

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)

УДК 539.1.01

ОТЧЁТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**Сравнение моделей ядро-ядерных взаимодействий, используемых в  
программе CORSIKA**

Научный руководитель

проф., д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ А. А. Петрухин

Студент

\_\_\_\_\_ Р. В. Николаенко

Москва 2021

# Содержание

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>3</b>
1.1	Модели адронных взаимодействий, используемые в программе CORSIKA . . . . .	3
1.2	Методика исследования . . . . .	5
1.3	Цель работы . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Сравнение моделей адронных взаимодействий программы CORSIKA</b>	<b>7</b>
2.1	Генерация вторичных частиц . . . . .	7
2.2	Распределение энергии взаимодействия . . . . .	14
2.3	Проверка выполнения законов сохранения . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Заключение</b>	<b>19</b>
	<b>Список использованных источников</b>	<b>20</b>

# 1 Введение

Программа CORSIKA [1] (COsmic Ray SIMulation for KAscade) используется для моделирования образования и развития широких атмосферных ливней (ШАЛ) в результате взаимодействия первичных космических лучей (ПКЛ) с энергиями вплоть до  $10^{20}$  эВ с атмосферой Земли. У программы нет широко распространённых аналогов, и большая часть экспериментов в мире используют программу CORSIKA для проведения численных расчётов для интерпретации экспериментальных данных. В программе используется набор моделей для описания адронных взаимодействий при высоких и низких энергиях, оставляя выбор модели на усмотрение пользователя. Развитие ШАЛ и, как следствие, получаемые пространственные и энергетические распределения частиц на уровне земли, могут серьёзно зависеть от гипотез, применяемых в моделях для описания адронных взаимодействий при высоких энергиях, вплоть до первого взаимодействия, породившего ливень. Поэтому представляет интерес сравнение этих моделей при моделировании взаимодействий ПКЛ с ядрами атомов атмосферы.

## 1.1 Модели адронных взаимодействий, используемые в программе CORSIKA

Взаимодействия при высоких энергиях (выше нескольких сотен ГэВ) в программе CORSIKA версии 77402 могут описываться восемью моделями, их перечень и краткое описание основных особенностей даны на Рисунке 1. Это DPMJET-III [2] (Dual Parton Model with JETs), HDPM [3], QGSJET01 [4,5] и QGSJET-II-04 [6] (Quark Gluon String model with JETs), SIBYLL-2.3d [7,8,9], VENUS [10] (Very Energetic NUClear Scattering), NEXUS [11] (NEXt generation of Unified Scattering approach) и EPOS-LHC [12] (Energy conserving quantum mechanical multi-scattering approach, based

on Partons, Off-shell remnants and Splitting parton ladders). DPMJET и HDPM основаны на партонной модели адронных взаимодействий, но HDPM использует более простые и быстрые алгоритмы для расчётов. Модель VENUS была разработана для моделирования ультрарелятивистских столкновений тяжёлых ионов. QGSJET использует квазиэйкональную померонную параметризацию для описания адронных взаимодействий на высоких энергиях. Более новая версия QGSJET-II имеет ряд коррекций в соответствии с данными LHC. NEXUS основывался на моделях VENUS и QGSJET с учетом продления диапазона энергий. Модель SIBYLL разработана на основе КХД модели мини джетов. Модель по умолчанию генерирует очарованные частицы, а ядро-ядерные взаимодействия рассчитывает как суперпозицию нуклон-нуклонных. Наконец модель EPOS-LHC, также как и NEXUS, комбинирует возможности моделей VENUS и QGSJET, а также включает эффекты высокой плотности. Наиболее актуальная версия использует данные LHC для уточнения параметров модели.

<b>High-energy hadronic interactions models in CORSIKA (v.77402)</b>	
Model (version)	Features
DPMJET-III (2017.1)	Dual Parton Model with soft chains and multiple minijets
EPOS-LHC (v3400)	Improved NEXUS features. LHC data is taken into account to constrain model parameters
NEXUS (3.97)	Combines features of the former VENUS and QGSJET
QGSJET-01d	Pomeron parameterization for the elastic hadron-nucleon scattering amplitude
QGSJET-II-04	Includes Pomeron loop and the cross-section is tuned to LHC data
SIBYLL (2.3d)	Based on the QCD mini-jet model
VENUS (4.12)	Developed to simulate ultra-relativistic heavy ion collisions

Рисунок 1 — Модели адронных взаимодействий при высоких энергиях, используемые в программе CORSIKA. Зелёным цветом выделены модели, рассматриваемые в данном исследовании.

В проведённом исследовании рассматривались наиболее актуальные

модели: EPOS-LHC, QGSJET-II-04, SIBYLL-2.3v и DPMJET-III.

## 1.2 Методика исследования

Схема вариантов расчёта для сравнения четырёх рассматриваемых моделей приведена на Рисунке 2. В качестве ядра-мишени был выбран азот, как наиболее распространённый газ в атмосфере. Частицами ПКЛ, взаимодействующими с ядрами азота, выступают протоны и ядра гелия, азота и железа. Для каждой модели и для каждой первичной частицы рассматривались также два значения энергии первичной частицы:  $E_0 = 10^{14}$  эВ и  $E_0 = 10^{18}$  эВ. Таким образом, всего было осуществлено 32 набора данных, каждый включающий  $10^5$  событий (кроме модели DPMJET, ввиду долго времени инициализации которой, за месяц удалось получить лишь  $3 \times 10^4$  событий на каждый набор данных).

Для получения данных в программе CORSIKA была включена опция UTFIIE, использующаяся для вывода информации о частицах, образованных в первом взаимодействии, в отдельный файл. Выводимая информация содержит список вторичных частиц взаимодействия, их полную энергию и проекции импульса. Поскольку эта опция действует только в первом моделируемом ШАЛ из серии, для набора статистики использовался скрипт, многократно запускавший программу CORSIKA. Для проведения необходимого анализа полученных данных использовалась специальная программа-обработчик, написанная на C++.

