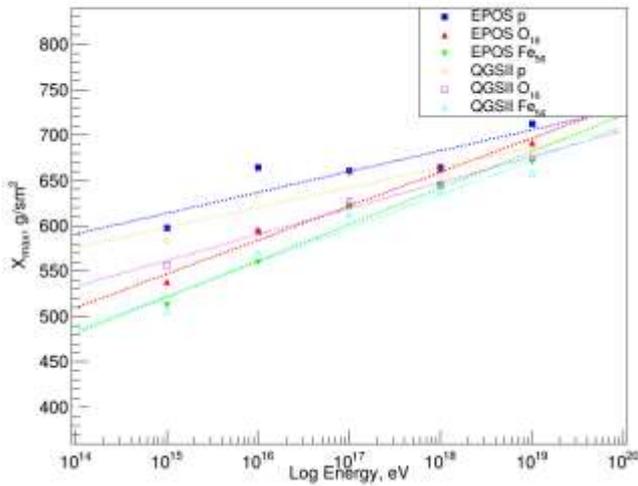


Рисунок 1 – Зависимость среднего значения  $X_{max}$  от энергии первичных частиц

Таблица 2 – Наклон  $X_{max}$

Модель и частица	$\alpha (X_{init})$		$\beta (ER_{10})$	
	среднее	+/-	среднее	+/-
EPOS –p	269.158	115.795	9.98094	2.94801
EPOS –O	-14.2782	47.6991	16.2519	1.21436
EPOS –Fe	-80.1332	76.7562	17.4202	1.95412
QGSII –p	267.246	89.1434	9.57887	2.26948
QGSII –O	131.897	32.0413	12.4484	0.81573
QGSII –Fe	-37.6379	89.8482	16.2196	2.28743

### Количество электронов и мюонов

Количество мюонов в ливне является ключевым параметром для изучения адронных взаимодействий, поскольку мюоны образуются в результате распада заряженных мезонов (таблицы 3-4). Средние значения общего числа электронов  $N_e$ , мюонов  $N_{mu}$ , адронов  $N_h$ , а также суммы энергий всех адронов  $E_h$ , зарегистрированных на уровне земли, для моделей взаимодействий EPOS и QGSJET II показаны в зависимости от энергии на рисунках 2, 3, 4 и 5, соответственно.

Видно, что обе модели демонстрируют линейную зависимость этих компонентов от энергии в логарифмическом масштабе.

На рисунках 2–5 видно, что нет значительных различий в размере заряженных частиц ливня, мюонов, адронов и суммарной энергии адронов

для двух рассматриваемых моделей при выбранных энергиях первичных частиц (протона, кислорода и железа). Хотя в предыдущих работах при сравнении версий CORSIKA v6990 [42] для мюонов различия между предсказаниями моделей EPOS 1.99 и QGSJET II-03 были значительны.

Таблица 3 – Количество мюонов  $\lg(N)$

Модель и частица	$\lg(N)$	
	Среднее значение	отклонение
EPOS –p	0.727826	0.007301
EPOS –O	0.883716	0.000085
EPOS –Fe	0.887186	0.000064
QGSII –p	0.881919	0.000084
QGSII –O	0.870927	0.000229
QGSII –Fe	0.888974	0.000084

Таблица 4 – Количество заряженных частиц  $\lg(N)$

Модель и частица	$\lg(N)$	
	Среднее значение	отклонение
EPOS –p	0.725499	0.014184
EPOS –O	0.891483	0.001008
EPOS –Fe	0.893778	0.000071
QGSII –p	0.890923	0.000024
QGSII –O	0.878806	0.000019
QGSII –Fe	0.893987	0.000070

