

ИЗУЧЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СОБЫТИЙ С ПОМОЩЬЮ МОНТЕ-КАРЛО МОДЕЛИ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА DANSS

Студент М24-114:

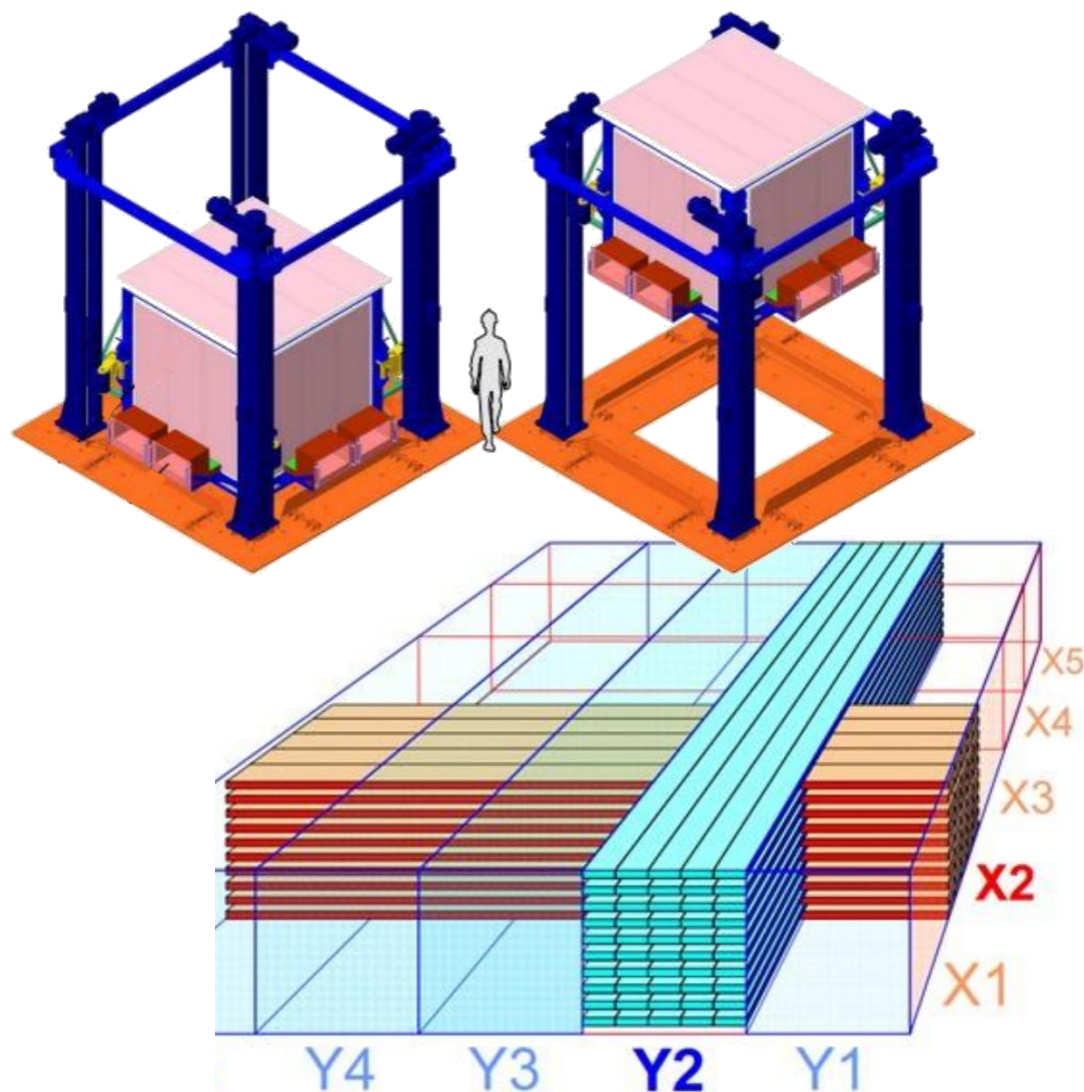
Е. М. Юско

Научный руководитель:

к.ф.-м.н.

И. Г. Алексеев

Детектор DANSS

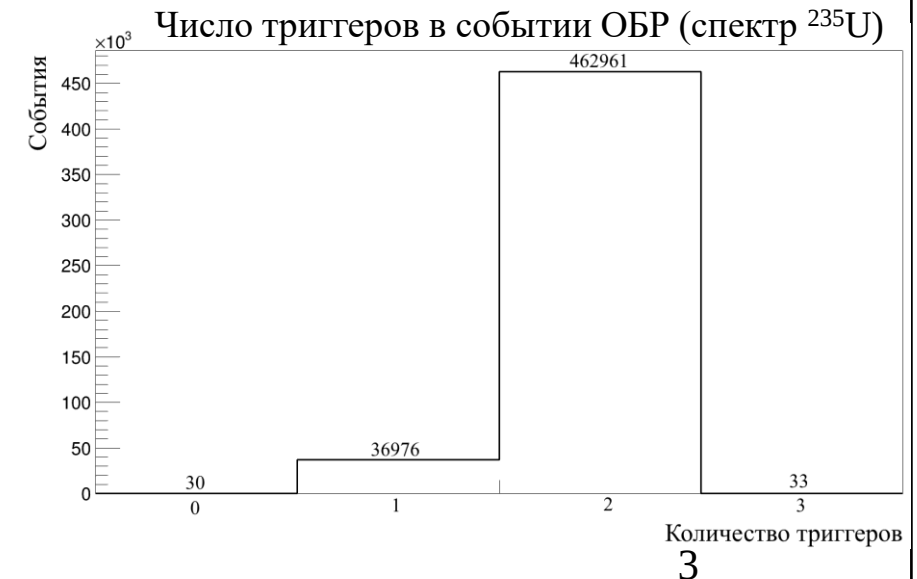
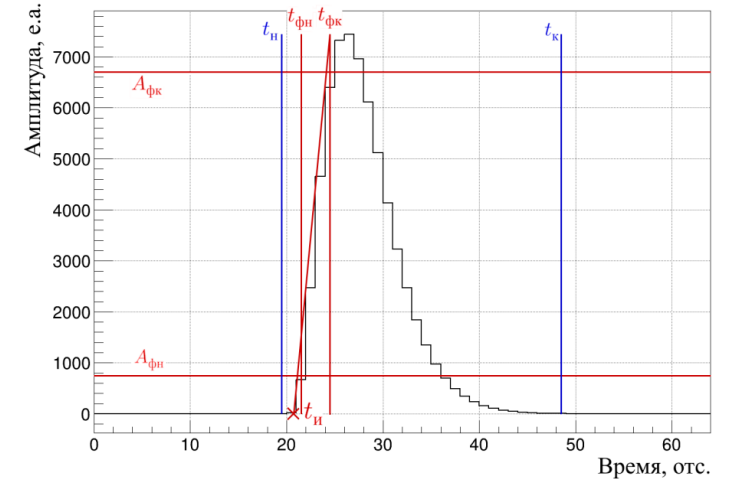


- Detector of **AntiNeutrino** based on **Solid Scintillator**.
- Реакторный нейтринный эксперимент.
- Находится на Калининской АЭС.
- Подвижная платформа: расстояние до реактора: $10,9 \div 12,9$ м.
- После модернизации:
 - объём: $1,2 \times 1,2 \times 1,2$ м³;
 - сцинтилляционные счётчики $2 \times 5 \times 120$ см³: 58 слоёв по 24 параллельных счётчика;
 - счётчики в соседних слоях перпендикулярны;
 - кремниевые фотоумножители с обеих сторон каждого счётчика.

Создание и анализ модели сигнала

1. Результаты МК-моделирования → бинарный файл с моделью сигнала.
2. Выделение в сигнале импульсов и их анализ, определение:
 - амплитуды;
 - интеграла;
 - времени (по пересечению фронта с нулём).
3. Объединение импульсов на двух концах одного счётчика в пары — *хиты*.
 - Импульсы без пары из анализа исключаются.
4. Объединение хитов, попадающих во временное окно в 300 нс, в *триггеры*.
 - В идеальном случае каждому событию ОБР соответствует два триггера: позитронный и нейтронный.

Определение параметров импульса

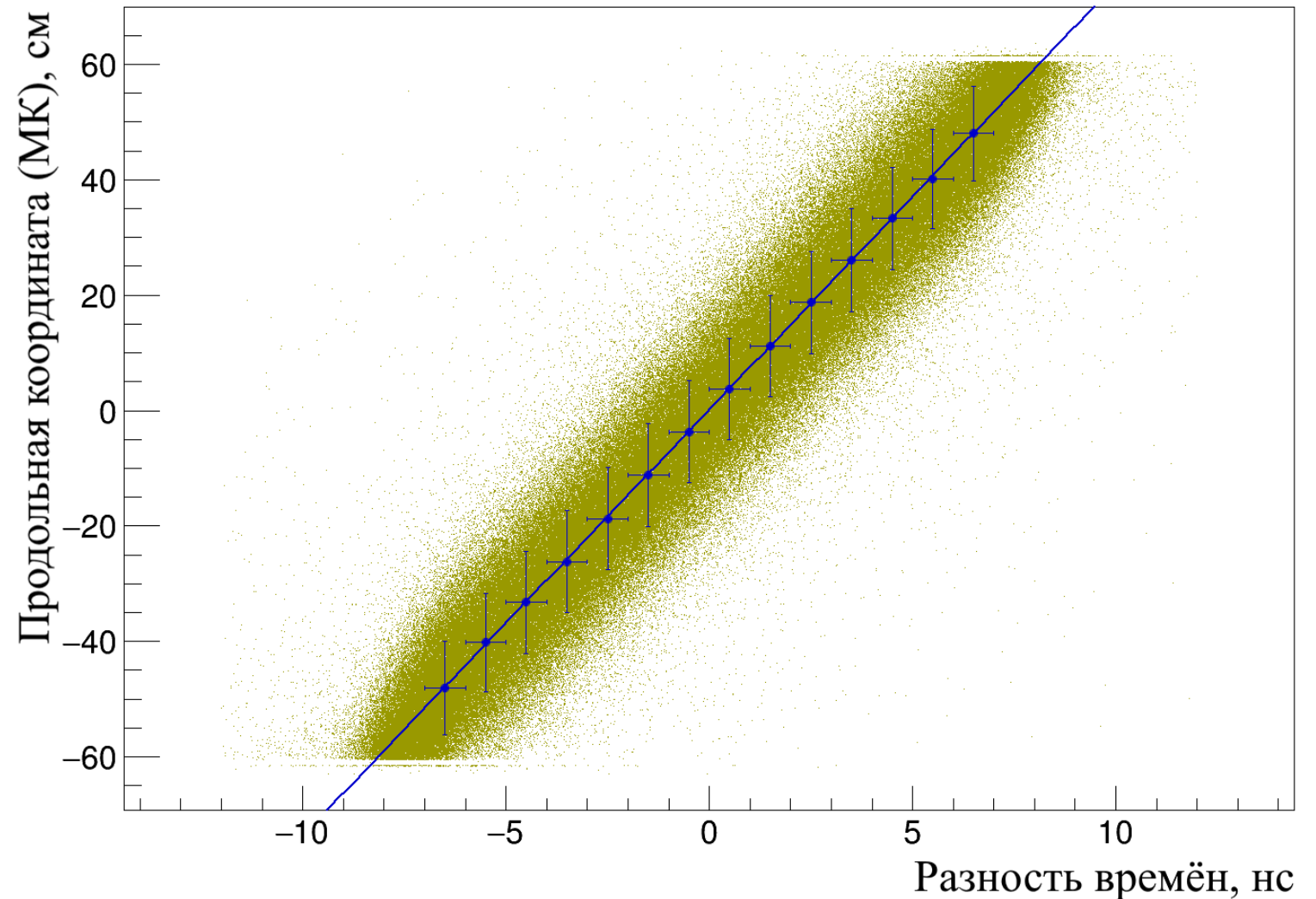


Восстановление координаты

Продольная
координата хита
определяется как

$$l = k \Delta t$$

- $k = 7,5 \frac{\text{см}}{\text{нс}}$,
- Δt — разность
между временами
регистрации
импульсов на двух
концах счётчика.



