

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Кудряшов Илья Анатольевич

**Электроника считывания малого ионизационного калориметра, алгоритмы анализа
данных космического эксперимента НУКЛОН
и измерение спектра никеля**

Специальность 01.04.16 Физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
Кандидат физико-математических наук
Воронин Александр Геннадьевич

Москва 2021

Работа выполнена в Отделе экспериментальной физики высоких энергий
Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научные руководители:

Воронин Александр Геннадьевич,
кандидат физико-математических наук

Официальные оппоненты:

Замятин Николай Иванович,
кандидат технических наук,
Международная межправительственная организация
«Объединенный институт ядерных исследований»,
начальник сектора

Михайлов Владимир Владимирович,
доктор физико-математических наук,
ФГАОУ высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ», профессор

Топчиев Николай Петрович,
доктор физико-математических наук,
ФГБУН «Физический институт им. П.Н.
Лебедева» РАН, высококвалифицированный
ведущий научный сотрудник

Защита диссертации состоится 26 ноября 2021 года в 15-00 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.11 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы 1, строение 5 (19 корпус НИИЯФ МГУ), ауд. 2-15.

Диссертация находится на хранении в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27). Со сведениями о регистрации участия в защите в удаленном интерактивном режиме и с диссертацией в электронном виде можно ознакомиться, перейдя на страницу диссертационного совета по ссылкам: https://istina.msu.ru/dissertation_councils/councils/400768902/
<https://www.msu.ru/science/dis-sov-msu.html>

Автореферат разослан "20.10" 2021 г.
Телефон совета для справок: +7 916 8717750
E-mail: galan_lidiya@mail.ru

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



Л.И. Галанина

Общая характеристика работы

Актуальность темы и степень ее разработанности

Изучение Космических лучей началось с работ Виктора Гесса 1912 году. За это время проведено множество наземных, стратосферных и орбитальных экспериментов по исследованию космических лучей, получено много полезной информации об энергетическом спектре, химическом составе и угловом распределении космических лучей (КЛ). Однако, в исследовании КЛ остается много нерешенных проблем. В частности – основной загадкой космических лучей является существование изгиба спектра – т.н. колена вблизи энергии 3 ПэВ на частицу.

Для исследования этой проблемы необходимо измерение спектров различных компонент КЛ в области колена. Основной проблемой в этом энергетическом диапазоне являются различия методов регистрации – до колена используются в основном прямые методы регистрации (баллонные или космические), которые дают поэлементное разрешение спектров, после колена – в основном косвенные (наземные, методом широких атмосферных ливней (ШАЛ)). С помощью ШАЛ удастся надежно измерить спектр всех частиц КЛ, но не спектры с поэлементным разрешением. Спектры с поэлементным разрешением легко получаются в прямых внеатмосферных измерениях. Так как в прямых измерениях (ATIC, CREAM, TRACER, PAMELA) удалось получить данные до энергий не выше нескольких десятков ТэВ на частицу, то создание аппаратуры и алгоритмов для прямого измерения энергетического спектра и химического состава космических лучей до энергий, приближающихся к колену в орбитальном эксперименте с большим фактором экспозиции позволит уточнить природу колена КЛ. Изучение тяжелой компоненты космических лучей - железа и, в особенности, никеля позволит уточнить механизмы распространения рождения КЛ в источниках и механизмы распространения, что определяет **актуальность данной работы**.

Цели и задачи исследования

Для решения поставленной задачи по измерению тяжелой компоненты спектров КЛ необходимо создать комплекс научной аппаратуры (КНА) с учетом особенностей регистрации тяжелых ядер, а так же создать новые и адаптировать существующие алгоритмы анализа данных, которые позволяли бы уверенно определять направление прилёта тяжелых ядер, заряд и их энергию.

В работе решены следующие задачи:

- Оптимизирована и протестирована специализированная микросхема считывания с

большим динамическим диапазоном от 1 до 30000 минимально ионизирующих частиц для малого ионизационного калориметра.

- Создана специализированная математическая модель установки Нуклон для оптимизации настроек триггерной системы.
- Созданы алгоритмы определения направления прилета и заряда для тяжелых ядер.
- Созданы алгоритмы определения энергии по данным малого ионизационного калориметра.
- Вычислены функции эффективности триггера и алгоритмов анализа.
- Построены спектры тяжелых компонент космических лучей, в том числе впервые измерен спектр никеля до энергий в несколько десятков ТэВ.

Научная новизна

Впервые для широкого энергетического диапазона от 900 ГэВ до 30 ТэВ получен спектр никеля. Показано, что спектр никеля спадает существенно интенсивнее, чем спектр железа и спектры других первичных металлов. Этот результат важен для уточнения механизмов рождения и распространения космических лучей.

Объект и предмет исследования

Объектом данного исследования является спектр тяжелых элементов космических лучей.

Предметом данного исследования является комплекс научной аппаратуры космического эксперимента Нуклон и, в частности, малый ионизационный калориметр.

Методология исследования

Комплексное тестирование и оптимизация электроники считывания выполнено с помощью автоматизированного тестового стенда методом последовательной оптимизации блоков микросхемы. Последовательность тестирования соответствует прохождению электрического сигнала, сгенерированного ионизирующей частицей в кремниевом детекторе, по тракту считывания.

Математическое моделирование установки выполнено в пакете GEANT4 с учетом реалистичного распределения окружающего вещества, в том числе гермоконтейнера и спутника Ресурс-П.

Создание алгоритмов анализа выполнено в пакете ROOT и опирается на математическое моделирование.

Положения, выносимые на защиту

1. Измеренный спектр никеля в энергетическом диапазоне 10^3 - 2×10^4 ГэВ спадает с ростом энергии существенно быстрее, чем спектры железа и других компонент КЛ.
2. Использование оптимизированной микросхемы считывания малого ионизационного калориметра эксперимента НУКЛОН позволяет измерять сигналы от одной минимально ионизирующей частицы до 30000 м.и.ч.
3. Учет специфических условий космического эксперимента: состав космического излучения, экранировку Землей и наличие в непосредственной близости от научной аппаратуры спутника Ресурс-П и гермоконтейнера в математической модели установки НУКЛОН позволяет рассчитывать ожидаемый темп выработки триггеров и позволяет оптимизировать настройки триггерной системы .
4. Оптимизация алгоритмов восстановления оси прилета, заряда и энергии для тяжелых ядер в космическом эксперименте НУКЛОН позволяет выделить ядра никеля на фоне существенно превосходящего потока ядер железа.

