

СПЕКТРЫ ДЕЙТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОКРЕСТНОСТИ ЗЕМЛИ

Докладчик Колдобский С. А., НИЯУ МИФИ

Научный руководитель проф., д.ф.-м.н. Воронов С. А.

Москва - ИЯИ - 14 января 2016 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

- новый метод идентификации дейтронов на интенсивном фоне других частиц посредством многопараметрического корреляционного анализа данных эксперимента ПАМЕЛА;**
- новые результаты измерений дифференциального энергетического спектра дейтронов и энергетической зависимости отношения потока дейтронов к потоку протонов в диапазоне энергий от 70 до 650 МэВ/нуклон в ГКЛ и под внутренним радиационным поясом Земли;**

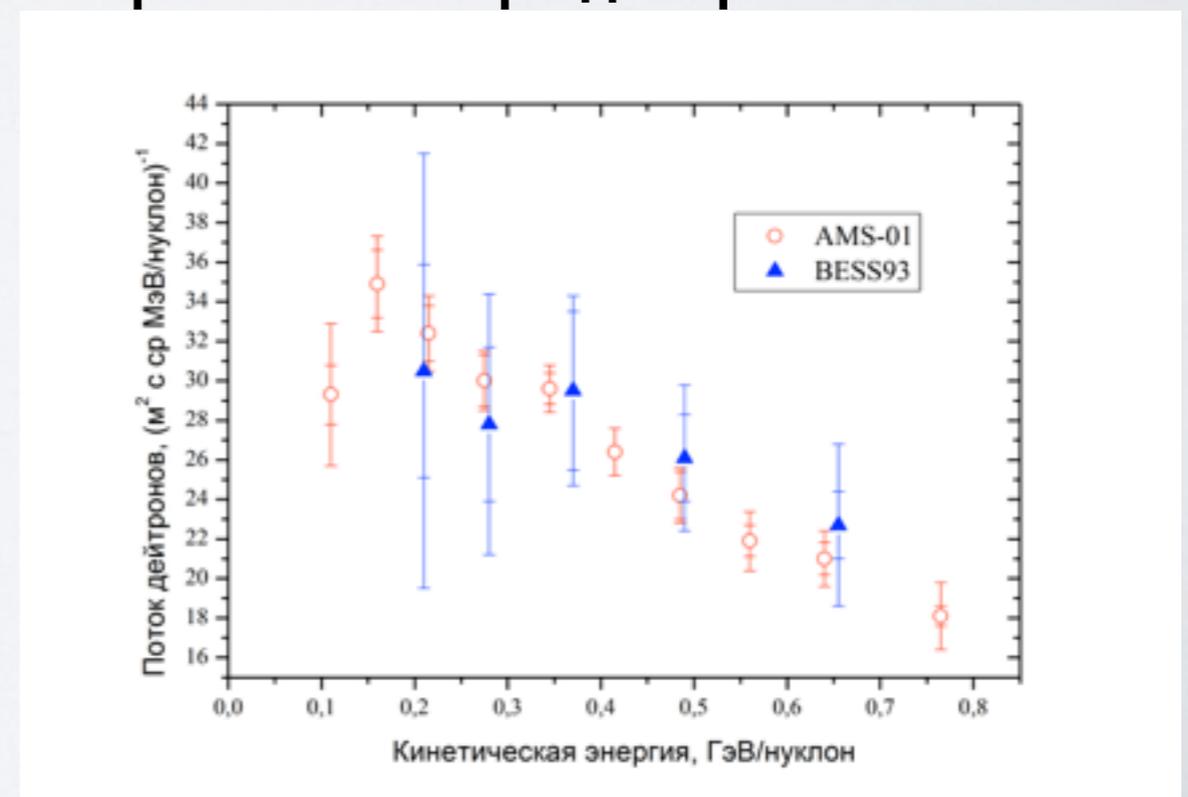
ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРА ДЕЙТРОНОВ В ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

- Дейтроны - стабильные изотопы водорода, состоящие из одного протона и одного нейтрона.
- Дейтроны галактических космических лучей (ГКЛ) имеют вторичную природу, они образуются в результате взаимодействия частиц первичных ГКЛ с веществом межзвездной среды.
- Измерение спектра дает возможность лучше понять процессы, происходящие при распространении космических лучей (КЛ) через Галактику.
- К запуску эксперимента ПАМЕЛА было проведено некоторое количество измерений спектра дейтронов, однако результаты различных экспериментальных групп не согласовывались друг с другом.

Основные реакции рождения дейтронов ГКЛ

$p^{+}+{}^1\text{H}\rightarrow\text{D}+\pi^{+}$
$p^{+}+{}^4\text{He}\rightarrow\text{D}+{}^3\text{He}+(\pi)$
$\alpha+{}^1\text{H}\rightarrow\text{D}+{}^3\text{He}+(\pi)$
$p^{+}+{}^4\text{He}\rightarrow\text{D}+2 p^{+}+n+(\pi)$

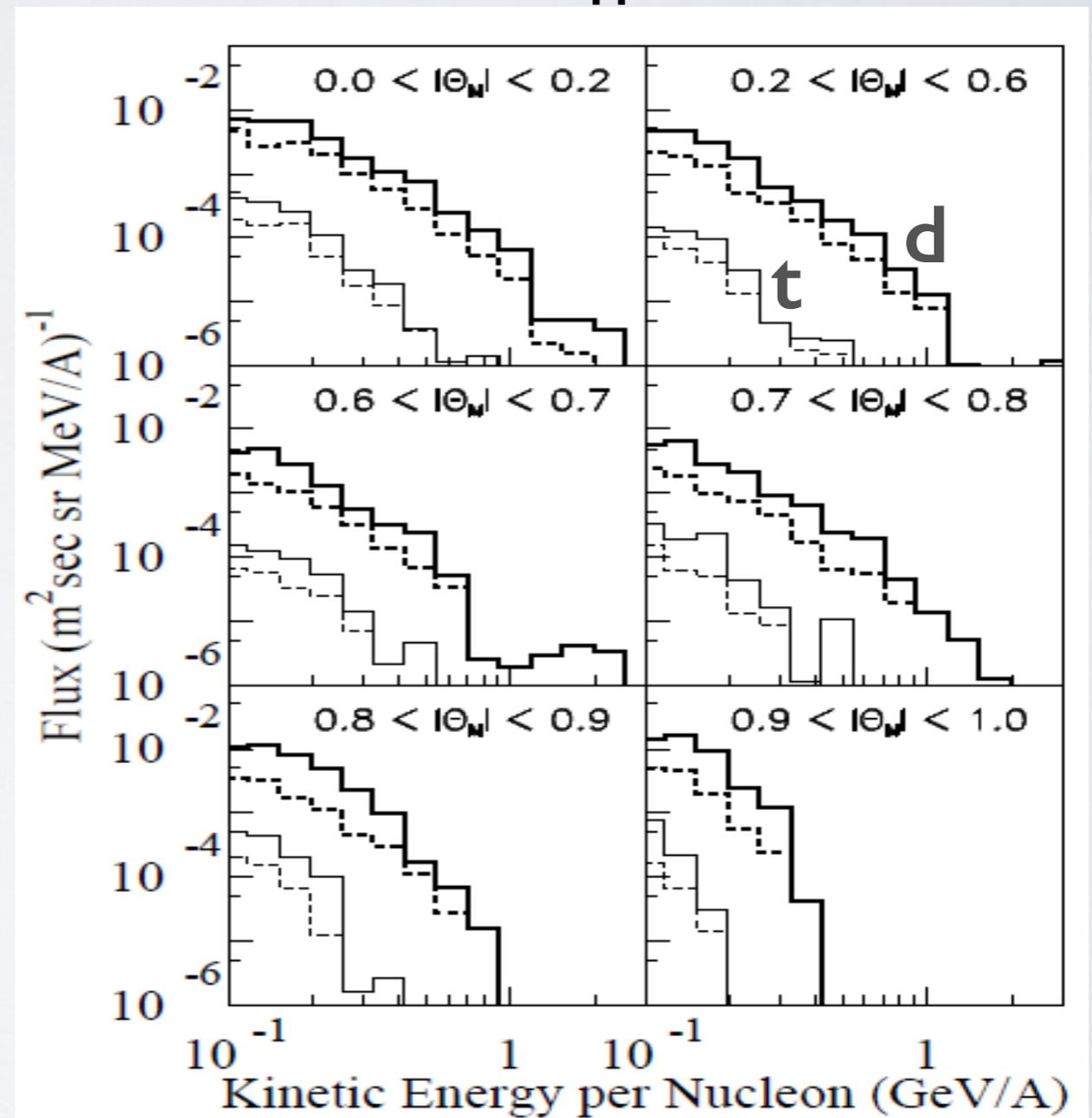
Результаты последних экспериментов по измерению спектра дейтронов в ГКЛ



ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРА ДЕЙТРОНОВ АЛЬБЕДО

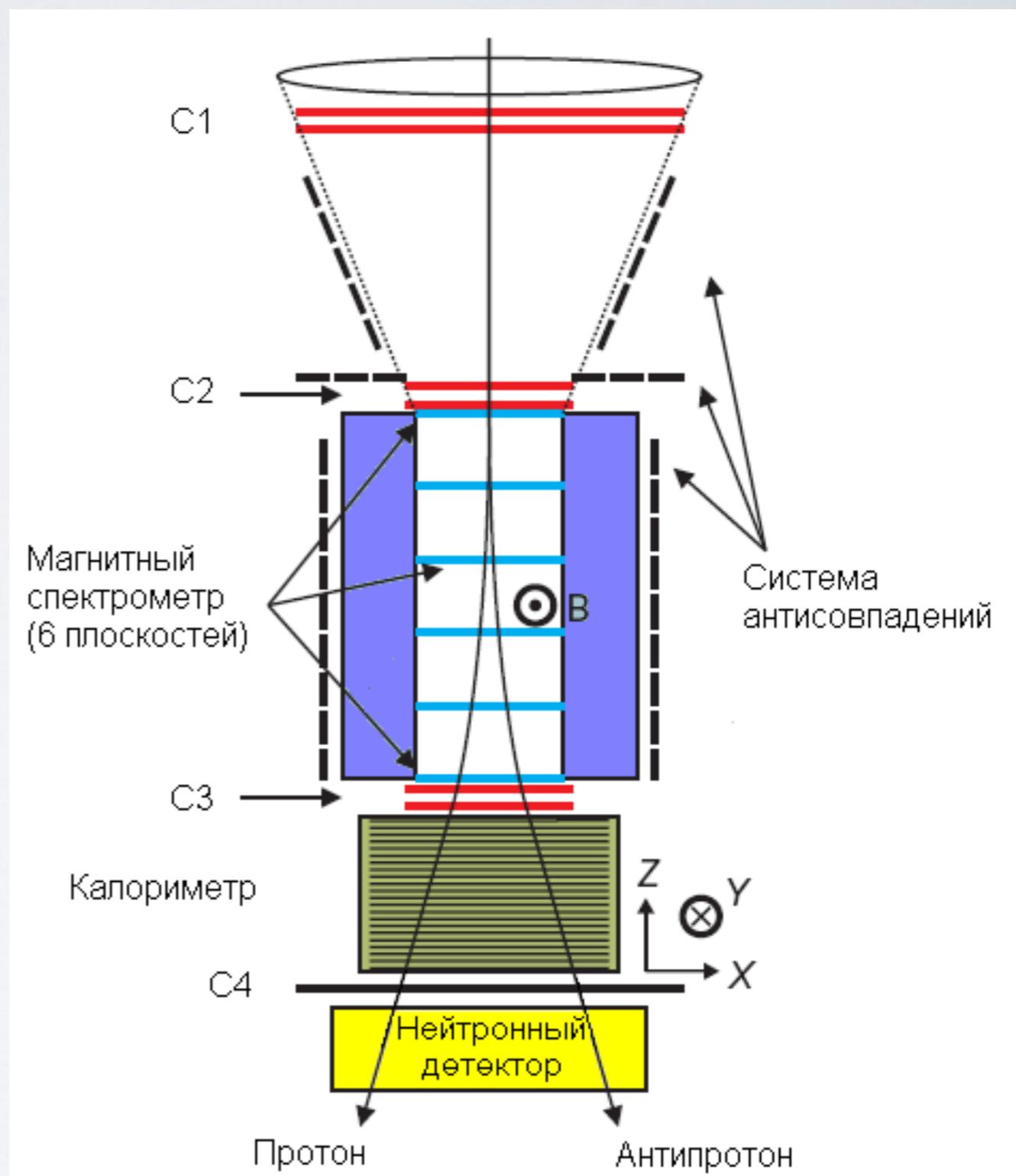
Ожидаемый спектр дейтронов
альбедро

- Дейтроны альбедро рождаются при взаимодействии галактических космических лучей с атомами верхних слоев атмосферы.
- Существуют теоретические расчеты по генерации дейтронов альбедро (Derome L., Buenerd M. // Physics Letters B, No. B521, 2001)
- Измерения спектра дейтронов альбедро были проведены в экспериментах NINA, NINA-2, а также AMS-01 (в перекрывающейся области измерений)