Восстановление энергии

$$E = \frac{I}{I_1 k_{\text{затух}}(l) Y (1 + \alpha)}$$

- I — интеграл импульса;
- I_1 — интеграл импульса от одного пикселя КФУ;
- $k_{\text{затух}}$ — коэффициент затухания в спектросмещающем волокне;
- $Y = 200 \text{ МэВ}^{-1}$ — число фотоэлектронов при регистрации частицы единичной энергии;
- $\alpha = 3\%$ — кросс-ток.

Первичный отбор событий

В дальнейшем анализе участвуют только такие события, в которых:

- ровно два триггера;
- суммарная энергия 2-го триггера превышает 1 МэВ;
- счётчик с наибольшей энергией в 1-м триггере не является крайним сбоку и не лежит в двух верхних и двух нижних слоях.

Позитронный кластер

Вклад в позитронный триггер даёт не только позитрон, но и до двух аннигиляционных гамма-квантов.

Позитронный кластер — хиты, относящиеся непосредственно к позитрону.

В кластер включается хит с максимальной энергией (*первичный хит*) и ближайшие к нему хиты.

- Энергия хита — не менее 0,1 МэВ (кроме первичного).
- Расстояние между соседними хитами не более 30 см.
- Не допускаются несработавшие счётчики между хитами кластера.

Топологии кластеров

- Обозначение топологии — последовательность цифр.
- Каждая цифра соответствует одному слою и означает количество хитов в нём.
- Звёздочка — слой, содержащий первичный хит.



1*



2*



3*



11*



12*



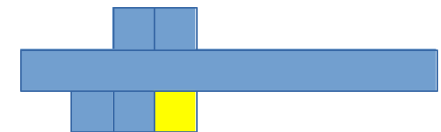
11*1



12*1

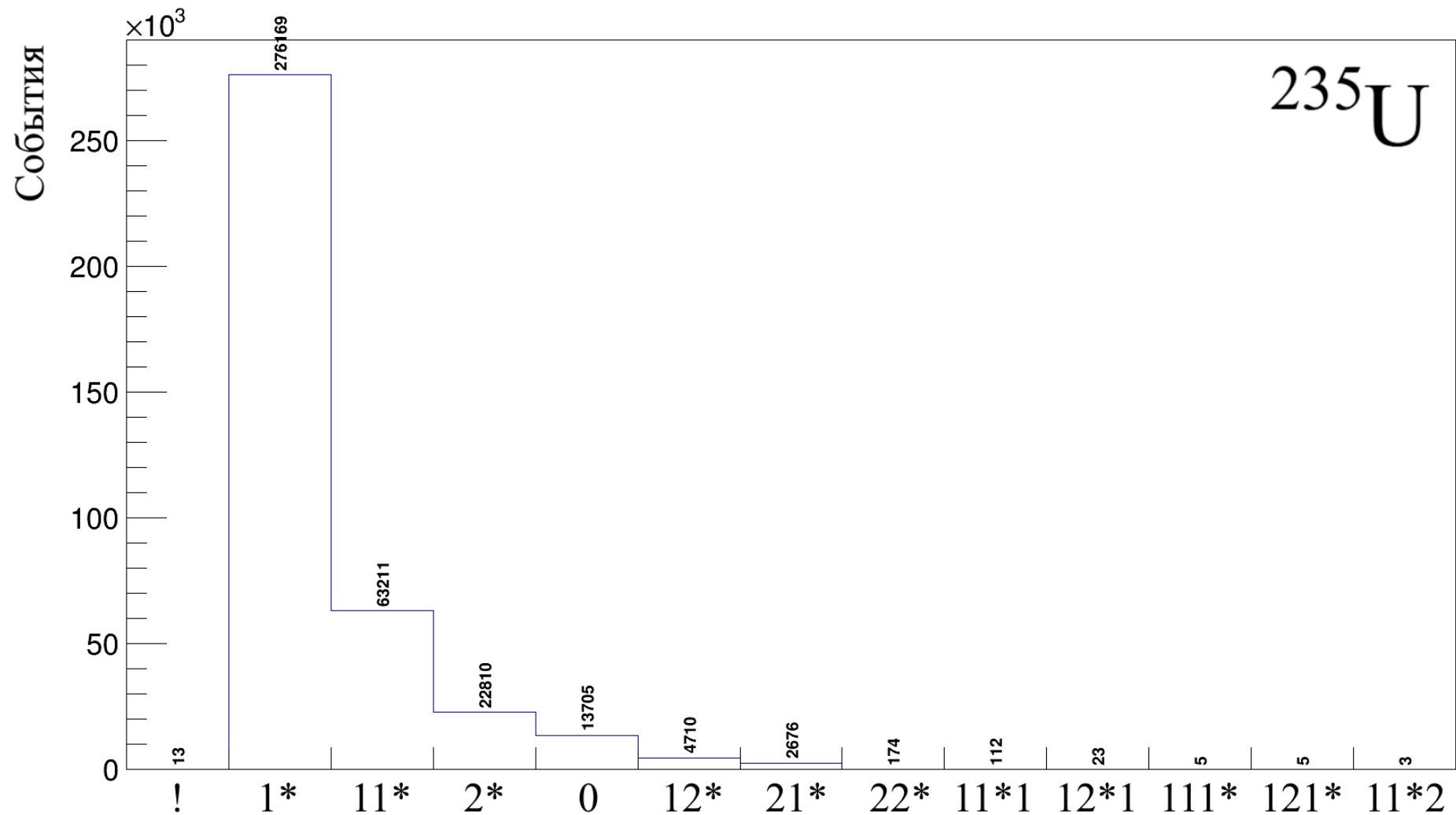


111*



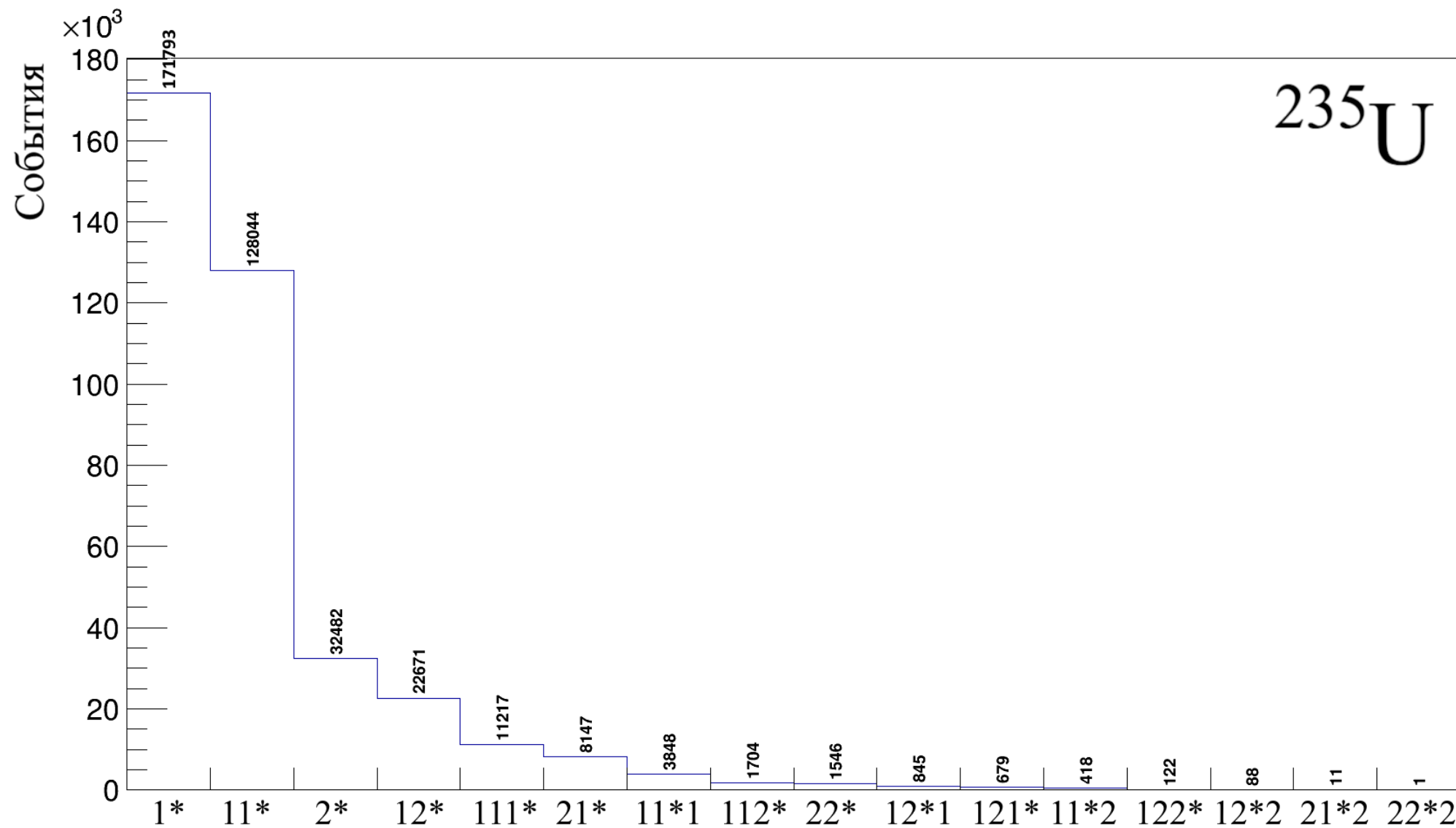
213*

Истинные топологии (из МК)

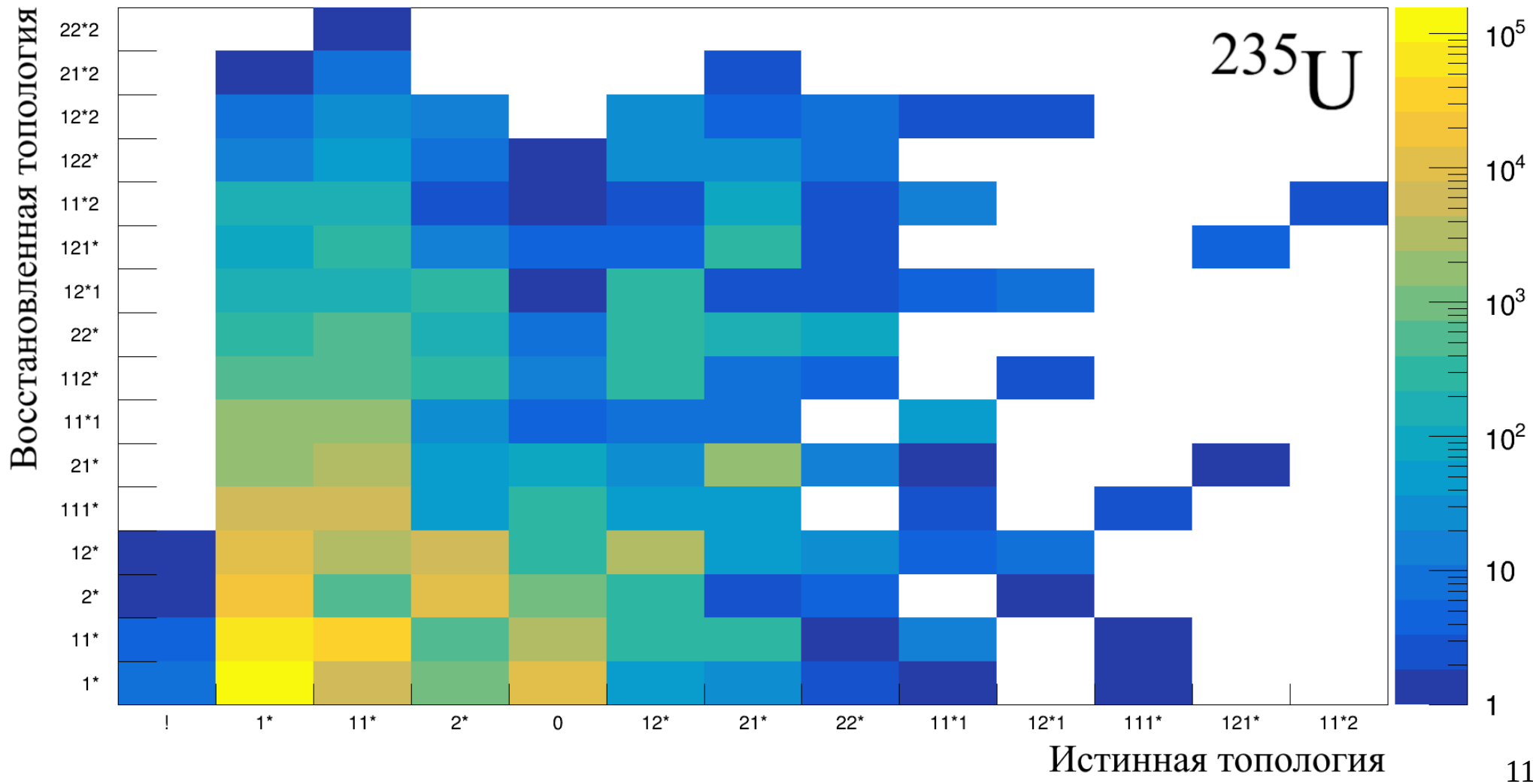


! — обозначение «некорректной» топологии: позитрон родился вблизи края, вылетел из чувствительного объёма, а затем вернулся в другом слое