Теоретическая и практическая значимость:

Разработанная с участием автора электроника считывания малого ионизационного калориметра успешно эксплуатировалась в космическом эксперименте НУКЛОН, что позволило провести измерения энергии космических лучей в широком энергетическом диапазоне классической калориметрической методикой. Созданная автором специализированная Монте-Карло модель позволила оптимизировать настройки триггера и модифицировать алгоритмы анализа для тяжелых ядер. Применив эти алгоритмы к экспериментальным данным, автор получил спектры распространенных тяжелых ядер и ядер никеля. Этот результат важен для интерпретации наблюдаемых спектральных неоднородностей, изучения механизмов распространения галактических космических лучей и физики сверхновых звезд.

Личный вклад:

Все выносимые на защиту результаты и положения были получены лично автором или при его определяющем участии. Автор оптимизирован режим работы специальной интегральной микросхемы считывания НУКЛОН со сверхвысоким динамическим

диапазоном, разработанной с участием НИИЯФ МГУ. Создана специализированная математическая модель установки НУКЛОН, оптимизирован режим триггера и алгоритмы анализа для тяжелых ядер, получены спектры тяжелых ядер, в том числе, ядер никеля.

Степень достоверности результатов подтверждается успешной эксплуатацией аппаратуры и разработанных автором алгоритмов обработки, а также соответствием экспериментальных данных малого ионизационного калориметра данным других частей установки и результатам других экспериментов, когда сопоставление было возможно.

Апробация работы:

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 10 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

- 1) E. Atkin, V. Bulatov, V. Dorokhov, S. Filippov, N. Gorbunov, V. Grebenyuk, D. Karmanov, I. Kovalev, I. Kudryashov, A. Kurganov, M. Merkin, A. Panov, D. Podorozhny, D. Polkov, S. Porokhovoy, V. Shumikhin, L. Sveshnikova, A. Tkachenko, L. Tkachev, A. Turundaevskiy, O. Vasiliev, and A. Voronin, “The nucleon experiment. results of the first year of data acquisition,” //Astroparticle Physics(импакт-фактор 1,129), vol. 90, pp. 69–74, 2017.
- 2) V. Grebenyuk, D. Karmanov, I. Kovalev, I. Kudryashov, A. Kurganov, A. Panov, D. Podorozhny, A. Tkachenko, L. Tkachev, A. Turundaevskiy, O. Vasiliev, and A. Voronin, “Energy spectra of abundant cosmic-ray nuclei in the nucleon experiment,” //Advances in Space Research(импакт-фактор 0,682), vol. 64, no. 12, pp. 2546–2558, 2019.
- 3) E. Atkin, A. Voronin, D. Karmanov, I. Kudryashov, D. Podorozhniy, and V.Shumikhin. The read-out asic for the space nucleon project. //Journal of Instrumentation (импакт-фактор 0,741), 10:C04005, 2015
- 4) E. Atkin, V. Bulatov, V. Dorokhov, N. Gorbunov, S. Filippov, V. Grebenyuk, D. Karmanov, I. Kovalev, I. Kudryashov, A. Kurganov, M. Merkin, A. Panov, D. Podorozhny, D. Polkov, S. Porokhovoy, V. Shumikhin, L. Sveshnikova, A. Tkachenko, L. Tkachev, A. Turundaevskiy, O. Vasiliev, and A. Voronin, “First results of the cosmic ray nucleon experiment”// Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (импакт-фактор 0,837) , vol. 2017, no. 7, p. 20, 2017.
- 5)А. Н. Турундаевский, О. А. Васильев, Д. Е. Карманов, И. М. Ковалев, И. А. Кудряшов, А. А. Курганов, А. Д. Панов, Д. М. Подорожный, “Основные результаты эксперимента НУКЛОН”// Известия Российской академии наук. Серия физическая (импакт-фактор 0,628), том. 85,

номер. 4, стр. 478–481, 2021

- 6) E. Atkin, A. Voronin, V. Bulatov, V. Dorokhov, D. Karmanov, I. Kovalev, I. Kudryashov, D. Podorozhniy, D. Polkov, and S. F. V. Shumikhin, “Nucleonasic and ladder electronics for cosmic ray experiments” //Journal of Instrumentation (импакт-фактор 0,741), vol. 10, no. 04042, 2015.
- 7) E. Atkin, V. Bulatov, V. Dorokhov, N. Gorbunov, S. Filippov, V. Grebenyuk, D. Karmanov, I. Kovalev, I. Kudryashov, M. Merkin, A. Pakhomov, D. Podorozhny, D. Polkov, S. Porokhovoy, V. Shumikhin, L. Sveshnikova, A. Tkachenko, L. Tkachev, A. Turundaevskiy, O. Vasiliev, and A. Voronin, “The nucleon space experiment for direct high energy cosmic rays investigation in tev–pev energy range,” //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment (импакт-фактор 0,747), vol. 770, pp. 189–196, 2015.
- 8) Д. Панов, Э. В. Аткин, В. Л. Булатов, О. А. Васильев, А. Г. Воронин, Н. В. Горбунов, В. М. Гребенюк, В. С. Дорохов, Д. Е. Карманов, И. М. Ковалев, И. А. Кудряшов, А. А. Курганов, М. М. Меркин, Д. М. Подорожный, Д. А. Полков, С. Ю. Пороховой, А. В. Ткаченко, Л. Г. Ткачев, А. Н. Турундаевский, С. Б. Филиппов, и В. В. Шумихин “Обзор результатов космического эксперимента НУКЛОН” //Известия Российской академии наук. Серия физическая (импакт-фактор 0,628), том 83, №8, с.1080-1082
- 9) О. А. Васильев, Д. Е. Карманов, И. М. Ковалев, И. А. Кудряшов, А. А. Лобанов, Д. М. Подорожный, Л. Г. Ткачев, А. В. Ткаченко, А. Н. Турундаевский, и В. Н. Шигаев, “Выделение электронной компоненты по форме каскада в ионизационном калориметре в эксперименте нуклон” //Ядерная физика (импакт-фактор 0,566), том. 77, номер. 5, стр. 621–628, 2014
- 10) Э. В. Аткин, Ю. А. Волков, А. Г. Воронин, Д. В. Дементьев, И. И. Ильющенко, Д. Е. Карманов, А. Д. Ключев, И. А. Кудряшов, А. А. Лобанов, Д. М. Подорожный, и В. В. Шумихин, “Испытание 32-канальной интегральной микросхемы для регистрации сигналов кремниевых детекторов”// Приборы и техника эксперимента (импакт-фактор 0,716), номер 4, стр. 43–48, 2012