ЭКСПЕРИМЕНТ ПАМЕЛА

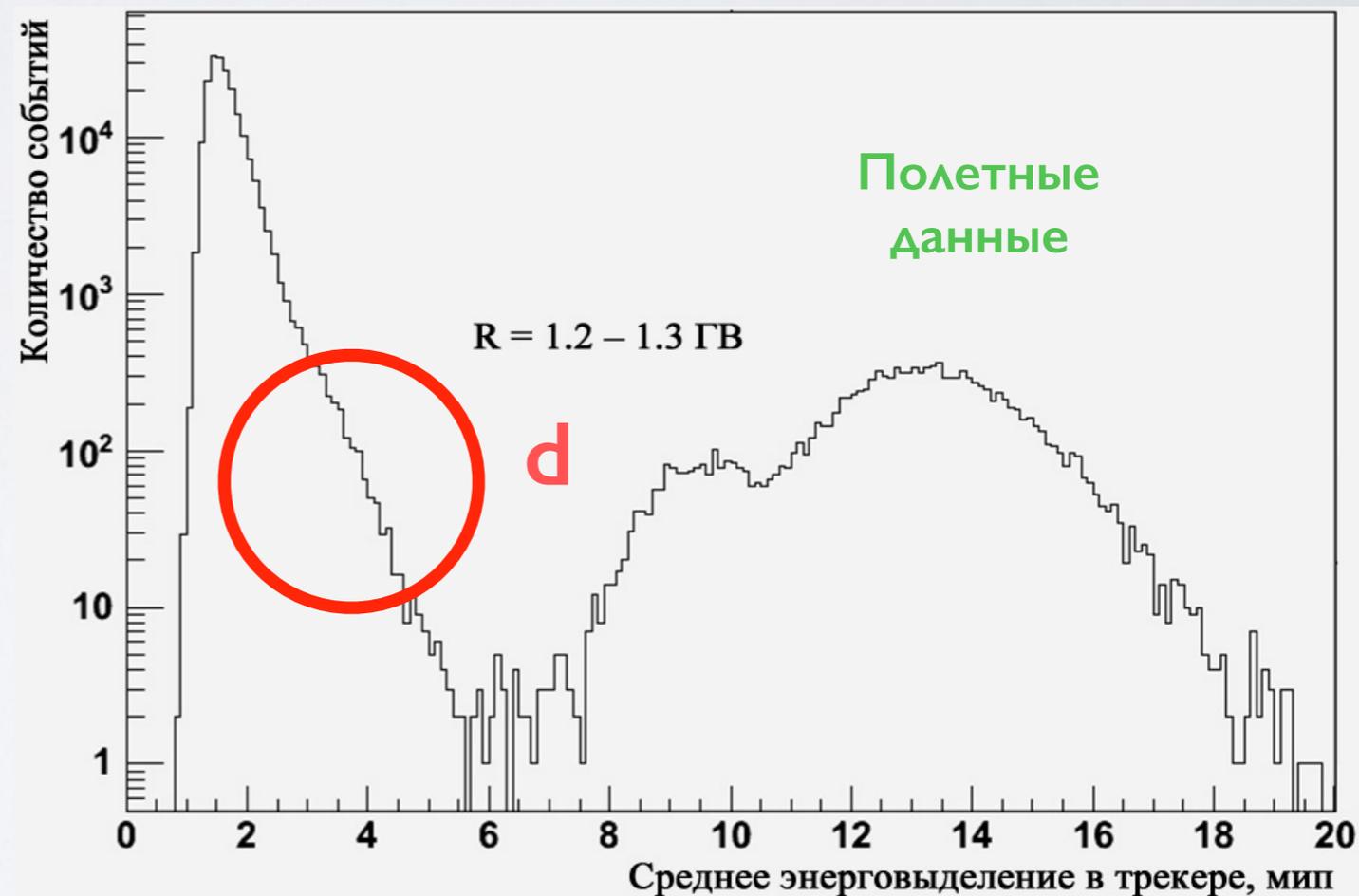
- Экспериментальный комплекс ПАМЕЛА размещена на борту ИСЗ Ресурс ДК I, который был запущен на околоземную орбиту 15 июня 2006 года.
- В состав экспериментального комплекса входит несколько детекторных систем, позволяющих определять различные характеристики пролетевших частиц космического излучения.



СЛОЖНОСТЬ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЕЙТРОНОВ

При идентификации дейтронов в эксперименте ПАМЕЛА основную сложность представляют собой большой фон протонов, имитирующих дейтронные события, затрудняющий их идентификацию и последующее восстановление их спектра.

Для получения спектра дейтронов было необходимо разработать метод подавления протонов.



«БАЗОВЫЙ» ОТБОР СОБЫТИЙ

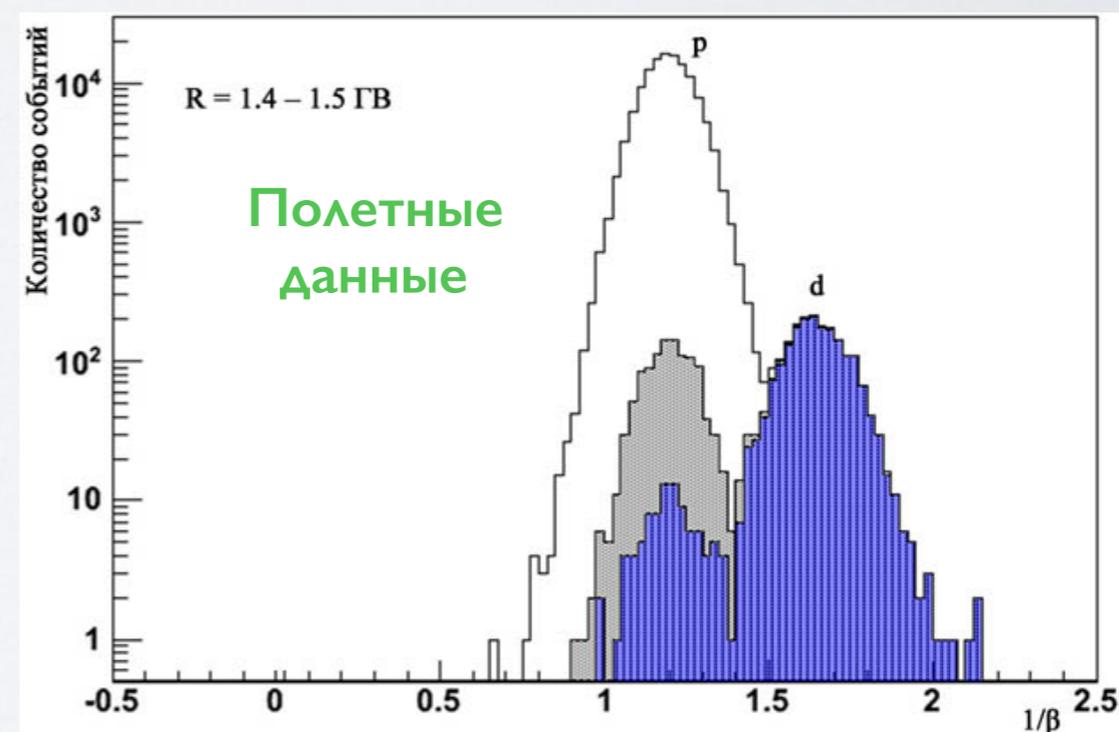
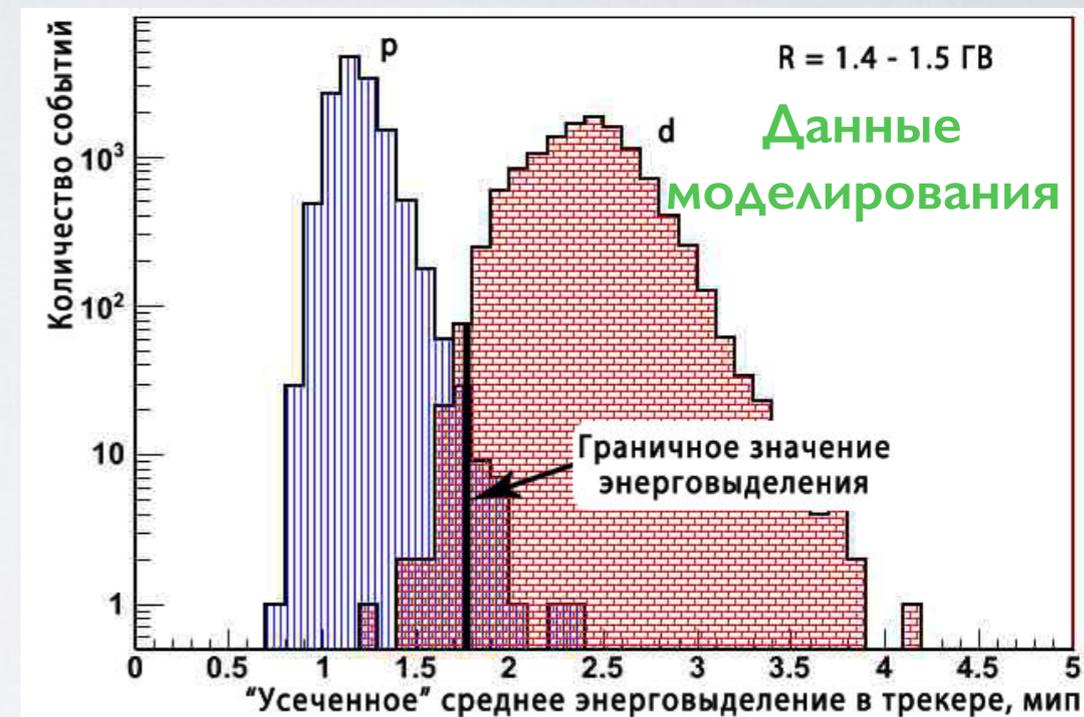
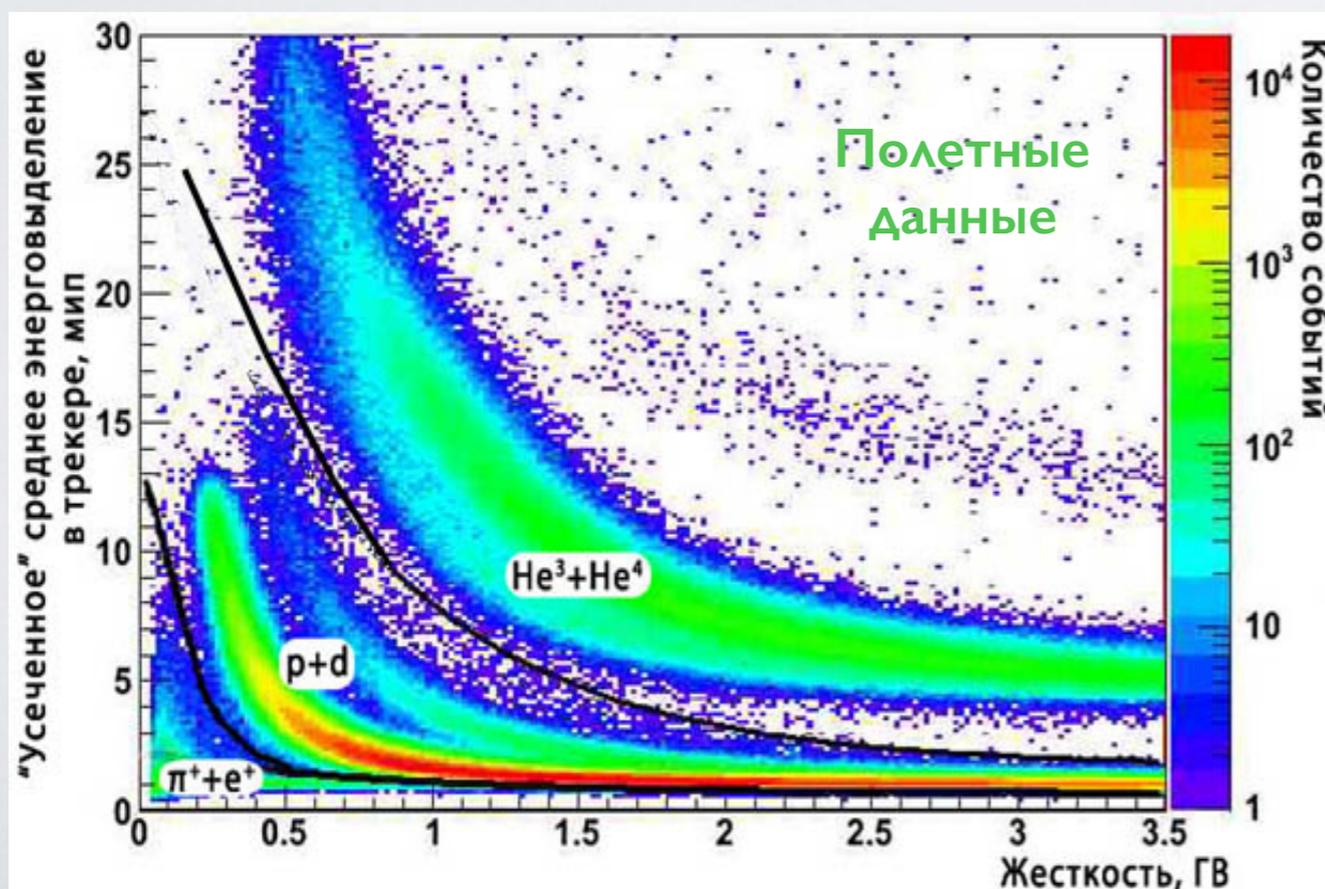
Работа по выбору критериев «базового» отбора носила итерационный характер и была неразрывно связана с разработкой метода подавления протонного фона и идентификации дейтронов.