Восстановленные топологии



Сравнение истинных и восстановленных топологий



Гамма-хиты

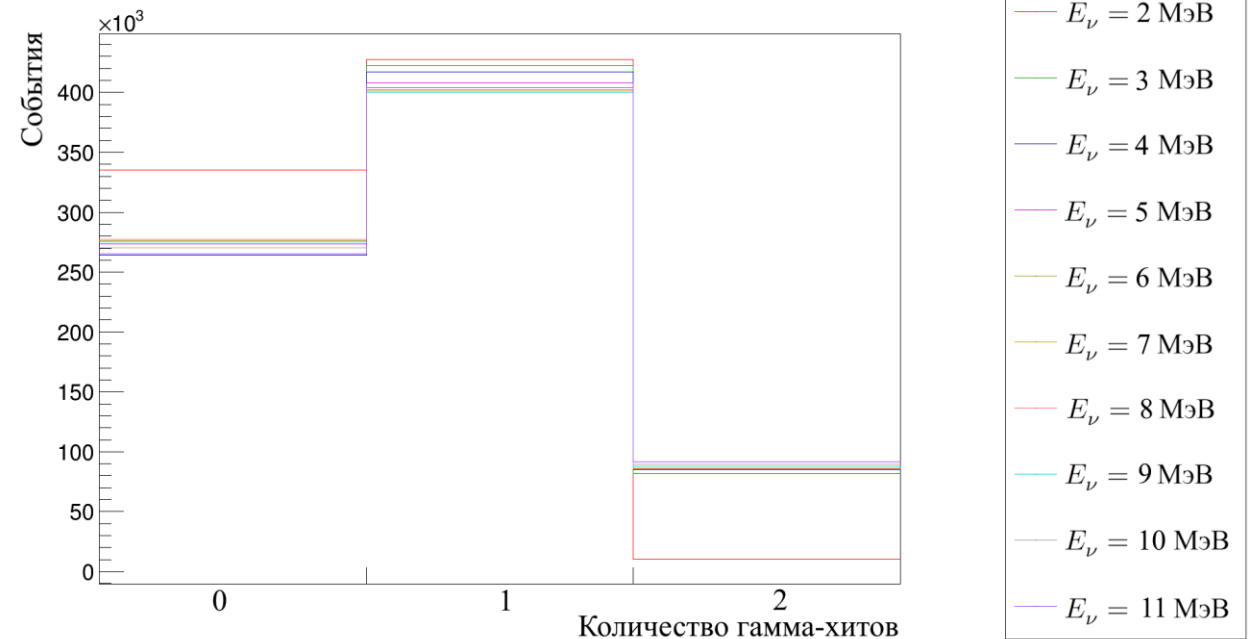
Среди хитов, не вошедших в кластер, выполняется поиск таких, которые с высокой вероятностью могли быть вызваны гамма-квантами.

- Энергия от 0,15 МэВ до 0,4 МэВ.
- Если хитов два — косинус угла разлёта не более $-0,25$.

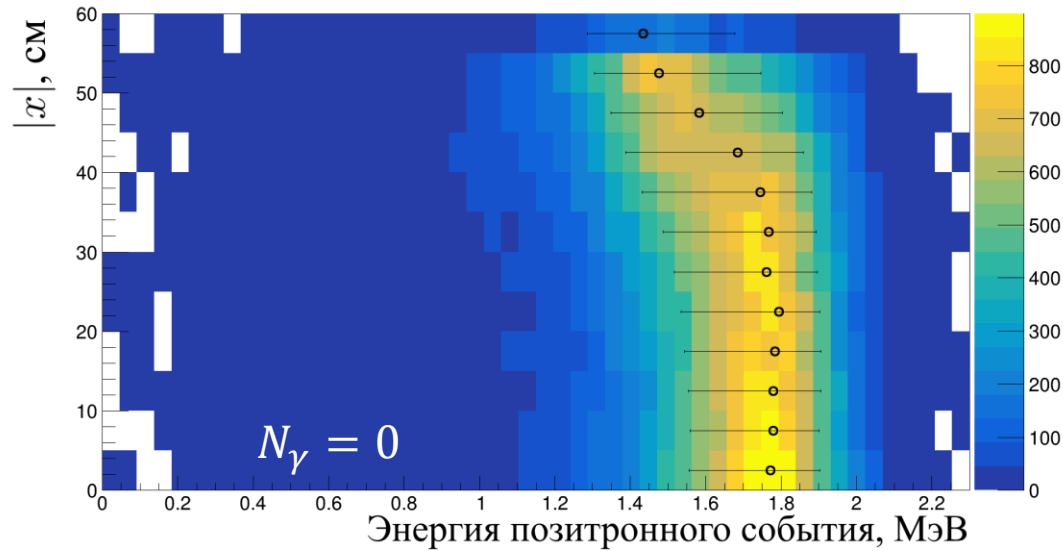
События разделяются на три категории:

- $N_\gamma = 0$;
- $N_\gamma = 1$;
- $N_\gamma = 2$.

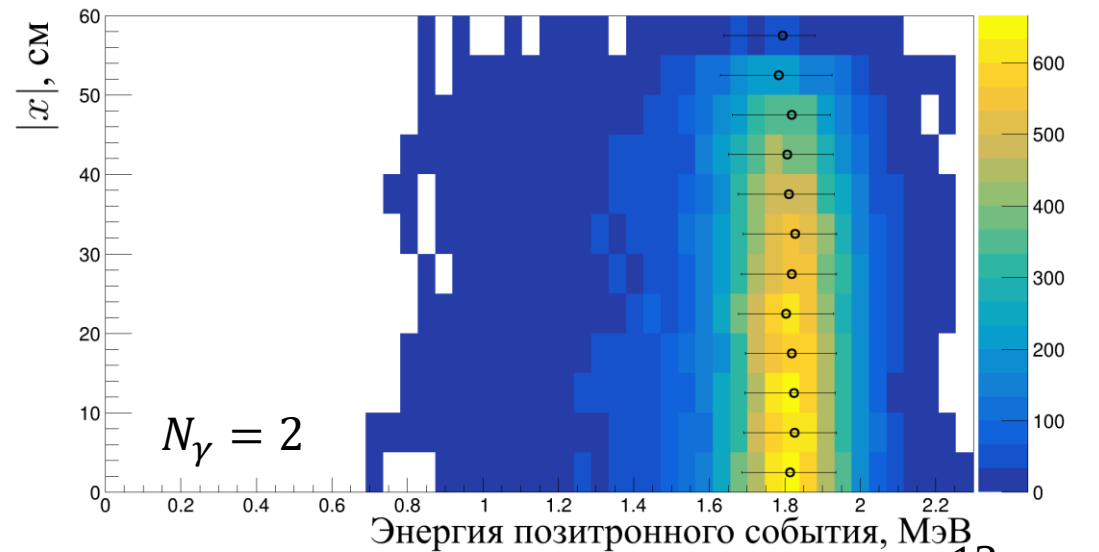
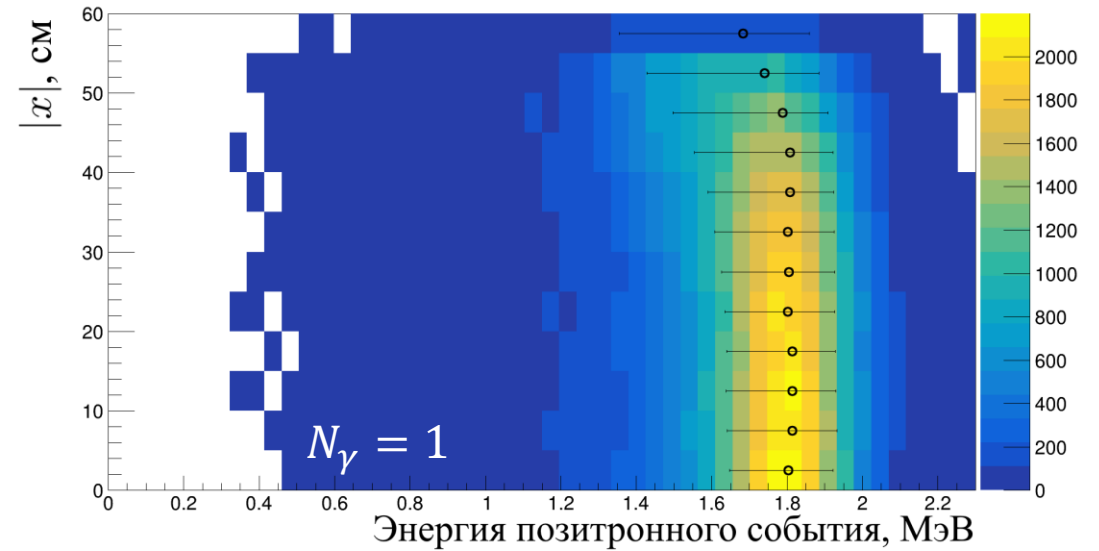
В случае $N_\gamma = 2$ вне кластера обнаружено два гамма-кванта. Значит, можно ожидать, что ни один из них не дал вклада в энергию кластера и не покинул детектор.