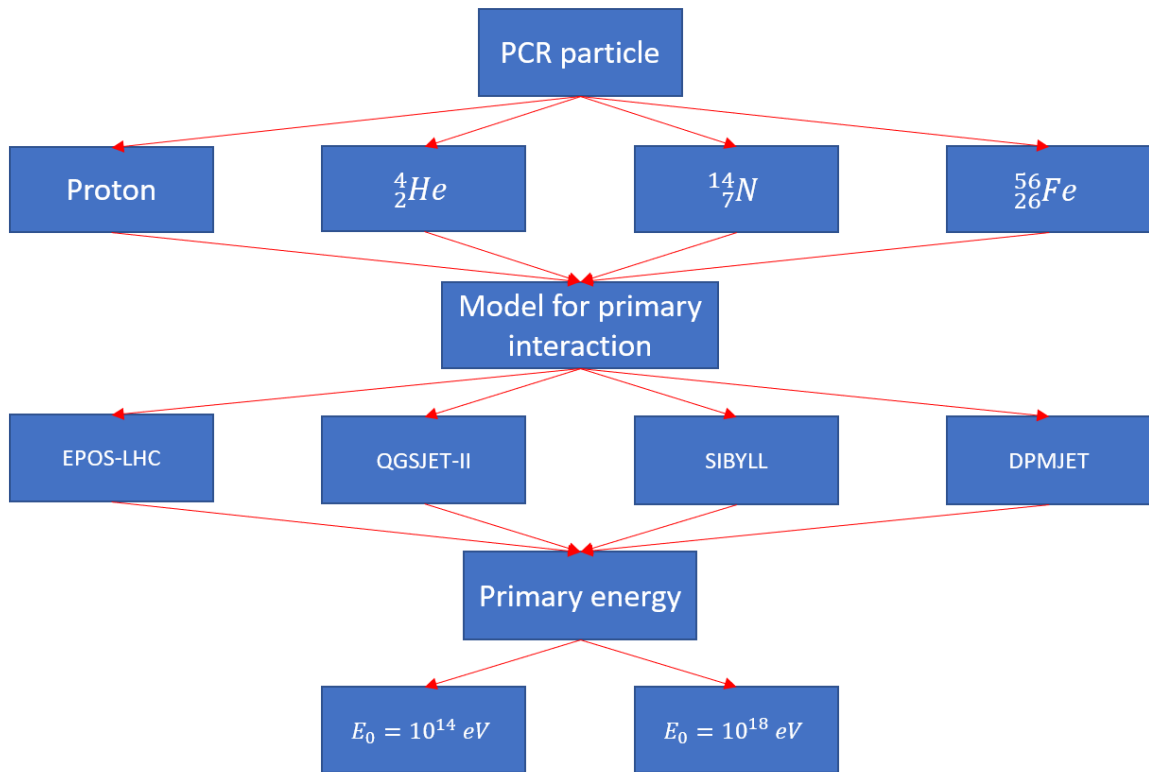


Рисунок 2 — Схема выбора параметров для проведения моделирования.

### 1.3 Цель работы

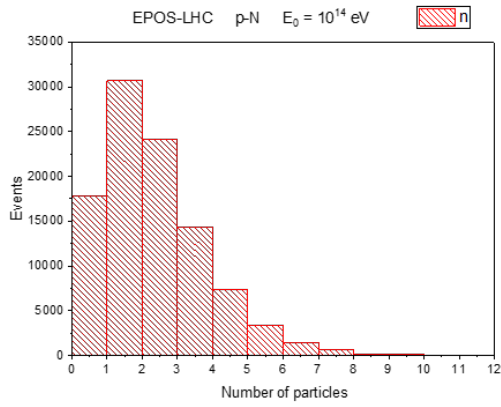
Задача данной работы заключается в сравнении моделей программы CORSIKA, описывающих ядро-ядерные взаимодействия по нескольким основным пунктам: число образованных вторичных частиц, распределение энергии взаимодействия между вторичными частицами и выполнение законов сохранения. Исследование должно показать отличия и сходства между моделями, и, по возможности, оценить их корректность.

## 2 Сравнение моделей адронных взаимодействий программы CORSIKA

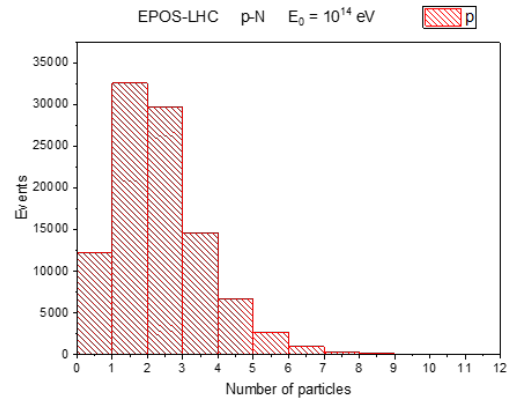
### 2.1 Генерация вторичных частиц

На Рисунках 3 и 4 представлены распределения числа нуклонов, образованных в протон-азотных взаимодействиях, для энергий  $E_0 = 10^{14}$  эВ (Рисунок 3) и  $E_0 = 10^{18}$  эВ (Рисунок 4). Распределения для разных моделей имеют схожую друг с другом форму и близкие по значению средние числа образованных нуклонов. При увеличении первичной энергии на 4 порядка распределения сохраняют свою форму и принципиальных отличий между моделями не наблюдается.

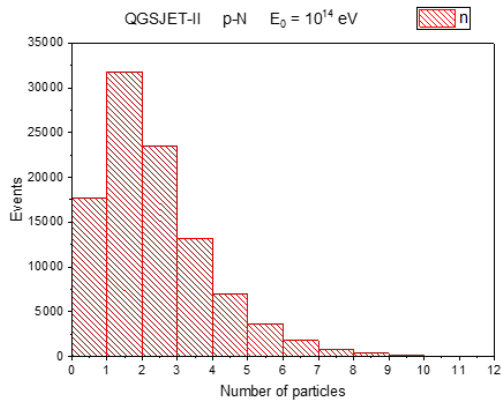
Однако картина сильно меняется в случае, когда первичной частицей является ядро железа. Как видно из Рисунка 5, форма распределений модели EPOS-LHC сильно отличаются от других уже на энергии  $E_0 = 10^{14}$  эВ, а при переходе к энергии  $E_0 = 10^{18}$  эВ, формы распределений для всех моделей меняются по сравнению с меньшей энергией (Рисунок 6).



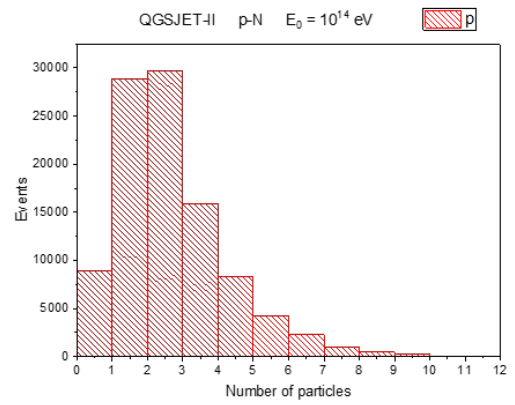
(a)



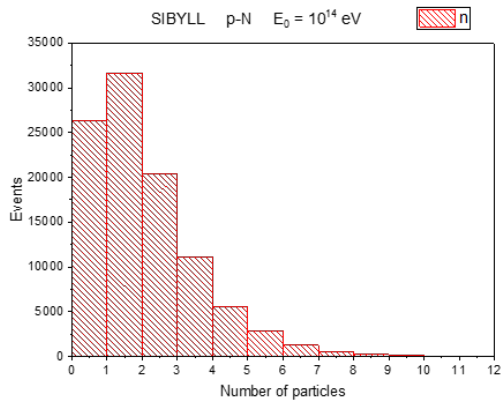
(б)