Материалы диссертации были представлены на двадцати семи конференциях и рабочих совещаниях коллаборации «Нуклон», в частности:

- 43rd COSPAR Scientific assembly, 2021, Сидней, Австралия
- 36-я Всероссийская конференция по космическим лучам, НИИЯФ МГУ, Россия, 2020

- The 2nd International Symposium on Cosmic Rays and Astrophysics (ISCRA-2019), Москва, Россия, 25-28 июня 2019
- The first Workshop on the Next Generation of AstroParticle Experiments in Space (NextGAPES-2019), Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Россия
- Workshop "Sources of Galactic Cosmic Rays" 11-14, Париж, Франция, 2018
- 26th Extended European Cosmic Ray Symposium and 35th Russian Cosmic Ray Conference, Барнаул/Белокуриха, Россия, 2018
- SUGAR 2015. Searching for the sources of galactic cosmic rays, Geneva, Switzerland, 2015
- TWEPP 2014 - Topical Workshop on Electronics for Particle Physics, Centre des Congrès - Aix en Provence, France, Франция, 2014
- 40th COSPAR Scientific Assembly, Moscow, Russia, Россия, 2014
- 20th International Conference on Particles and Nuclei (PANIC 14), Hamburg, Germany, Германия, 2014
- International Nuclear Science and Technology conference, Centara Grand at Central Plaza Ladprao, Bangkok, Thailand, Таиланд, 2014
- 33-я Всероссийская конференция по космическим лучам (Дубна, 11-15 августа 2014).

Структура и объем диссертации:

Диссертация состоит из введения, 7 глав и заключения, содержит 133 страницы, 85 иллюстраций, 2 таблицы и 60 библиографических ссылок.

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы цели работы, показана новизна и практическая ценность диссертации. Приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрена история исследования космических лучей, рассмотрена структура спектра КЛ, описаны механизмы рождения космических лучей, приведен обзор современных экспериментов.

На сегодняшний день создано множество моделей физической интерпретации явления «колена» (рис. 1), но ни для одной из них не предоставлено убедительных экспериментальных доказательств предлагаемых моделей.

Из всех существующих теорий объяснения существования колена можно выделить три основные направления:

- «Колено» в спектре ГКЛ отражает максимальную энергию частиц, до которой ускоряются КЛ в основных источниках.
- Диффузионные модели, в которых считается, что излом возникает как следствие эффектов распространения.
- Модель близкого источника, в которой в области колена доминируют частицы сверхновой или пульсара, находящихся на «близком» расстоянии от Земли – в радиусе сотен парсек, которые и определяют вид спектра в области «колена»

Для исследования природы колена необходимо измерить химический состав и построить поэлементные спектры космических лучей в энергетическом диапазоне ТэВ-ПэВ, что возможно только при проведении прямых экспериментов. Задачей диссертации является продвижение верхнего предела энергий, достижимых в прямых измерениях КЛ, к области колена.

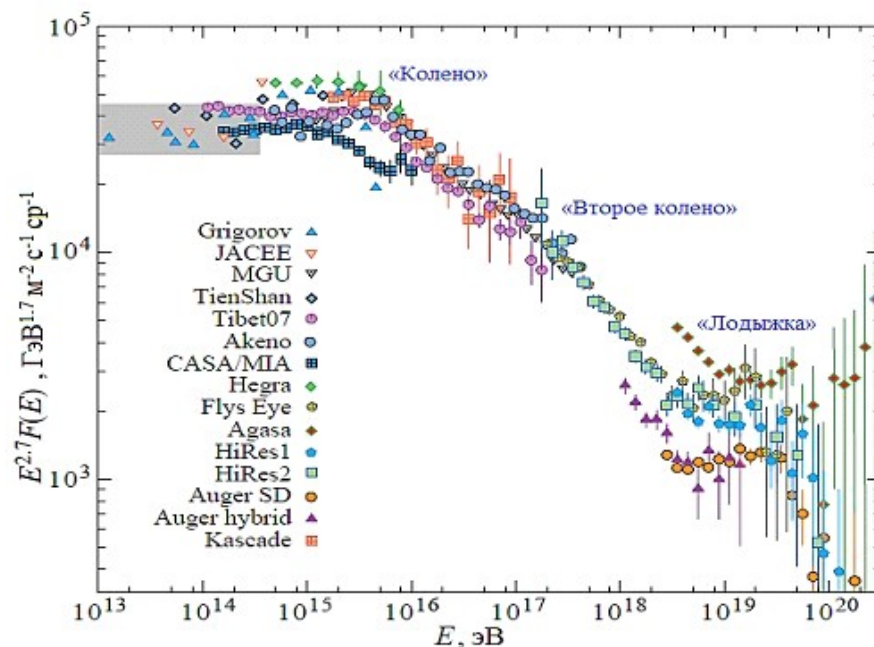


Рис. 1. Спектр космических лучей

Во второй главе приводится описание научной аппаратуры НУКЛОН, описываются его физические задачи и конструкция. Назначение эксперимента НУКЛОН - определение энергетических спектров и химического состава КЛ высоких энергий в энергетическом диапазоне 10^{11} - 10^{15} эВ.

Основными физическими задачами эксперимента являются:

- Измерения энергетического спектра обильных компонент КЛ в области 10^{11} - 10^{15} эВ. Такие измерения, развернутые по химическому составу, позволяют соотнести прямые и косвенные измерения КЛ и интерпретировать тонкую структуру спектров с точки зрения особенностей механизмов рождения и распространения КЛ.
- Измерения отношения потоков вторичных ядер к первичным. Получение отношения потоков вторичных ядер к первичным при высоких энергиях позволяет ответить на вопрос, как переходить от наблюдаемого потока КЛ к спектру в источниках.
- Измерение химического состава ГКЛ. Изучение характеристик различных химических элементов в космических лучах.

Научная аппаратура НУКЛОН состоит из нескольких систем: (см. рис.2), а именно:

- Система измерения заряда (СИЗ) - служит для измерения заряда налетающих частиц.
- Углеродная мишень (УМ) - обеспечивает первое неупругое столкновение частиц.
- Сцинтилляционная система быстрого триггера (ССБТ) - формирует запуск аппаратуры считывания.
- Система измерения энергии (СИЭ) — кинематический калориметр, по данным которого измеряются псевдо-быстроты компонент реакции первого неупругого взаимодействия и по ним вычисляется энергия налетающих адронов.
- Малый ионизационный калориметр (МИК) - ионизационный калориметр, обеспечивает альтернативную методику измерения энергии по отношению к кинематической методике и возможность перекрестной проверки измерения энергии частиц двумя методами, когда частица оказывается в апертуре калориметра а так же выделение и измерение лептонного спектра.