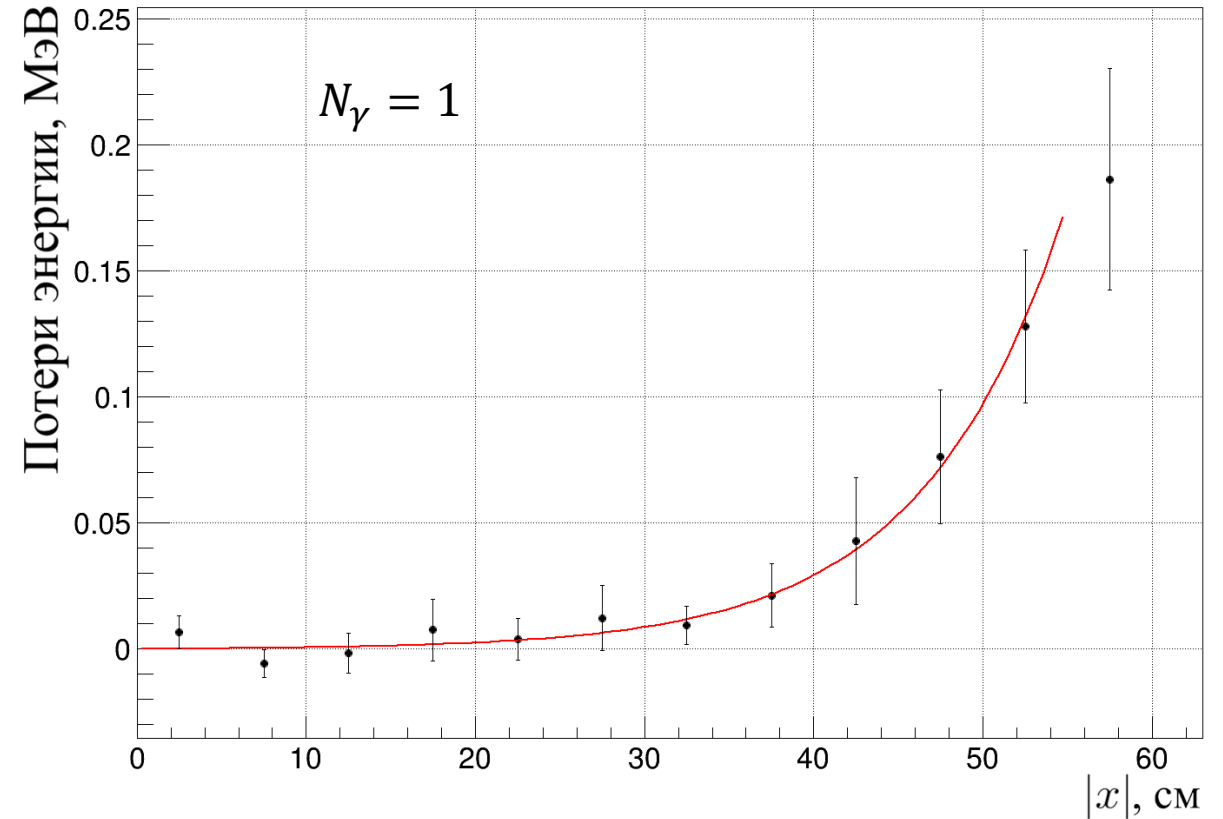
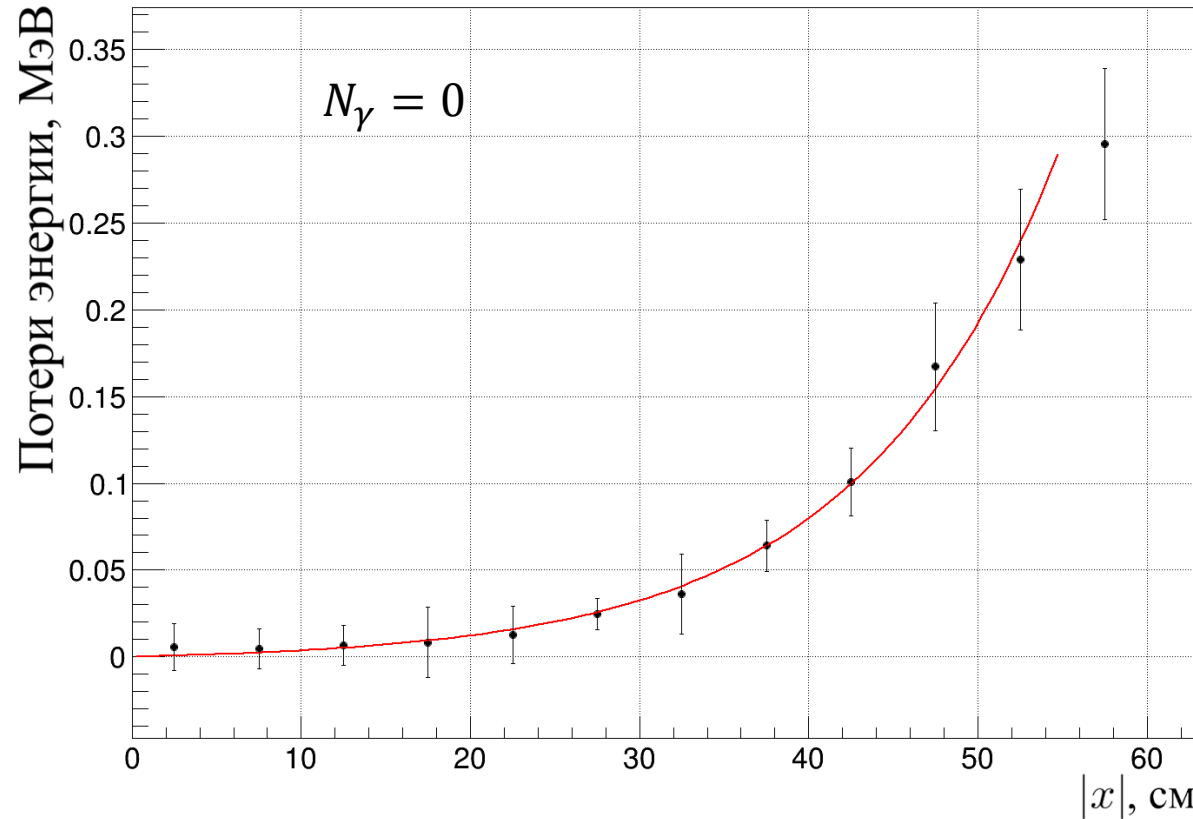
Зависимость от расстояния до края детектора



- Чем ближе к краю, тем больше вероятность гамма-кванта покинуть чувствительный объём $\Rightarrow$ меньше средняя энергия.
- Картинки для $E_\nu = 3$ МэВ, $|y| < 35$ см, $|z| < 35$ см.



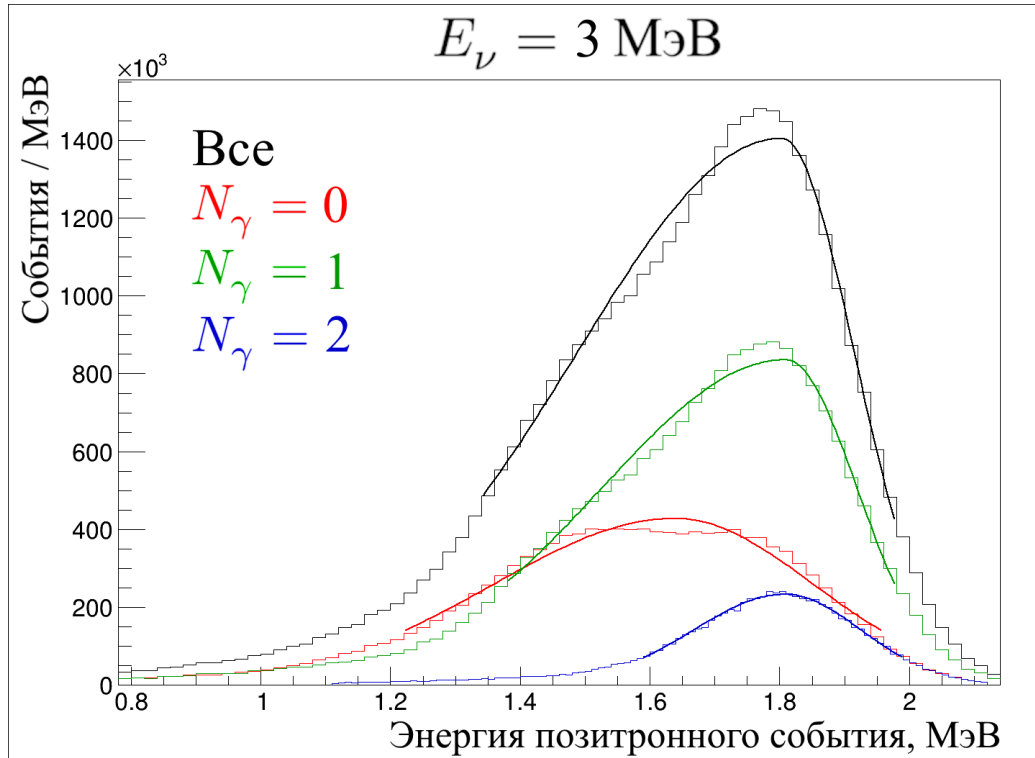
Средние потери энергии для всех E_ν



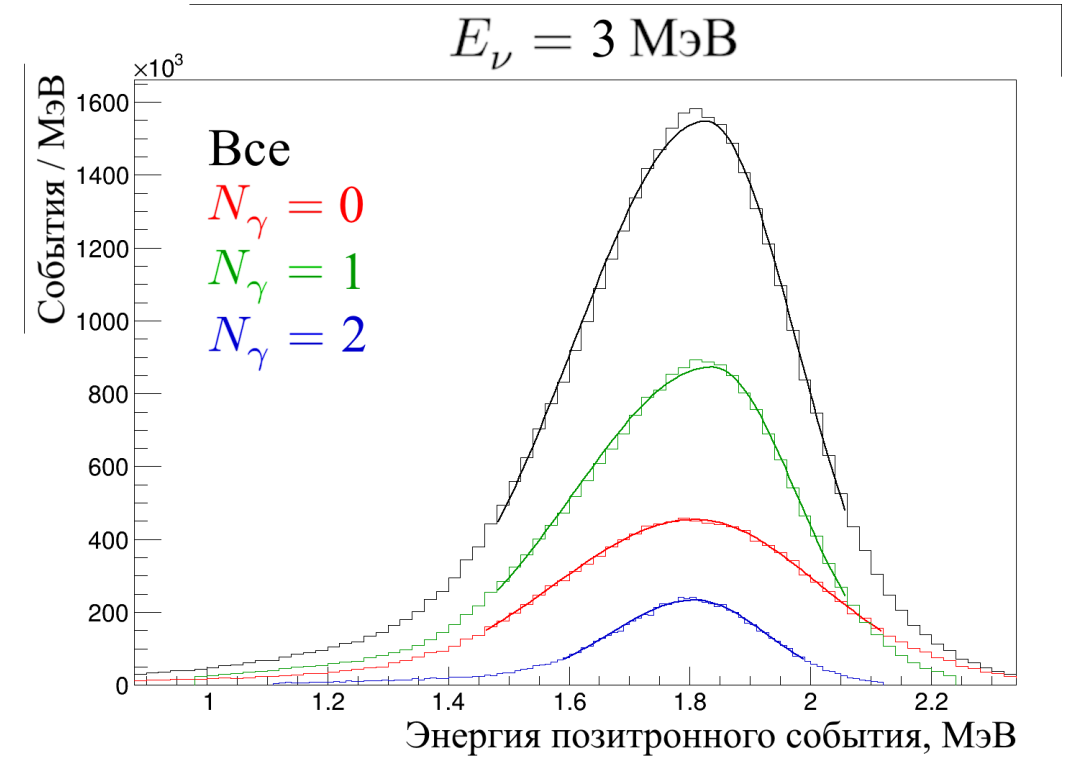
- Энергии нейтрино от 3 МэВ до 11 МэВ с шагом 1 МэВ.
- Подгонка функцией $E = a - ae^{c|x|}$.
- Полученную зависимость можно использовать как аддитивную поправку к энергии.