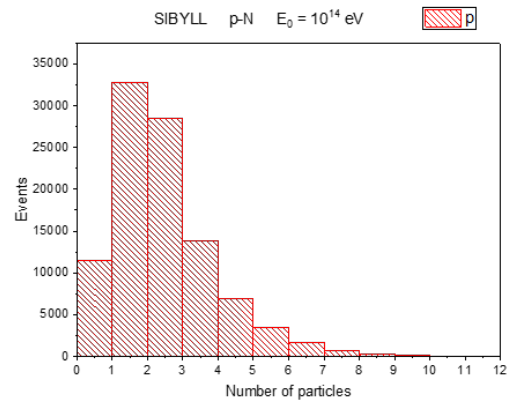
(B)



(Г)



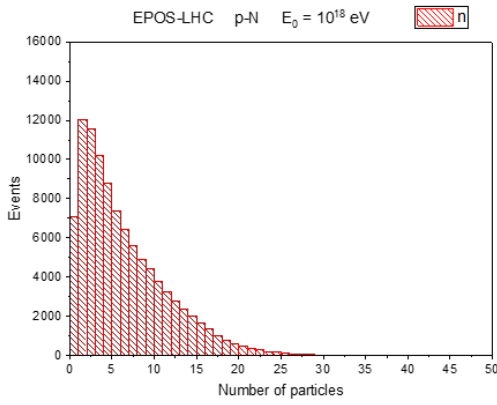
(д)



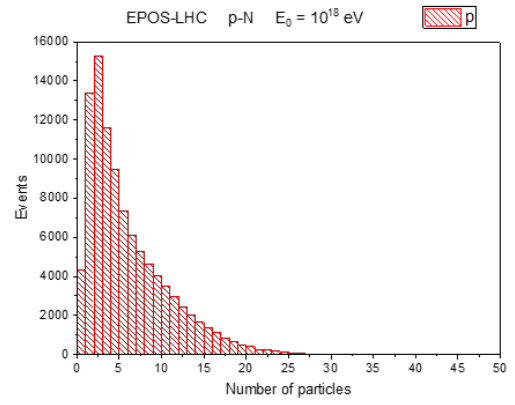
(e)

Рисунок 3 — Распределения числа нейтронов (слева) и протонов (справа), образованных в протон-азотных взаимодействиях при энергии первичной частицы  $E_0 = 10^{14}$  эВ для моделей EPOS-LHC, QGSJET-II-04 и SIBYLL-2.3d.

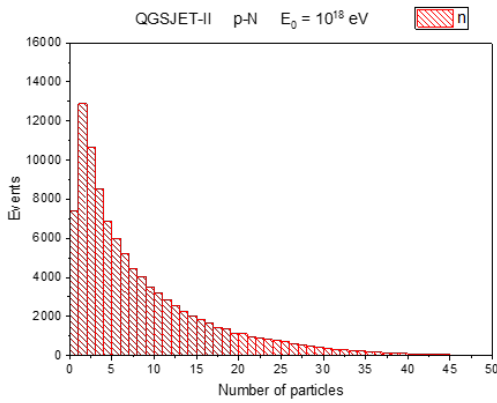




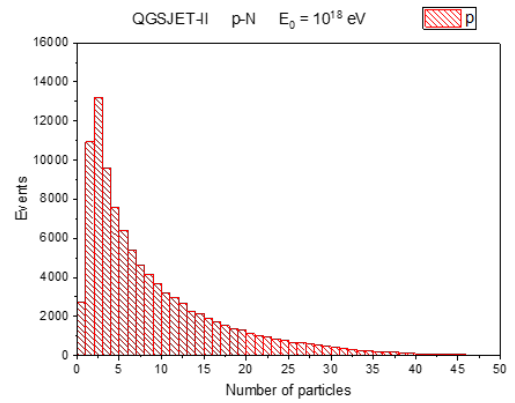
(a)



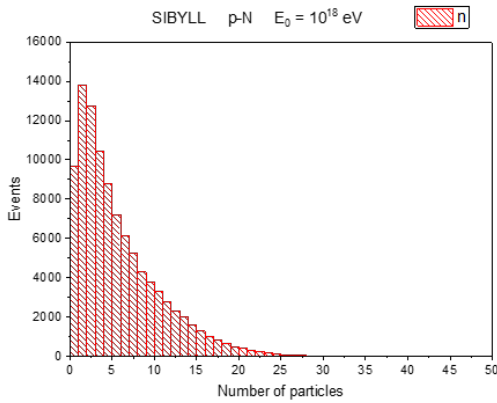
(б)



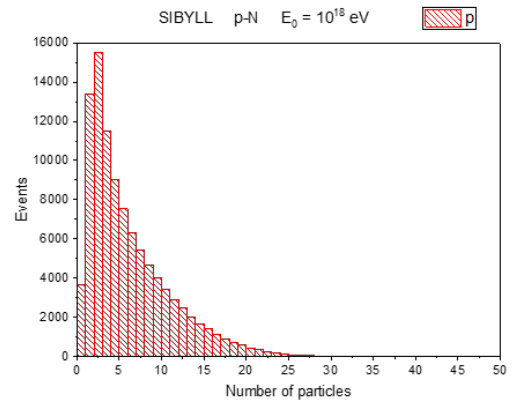
(B)



(Г)

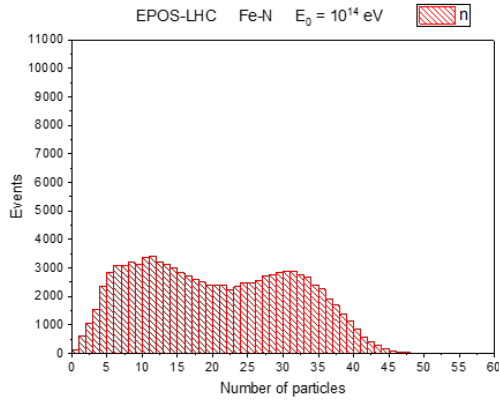


(д)

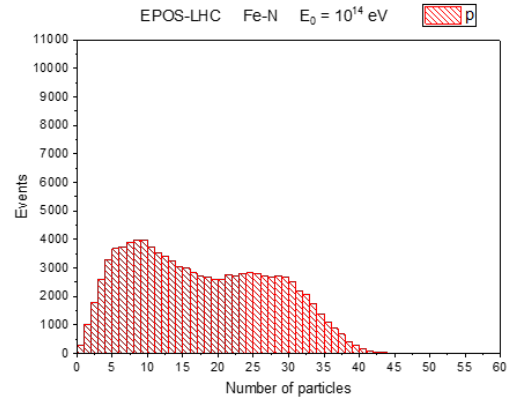


(e)

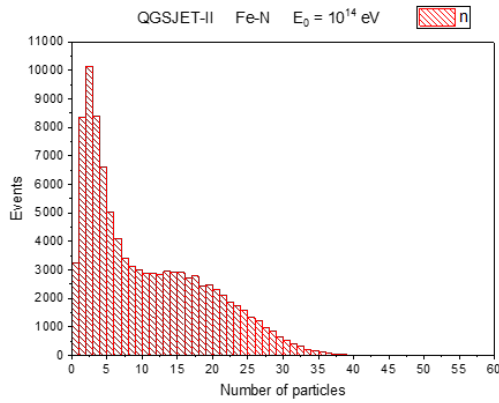
Рисунок 4 — Распределения числа нейтронов (слева) и протонов (справа), образованных в протон-азотных взаимодействиях при энергии первичной частицы  $E_0 = 10^{18}$  эВ для моделей EPOS-LHC, QGSJET-II-04 и SIBYLL-2.3d.