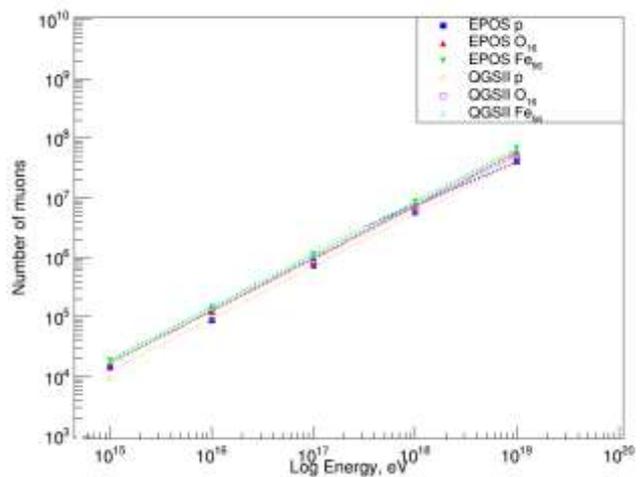
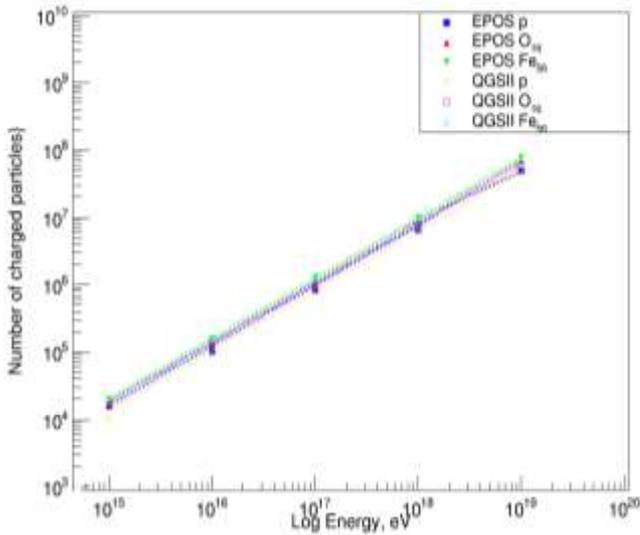
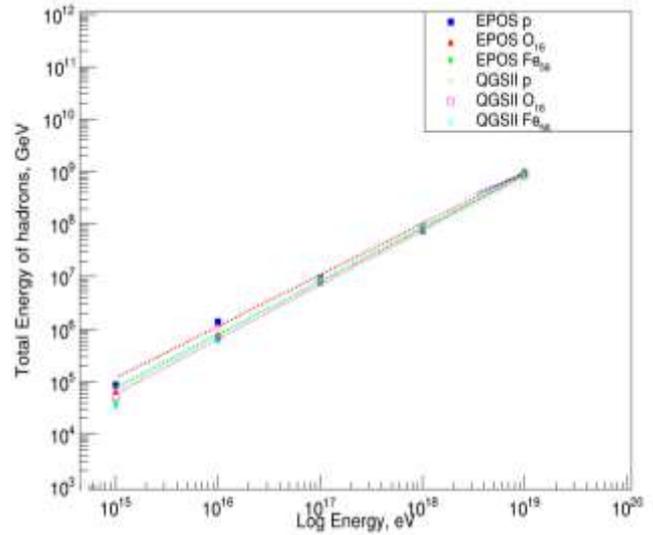


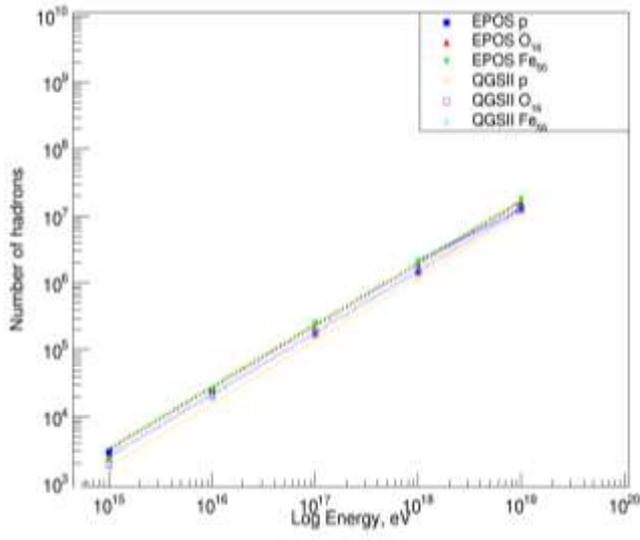
Рисунок 2 – Зависимость среднего количества мюонов ливня от энергии первичных частиц



**Рисунок 3** – Зависимость среднего количества заряженных частиц от энергии первичных частиц



**Рисунок 5** – Зависимость суммарной энергии адронов от энергии первичных частиц



**Рисунок 4** – Зависимость количества адронов от энергии первичных частиц

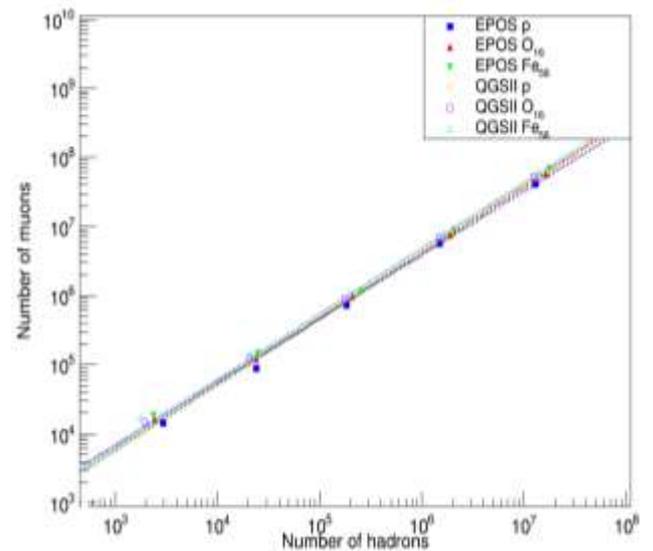
Для адронов общее количество частиц, как для протона, кислорода, так и для железа, в модели EPOS оказывается незначительно больше, чем в QGSJET II (рисунок 4).