Эта работа позволила выработать ряд критериев, позволяющих использовать при дальнейшем анализе события со следующими корректно измеренными характеристиками частиц, прошедших через детекторную систему:

- скоростью, измеряемой ВПС;
- жесткостью, измеряемой трекером;
- ионизационными потерями частиц в детекторах ВПС и трекера.

МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ

- При подавлении протонов исключались события, имеющие энерговыделение ниже порогового, после чего для оставшихся событий строились распределения по величине, обратной скорости частицы β , для узких интервалов по жесткости

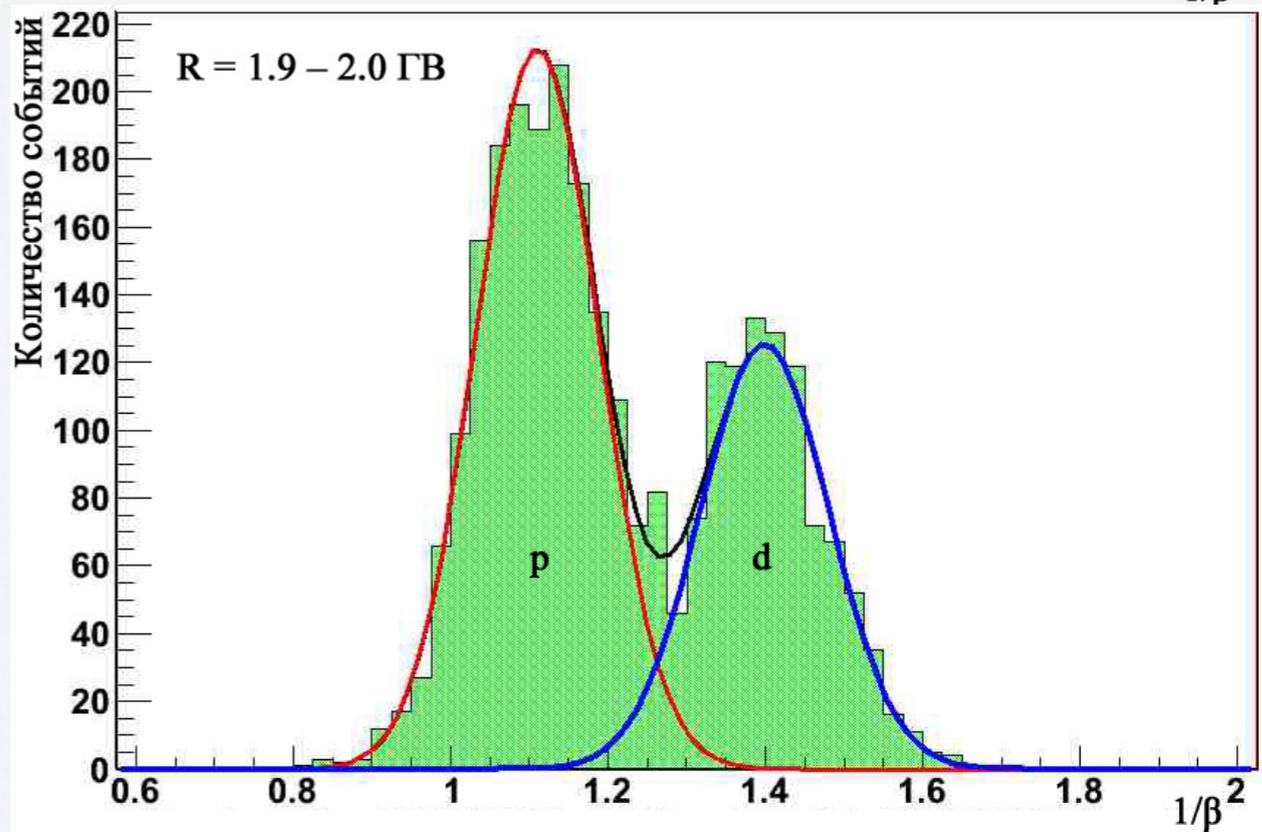
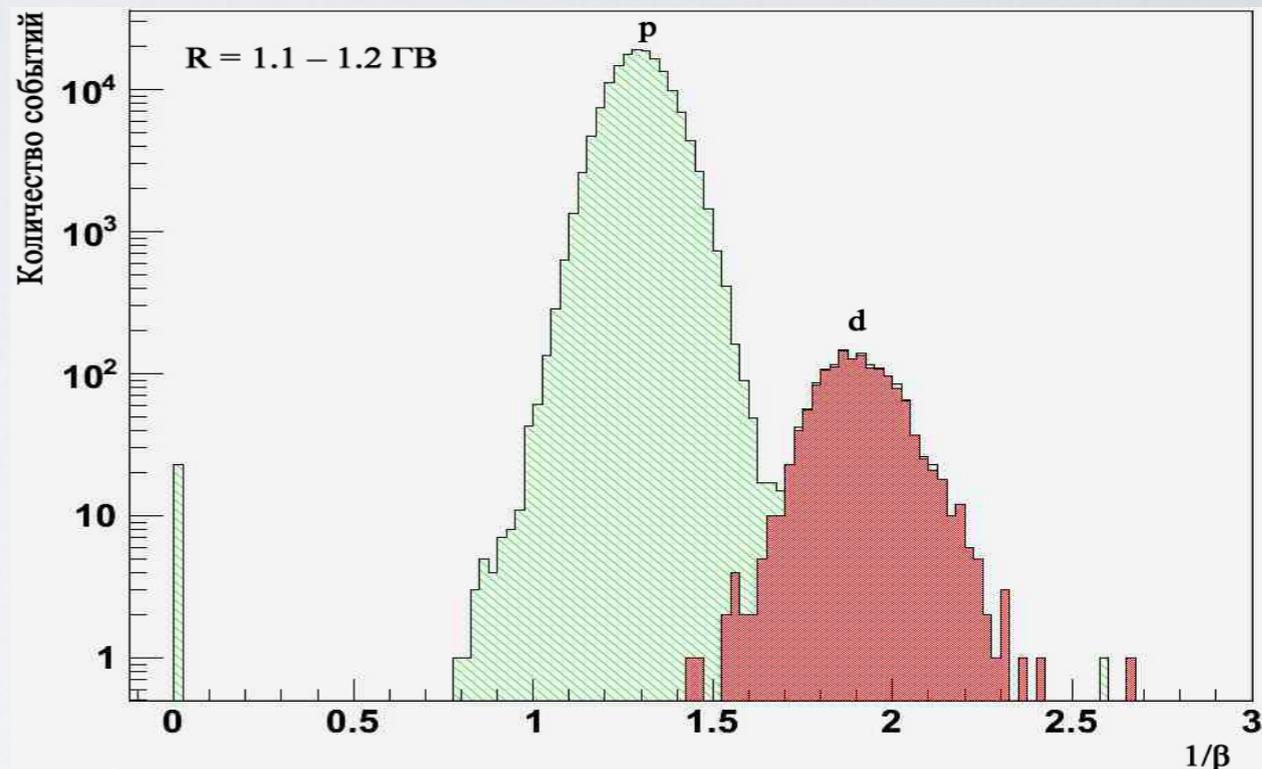


МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ

Для подсчета количества зарегистрированных дейтронов использовалась два метода:

$R < 1.4$ ГВ \Rightarrow полное подавление протонов, пики протонов и дейтронов полностью разделяются, количество дейтронных событий подсчитывается непосредственно как количество событий под соответствующим пиком на гистограмме.

$R > 1.4$ ГВ \Rightarrow значительный протонный фон, распределения перекрываются. Для определения количества дейтронов и протонов используется аппроксимация экспериментальных распределений по величине, обратной скорости, суммой двух распределений Гаусса.