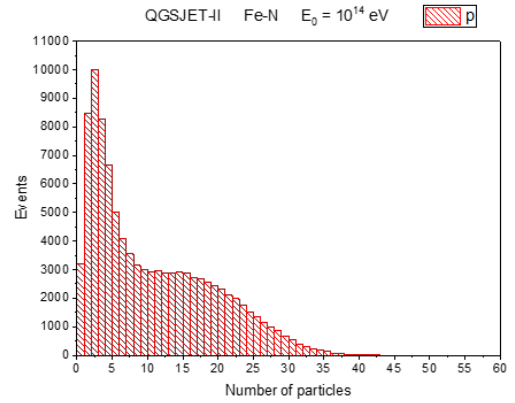
(a)



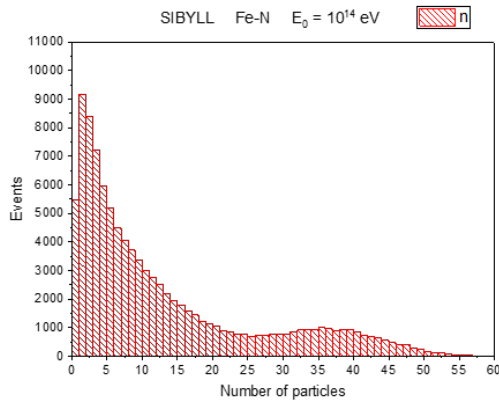
(б)



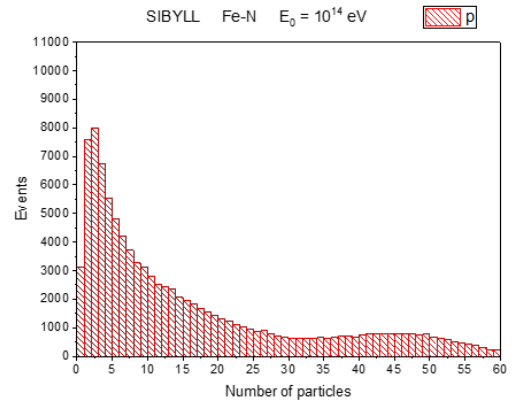
(в)



(г)



(д)



(е)

Рисунок 5 — Распределения числа нейтронов (слева) и протонов (справа), образованных в железо-азотных взаимодействиях при энергии первичной частицы  $E_0 = 10^{14}$  эВ для моделей EPOS-LHC, QGSJET-II-04 и SIBYLL-2.3d.

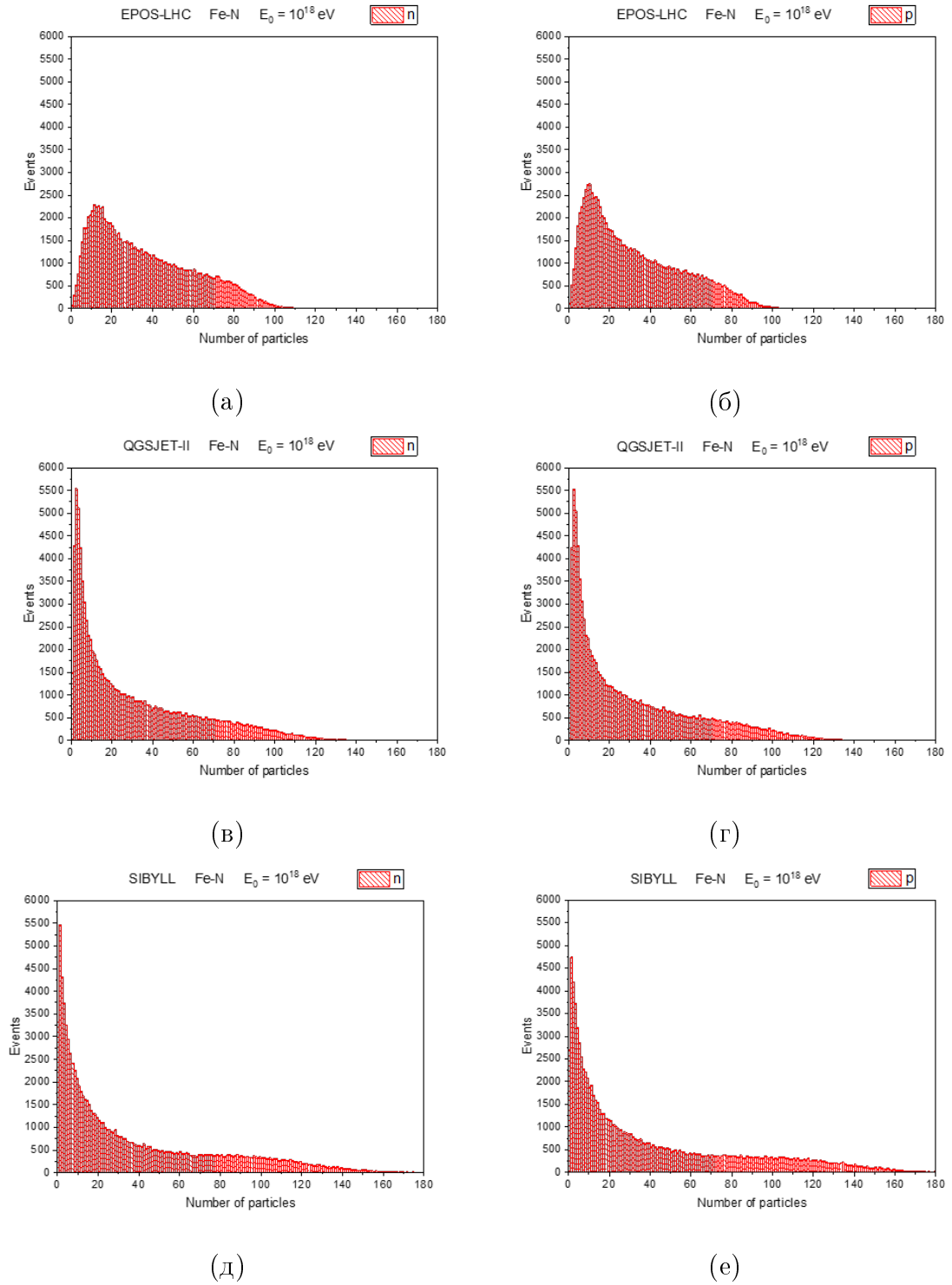


Рисунок 6 — Распределения числа нейтронов (слева) и протонов (справа), образованных в железо-азотных взаимодействиях при энергии первичной частицы  $E_0 = 10^{18}$  эВ для моделей EPOS-LHC, QGSJET-II-04 и SIBYLL-2.3d.