В общей сложности, в Научной аппаратуре НУКЛОН 10595 независимых каналов регистрации.

Особое внимание во второй главе уделено более подробному описанию малого ионизационного калориметра. Необходимость использования калориметра вместе с методикой KLEM вызвана двумя факторами:

- Методика KLEM не может быть проверена и откалибрована во время наземной отработки во всем диапазоне ожидаемых в эксперименте энергий. Это вызвано тем, что не существует ускорительных комплексов, где можно бы было, провести такие измерения. Поэтому для проверки методики KLEM в состав аппаратуры включен классический ионизационный калориметр.

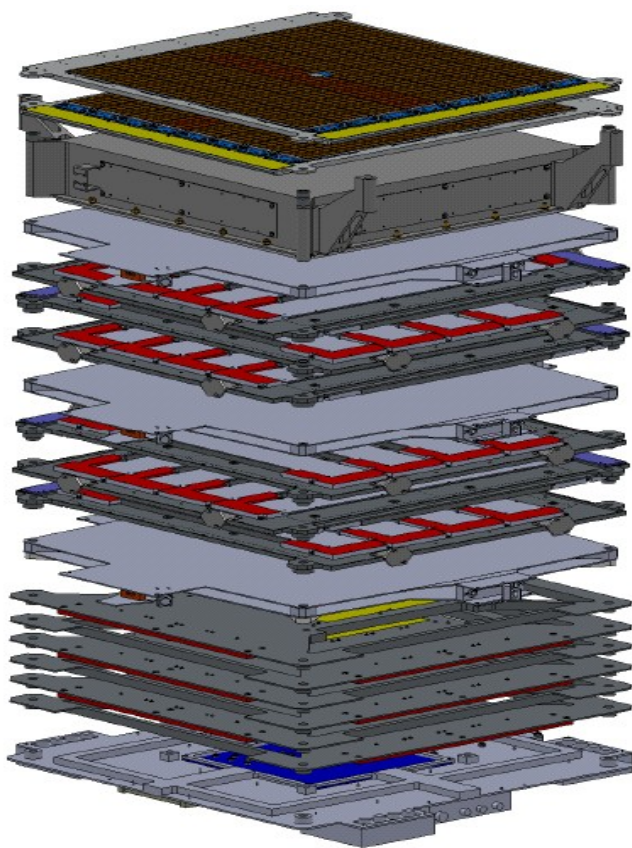


Рис.2. Схема аппаратуры НУКЛОН

Кинематический калориметр (KLEM спектрометр) не позволяет измерять энергию электромагнитной компоненты космических лучей, так как в малом количестве вещества недостаточно развивается электромагнитный каскад, чтобы использовать KLEM спектрометр как классический калориметр. Поэтому для измерения энергии электронов необходим более глубокий калориметр, работающий по классической (ионизационной) методике.

Адронный калориметр полного поглощения невозможно установить на спутнике Ресурс-П из-за весовых ограничений. Поэтому МИК является тонким калориметром (0.5 длины

пробега протона для ядерного взаимодействия), однако его энергетической точности 80% достаточно для проверки методики KLEM. Тем самым на борту реализованы две независимые методики измерения энергии, что позволяет выполнять перекрестные проверки обеих методик и уменьшить неопределенности, вызванные зависимостью от применяемой модели.

Третья глава посвящена специальной интегральной микросхеме считывания (СИМС) НУКЛОН.

Математическое моделирование, проведенное для протонов и электронов с максимально ожидаемой за время экспозиции энергией, показывает, что при выбранной грануляции детектора (размер стрипа порядка 1 мм) загрузка в отдельных стрипах МИК может достигать до 30000 м.и.ч. Поэтому главным требованием для микросхем считывания МИК проекта НУКЛОН является большой (порядка 30000 м.и.ч.) динамический диапазон.

Таким образом, для успешной эксплуатации научной аппаратуры в космическом эксперименте необходима регистрирующая электроника, реализованная в основном в интегральном виде со следующими характеристиками:

- динамический диапазон не менее 30000 м.и.ч
- соотношение сигнал-шум (сигнал от м.и.ч. для 300 микронного кремниевого сенсора равен 3,6 фКл) не менее 1.5
- не менее 32 каналов на микросхему
- малое энергопотребление — не более 3.5 мВт на канал

Объединенная группа НИИЯФ МГУ и НИЯУ МИФИ разработала специализированную интегральную микросхему, удовлетворяющую заданным требованиям. Главным техническим решением новой СИМС являлось применение билинейной амплитудной (переходной) характеристики для обеспечения соотношения сигнал/шум в области малых сигналов и динамического диапазона в области всего измеряемого амплитудного спектра.

Для обеспечения необходимого динамического диапазона был применен входной усилитель с линейно-ломанной передаточной характеристикой, имеющей более высокое усиление для малых сигналов и низкое усиление для больших сигналов (рис. 3).

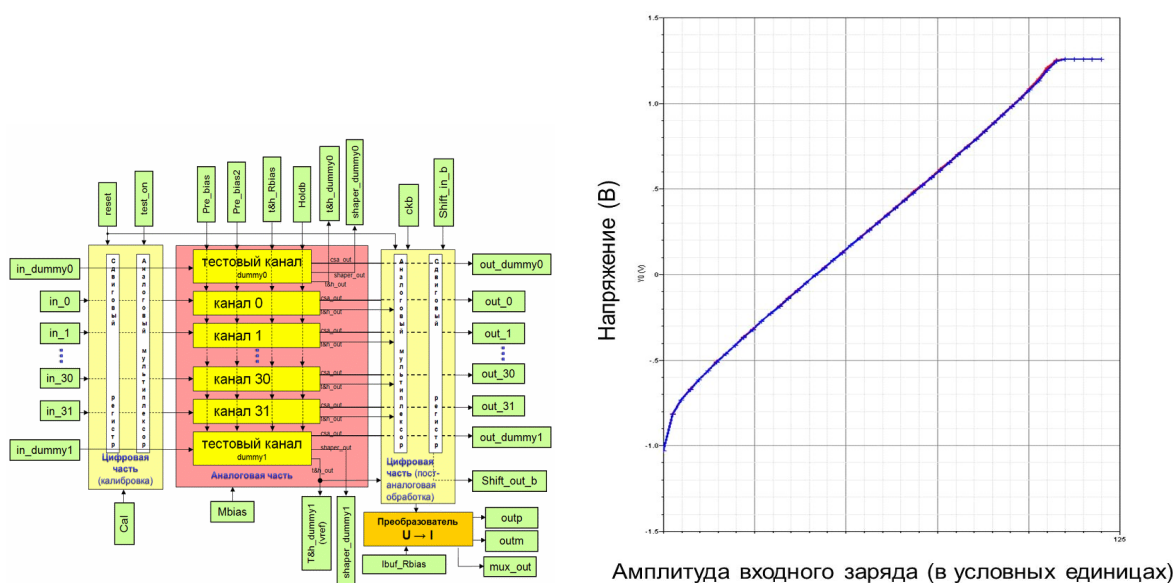


Рис.3. Структурная схема СИМС Нуклон и ее переходная характеристика.