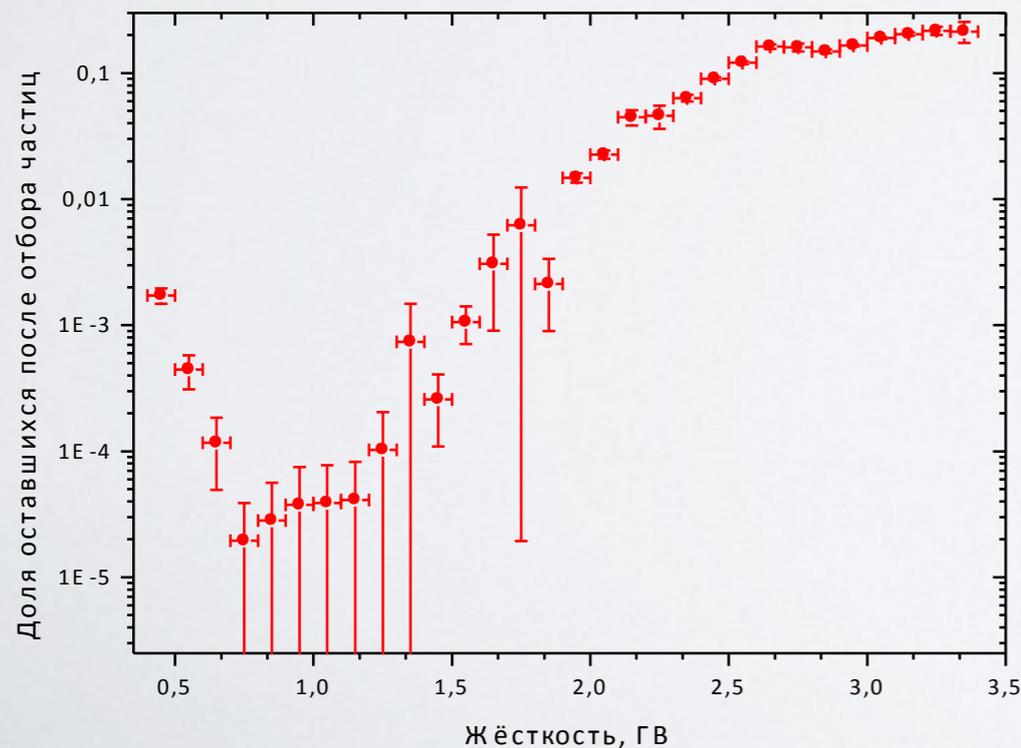


МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ

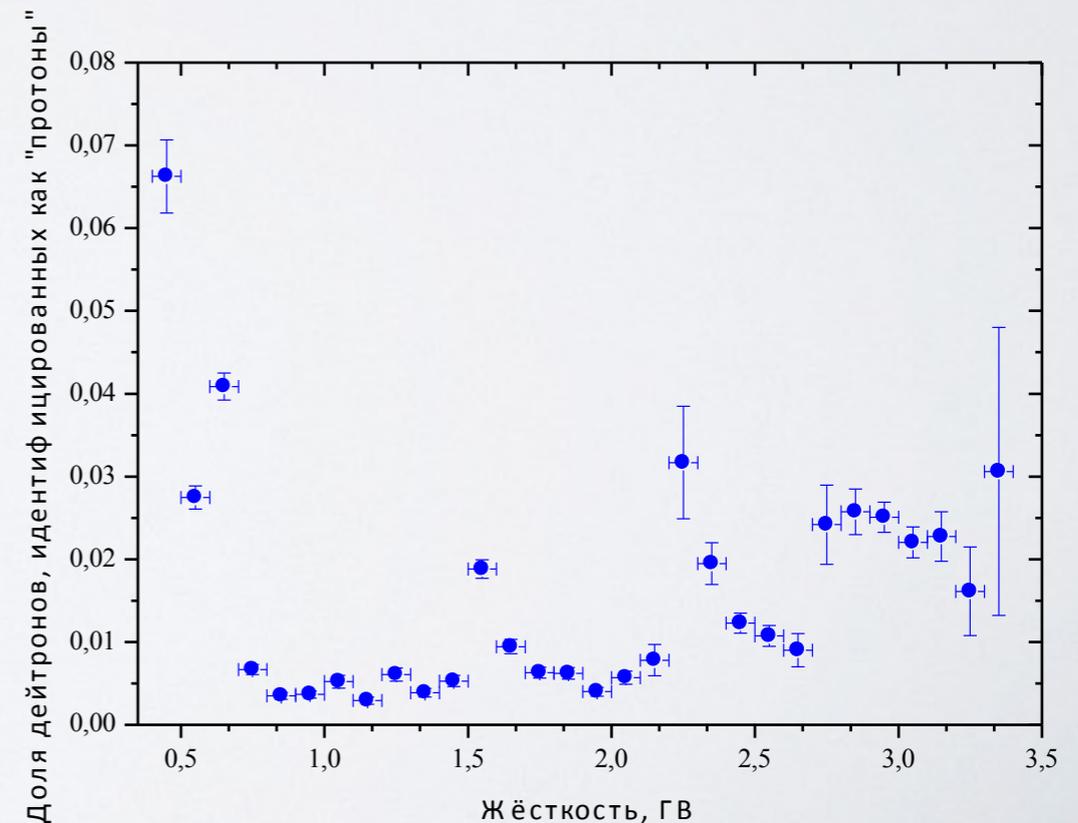
Эффективность работы методики по подавлению протонов была проверена при анализе данных моделирования методом Монте-Карло прохождения частиц через детекторную установку.

Доля протонов, остающихся в наборе данных после отработки

методики по подавлению протонного фона



Доля дейтронов, ошибочно
исключаемых методикой как «протоны»



ВОССТАНОВЛЕНИЕ СПЕКТРА

Для вычисления дифференциального энергетического спектра использовалась следующая формула:

$$\frac{dJ}{dE} = \frac{N(E, \Delta E) \times (1 + \Delta_d) \times (1 - \Delta_{He}) \times (1 - \Delta_p)}{\Delta E \times \Gamma_{eff}(E) \times \varepsilon(E) \times t_{live}}$$

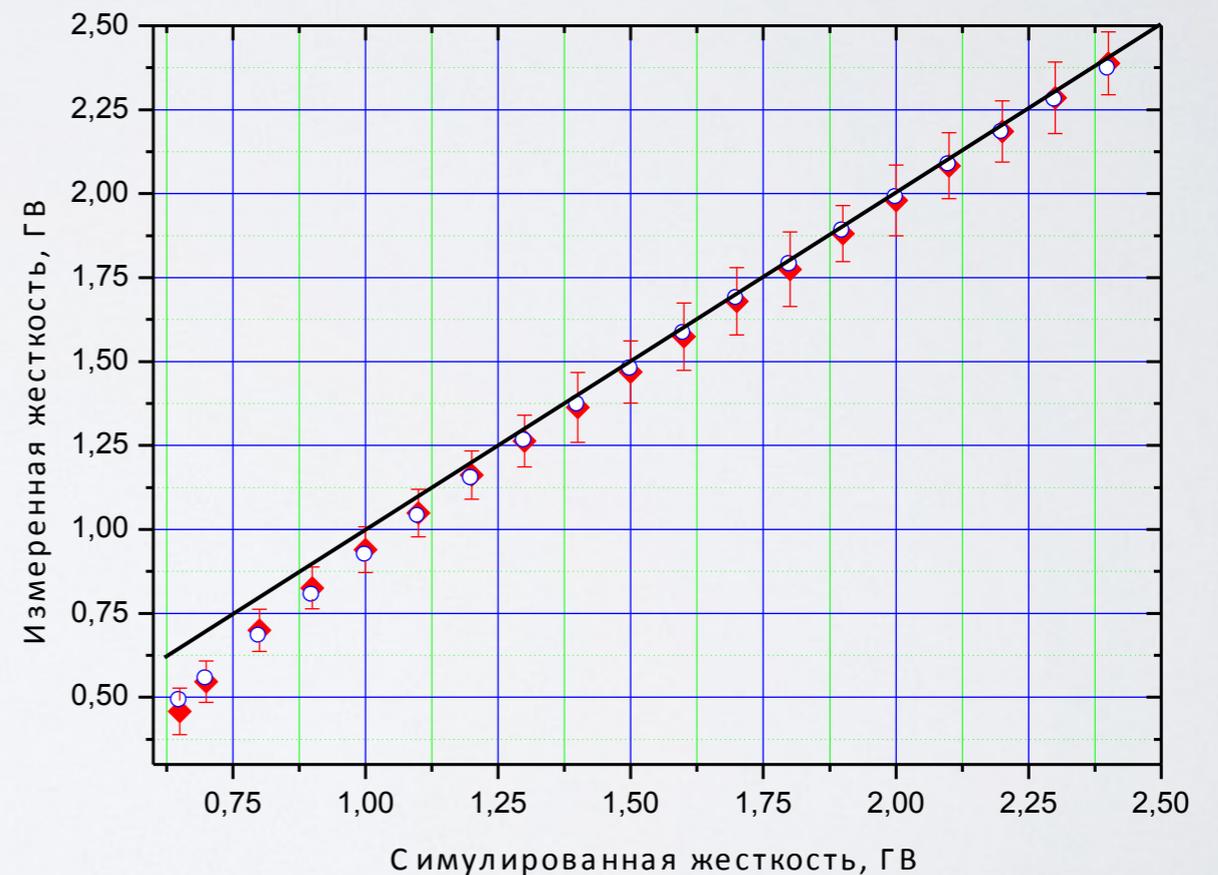
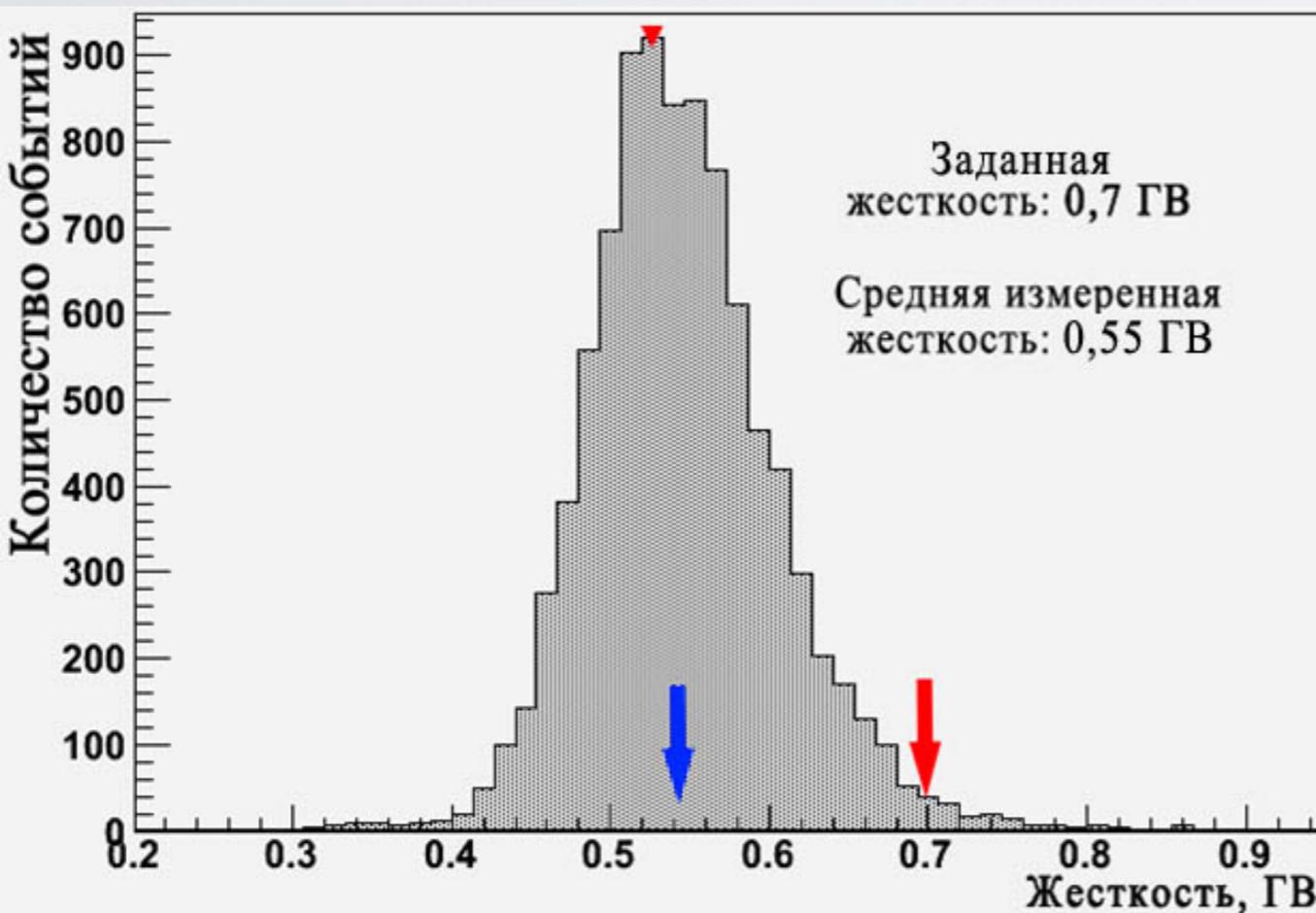
где $N(E, \Delta E)$ – число частиц энергии E , зарегистрированных в энергетическом интервале ΔE , $\Gamma_{eff}(E)$ – эффективный геометрический фактор, учитывающий уменьшение количества зарегистрированных частиц вследствие их взаимодействия в веществе детектора, Δ_d – доля дейтронов, исключенных при использовании отбора по энергетическим потерям в трекаре и ВПС, Δ_{He} – доля дейтронов, рожденных в результате взаимодействия частиц КЛ с веществом детектора, Δ_p – доля протонов, остающихся в выборке дейтронов после отбора по энергетическим потерям в трекаре и ВПС (при прямом подсчете спектра) $\varepsilon(E)$ – суммарная эффективность отбора частиц энергии E и t_{live} – «живое» время регистрации частиц в данной геомагнитной области. Суммарная эффективность отбора вычислялась по следующей формуле:

$$\varepsilon(E) = \varepsilon_{TRK}(E) \times \varepsilon_{TOF}(E) \times \varepsilon_{AC}(E)$$

где ε_{TOF} , ε_{TRK} , ε_{AC} – эффективности отбора по данным ВПС, трекара и АС, соответственно.

ЭФФЕКТ ЗАНИЖЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ИЗМЕРЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ

На основе анализа данных моделирования методом Монте-Карло исследовался эффект систематического уменьшения измеренной внутри трекера жесткости частицы по сравнению с заданной при моделировании. Уменьшение происходило вследствие энергетических потерь заряженной частицы при прохождении аппаратуры эксперимента.

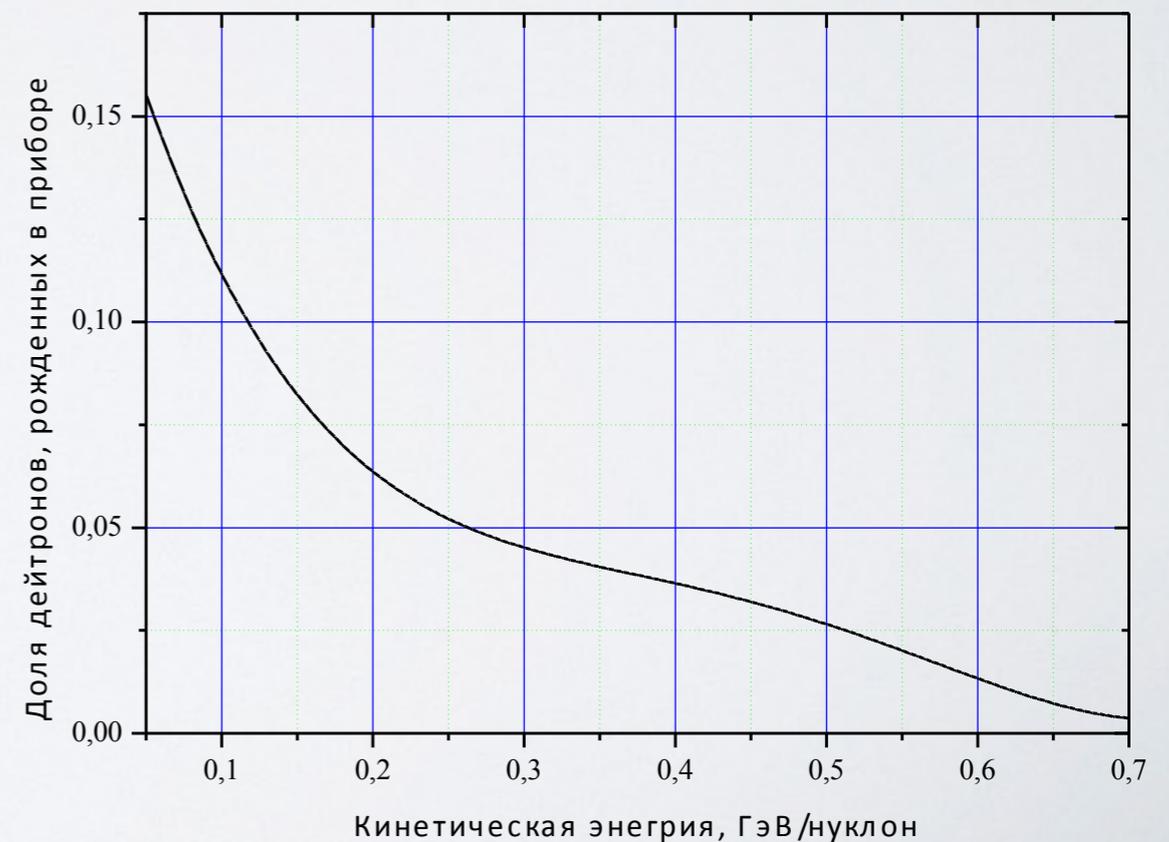
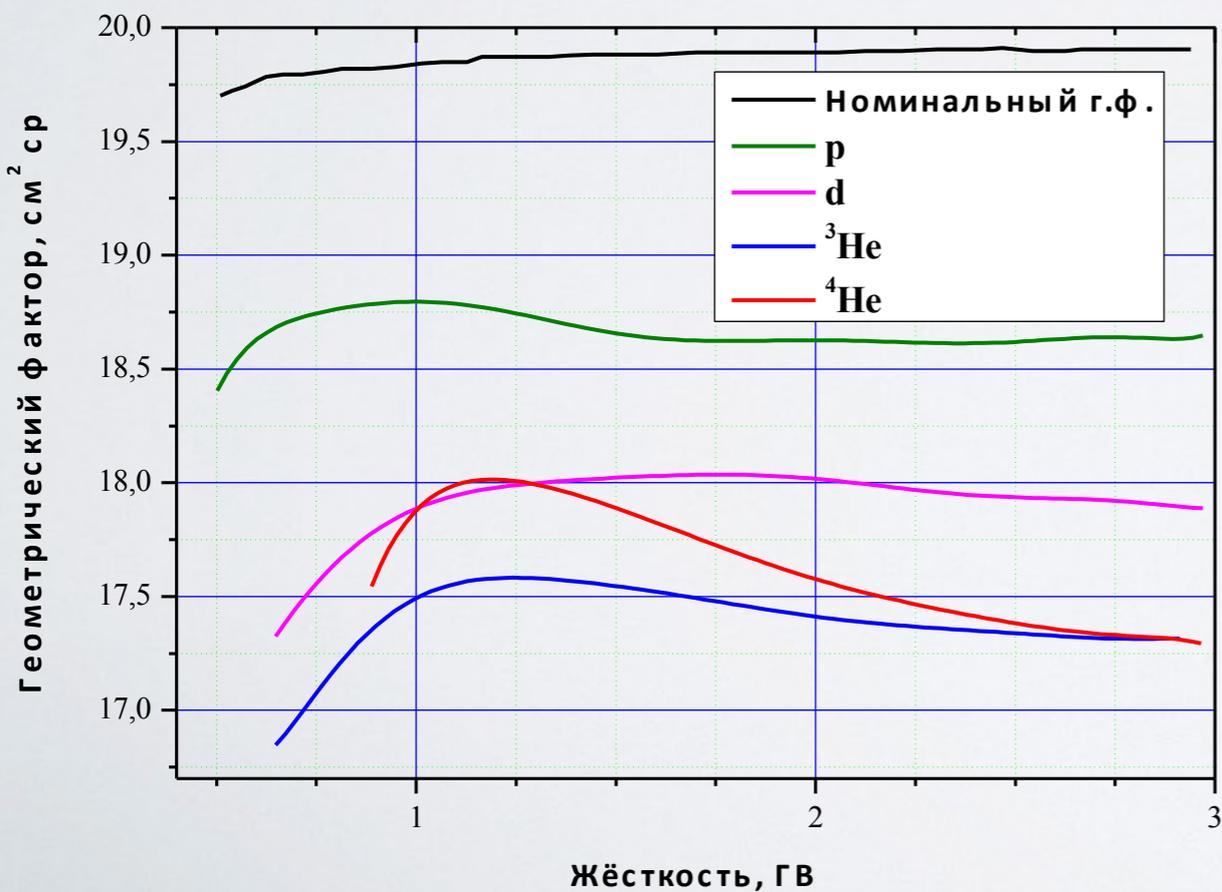


После идентификации дейтронов и оценке указанного выше эффекта было возможно однозначно восстановить кинетическую энергию по восстановленной жесткости.

ВЛИЯНИЕ ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Для оценки количества дейтронов, рожденных при взаимодействии других частиц с веществом детекторов, а также для оценки возможной убыли дейтронов из-за ядерных взаимодействий с ним же, были проанализированы данные моделирования.