Интересу подлежит сравнение не только числа образованных нуклонов, но и ряда других частиц, включающего пионы, каоны и антинуклоны. Для этих частиц представленный анализ ограничен сравнением средних значений числа частиц, образованных в результате первого взаимодействия. На Рисунке 7 представлено сопоставление моделей QGSJET-II-04, SIBYLL-2.3v и DPMJET-III по среднему числу генерируемых частиц с моделью EPOS-LHC, поскольку она является моделью по умолчанию в актуальных версиях программы CORSIKA. Для наглядности сравнения используется цветовой градиент, зависящий от значения параметра

$$\alpha = \frac{|N_{EPOS} - N_{model}|}{N_{EPOS}}, \quad (2.1)$$

где  $N_{EPOS}$  - среднее число частиц по данным модели EPOS-LHC, а  $N_{model}$  - среднее число частиц по данным сравниваемой модели.

Proton-nitrogen collisions, $E_0 = 10^{14}$ eV					Iron-nitrogen collisions, $E_0 = 10^{14}$ eV				
Particle	Number of particles				Particle	Number of particles			
	EPOS-LHC	QGSJET-II	SIBYLL	DPMJET		EPOS-LHC	QGSJET-II	SIBYLL	DPMJET
$\gamma$	0.46	0	0.53	90.6	$\gamma$	1.19	0	1.92	481.2
$\pi^0$	15.5	16.9	6.00	0.65	$\pi^0$	40.6	50.7	26.7	0.71
$\pi^+$	14.2	16.4	5.66	37.3	$\pi^+$	38.7	47.9	25.6	191.2
$\pi^-$	14.2	16.0	5.45	37.0	$\pi^-$	38.9	47.9	23.4	192.6
$K^+$	1.69	1.93	1.00	2.95	$K^+$	4.44	5.21	3.72	20.1
$K^-$	1.5	1.78	0.87	2.74	$K^-$	3.44	4.43	2.85	19.8
$K_l^0$	1.57	1.83	0.97	2.8	$K_l^0$	3.87	4.82	3.53	19.5
$K_s^0$	1.57	1.84	0.97	2.74	$K_s^0$	3.87	4.82	3.54	19.4
n	1.84	1.86	1.57	5.21	n	20.1	10.2	12.6	48.1
p	1.86	2.19	1.96	5.51	p	17.2	10.2	15.7	46.9
$\bar{n}$	0.79	0.70	0.77	1.5	$\bar{n}$	1.58	1.16	2.07	13.3
$\bar{p}$	0.55	0.69	0.73	1.52	$\bar{p}$	1.20	1.17	1.84	13.3

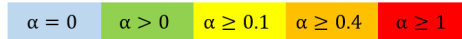


Рисунок 7 — Сравнение средних значений числа образуемых в первом взаимодействии частиц для моделей EPOS-LHC, QGSJET-II-4, SIBYLL-2.3d и DPMJET-III. Приведены данные для случаев протон-азотных и железо-азотных взаимодействий при энергии  $E_0 = 10^{14}$  эВ.

Как видно из сравнения, модель DPMJET крайне отличается по всем рассматриваемым частицами не только от EPOS-LHC, но и от остальных моделей. А модель QGSJET наиболее близка к EPOS-LHC, за исклю-

чением случая гамма-квантов, которые отсутствуют в модели QGSJET, скорее всего из-за того, что эта модель не осуществляет распад  $\pi^0$  в момент образования вторичных частиц.

Стоит отметить, что приведенные таблицы не содержат полный список генерируемых частиц. Модель SIBYLL, например, создает гораздо большее разнообразие вторичных частиц по сравнению с другими моделями, включая векторные мезоны и очарованные барионы и их античастицы. Отдельного внимания заслуживает образование ядер-осколков. QGSJET-II в среднем генерирует на порядок больше фрагментов ядер, чем EPOS-LHC, а DPJET не создаёт ядра-фрагменты вовсе.

## 2.2 Распределение энергии взаимодействия

Важнейшим аспектом проводимого исследования является сравнение распределения энергии взаимодействия между образовавшимися вторичными частицами в разных моделях, используемых в программе CORSIKA. Доля энергии, уносимая заряженными пионами и каонами определяет энергию, приходящуюся на мюонную компоненту ШАЛ, представляющую наибольший интерес для наземных экспериментов. Важно также и распределение энергии между нуклонами и ядрами-фрагментами.

На Рисунках 8, 9, 10 и 11 представлены зависимости долей энергии взаимодействия, уносимых различными частицами, от массы первичной частицы. Сравняются четыре модели - EPOS-LHC (Рисунок 8), QGSJET-II-04 (Рисунок 9), SIBYLL-2.3d (Рисунок 10) и DPMJET-III (Рисунок 11). На каждом рисунке приведены зависимости для двух значений первичной энергии:  $E_0 = 10^{14}$  эВ (пунктирные линии) и  $E_0 = 10^{18}$  эВ (сплошные линии).

Распределение энергии между нуклонами и ядрами осуществляется по-разному во всех моделях. Стоит отметить, что в случае моделей EPOS-LHC и QGSJET-II04 суммарная доля энергии, пришедшаяся на нуклоны и ядра, примерно одинакова для всех первичных частиц и энергий. Эти модели также хорошо согласуются по долям энергии, приходящимся на  $\pi^0$ ,  $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $K^+$ ,  $K^-$ ,  $K_s^0$  и  $K_l^0$ . Случай SIBYLL особенен присутствием векторных мезонов, которые уносят значительную долю энергии, вплоть до 23% для протон-азотных столкновений. Модель DPMJET-III ядра-осколки не генерирует, и энергию из взаимодействия в этой модели они не уносят. Вообще, модель DPMJET-III показывает полное несоответствие остальным моделям по всем представленным группам частиц.