Принципиальной особенностью разработанной схемы следует считать разделение полного динамического диапазона (от шумов до насыщения) на два поддиапазона. Точка перегиба характеристики определяется значением входного заряда на уровне 3 пКл. Это, с одной стороны, позволяет в области малых амплитуд обеспечить более высокий наклон передаточной характеристики и тем самым достигнуть лучшего отношения сигнал/шум, а с другой - в области больших сигналов обеспечить меньший наклон и тем самым расширить границы динамического диапазона «сверху» до 120 пКл.

Учитывая новизну и сложность микросхемы, для ее применения в аппаратуре необходимо всестороннее тестирование. Для этого был создан программно-аппаратный стенд для испытаний СИМС.

С помощью стенда решаются следующие задачи:

- обеспечение функционирования микросхемы в рабочем и тестовых режимах
- измерение передаточной характеристики
- измерение осциллограмм и передаточных характеристик в промежуточных точках вспомогательных (dummy) каналов микросхемы
- измерение уровня шумов
- изучение изменений в режиме работы микросхемы при варьировании интервалов временной диаграммы и опорных потенциалов микросхемы

- измерение уровней потребления микросхемы в различных режимах потенциалов prebias1 и prebias2.

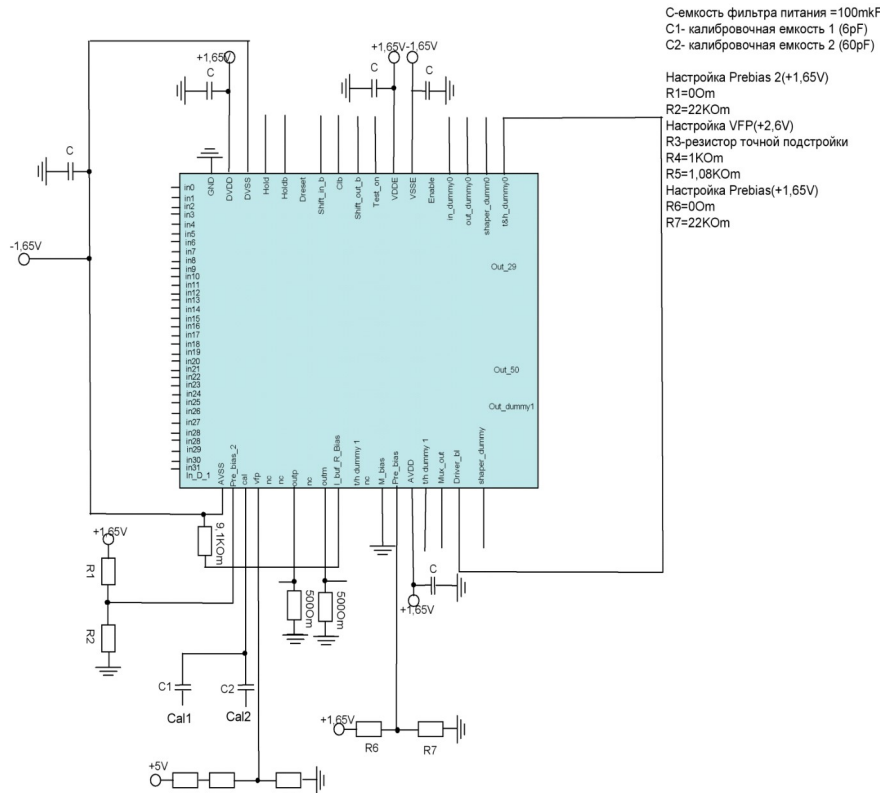


Рис 4. Оптимизированная схема включения СИМС Нуклон

Таким образом, было проведено комплексное тестирование СИМС НУКЛОН и создана схема включения (рис 4), оптимизирующая параметры микросхемы и позволившая эксплуатировать СИМС НУКЛОН в космическом эксперименте с параметрами, обеспечивающими выполнение физической задачи эксперимента.

Четвертая глава посвящена созданию математической модели комплекса научной аппаратуры Нуклон, оптимизации режима работы триггера и алгоритмам предварительной обработки данных.

Основной задачей эксперимента НУКЛОН является получение спектров различных компонентов космических лучей. Для наиболее эффективного набора статистики необходимо оптимизировать режим работы триггера, а для построения поэлементных спектров космических лучей необходимо определять направление прилета, измерять энергию частиц и идентифицировать их.

Для разработки, проверки и уточнения алгоритмов и методов физического анализа

было проведено математическое моделирование взаимодействия различных компонентов космических лучей (протонов, ядер, электронов) с установкой НУКЛОН. Моделирование проводилось с помощью пакета Geant4 (версии 9.4 и 9.5).

Основные задачи моделирования – оптимизация условий работы триггера, разработка алгоритмов анализа для тяжелых ядер, оценка координатного, зарядового и энергетического разрешения.

Полученные с помощью этой модели алгоритмы были проверены на пучке синхротрона SPS CERN, используя данные тестовых сеансов.

Для отработки алгоритмов анализа были созданы две модели эксперимента НУКЛОН – упрощенная и полная, более точно описывающая геометрию установки, условия космического полета и распределение вещества в установке (см. рис.5).