Энергетические распределения

Без поправки



С поправкой

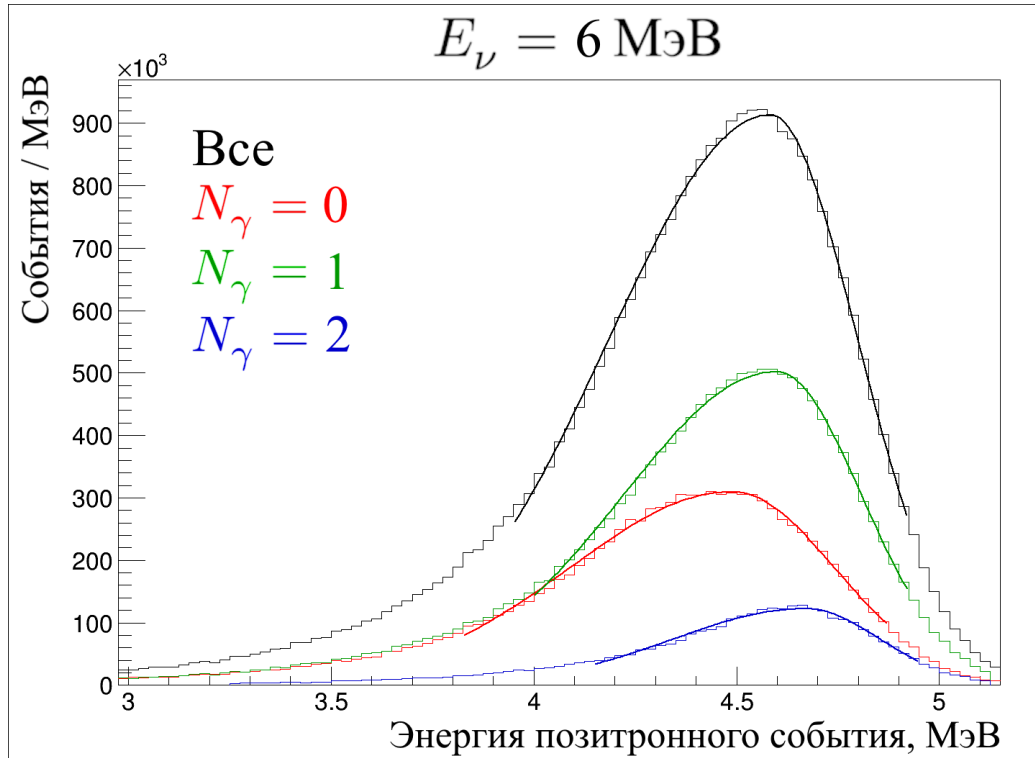


Подгонка несимметричной функцией Гаусса: $f(x) = \begin{cases} A \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_l^2}\right), & x < x_0, \\ A \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_r^2}\right), & x > x_0. \end{cases}$

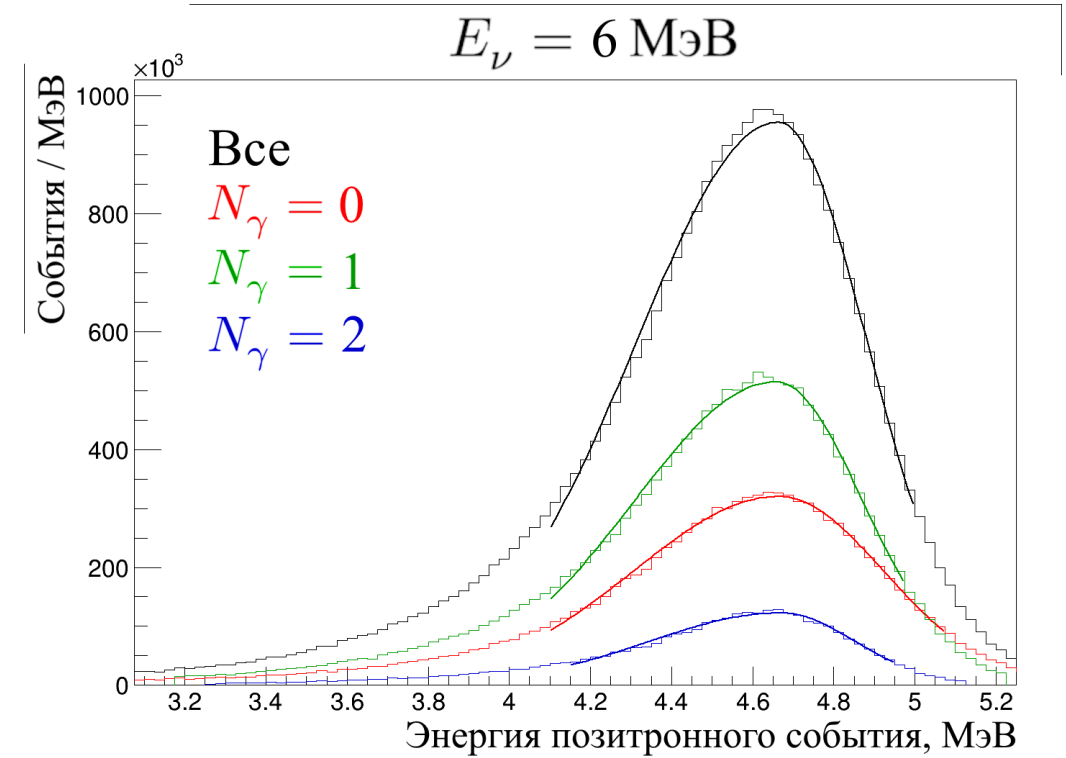
Три поправки: по одной для каждой из осей.

Энергетические распределения

Без поправки



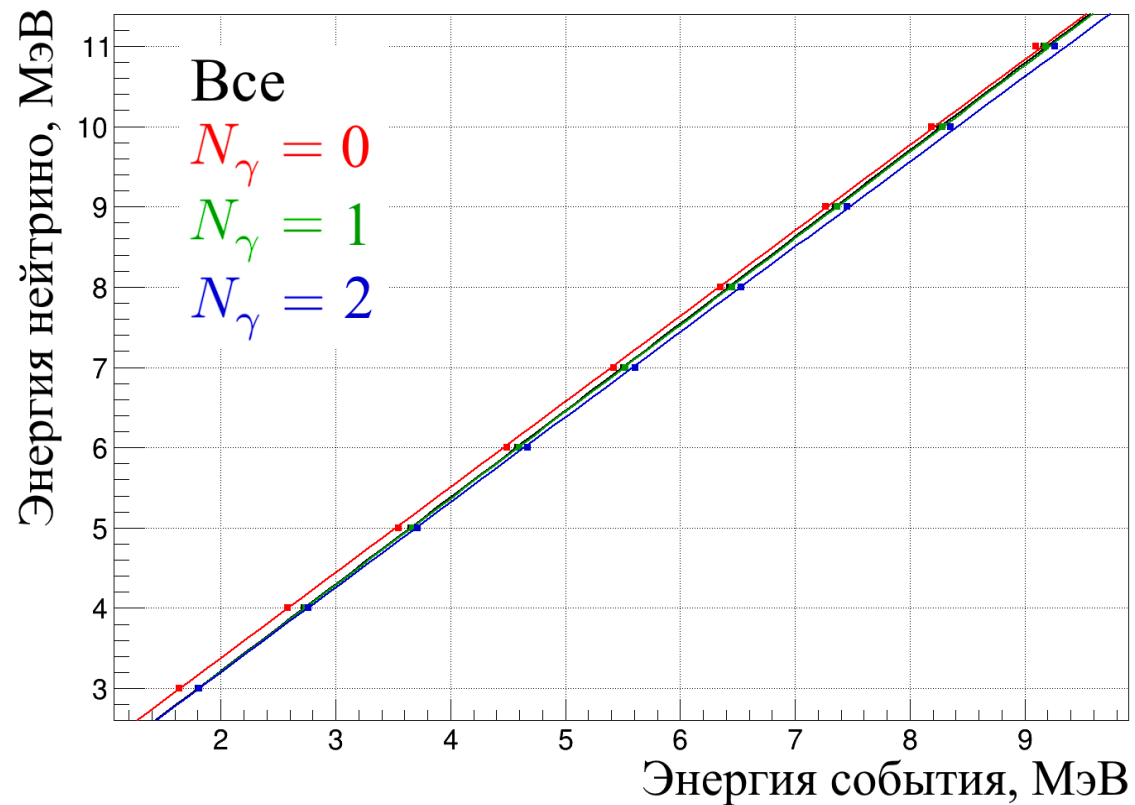
С поправкой



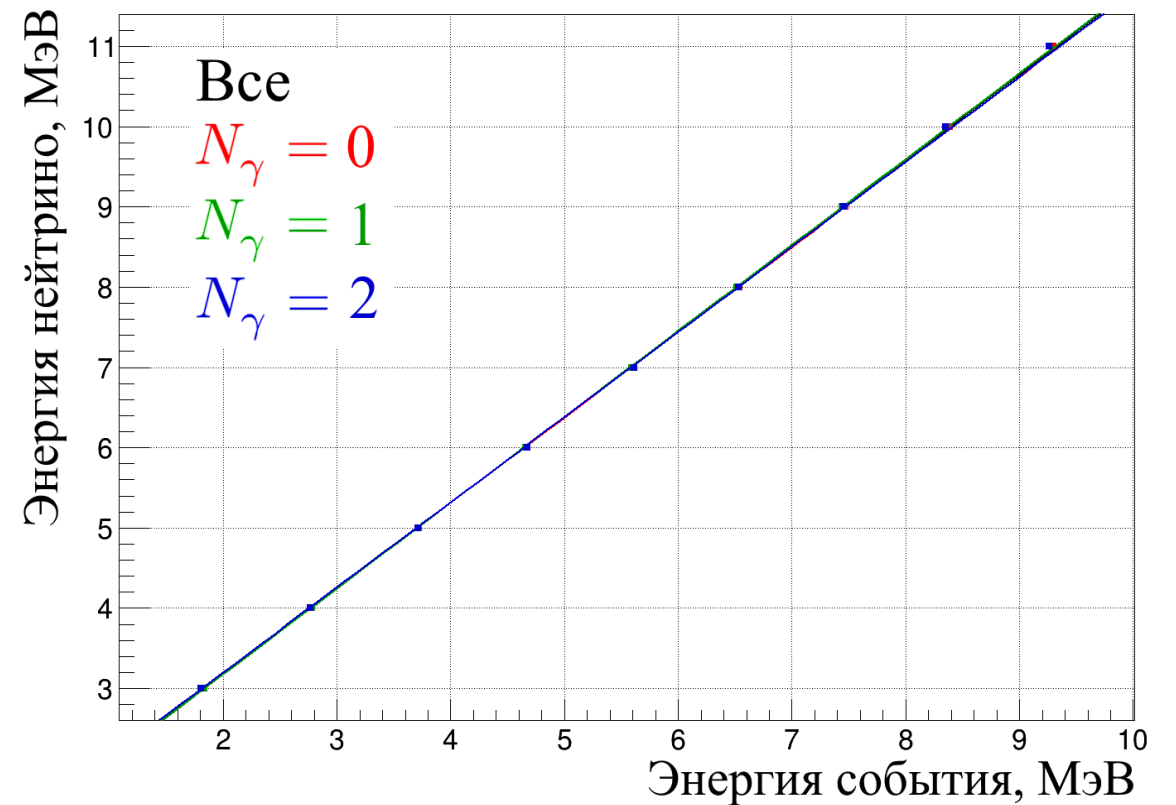
Подгонка несимметричной функцией Гаусса: $f(x) = \begin{cases} A \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_l^2}\right), & x < x_0, \\ A \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_r^2}\right), & x > x_0. \end{cases}$