Однако, если рассматривать суммарную энергию всех адронов  $E_h$ , значительных различий между моделями с возрастанием энергий не наблюдается (рисунок 5).

### Распределение адронов и их энергии

Распределение энергии вторичных частиц также демонстрирует заметные различия между моделями.

Среднее количество адронов в зависимости от числа мюонов представлено на рисунке 6 для двух моделей. Наклоны всех кривых практически одинаковы.

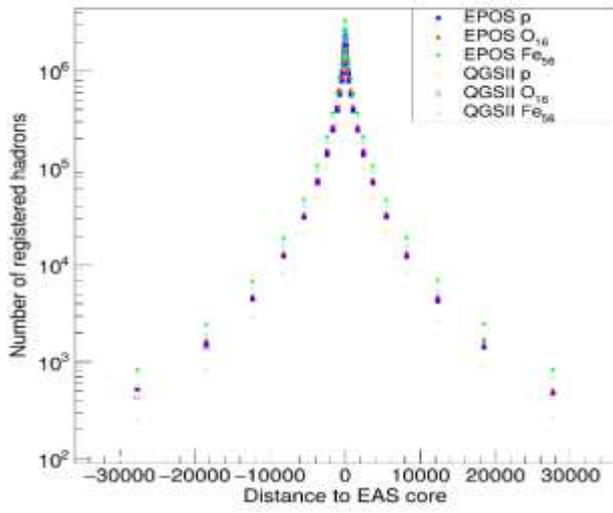


**Рисунок 6** – Соотношение количества мюонов на количество адронов

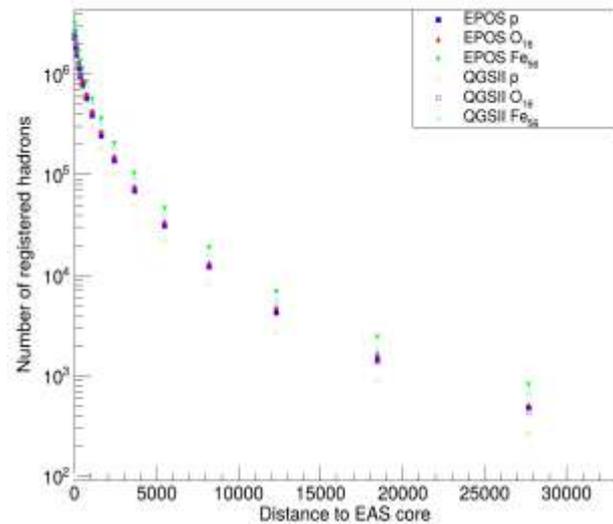
### Продольное распределение

Продольное распределение частиц (их плотность на разных расстояниях от оси ливня) также демонстрирует влияние моделей.

Видимых различий общего среднего количества зарегистрированных адронов для первичных частиц всех пяти значений энергии (рисунки 7-12) между двумя моделями практически нет.

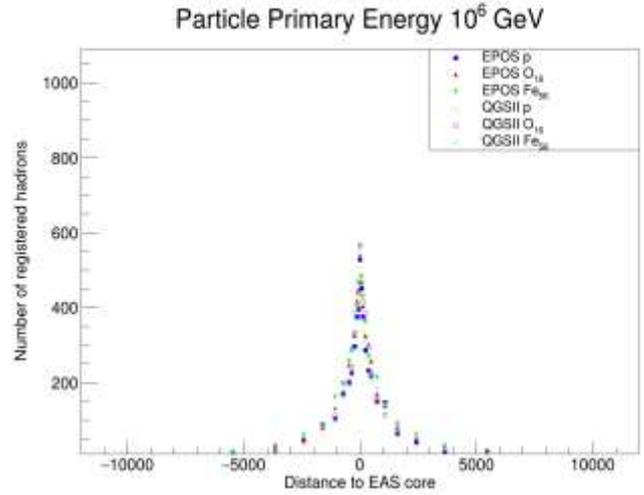


а)