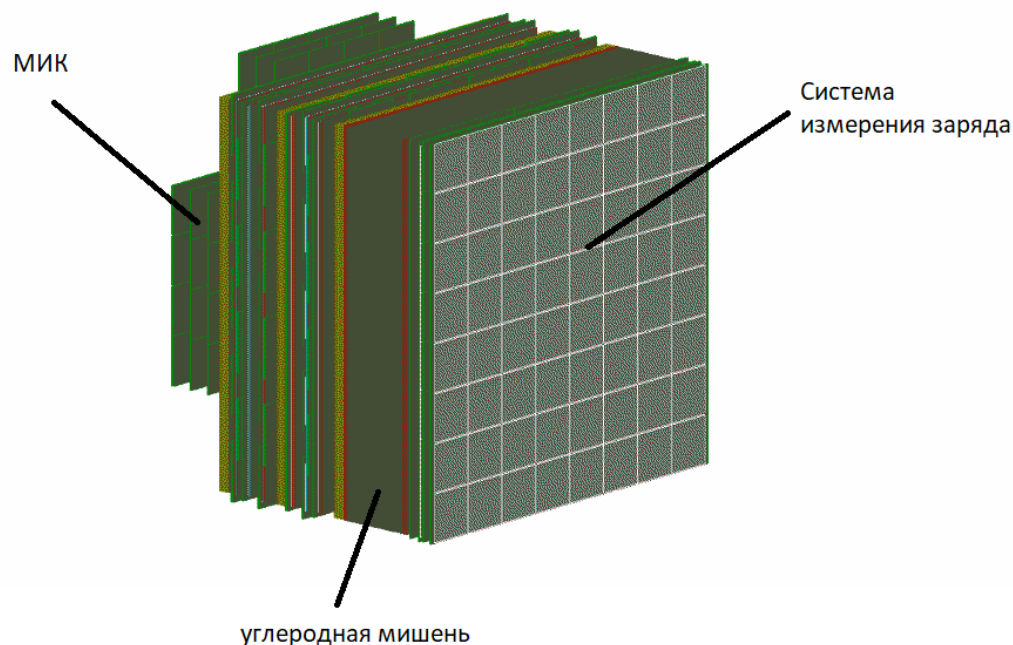


Рис.5 Представление геометрии спектрометра в математической модели эксперимента
НУКЛОН

Реконструкция оси ливня – один из наиболее важных этапов анализа. Построение оси ливня важно для работы алгоритмов определения энергии, заряда и типа частицы, а критерий качества линейной аппроксимации оси показывает достоверность (качество) восстановления события для дальнейшей интерпретации.

Алгоритм реконструкции состоит из двух этапов:

- Вычисление положения точек пересечения траектории частиц и координатно-

чувствительных плоскостей СИЭ и МИК: сначала вычислялось положение полосы шириной в 21 стрип с максимальным суммарным выделением энергии, а потом определялся центр тяжести в этой полосе. При этом учитывалось энерговыделение больше 2 м.и.ч.

- Собственно аппроксимация оси, которая выполняется с помощью минимизации χ^2 по восстановленным точкам пересечения траектории частицы. При этом учитываются только плоскости с энерговыделением в полосе выше порогового (для СИЭ от 20 до 200 м.и.ч в зависимости от слоя, для МИК 250 м.и.ч.) и ошибкой среднего менее 10 мм. Алгоритм предусматривает корректное восстановление оси при наличии как минимум двух таких точек в каждой проекции.

Результатом аппроксимации является положение оси ливня в двух проекциях. Результат работы алгоритма проиллюстрирован на рис.6.

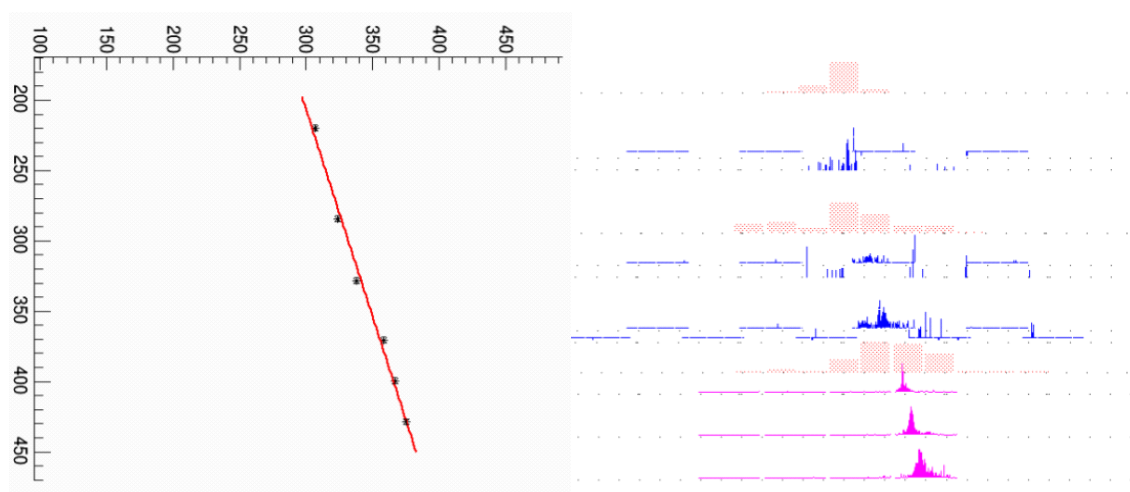


Рис.6. Пример работы алгоритма – портрет проекции события (слева) и восстановления оси (справа)

Следующей операцией, после определения оси, является определение заряда частицы. Необходимо точно идентифицировать налетающую частицу для реконструкции спектров с поэлементным разрешением химического состава КЛ. Особую трудность представляет разделение близких компонент КЛ, распространенность которых существенно отличается. Например, эта проблема актуальна для изучения спектров вторичных ядер, таких как азот и бериллий и для выделения никеля на фоне железа. Для аппаратуры НУКЛОН реализован алгоритм, построенный на применении ранговой статистики.

Результатом работы алгоритма является определение заряда налетающих ядер с точностью:

~0.2 зарядовые единицы для легких ядер

~0.22 зарядовые единицы для средних ядер

~0.3 зарядовые единицы для тяжелых ядер

В этой же главе рассмотрен анализ эффективности триггеров и алгоритмов на основе математической модели с учетом вещества, расположенного по соседству со спектрометром спутника Ресурс - П.

Пятая глава посвящена алгоритмам физического анализа данных в КНА НУКЛОН.