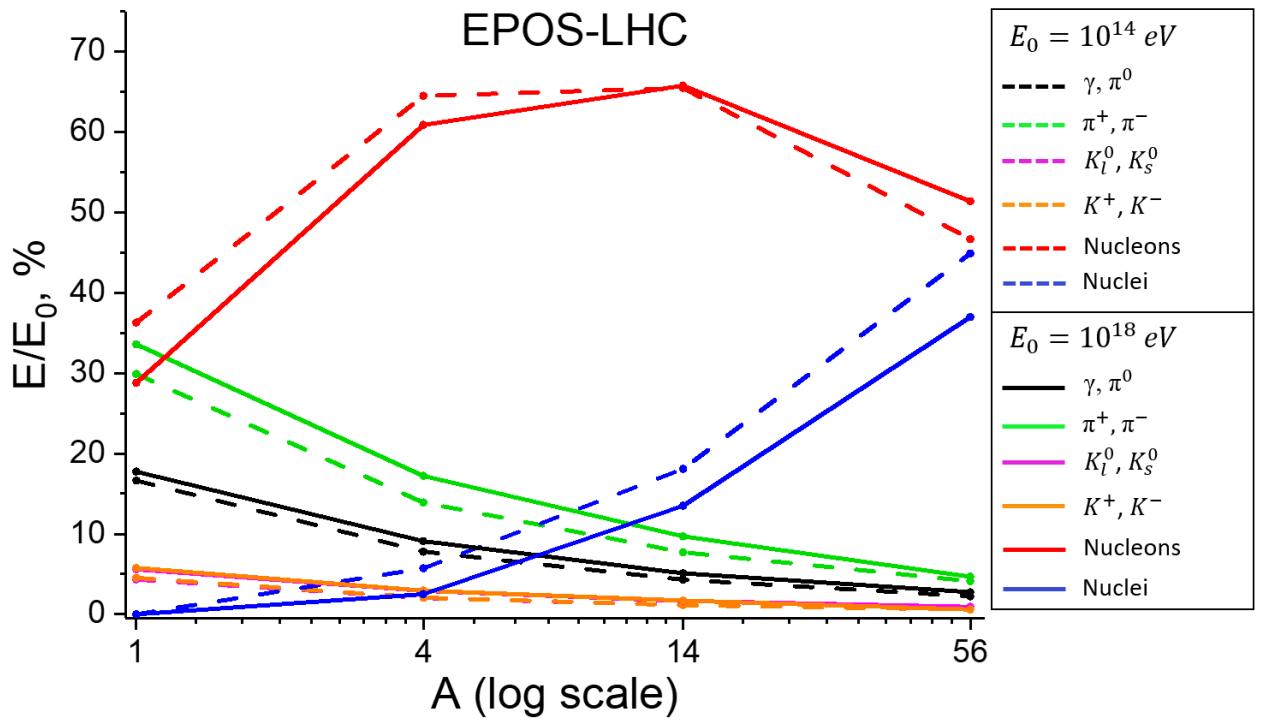


Рисунок 8 — Зависимости доли первичной энергии, уносимой частицами различных типов, для модели EPOS-LHC.

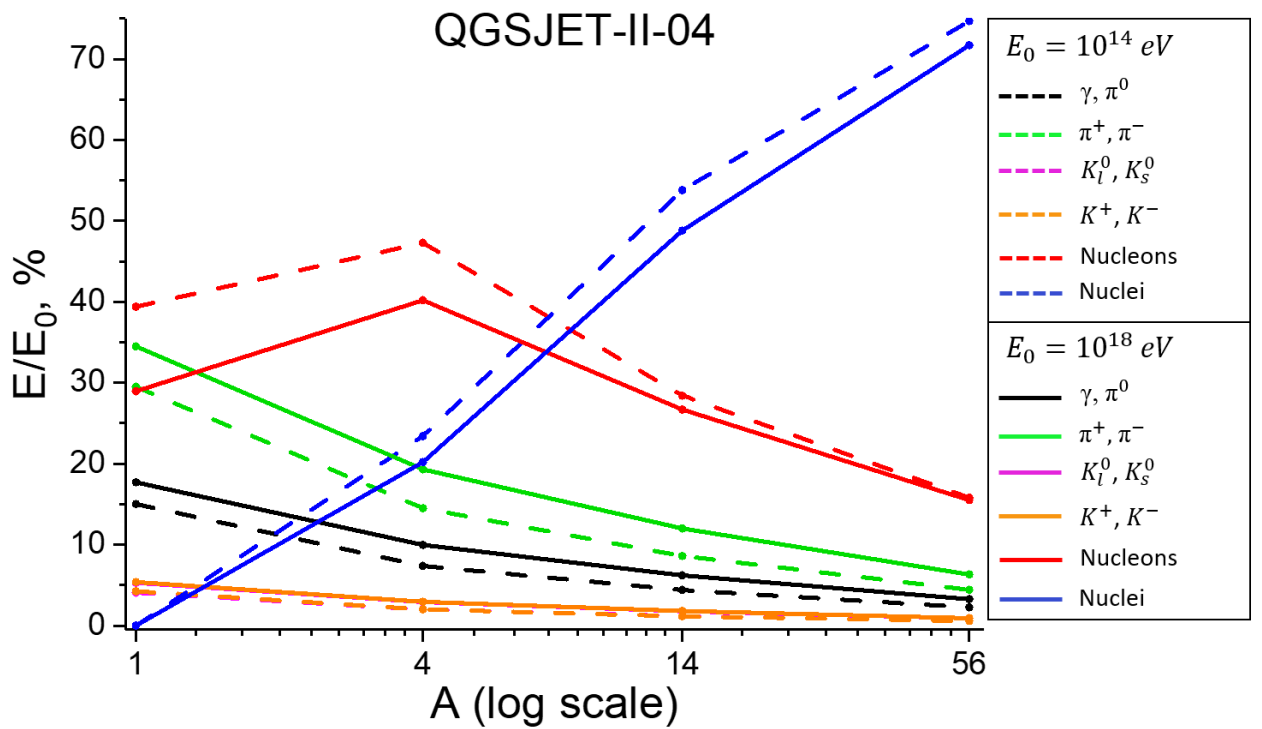


Рисунок 9 — Зависимости доли первичной энергии, уносимой частицами различных типов, для модели QGSJET-II-04.