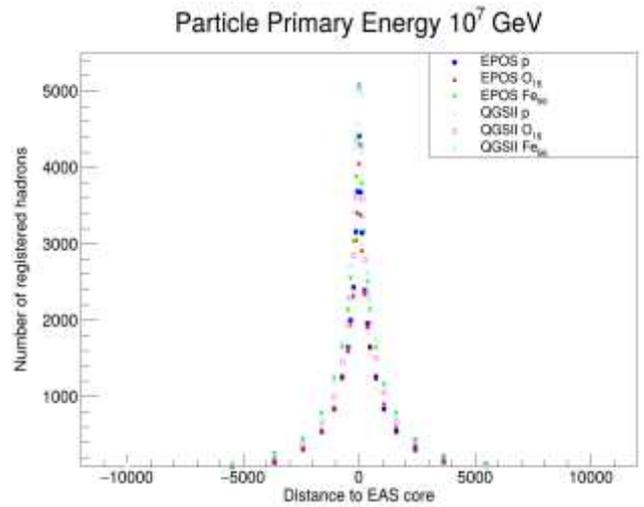


б)

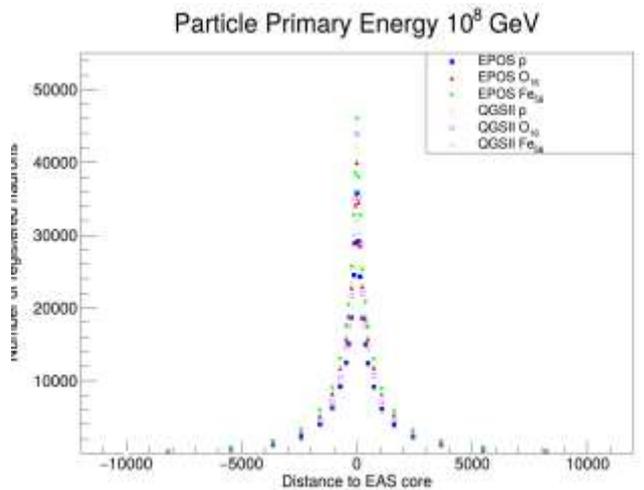
**Рисунок 7** – Распределения количества адронов от центра ШАЛ (а). Увеличенный участок правой ветви (б)



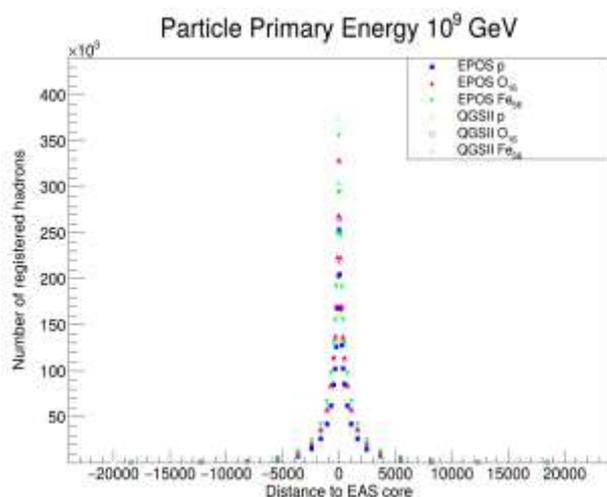
**Рисунок 8** – Распределение количества адронов от центра ШАЛ для энергий  $10^6$  ГэВ



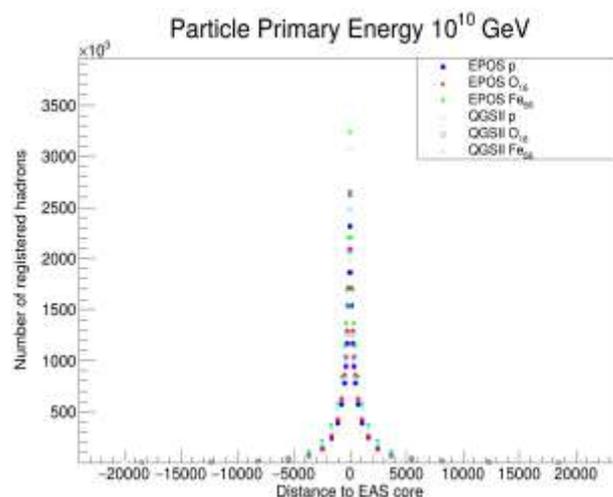
**Рисунок 9** – Распределение количества адронов от центра ШАЛ для энергий  $10^7$  ГэВ



**Рисунок 10** – Распределение количества адронов от центра ШАЛ для энергий  $10^8$  ГэВ



**Рисунок 11** – Распределение количества адронов от центра ШАЛ для энергий  $10^9$  ГэВ



**Рисунок 12** – Распределение количества адронов от центра ШАЛ для энергий  $10^{10}$  ГэВ

### Заключение

Полученные результаты по различиям моделей EPOS и QGSJET II в CORSIKA v77410 указывают на проведенную многошаговую модификацию версий CORSIKA v6990 одной или обеих моделей, чтобы согласовать их предсказания с экспериментальными данными.