Восстановление энергии налетающих частиц в установке реализовано с помощью классической методики ионизационного калориметра, а так же с помощью методики кинематического калориметра (см. Главу 2). В настоящей работе описана классическая ионизационная методика, являющаяся объектом исследования настоящей диссертации. При анализе данных аппаратуры НУКЛОН, как ионизационного калориметра, функцией, пропорциональной энергии первичной частицы, служит суммарное полное энергосодержание в МИК (рис. 6). Пересчет двумерного распределения аппаратной функции в функциональную зависимость выполнялось в несколько этапов. Для построения передаточной функции для каждого Z применялся следующий алгоритм :

- 1) Сначала определялась сетка значений по выделившейся энергии
- 2) Для каждого значения сетки в диапазоне $\pm 10\%$ строилось распределение по исходной энергии
- 3) Для каждого распределения находится среднее значение и его дисперсия.
- 4) Строится зависимость полученного в п.3 среднего первичной энергии от выделившейся энергии (по сетке)

Энергетическое разрешение метода составляет от, примерно, 75% для протонов до, примерно, 35% для железа в энергетическом диапазоне 100ГэВ-100ТэВ, а зависимость энергосодержания от энергии налетающей частицы аппроксимируется квадратичной функцией, в которой доминирует член первого порядка (рис .7)

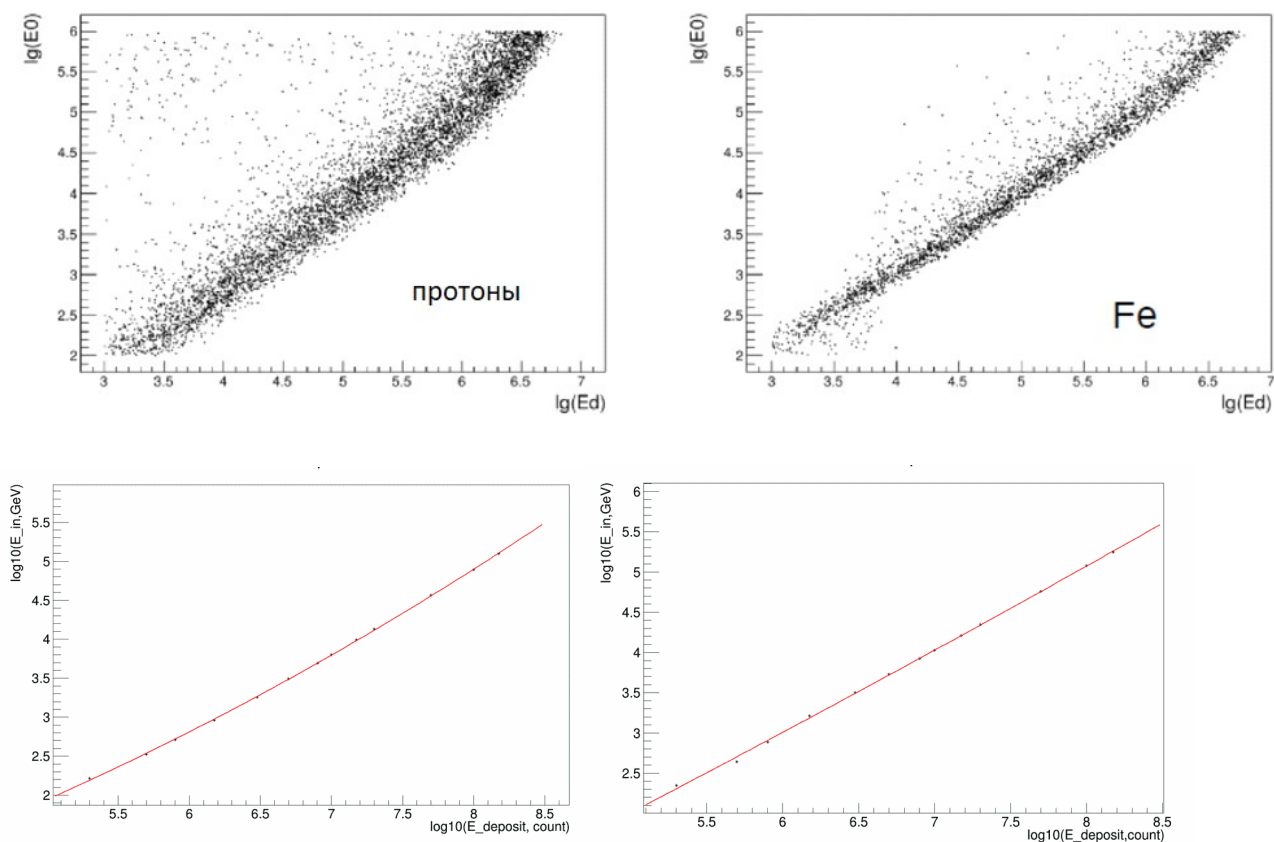


Рис.7. Вверху – аппаратные функции (зависимость энергосодержания в калориметре от энергии налетающей частицы для каждого отдельного случая взаимодействия). Снизу – зависимость первичной энергии от энергосодержания для ядер водорода (слева) и железа (справа) аппроксимируется полиномом 2 степени.

Для построения электронного спектра необходимо выделить электронные события на общем фоне. Сложность заключается в том, что поток электронов в среднем на три порядка ниже потока адронов тех же энергий. Поэтому для надежной идентификации электронов был разработан эффективный механизм, позволяющий подавить адронный фон на 3 порядка.

Разработанный механизм базируется на разнице в топологическом и энергетическом развитии электромагнитного и адронного каскадов.

Для увеличения эффективности сепарации был применен мультивариантный анализ (МВА). Он представляет собой метод классификации событий, основанный на обучаемых алгоритмах. Для использования МВА был выбран пакет TMVA (Toolkit for MVA).

Для испытаний аппаратуры и проверки правильности использования предложенных алгоритмов анализа данных были проведены несколько сеансов на выведенном пучке Супер Протонного Синхротрона (SPS) в Европейском Центре Ядерных Исследований. Первичные протоны в синхротроне ускорялись до энергии 400 ГэВ, после чего выводились на

фиксированную мишень, расположенную в начале канала.

Из-за технических проблем с аппаратурой в полетном эксперименте для решения основной задачи пришлось существенно увеличить порог триггерной системы, что не позволило применить методику выделения электронов и измерить электронный спектр.

Шестая глава посвящена испытаниям предложенных алгоритмов.

Испытание алгоритмов выделения электронов, описанных в предыдущей главе, проводилось на доступном в тестовом сеансе энергетическом диапазоне - электроны с энергией 100, 150 и 200 ГэВ сравнивались с пионами с энергий 350 ГэВ. Для выделения электронов использовался алгоритм BDT наилучшим образом зарекомендовавший себя при анализе модельных данных. В результате мультивариативного анализа были получены кривые ошибок (Рис 8).