Калибровочная прямая

Без поправки



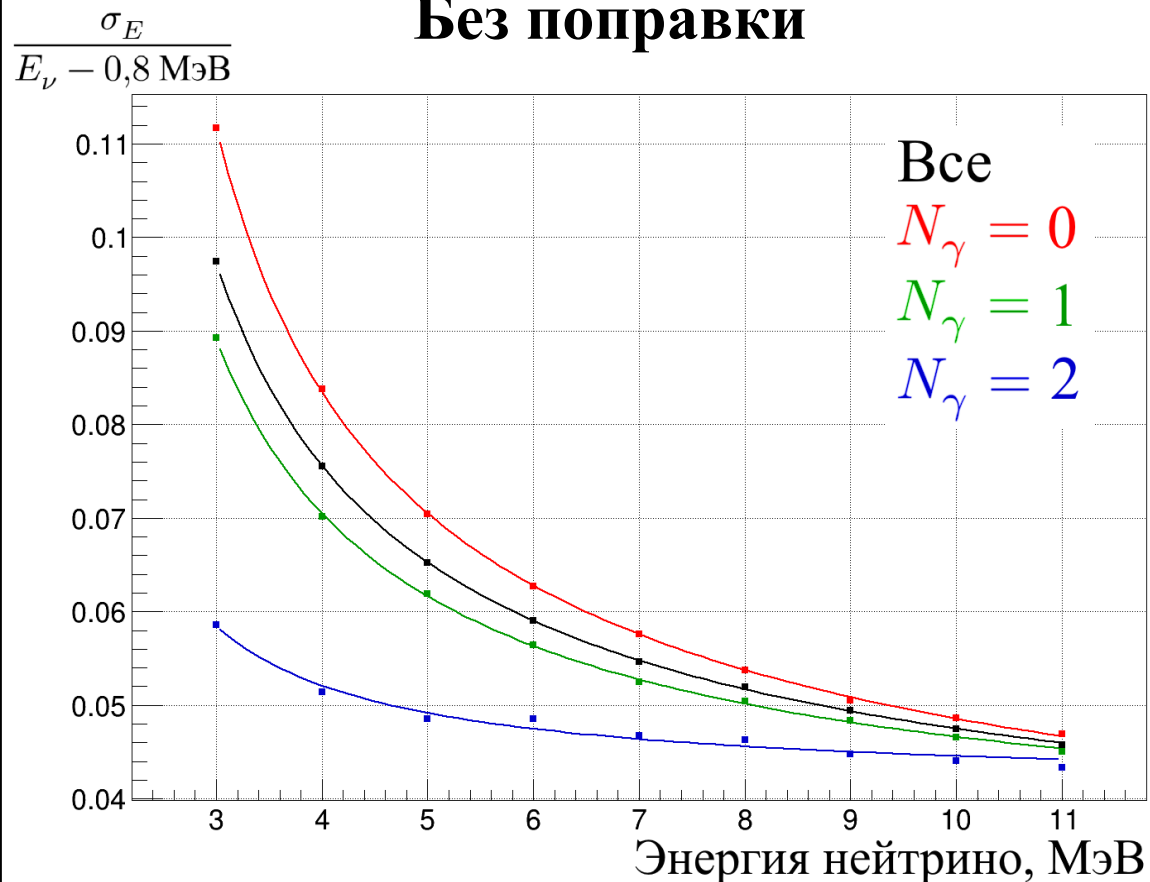
С поправкой



Подгонка прямой: $E_\nu = kE + E_0$

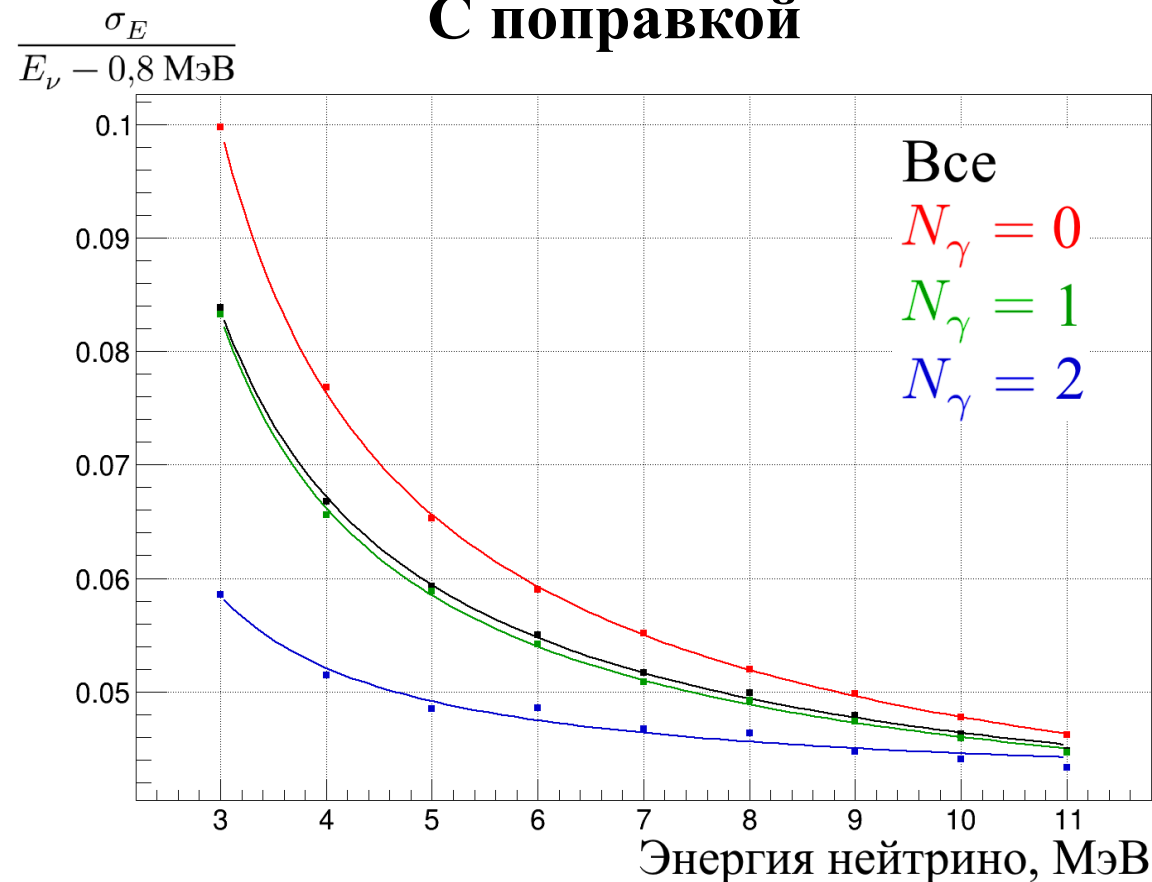
Энергетическое разрешение

Без поправки



Подгонка функцией $\frac{A}{\sqrt{E_\nu - \varepsilon}} \oplus B$
 $(a \oplus b \equiv \sqrt{a^2 + b^2})$

С поправкой



В идеальном случае энергия позитронного события
 $E_{\text{п.с.}} = E_e + 2E_\gamma = E_\nu - 1,8 \text{ МэВ} + 2E_\gamma = E_\nu - 0,8 \text{ МэВ}.$

Результаты подгонок

Без поправки

N_γ	0	1	2	Все
k	1,065	1,079	1,060	1,082
E_0 , МэВ	1,241	1,044	1,073	1,047
A , МэВ ^{1/2}	0,115	0,094	0,050	0,104
B	0,027	0,033	0,041	0,031
ε , МэВ	1,874	1,699	1,55	1,733

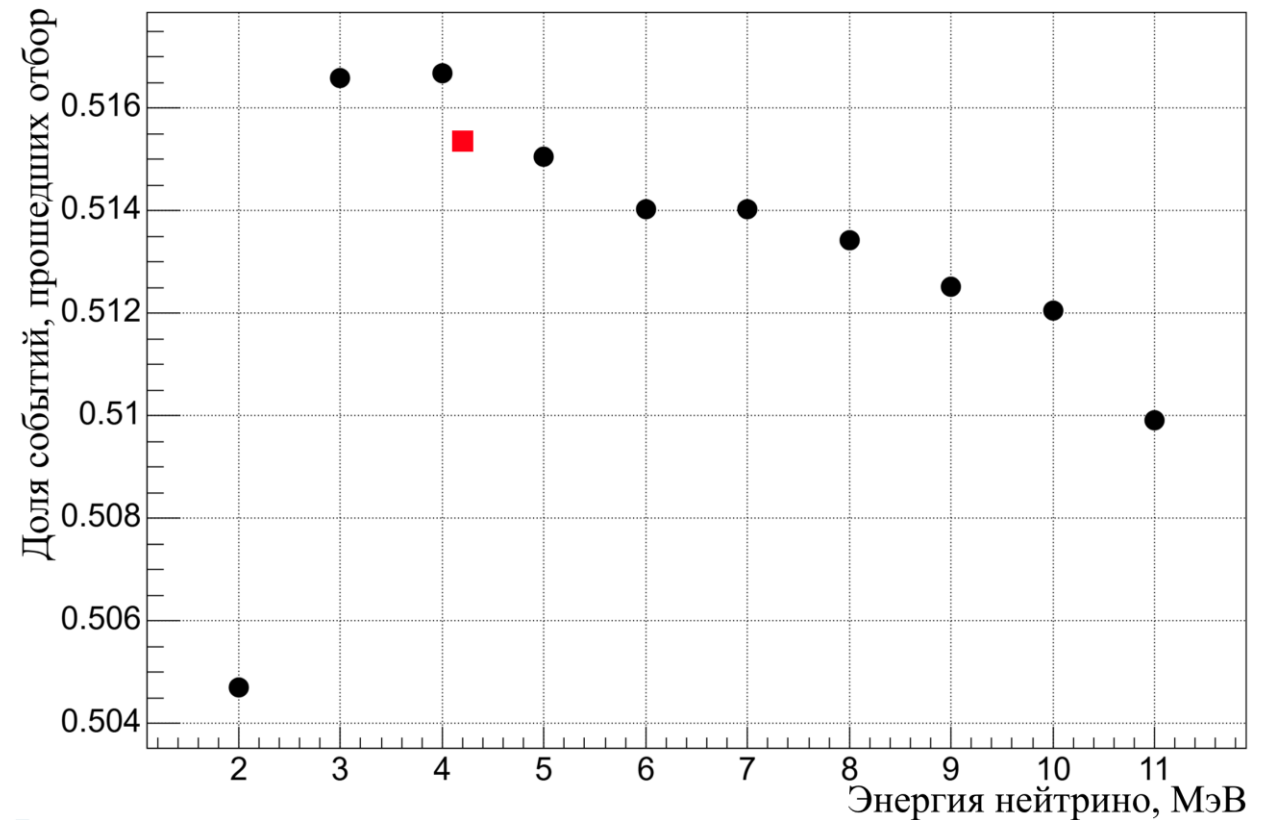
С поправкой

N_γ	0	1	2	Все
k	1,061	1,070	1,060	1,067
E_0 , МэВ	1,067	1,029	1,073	1,044
A , МэВ ^{1/2}	0,102	0,083	0,050	0,087
B	0,032	0,036	0,041	0,035
ε , МэВ	1,836	1,769	1,55	1,681

Эффективность восстановления событий

Дополнительный отбор событий:

- время между триггерами: $1 \div 50$ мкс;
- все три координаты первичного хита: $-55 \div 55$ см;
- полная энергия нейтронного триггера: >3 МэВ.