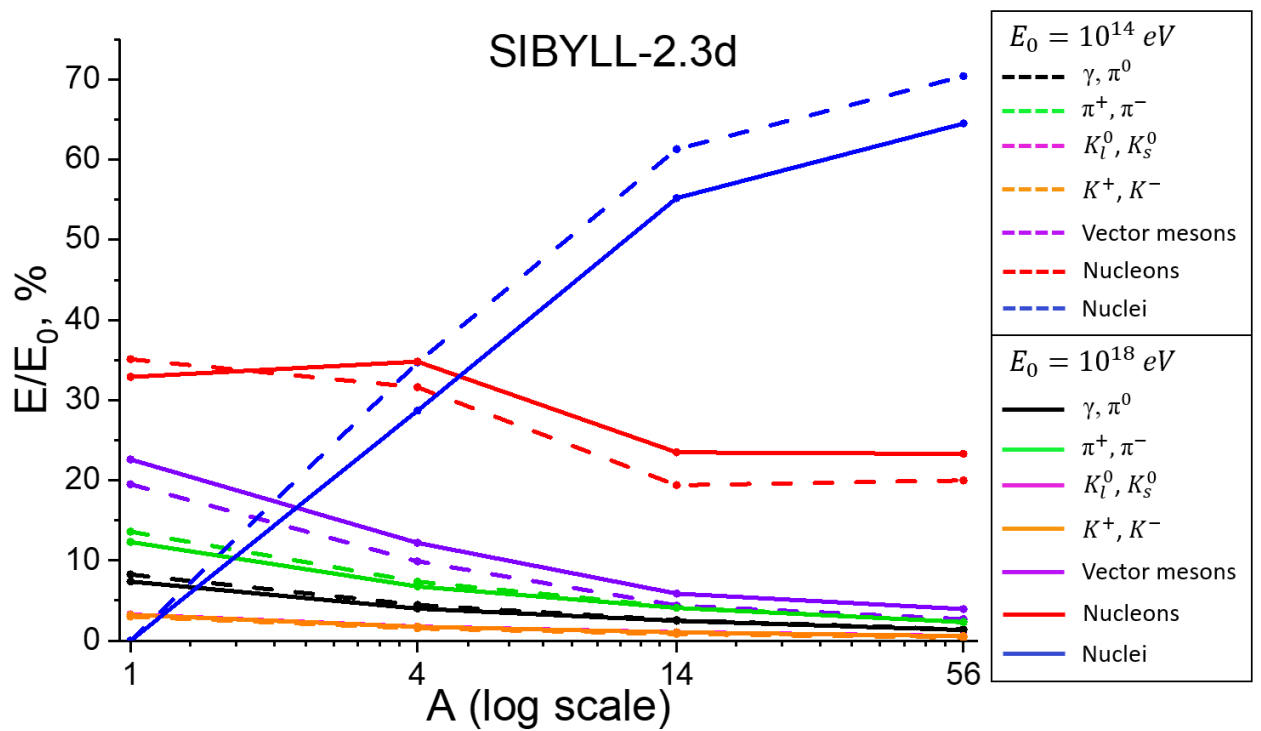


Рисунок 10 — Зависимости доли первичной энергии, уносимой частицами различных типов, для модели SIBYLL-2.3d.

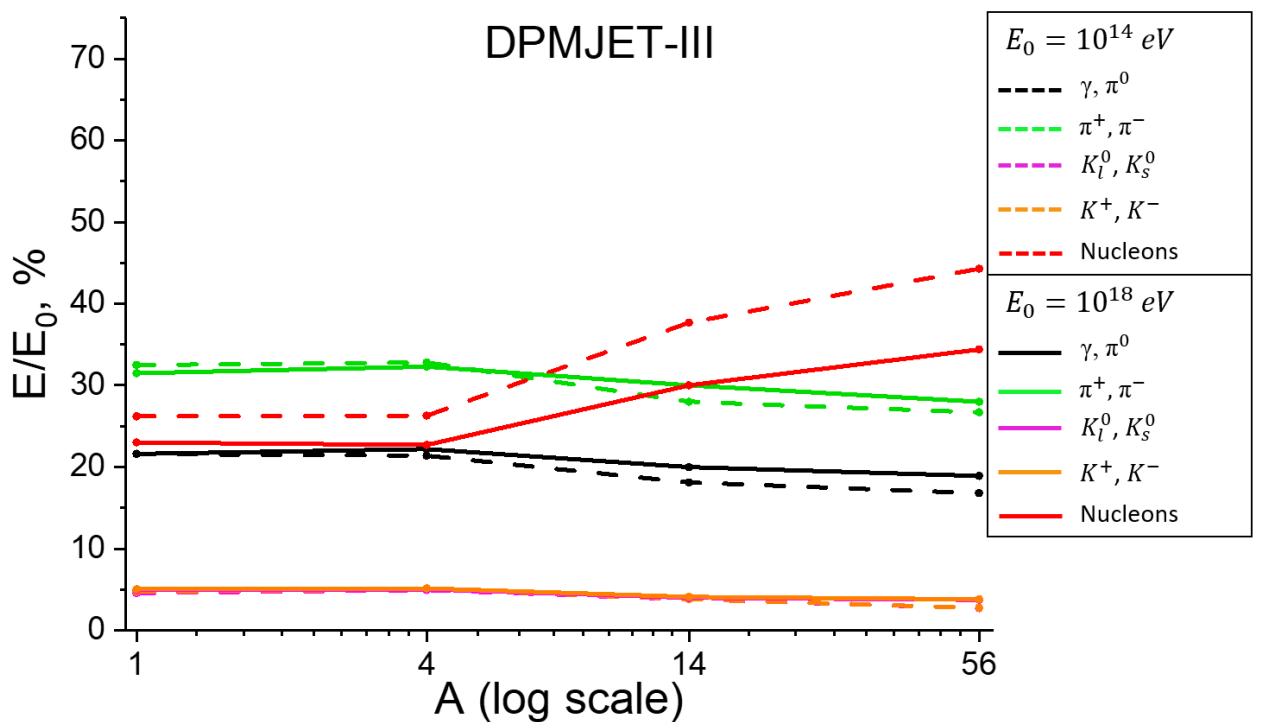


Рисунок 11 — Зависимости доли первичной энергии, уносимой частицами различных типов, для модели DPMJET-III.



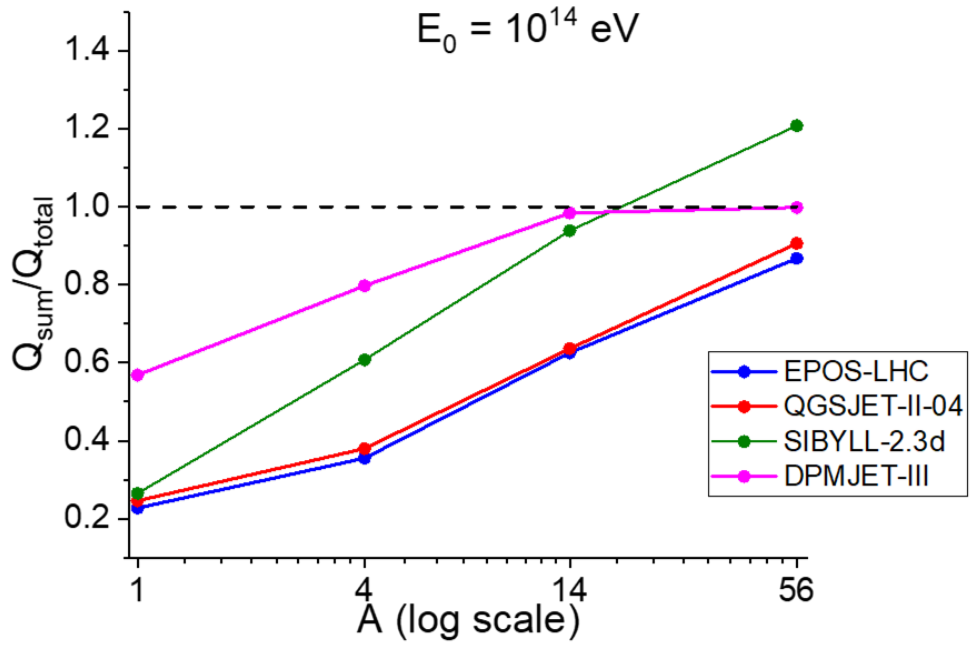
## 2.3 Проверка выполнения законов сохранения

Предоставляемая программой CORSIKA информация о вторичных частицах первого взаимодействия позволяет провести проверку выполнения законов сохранения. Во всех моделях суммарные энергия и импульс вторичных частиц в точности равны их значениям до взаимодействия. Совершенно иначе обстоит дело с сохранением электрического заряда.