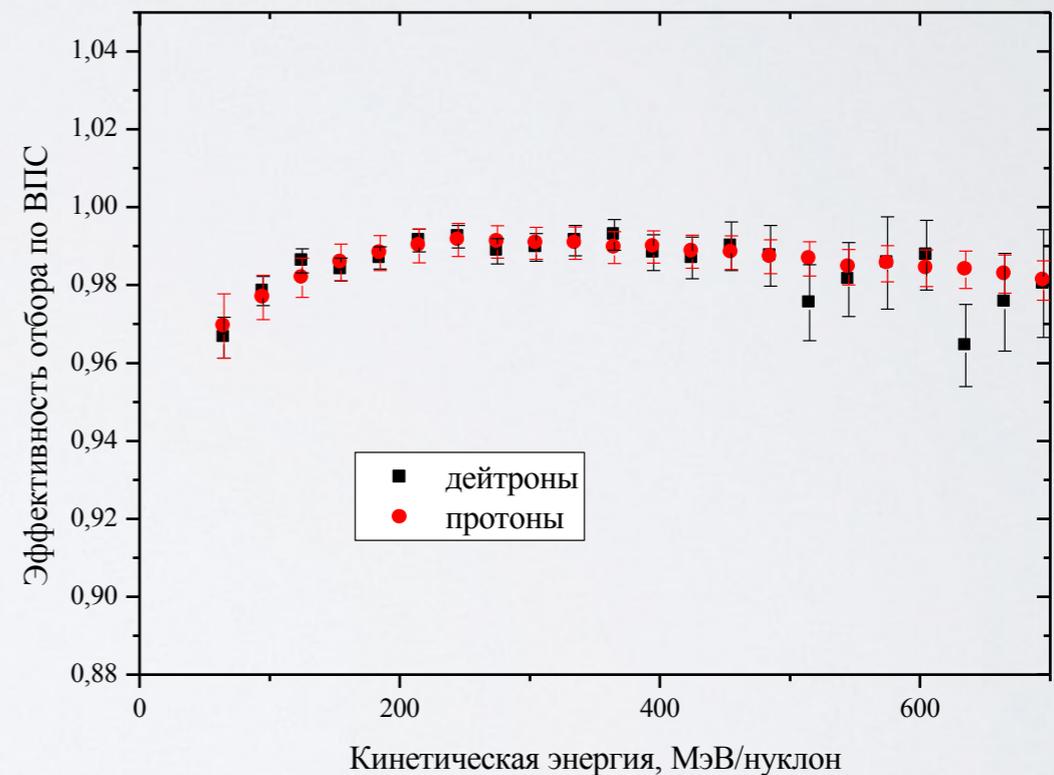
На левом рисунке приведен «эффективный» геометрический фактор, учитывающий, помимо убыли различных частиц за счет взаимодействий внутри спектрометра, также различные конструктивные элементы и электронику детекторов. На правом рисунке приведена доля рожденных в крышке спектрометра дейтронов в зависимости от их энергии.



РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ

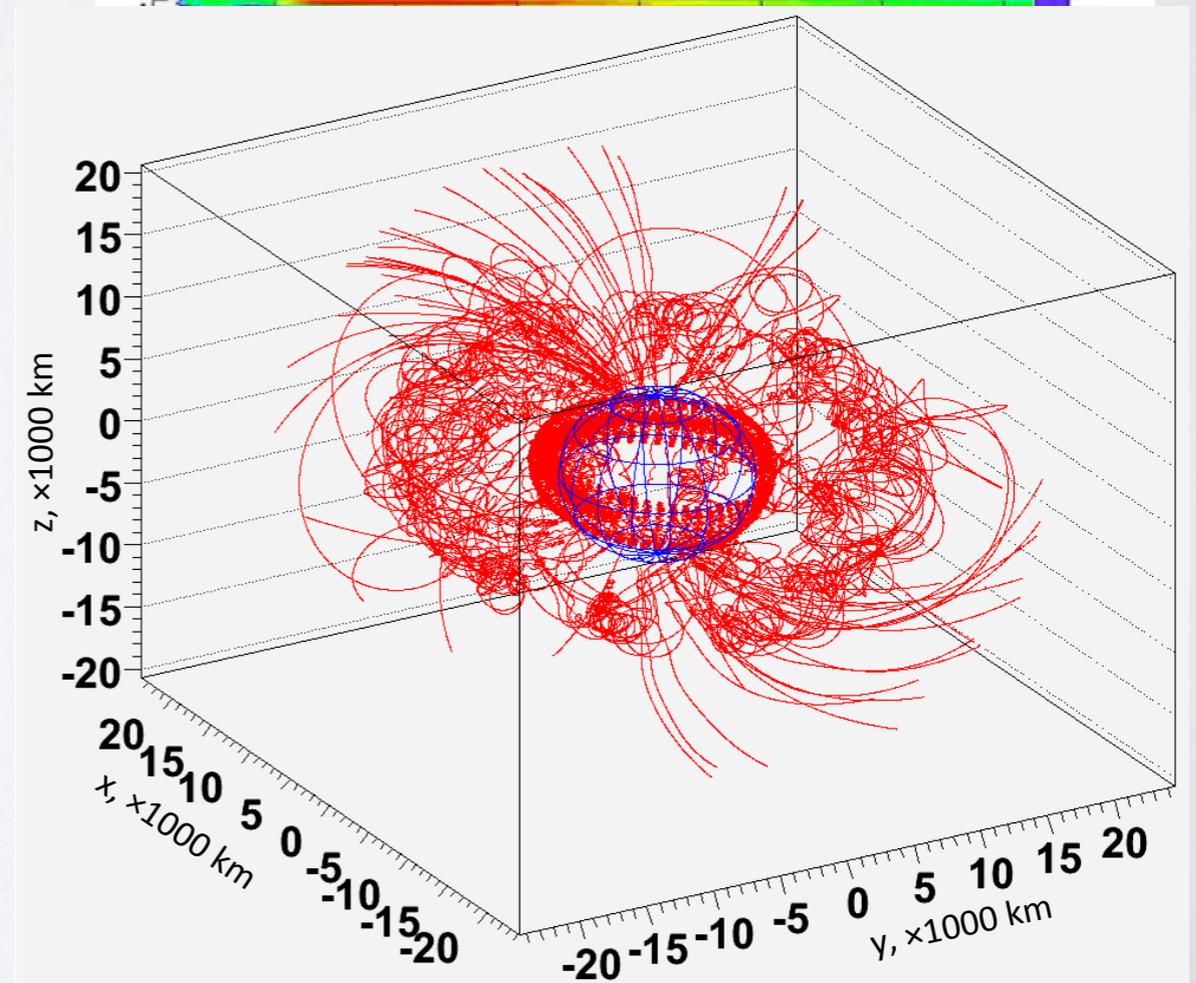
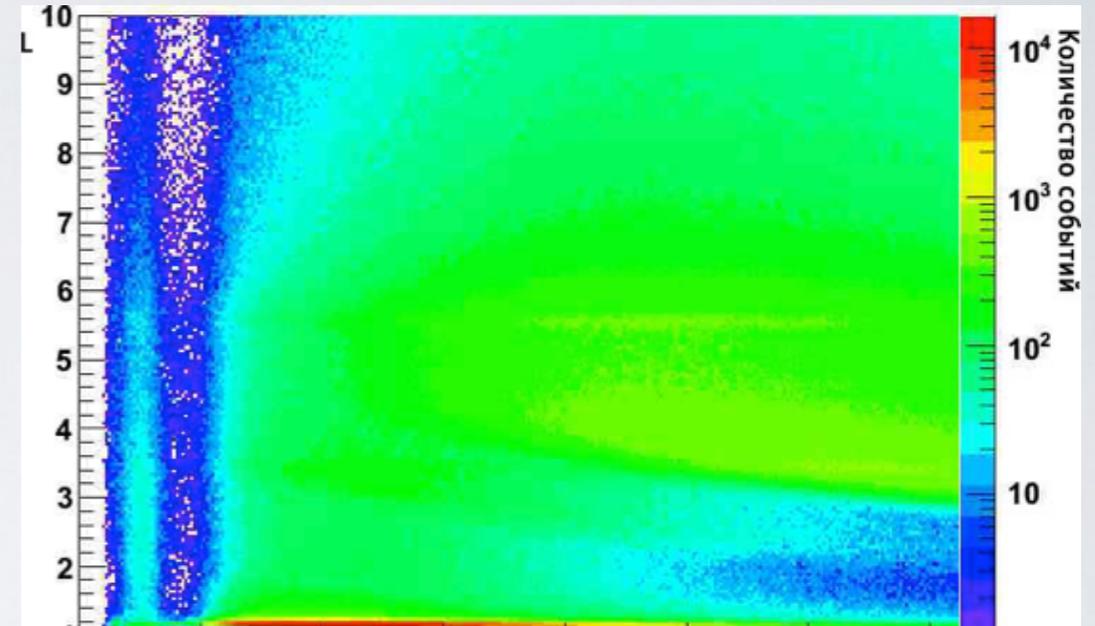
Для расчета эффективности совместно использовались полетные данные и данные моделирования методом Монте-Карло прохождения частиц через детекторную установку.

Использовался метод кросс-калибровки, когда эффективность одного детектора определяются с помощью анализа сигналов с других детекторов.

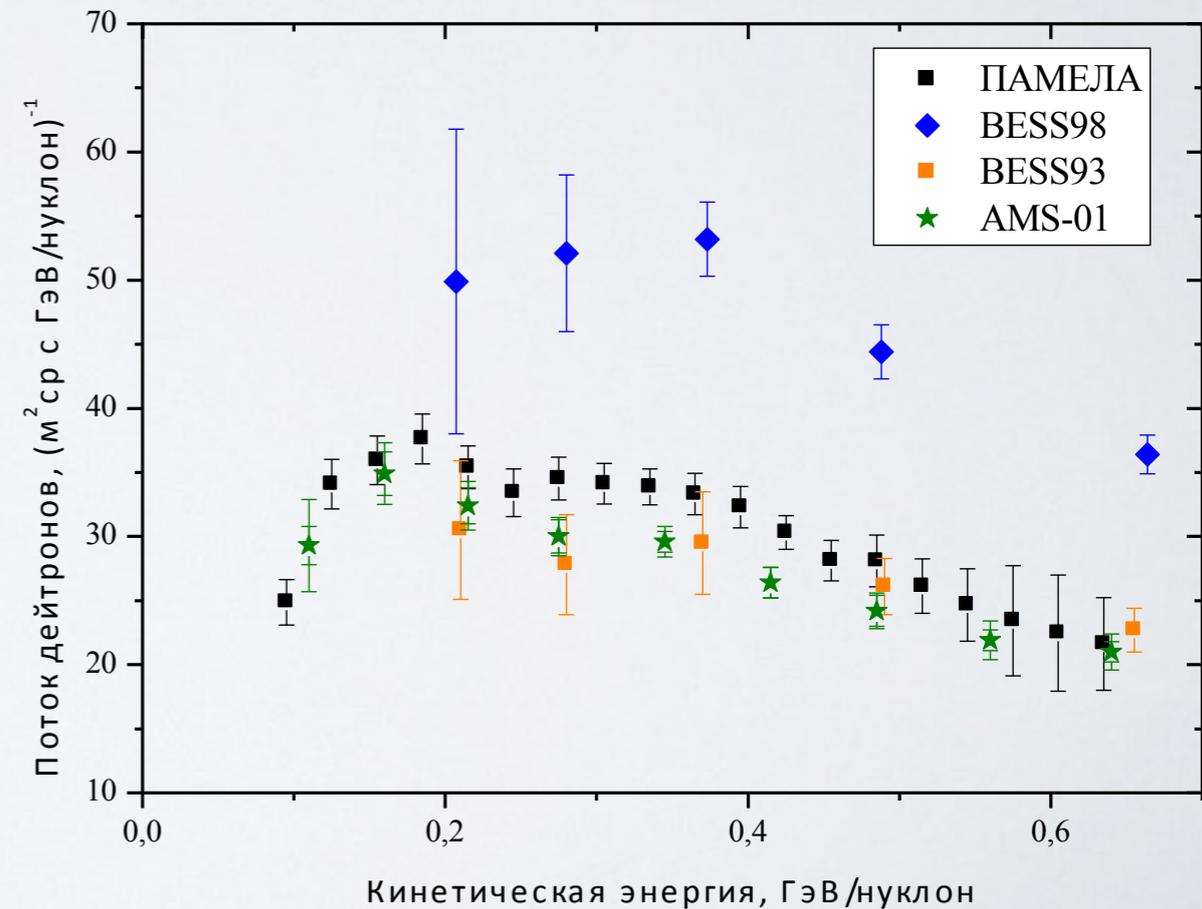
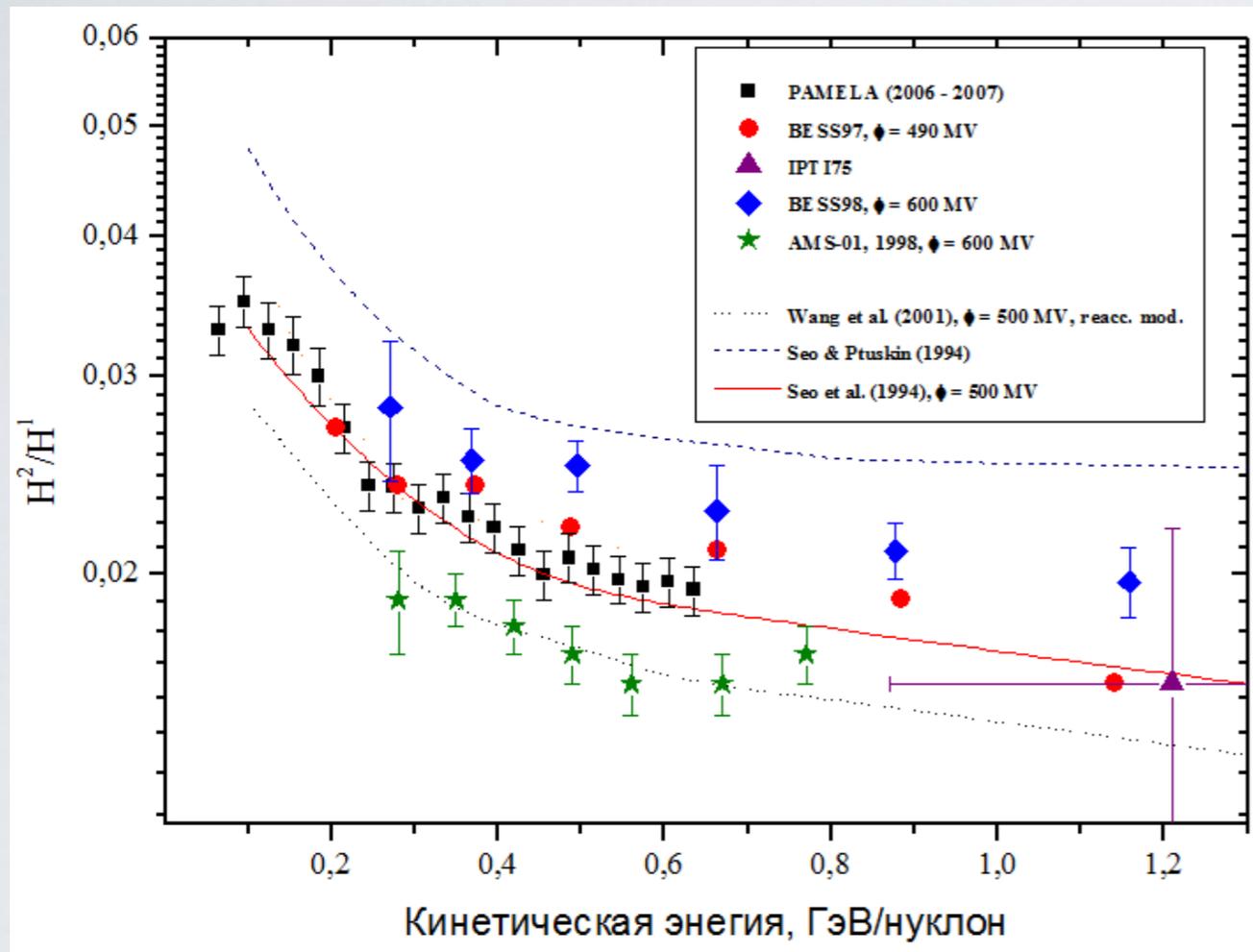