Из графиков видно, что для первичных протонов модель EPOS предсказывает немного больше мюонов (около 2%) для ливней до энергий  $10^{16}$  эВ, практически равное число электронов (разница менее 1%) при  $10^{16}$  эВ и немного меньше мюонов (около 2%) после энергий  $10^{16}$  эВ.

Результаты показывают, что различия между моделями зависят как от энергии, так и от типа первичной частицы.

### Благодарность

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR21881941 «Экспериментальные и теоретические исследования в области высоких и сверхвысоких энергий для решения актуальных задач астрофизики и физики космических лучей»).

### Литература

- 1 Heck D., Knapp J., Capdevielle J., Schatz G., Thouw T. CORSIKA: A Monte Carlo code to simulate extensive air showers // *Physics*. – 2022. – Vol.9. – P.35-40. DOI:10.5445/IR/270043064
- 2 Sandrock A. Status and prospects of the CORSIKA 8 air shower simulation framework // *PoS ECRS*. – 2023. – Vol. 075. – P. 1-8. DOI: 10.22323/1.423.0075
- 3 Pierog T., Karpenko Iu., Katzy J. M., Yatsenko E., Werner K. EPOS LHC: Test of collective hadronization with data measured at the CERN Large Hadron Collider // *Phys. Rev.* – 2015. – Vol. 92, No. 3. – P. 034906. DOI: 10.1103/PhysRevC.92.034906
- 4 Pierog T. LHC results and High Energy Cosmic Ray Interaction Models // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2013. – Vol. 409. – P. 012008. DOI: 10.1088/1742-6596/409/1/012008
- 5 Ostapchenko S. QGSJET-II: towards reliable description of very high energy hadronic interactions // *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* – 2006. – Vol. 151. – P. 143-146. DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2005.07.026
- 6 Ostapchenko S. Nonlinear screening effects in high energy hadronic interactions // *Phys. Rev.* – 2006. – Vol. D74. – P. 014026. DOI: 10.1103/PhysRevD.74.014026
- 7 Ostapchenko S. Monte Carlo treatment of hadronic interactions in enhanced Pomeron scheme: QGSJET-II model // *Phys. Rev.* – 2011. – Vol. D83. – P. 014018. DOI: 10.1103/PhysRevD.83.014018
- 8 Ostapchenko S. QGSJET-II: physics, recent improvements, and results for air showers // *EPJ Web Conf.* – 2013. – Vol. 52. – P. 02001. DOI: 10.1051/epjconf/20135202001
- 9 Kalikulov O.A., Saduyev N.O. Study of the spatiotemporal structure of extensive air showers at high energies // *Journal of Instrumentation*. – 2022. – Vol. 17, No. 41. – P. C04014. DOI: 10.1088/1748-0221/17/04/C04014