Красный квадрат — спектр ^{235}U (средняя энергия 4,2 МэВ)

Результаты

- Разработана программа, создающая модель сигнала детектора на основе результатов Монте-Карло.
- Разработан алгоритм для выделения в сигнале позитронного кластера и поиска гамма-хитов. События разделены на три категории ($N_\gamma = 0, 1, 2$).
- Изучена зависимость энергетических потерь от расстояния до края детектора для трёх категорий событий. Полученная зависимость в дальнейшем использовалась в качестве аддитивной поправки к энергии.
- Получена оценка энергетического разрешения как без, так и с использованием поправки к энергии:

$$\frac{\sigma_E^{\text{непопр}}}{E_\gamma - 0,8 \text{ МэВ}} = \frac{10,4 \%}{\sqrt{E_\gamma - 1,73}} \oplus 3,1 \%,$$

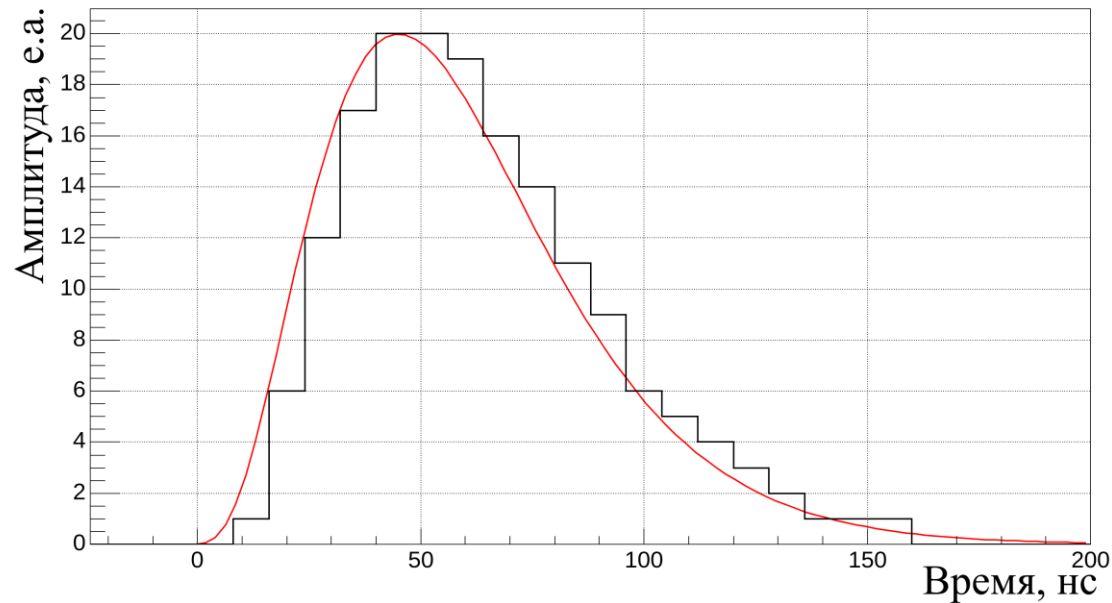
$$\frac{\sigma_E^{\text{попр}}}{E_\gamma - 0,8 \text{ МэВ}} = \frac{8,7 \%}{\sqrt{E_\gamma - 1,68}} \oplus 3,5 \%.$$

- Изучалась эффективность восстановления событий. Для использовавшихся критериев доля событий, проходящих отбор составила 51,5 % (для спектра ^{235}U).

Создание модели сигнала на основе МК

Результаты Монте-Карло-моделирования → Бинарный файл с моделью сигнала

Форма импульса от одного пикселя КФУ



е.а. — условные единицы амплитуды

Каждому сработавшему пикселю КФУ ставится в соответствие импульс вида

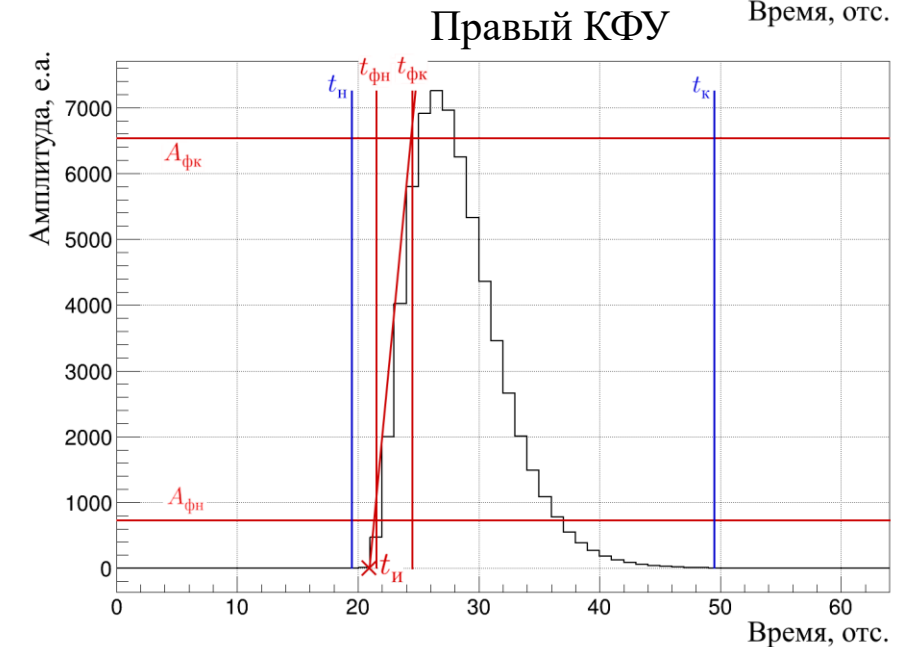
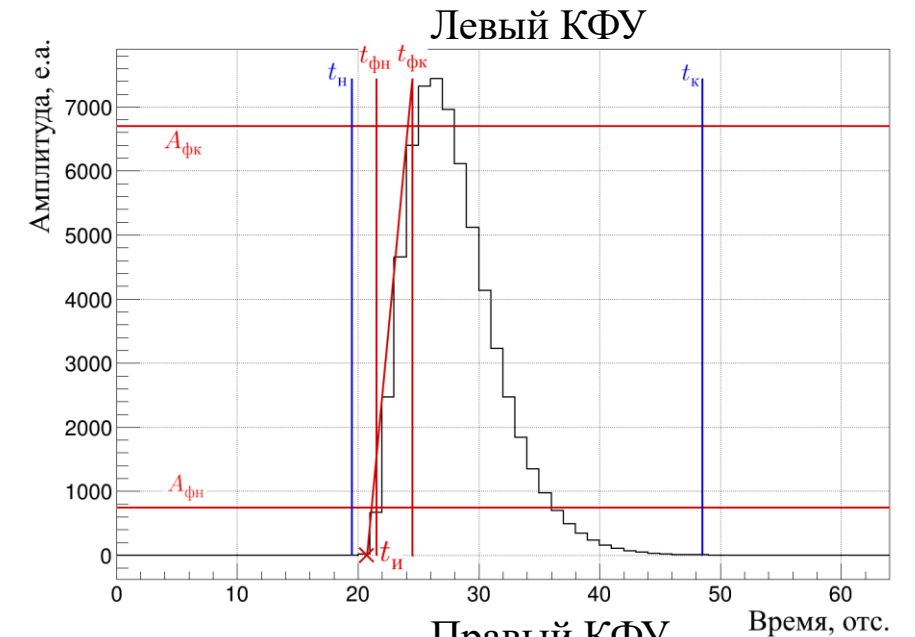
$$A_1(t) = A_0 \exp(3(1 + \ln \xi - \xi)),$$

- $\xi = \frac{t-t_0}{3\tau}$;
- t_0 — время регистрации;
- $A_0 = 20$ е. а. — амплитуда;
- $\tau = 15$ нс.

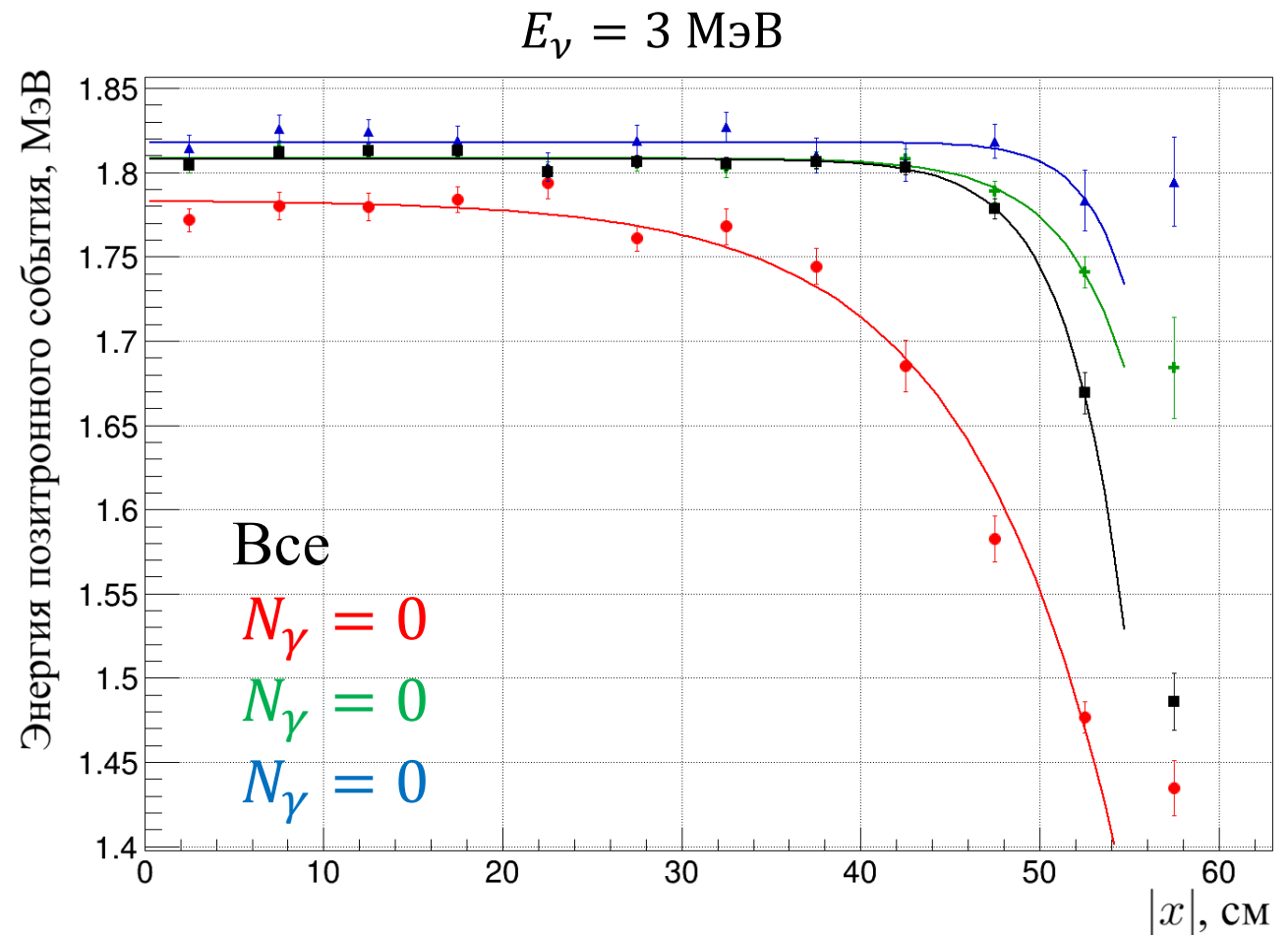
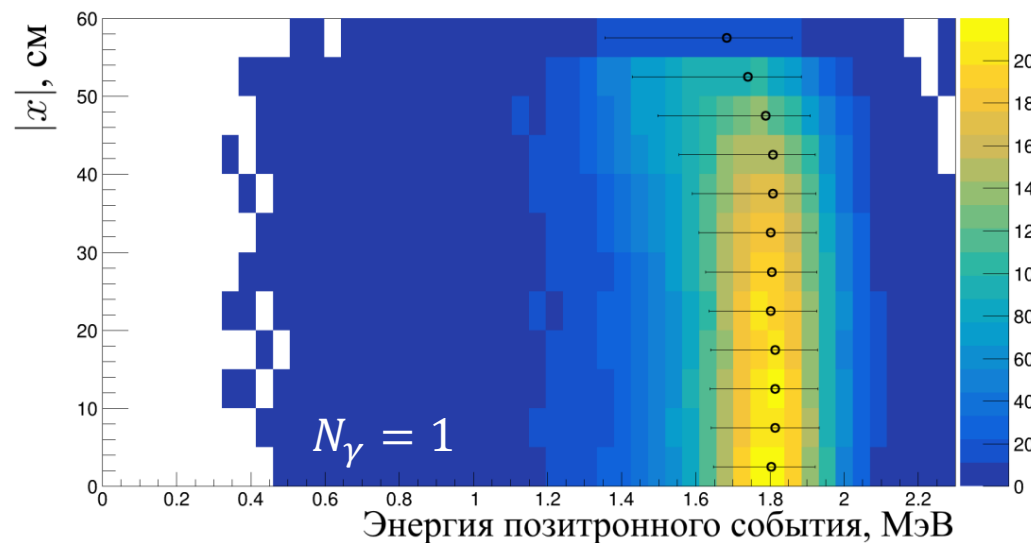
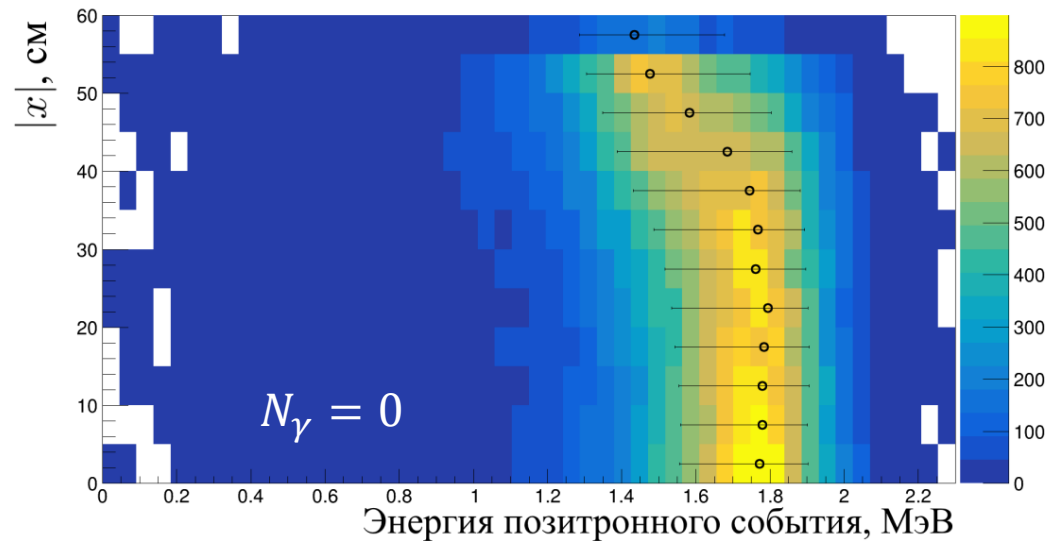
Все полученные импульсы суммируются, оцифровываются и записываются в файл.