ОТБОР СОБЫТИЙ ПО ГЕОМАГНИТНЫМ КООРДИНАТАМ

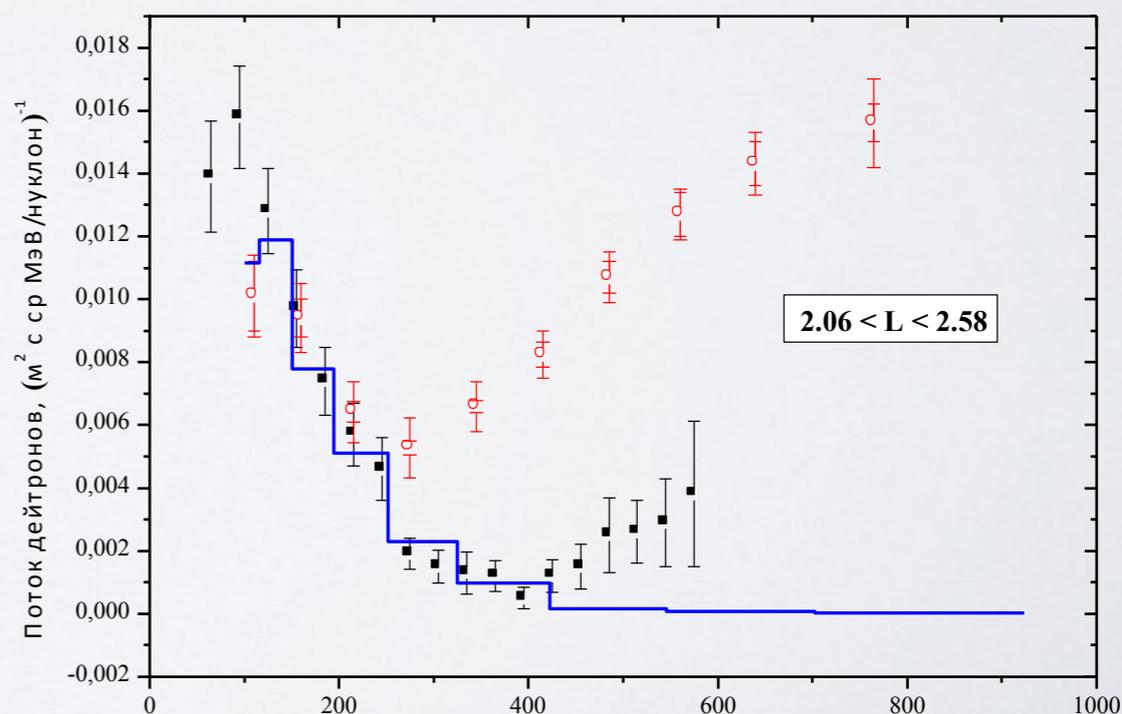
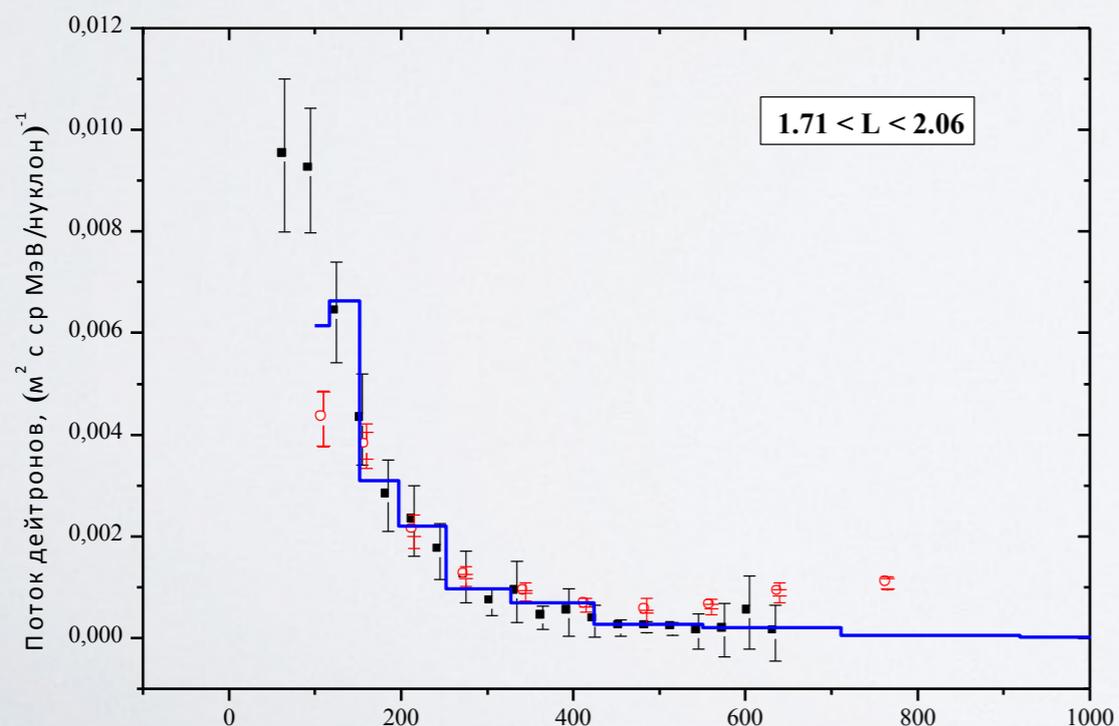
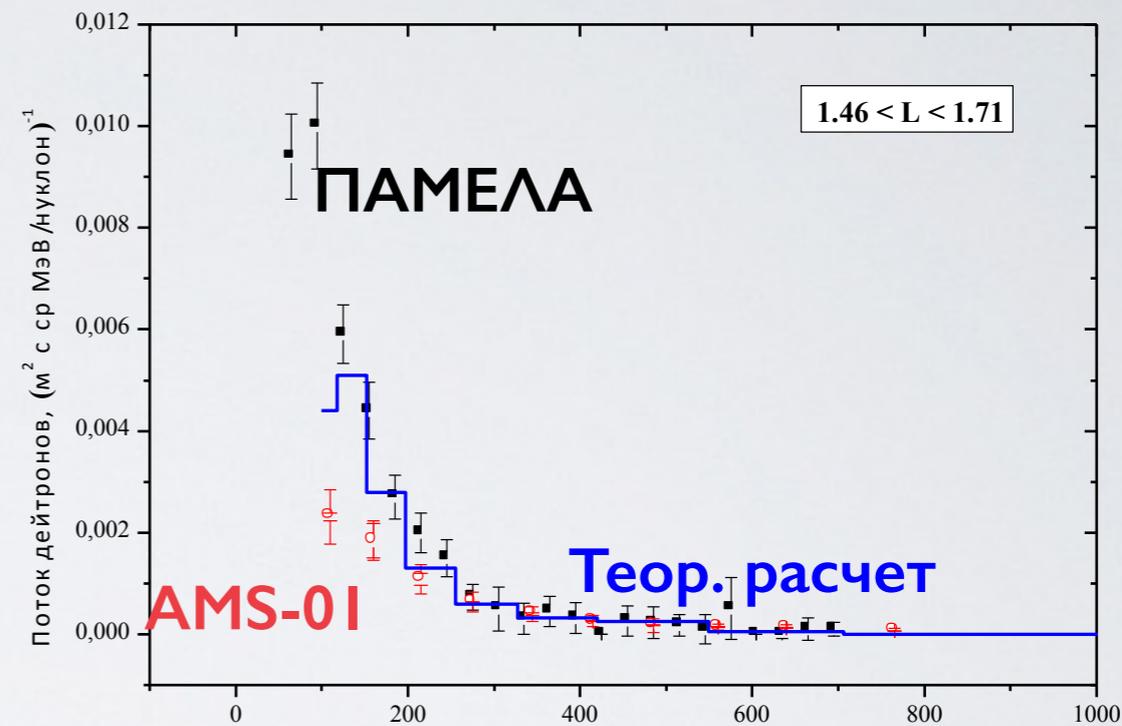
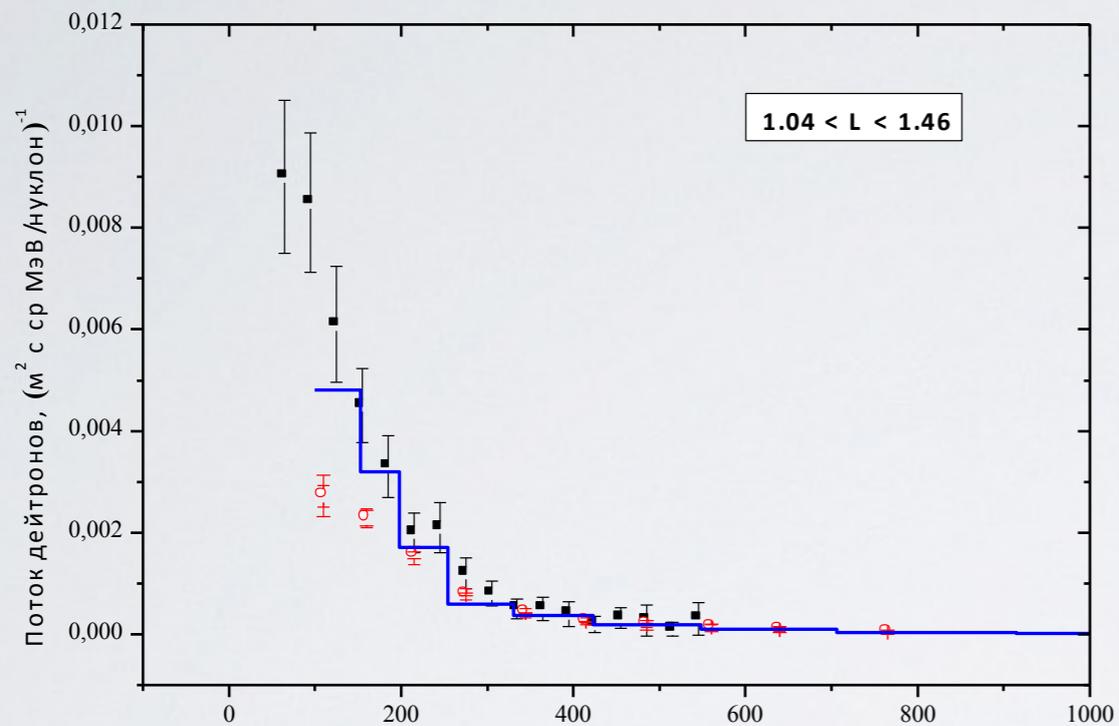
- Для отбора галактических космических лучей использовалось условие, основанное на приближении Штермера. В соответствии с ним для проникновения в геомагнитные зоны, имеющие различные значения L -координаты Мак-Илвайна частицы космических лучей должны иметь вертикальную жесткость $R_{\text{пор}} = 14.9/L^2$, при этом использовались события, для которых $L > 6$.



РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРА ДЕЙТРОНОВ ГКЛ



РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРА ДЕЙТРОНОВ ВОЗВРАТНОГО АЛЬБЕДО



РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

- Разработан новый метод идентификации дейтронов, использующий многопараметрический корреляционный анализ с детекторных систем эксперимента ПАМЕЛА
- Получены новые, наиболее точные к настоящему моменту времени, результаты измерения спектра дейтронов в интервале энергией 70 - 650 МэВ/нуклон в ГКЛ и возвратном альбеде Земли.

ПУБЛИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основные результаты диссертационной работы изложены в **8 печатных работах** в периодических научных изданиях, в том числе в **7 изданиях**, включенных **ВАК РФ** в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и в **6 статьях**, опубликованных в журналах, индексируемых в **Web of Science и Scopus**:

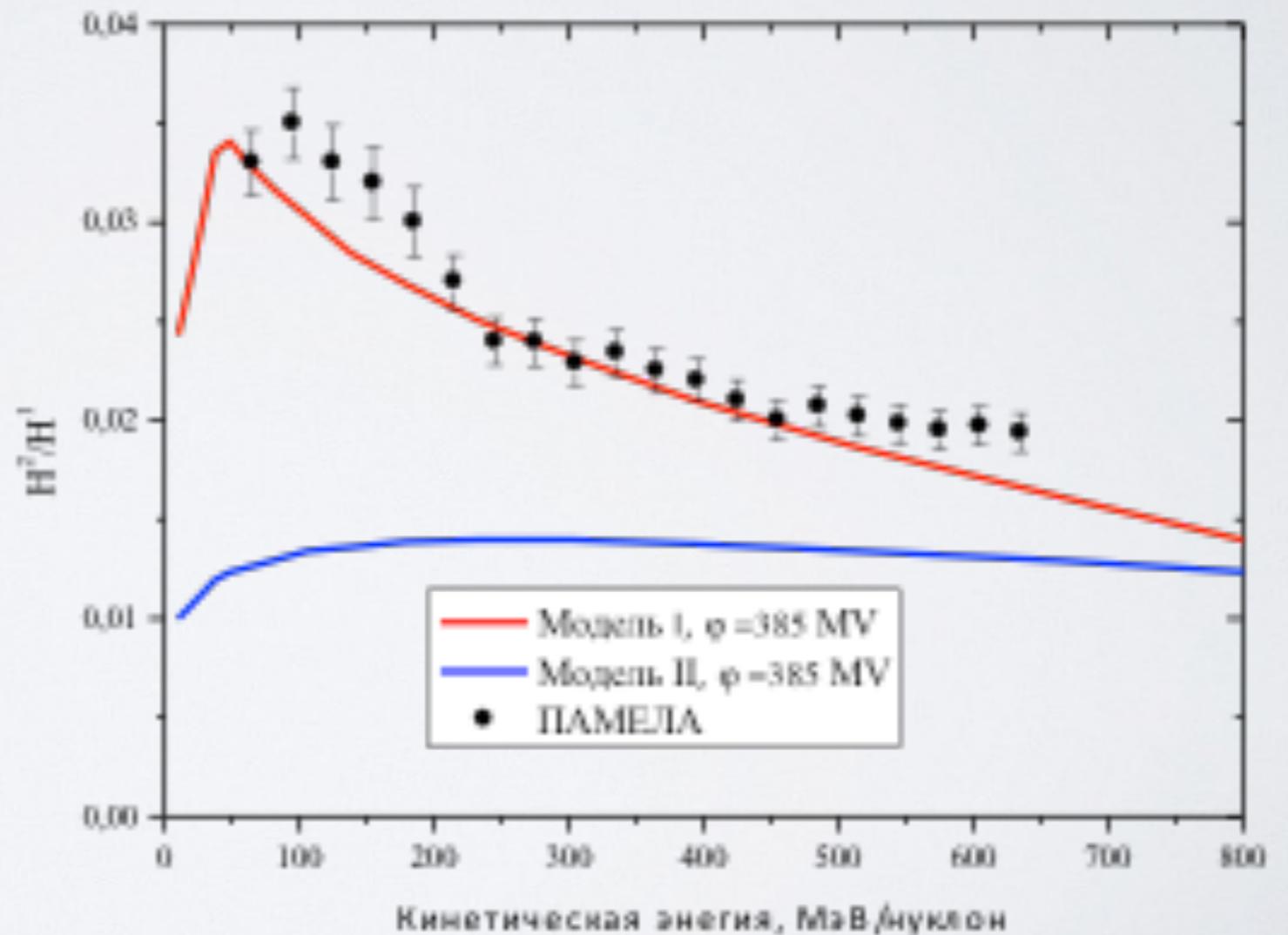
1. Воронов С. А., Данильченко И. А., Колдобский С. А., Малахов В. В. Методика выделения дейтронов в эксперименте ПАМЕЛА // Труды научной сессии НИЯУ МИФИ-2010, 2010, Том IV, с. 117-120.
2. Воронов С.А., Данильченко И.А., Колдобский С.А. Методика идентификации дейтронов в космическом эксперименте ПАМЕЛА // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 6. С. 8-11.
3. Воронов С.А., Данильченко И.А., Колдобский С.А. Методика измерения спектра дейтронов в эксперименте ПАМЕЛА // Ядерная физика и инжиниринг. 2012. Т. 3. № 4. С. 328.
4. Koldobskiy S. A., Adriani O., Barbarino G. C. et al. Galactic deuteron spectrum measured in PAMELA experiment // Journal of Physics: Conference Series. 2013. V. 409. № 1. p. 012040.
5. Колдобский С.А., Формато В., Адриани О. и др. Измерение галактического дейтронного спектра в эксперименте ПАМЕЛА // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2013. Т. 77. № 5. С. 674.
6. Adriani O., Bongi M., ..., Koldobskiy S. et al. Measurement of the isotopic composition of hydrogen and helium nuclei in cosmic rays with the PAMELA experiment // The Astrophysical Journal. 2013. V. 770. № 1. p. 2.
7. Adriani O., Bongi M., ..., Koldobskiy S. et al. Measurement of hydrogen and helium isotopes flux in galactic cosmic rays with the PAMELA experiment // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2014. V. 742. p. 273-275.
8. Колдобский С.А., Адриани О., Базилевская Г.А. и др. Измерения потоков дейтронов альbedo в спутниковом эксперименте ПАМЕЛА // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2015. Т. 79. № 3. С. 327.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

GALPROP

Была проведена попытка интерпретации полученных экспериментальных результатов с помощью программного пакета GALPROP, при этом использовались две наиболее распространенные модели - простая диффузионная модель (I) и конвекционная модель с доускорением (II),

Параметры были отсортированы и настроены на совпадение с результатами эксперимента АСЕ по изотопическому составу космических лучей



НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ

разработан новый метод разделения изотопов водорода на интенсивном фоне других частиц, совместно использующий данные времяпролетной системы, магнитного спектрометра и калориметра. При этом используется корреляционный многопараметрический анализ, позволяющий с высокой точностью определить изотопный состав и энергетический спектр изотопов водорода КЛ;

с рекордной точностью **измерен дифференциальный энергетический спектр дейтронов и отношение потоков дейтронов и протонов в диапазоне кинетических энергий от 70 до 650 МэВ/нуклон в ГКЛ и возвратном альbedo Земли.**

В указанном диапазоне энергий полученные результаты являются наиболее точными на сегодняшний день. Кроме того, результаты проведенных ранее экспериментов были получены лишь в части изученного в настоящей работе диапазона энергий.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ

Результаты измерений могут быть использованы при оценке радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве и для совершенствования моделей генерации и распространения КЛ.

Разработанный метод идентификации дейтронов может быть использован в других экспериментах, где необходимо эффективное выделение полезных событий при наличии превосходящего на порядки фона.

ХАРАКТЕРИСТИКИ АППАРАТУРЫ

Сборка микроstriповых детекторов, иначе называемая трекером [83], состоит из шести слоёв (каждый толщиной 300 мкм) тонких двухсторонних микроstriповых кремниевых детекторов, которые используются для измерения координат траектории пролетающих через аппаратуру частиц. При этом точность измерений составляет (3.0 ± 0.1) мкм для плоскости, в которой происходит отклонение частицы, и (11.5 ± 0.6) мкм для плоскости, в которой отклонение не происходит. Размер сборки детекторов составляет $(13.1 \times 16.1 \times 44.5)$ см³.

. Времяпролетная система имеет временное разрешение ~ 250 пс для однозарядных частиц [87]. Каждая полоса детекторов времяпролетной системы позволяет производить измерения ионизационных потерь энергии, что может использоваться для измерения величины заряда частицы вплоть до $Z = 8$