- 10 Shaulov S.B. Method for determining angles in x-ray emulsion chambers // *Recent Contributions to Physics*. – 2019. – Vol. 69, No. 2. – P. 61-70. DOI: 10.26577/RCPH-2019-i2-9
- 11 Shinbulatov S.K. Study of the angular spectra of hadrons in x-ray emulsion chamber // *Proc. 36th International Cosmic Ray Conference*. – 2019. – July 24th - August 1st.
- 12 Shaulov S.B. Autonomous station for recording radiation in a thunderstorm atmosphere at the Tien Shan high mountain cosmic-ray station // *Recent Contributions to Physics*. – 2019. – Vol. 70, No. 3. – P. 13-21. DOI: 10.26577/RCPH-2019-i3-2
- 13 Kalikulov O.A. Прототип установки временных детекторов для исследования оси прихода ШАЛ // *Вестник КазНУ. Серия Физическая*. – 2021. — Том 79, №. 4. – С. 4-9. DOI: 10.26577/RCPH.2021.v79.i4.01
- 14 Antoni T. The cosmic-ray experiment KASCADE // *Nucl. Instr. Meth. A*. – 2003. – Vol. 513. – P. 490-510. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)02076-X
- 15 Pierog T. EPOS LHC: Test of collective hadronization with data measured at the CERN Large Hadron Collider // *Phys. Rev. C*. – 2015. – Vol. 92. – P. 034906. DOI: 10.1103/PhysRevC.92.034906
- 16 Ostapchenko S. LHC data on inelastic diffraction and uncertainties in the predictions for longitudinal extensive air shower development // *Phys. Rev. D*. – 2014. – Vol. 89. – P. 074009. DOI: 10.1103/PhysRevD.89.074009
- 17 Riehn F., Engel R., Fedynitch A., Gaisser K., Todor S. A new version of the event generator SIBYLL // *Proc. Sci.* – 2015. – July 30th. – P. 558.
- 18 Riehn F., Engel R., Fedynitch A., Gaisser T.K., Stanev T. Charm production in SIBYLL // *EPJ Web of Conferences*. – 2015. – Vol. 99. – P. 12001. DOI: 10.1051/epjconf/20159912001
- 19 Riehn F. The hadronic interaction model SIBYLL 2.3c and Feynman scaling // *Proc. 35th Int. Cosmic Ray Conf., Bexco, Busan (Korea)*. – 2017. – Contr. 301. DOI: 10.48550/arXiv.1709.07227
- 20 Engel R. Hadronic interaction model SIBYLL 2.3d and extensive air showers // *Phys. Rev. D*. – 2019. – Vol. 102. – P. 063002. DOI: 10.1103/PhysRevD.102.063002
- 21 Roesler S., Engel R., Ranft J. The Monte Carlo event generator DPMJET-III // *Proc. 2000 Conf., Lisbon (Portugal)*. – 2000. – Oct. 23-26.
- 22 Kling A. et al. eds. *Advanced Monte Carlo for Radiation Physics, Particle Transport Simulation and Applications* // Springer (Berlin). – 2001. DOI: 10.1007/978-3-642-18211-2
- 23 Fedynitch A., Engel R. Nuclear model developments in FLUKA // *Nuclear Reaction Mechanisms*. – 2015. – Vol. 14. – P. 291.
- 24 Werner K. Strings, pomerons and the VENUS model of hadronic interactions at ultrarelativistic energies // *Phys. Rep.* – 1993. – Vol. 232. – P. 87-299. DOI: 10.1016/0370-1573(93)90078-R
- 25 Drescher H.J., Hladik M., Ostapchenko S., Pierog T., Werner, K. Parton-based Gribov–Regge theory // *Phys. Rep.* – 2001. – Vol. 350. – P. 93-289. DOI: 10.1016/S0370-1573(00)00122-8
- 26 Fassò A., Ferrari, A., Roesler, S. The physics models of FLUKA: status and recent development // *Computing in High Energy and Nuclear Physics 2003 Conference (CHEP2003)*. – 2003. – Vol. C0303241. – P. 1–5. DOI: 10.48550/arXiv.hep-ph/0306267
- 27 Fesefeldt H. The e/h ratio and energy resolution of hadron calorimeters // *Nucl. Instr. Meth. A*. – 1988. – Vol. 263, No. 1. – P. 114-135.
- 28 Bass S.A. Microscopic models for ultrarelativistic heavy ion collisions // *Prog. Part. Nucl. Phys.* – 1998. – Vol. 41. – P. 225-369. DOI: 10.1016/S0146-6410(98)00058-1
- 29 Bleicher M. Relativistic hadron-hadron collisions in the ultra-relativistic quantum molecular dynamics model // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* – 1999. – Vol. 25. – P. 1859. DOI: 10.1088/0954-3899/25/9/308
- 30 Kamata K., Nishimura J. The Lateral and the Angular Structure Functions of Electron Showers // *Suppl. Progr. Theoret. Phys.* – 1958. – Vol. 6. – P. 93-155. DOI: 10.1143/PTPS.6.93
- 31 Nelson W.R., Hirayama H. Report SLAC 265, Stanford Linear Accelerator Center. – 1985.
- 32 Yerezhap N.O., Sadykov T.K., Burtebayev N., Saduyev N.O. Comparison of GHEISHA QGSJET and UrQMD EPOS Interaction Models to Compare Experiments with Observation Parameters of TSHSS // *Acta Physica Polonica B, Proceedings Supplement*. – 2023. – Vol.16. – A5.
- 33 Gribov V. N. A reggeon diagram technique. // *Soviet Physics JETP*. – 1968. – Vol. 26, No. 2. – P. 414–422.
- 34 Gribov, V. N. Glauber corrections and the interaction between high-energy hadrons and nuclei. // *Soviet Physics JETP*. – 1969. – Vol. 29, No. 3. – P. 483–487.
- 35 Kalmykov N.N., Ostapchenko S.S., Pavlov A.I. Quark-gluon-string model and EAS simulation problems at ultra-high energie // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*. – 1997. – Vol.52. – P.17-28. DOI: 10.1016/S0920-5632(96)00846-8
- 36 Evans L., Bryant P. LHC Machine // *JINST*. – 2008. – Vol.3. – S08001. DOI: 10.1088/1748-0221/3/08/S08001
- 37 The ALICE Collaboration, Aamodt K. The ALICE experiment at the CERN LHC // *Journal of Instrumentation* – 2008. – Vol.3. – S08002. DOI: 10.1088/1748-0221/3/08/S08002
- 38 The CMS Collaboration, Chatrchyan S. The CMS experiment at the CERN LHC // *Journal of Instrumentation* – 2008. – Vol.3. – S08004. DOI: 10.1088/1748-0221/3/08/S08004
- 39 The ATLAS Collaboration, Aad G. The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider // *Journal of Instrumentation*. – 2008. – Vol.3. – S08003. DOI: 10.1088/1748-0221/3/08/S08003
- 40 Van Rossum G. Python tutorial Technical Report CS-R9526. Centrum voor Wiskunde en Informatica, Amsterdam. – 1995.