Анализ импульсов

1. t_n и t_k — границы импульса — моменты, когда сигнал начинает и перестаёт превышать фоновый порог $A_\phi = 5$ е. а.
2. $A_{\max}$ и A_1 — глобальный максимум и первый локальный максимум.
3. $t_{\phi n}$ и $t_{\phi k}$ — границы переднего фронта — моменты, когда сигнал впервые превышает уровни $A_{\phi n} = 0,1A_1$ и $A_{\phi k} = 0,9A_1$.
4. Восстановление переднего фронта: метод наименьших квадратов между $t_{\phi n}$ и $t_{\phi k}$.
5. $t_{\text{и}}$ — время импульса — пересечение фронта с нулём.
6. Интеграл — суммирование точек между $t_{\phi n}$ и t_k .



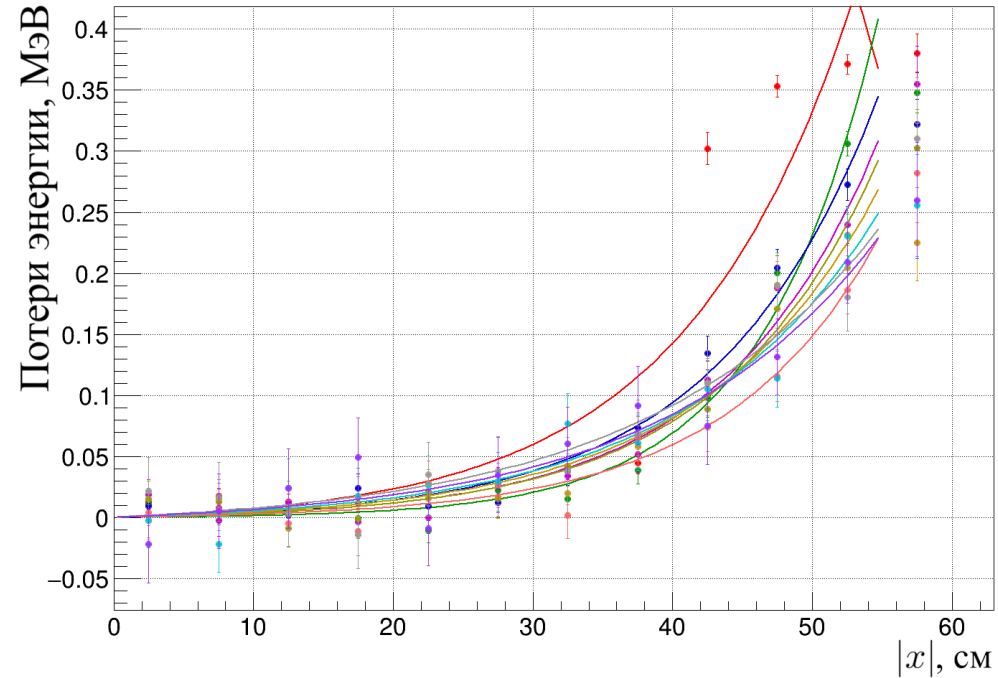
Зависимость от расстояния до края детектора



Подгонка: $E = a - be^{c|x|}$.

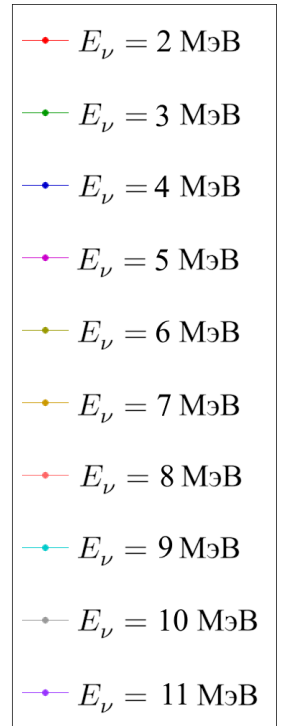
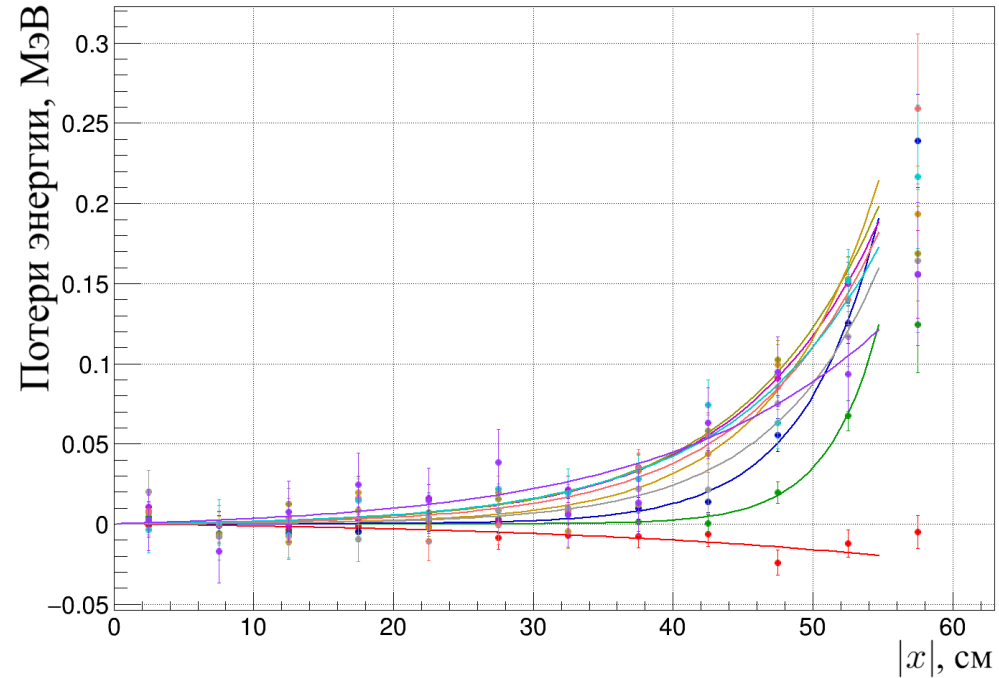
Зависимость от расстояния до края детектора

$N_\gamma = 0$

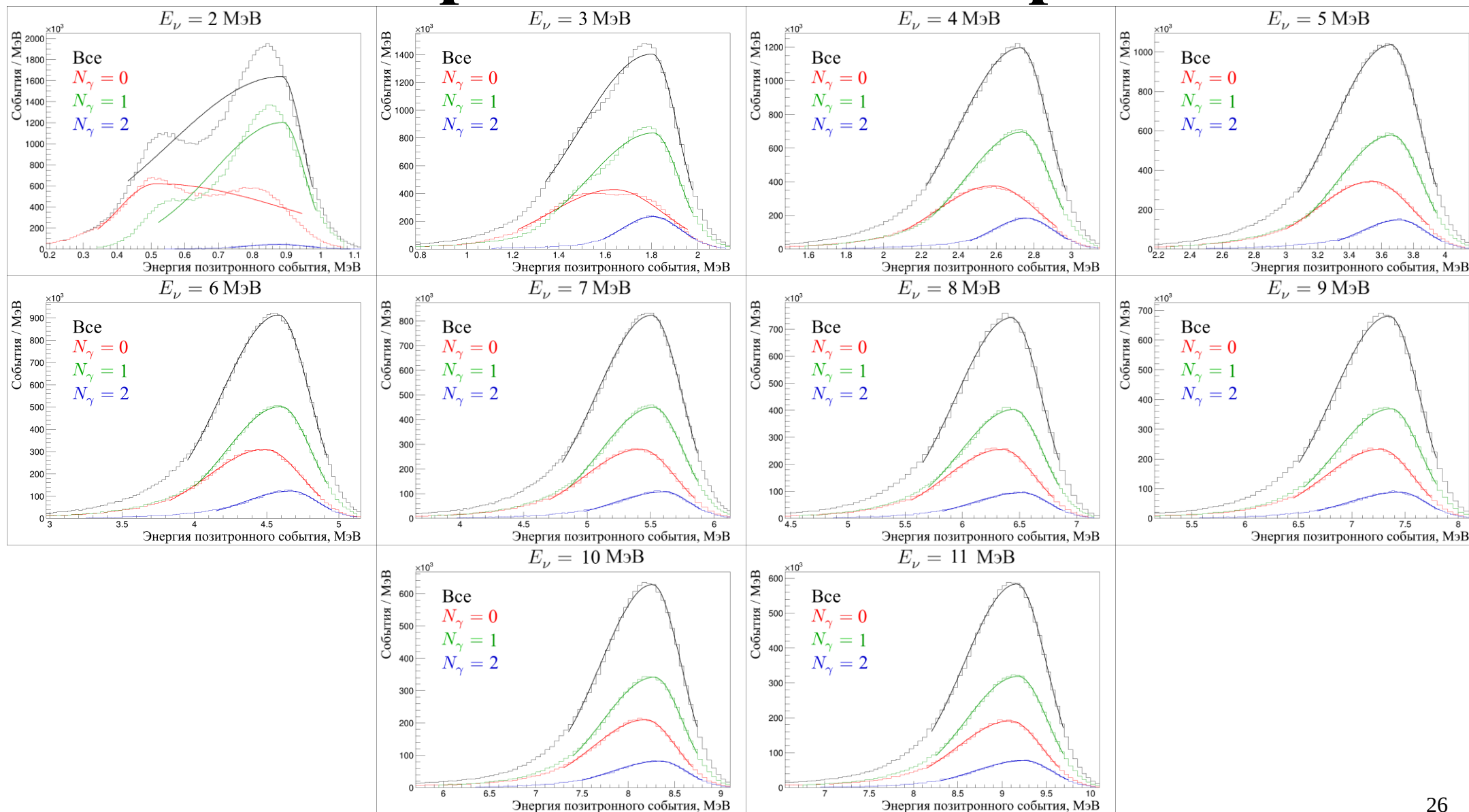


Подгонка: $E = a - ae^{c|x|}$.

$N_\gamma = 1$



Распределения без поправки



Распределения с поправкой