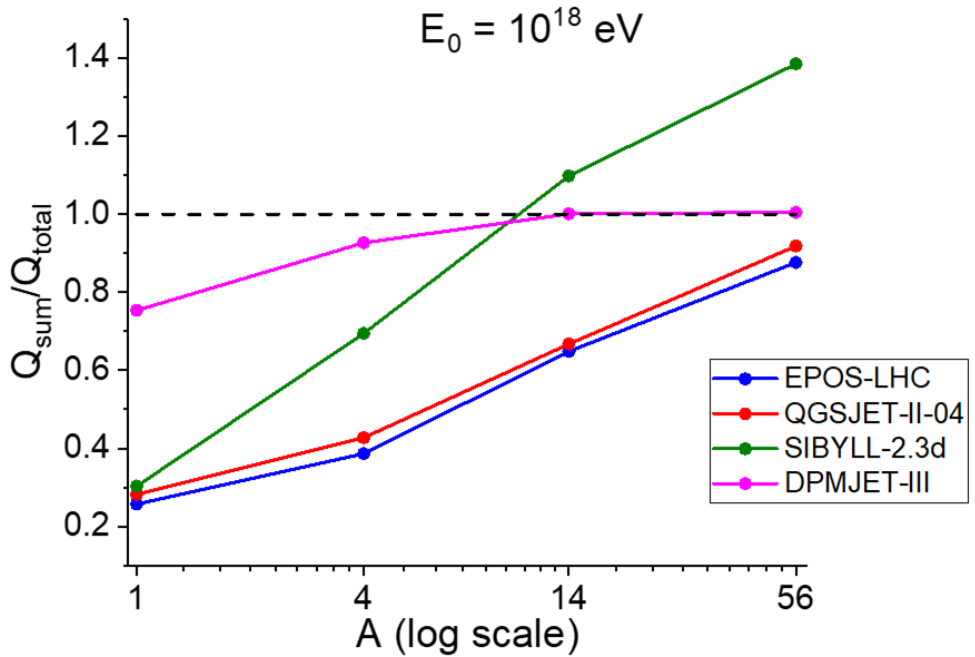
В процессе обработки данных моделирования программой - обработчиком, рассчитывался суммарный электрический заряд  $Q_{sum}$  всех частиц, образовавшихся во взаимодействии. Среднее значение этой величины для всех исследуемых моделей оказалось вовсе не равным полному заряду частиц  $Q_{total}$  до взаимодействия. На Рисунке 12 представлены зависимости отношения  $\frac{Q_{sum}}{Q_{total}}$  для 4 рассматриваемых моделей в случае первичной энергии  $E_0 = 10^{14}$  эВ (Рисунок 12а) и  $E_0 = 10^{18}$  эВ (Рисунок 12б).

Как видно из рисунка, величина  $\frac{Q_{sum}}{Q_{total}}$  в большей части случаев оказывается меньше 1. Возможным объяснением тому может быть отсутствие осколков ядра-мишени в списке вторичных частиц. Поскольку такие осколки практически не получают энергии, Монте-Карло генераторы, используемые в моделях, могут исключать их на этапе создания стека вторичных частиц.

Однако случай модели SIBYLL это всё равно не объясняет: величина  $\frac{Q_{sum}}{Q_{total}}$  в данной модели превышает 1 для более тяжёлых первичных частиц. Такой исход невозможен без исключения из расчётов отрицательно заряженных частиц, которые могут образовываться лишь в результате взаимодействия в парах с положительными частицами. Это не первый случай обнаружения нарушения закона сохранения в модели SIBYLL: ранее в исследованиях указывалось на нарушение сохранения барионного числа.



(a)



(б)

Рисунок 12 — Зависимости отношения  $Q_{sum}/Q_{total}$  от массы первичной частицы для исследуемых моделей. Приведены данные для первичной энергии  $E_0 = 10^{14}$  эВ (Рисунок 12а) и  $E_0 = 10^{18}$  эВ (Рисунок 12б)

## 3 Заключение

Проведено сравнение четырёх моделей, широко используемых в программе CORSIKA для описания ядро-ядерных взаимодействий. Построены распределения числа частиц разных типов, образованных в первом взаимодействии, и определены средние значения их количества. Результаты для модели DPMJET-III радикально отличаются от других моделей.

Построены зависимости доли энергии взаимодействия, уносимой частицами разных типов, от массы первичной частицы. Полученные зависимости сильно различаются для разных моделей, но слабо зависят от энергии взаимодействия в рамках одной и той же модели.

Проведена проверка выполнения закона сохранения электрического заряда. Результаты, полученные для модели SIBYLL-2.3d, показывают нарушение закона сохранения. Явных противоречий в случае других моделей не наблюдается, хотя возможное исключение ядер-фрагментов из списка вторичных частиц не позволяет сделать определённое заключение.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] D. Heck et al. // Report FZKA 6019 1998.  
(<https://www.iap.kit.edu/corsika/>)
- [2] S. Roesler, R. Engel, J. Ranft, Proc. Monte Carlo 2000 Conf., Lisbon (Portugal) Oct. 23-26, 2000, A. Kling et al. eds., Springer (Berlin) 1003 (2001)
- [3] J. Knapp, D. Heck, and G. Schatz, Report FZKA 5828 (1996), Forschungszentrum Karlsruhe  
(<https://web.iap.kit.edu/heck/publications/>)
- [4] N.N. Kalmykov and S.S. Ostapchenko, Yad. Fiz. 56 (1993) 105
- [5] N.N. Kalmykov, S.S. Ostapchenko, and A.I. Pavlov, Izv. RAN Ser. Fiz. 58 (1994) N12 p.21
- [6] S.S. Ostapchenko, Phys. Rev. D83 (2011) 014018; S. Ostapchenko, Phys. Rev. D89 (2014) 074009
- [7] R.S. Fletcher, T.K. Gaisser, P. Lipari, and T. Stanev, Phys. Rev. D50 (1994) 5710; J. Engel, T.K. Gaisser, P. Lipari, and T. Stanev, Phys. Rev. D46 (1992) 5013
- [8] R. Engel, T.K. Gaisser, P. Lipari, and T. Stanev, Proc. 26 th Int. Cosmic Ray Conf., Salt Lake City (USA), 1 (1999) 415
- [9] F. Riehn, Diss. University Karlsruhe (2015); F. Riehn et al., Proc. 34 th Int. Cosmic Ray Conf., The Hague (The Netherlands), (2015) contr. 1313
- [10] K. Werner, Phys. Rep. 232 (1993) 87
- [11] H.J. Drescher et al., Phys. Rep. 350 (2001) 93
- [12] K. Werner, F. M. Liu, and T. Pierog, Phys. Rev. C74 (2006) 044902; T. Pierog and K. Werner, Nucl. Phys. (Proc. Suppl.) 196 (2009) 102