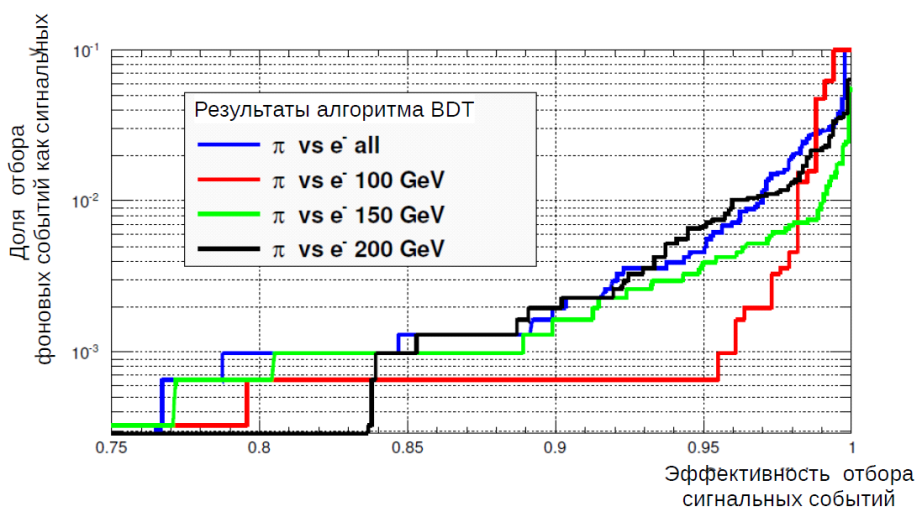


Рис. 8. Кривые ошибок для экспериментальных данных, полученные методом BDT.

Седьмая глава посвящена результатам эксперимента в условиях космического полета. В ней описывается настройка триггерной системы, калибровка установки по полетным данным и полученные экспериментальные спектры.

На первоначальном этапе космического полета в процессе настройки космического эксперимента на аппаратуре выставлялись различные пороги триггерной системы, и, как следствие, темп прихода триггеров менялся в широком диапазоне. Это позволило проверить правильность настройки математической модели с помощью сравнения реального и ожидаемого темпов счета.

Полученная за время полета статистическая информация позволила откалибровать зарядовую систему и повысить точность алгоритмов анализа: в частности, была проведена

работа по уменьшению систематической ошибки определения заряда из-за допусков разброса толщины пластин, на которых изготавливались детекторы зарядовой системы.

Иллюстрацией качества работы предложенных алгоритмов предварительного анализа данных является построение зарядовых и энергетических спектров КЛ и сопоставление этих спектров с предыдущими экспериментами. Совпадение потоков компонент КЛ с предыдущими экспериментами в пределах ошибок в хорошо известной и измеренной энергетической области говорит о правильности работы алгоритмов предварительного анализа, построения кривых эффективностей алгоритмов и триггера, а так же о работоспособности аппаратуры в целом при выполнении космического полета.

Одним из основных результатов работы эксперимента НУКЛОН являлся спектр никеля, полученный впервые для энергетического диапазона от 900 ГэВ до 30 ТэВ. В отличие от предыдущих измерений этот энергетический диапазон не подвержен солнечной модуляции, что позволило оценить показатель его спектра, который оказался существенно более интенсивно спадающим по сравнению с спектрами железа и остальных металлов. Возможными причинами этого может являться механизм рождения никеля, отличный от механизмов рождения более легких ядер (комбинация равновесного и S процессов нуклеосинтеза) или не полная ионизация ядер при ускорении в источниках. Этот результат получен впервые и требует дальнейшего уточнения: как увеличение энергетического диапазона и повышения статистики, так и измерение спектров более тяжелых ядер.

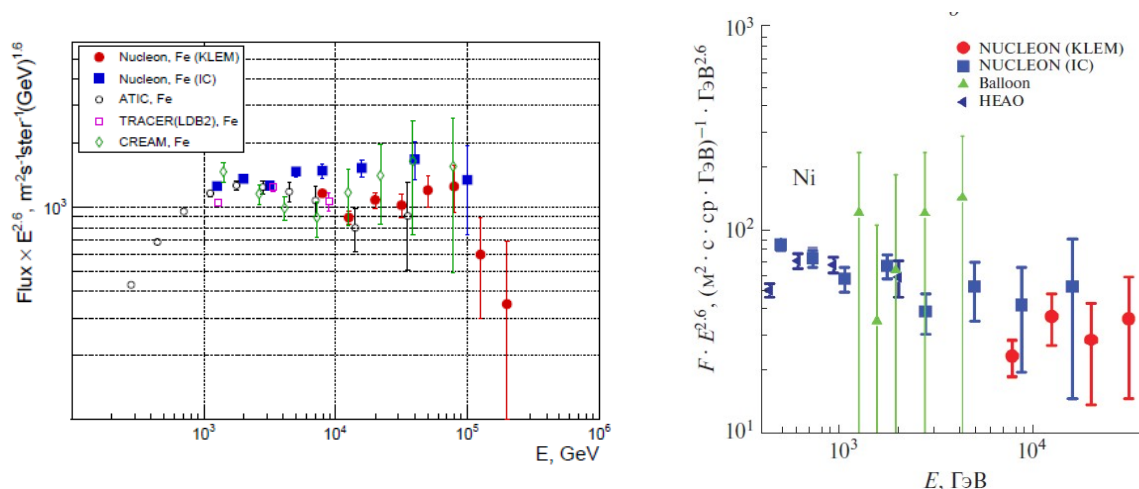


Рис 9. Спектры железа и никеля по данным анализа автора, KLEM, а так же экспериментов ATIC, TRACER, CREAM и HEAO.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации:

- Проведено лабораторное электрическое тестирование электроники и микросхемы считывания. Создана методика оптимизации работы считывающей электроники и микросхемы при помощи внешних элементов с целью достижения оптимальных параметров микросхемы при использовании ее в проекте НУКЛОН. Полученные параметры позволили успешно эксплуатировать микросхему в комплексе научной аппаратуры Нуклон.
- Создана специализированная математическая модель установки НУКЛОН, учитывающая реальные условия космического эксперимента. Модель позволила оптимизировать настройки триггерной системы в том числе для тяжелых ядер.
- Созданы и оптимизированы алгоритмы восстановления осей ливней налетающих частиц для тяжелых ядер, их заряда и энергии с помощью ионизационного калориметра, что позволило впервые выделить спектр никеля на фоне превосходящего потока железа .
- Впервые построен спектр никеля в широкой энергетической области 10^3 - 2×10^4 ГэВ, и уточнены характеристики спектров распространенных тяжелых элементов космических лучей. Этот результат очень важен для понимания физики источников космических лучей – механизмов ускорения в оболочках сверхновых звезд.