41 Brun R., Rademakers An object oriented data analysis framework // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1997. – Vol.389 (1-2). – P.81-86. DOI: 10.1016/S0168-9002(97)00048-X

42 Chabin Ch. Thakuria, and Boruah K. Comparison of EPOS and QGSJET-II in EAS Simulation using CORSIKA // High Energy Astrophysical Phenomena. – 2012. – 7 p. DOI: 10.48550/arXiv.1202.3661

## References

- 1 D. Heck, J. Knapp, J. Capdevielle, G. Schatz, T. Thouw, Physics 9, 35-40 (2022). DOI: 10.5445/IR/270043064
- 2 A. Sandrock, PoS ECRS 075, 1-8 (2023). DOI: 10.22323/1.423.0075
- 3 T. Pierog, Iu. Karpenko, J. M. Katzy, E. Yatsenko, K. Werner, Phys. Rev. 92, 034906 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevC.92.034906
- 4 T. Pierog, J. Phys.: Conf. Ser. 409, 012008 (2013). DOI: 10.1088/1742-6596/409/1/012008
- 5 S. Ostapchenko, Nucl. Phys. Proc. Suppl. 151, 143-146 (2006). DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2005.07.026
- 6 S. Ostapchenko, Phys. Rev. D74, 014026 (2006). DOI: 10.1103/PhysRevD.74.014026
- 7 S. Ostapchenko, Phys. Rev. D83, 014018 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevD.83.014018
- 8 S. Ostapchenko, EPJ Web Conf. 52, 02001 (2013). DOI: 10.1051/epjconf/20135202001
- 9 O. A. Kalikulov, N. O. Saduyev, Journal of Instrumentation 17, C04014 (2022). DOI: 10.1088/1748-0221/17/04/C04014
- 10 S.B. Shaulov, Recent Contributions to Physics 69, 61-70 (2019). DOI: 10.26577/RCPH-2019-i2-9
- 11 S.K. Shinbulatov, Proc. 36th International Cosmic Ray Conference, July 24 - August 1 (2019).
- 12 S.B. Shaulov, Recent Contributions to Physics 70, 13-21 (2019). DOI: 10.26577/RCPH-2019-i3-2
- 13 O.A. Kalikulov, Recent Contributions to Physics 79, 4-9 (2021). DOI: 10.26577/RCPH.2021.v79.i4.01 (In Russ)
- 14 T. Antoni, Nucl. Instr. Meth. A 513, 490-510 (2003). DOI: 10.1016/S0168-9002(03)02076-X
- 15 T. Pierog, Phys. Rev. C 92, 034906 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevC.92.034906
- 16 S. Ostapchenko, Phys. Rev. D 89, 074009 (2014). DOI: 10.1103/PhysRevD.89.074009
- 17 F. Riehn, R. Engel, A. Fedynitch, K. Gaisser, S. Todor, Proc. Sci., July 30, 558 (2015).
- 18 F. Riehn, R. Engel, A. Fedynitch, T. K. Gaisser, T. Stanev, EPJ Web Conf. 99, 12001 (2015). DOI: 10.1051/epjconf/20159912001
- 19 F. Riehn, Proc. 35th Int. Cosmic Ray Conf., Bexco, Busan (Korea), Contr. 301 (2017). DOI: 10.48550/arXiv.1709.07227
- 20 R. Engel, Phys. Rev. D 102, 063002 (2019). DOI: 10.1103/PhysRevD.102.063002
- 21 S. Roesler, R. Engel, J. Ranft, Proc. 2000 Conf., Lisbon (Portugal), Oct. 23-26 (2000).
- 22 A. Kling et al., eds., Springer (Berlin) (2001). DOI: 10.1007/978-3-642-18211-2
- 23 A. Fedynitch, R. Engel, Nuclear Reaction Mechanisms 14, 291 (2015).
- 24 K. Werner, Phys. Rep. 232, 87-299 (1993). DOI: 10.1016/0370-1573(93)90078-R
- 25 H.J. Drescher, M. Hladik, S. Ostapchenko, T. Pierog, K. Werner, Phys. Rep. 350, 93-289 (2001). DOI: 10.1016/S0370-1573(00)00122-8
- 26 A. Fassò, A. Ferrari, S. Roesler, Computing in High Energy and Nuclear Physics 2003 Conference (CHEP2003) C0303241, 1-5 (2003). DOI: 10.48550/arXiv.hep-ph/0306267
- 27 H. Fesefeldt, Nucl. Instr. Meth. A 263, 114-135 (1988).
- 28 S. A. Bass, Prog. Part. Nucl. Phys. 41, 225-369 (1998). DOI: 10.1016/S0146-6410(98)00058-1
- 29 M. Bleicher, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 25, 1859 (1999). DOI: 10.1088/0954-3899/25/9/308
- 30 K. Kamata, J. Nishimura, Suppl. Progr. Theoret. Phys. 6, 93-155 (1958). DOI: 10.1143/PTPS.6.93
- 31 W.R. Nelson, H. Hirayama, Report SLAC 265, Stanford Linear Accelerator Center (1985).
- 32 N.O. Yerezhep, T.K. Sadykov, N. Burtebayev, N.O. Saduyev, Acta Physica Polonica B, Proceedings Supplement 16, A5 (2023).
- 33 V.N. Gribov, Soviet Physics JETP 26, 414-422 (1968).
- 34 V.N. Gribov, Soviet Physics JETP 29, 483-487 (1969).
- 35 N.N. Kalmykov, S.S. Ostapchenko, A.I. Pavlov, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 52, 17-28 (1997). DOI: 10.1016/S0920-5632(96)00846-8
- 36 L. Evans, P. Bryant, JINST 3, S08001 (2008). DOI: 10.1088/1748-0221/3/08/S08001
- 37 The ALICE Collaboration, K. Aamodt, Journal of Instrumentation 3, S08002 (2008). DOI: 10.1088/1748-0221/3/08/S08002
- 38 The CMS Collaboration, S. Chatrchyan, Journal of Instrumentation 3, S08004 (2008). DOI: 10.1088/1748-0221/3/08/S08004
- 39 The ATLAS Collaboration, G. Aad, Journal of Instrumentation 3, S08003 (2008). DOI: 10.1088/1748-0221/3/08/S08003
- 40 G. Van Rossum, Python Tutorial, Technical Report CS-R9526, Centrum voor Wiskunde en Informatica, Amsterdam (1995).

41 R. Brun, F. Rademakers, Nucl. Instr. Meth. A 389, 81-86 (1997). DOI: 10.1016/S0168-9002(97)00048-X

42 Ch. Chabin, K. Thakuria, K. Boruah, High Energy Astrophysical Phenomena, 7 p. (2012). DOI: 10.48550/arXiv.1202.3661

**Article history:**

Received 28 November 2024

Accepted 18 December 2024

**Information about authors:**

1. **Nurzhan Yerezhep** (corresponding author) – Researcher, Laboratory of Cosmic Ray Physics, Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan; Tien-Shan High Altitude Science Station (TSHASS), Almaty, Kazakhstan; e-mail: [n.yerezhep@inp.kz](mailto:n.yerezhep@inp.kz)

2. **Nurzhan Sadyev** – PhD, Deputy Director for Research Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan; Shan High Altitude Science Station (TSHASS), Almaty, Kazakhstan; e-mail: [n.sadyev@inp.kz](mailto:n.sadyev@inp.kz)

3. **Orazaly Kalikulov** – PhD, Head of the Cosmic Rays Laboratory Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan; e-mail: [o.kalikulov@inp.kz](mailto:o.kalikulov@inp.kz)

4. **Margarita Banshchikova** – Junior Researcher, Laboratory of Cosmic Ray Physics Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan; e-mail: [margaretbanshchikova@gmail.com](mailto:margaretbanshchikova@gmail.com)

**Мақала тарихы:**

Түсті – 28.11.2024

Қабылданды – 18.12.2024

**Авторлар туралы мәлімет:**

1. **Ережеп Нұржан Оразбекұлы** (автор корреспондент) – Ядролық физика институтының ғылыми қызметкері, Алматы қ., Қазақстан; Тянь-Шань биік таулы ғылыми станциясы, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: [n.yerezhep@inp.kz](mailto:n.yerezhep@inp.kz)

2. **Садуев Нуржан Орынбасарович** – PhD, Ядролық физика институт директорының ғылыми жұмыстар жөніндегі орынбасары; Тянь-Шань биік таулы ғылыми станциясы, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: [n.sadyev@inp.kz](mailto:n.sadyev@inp.kz)

3. **Каликулов Оразалы Абиькасимович** – PhD, Ядролық физика институтының Ғарыштық сәулелер зертханасының меңгерушісі, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: [o.kalikulov@inp.kz](mailto:o.kalikulov@inp.kz)

4. **Банщикова Маргарита Александровна** – Ядролық физика институтының Ғарыштық сәулелер зертханасының кіші ғылыми қызметкері, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: [margaretbanshchikova@gmail.com](mailto:margaretbanshchikova@gmail.com)