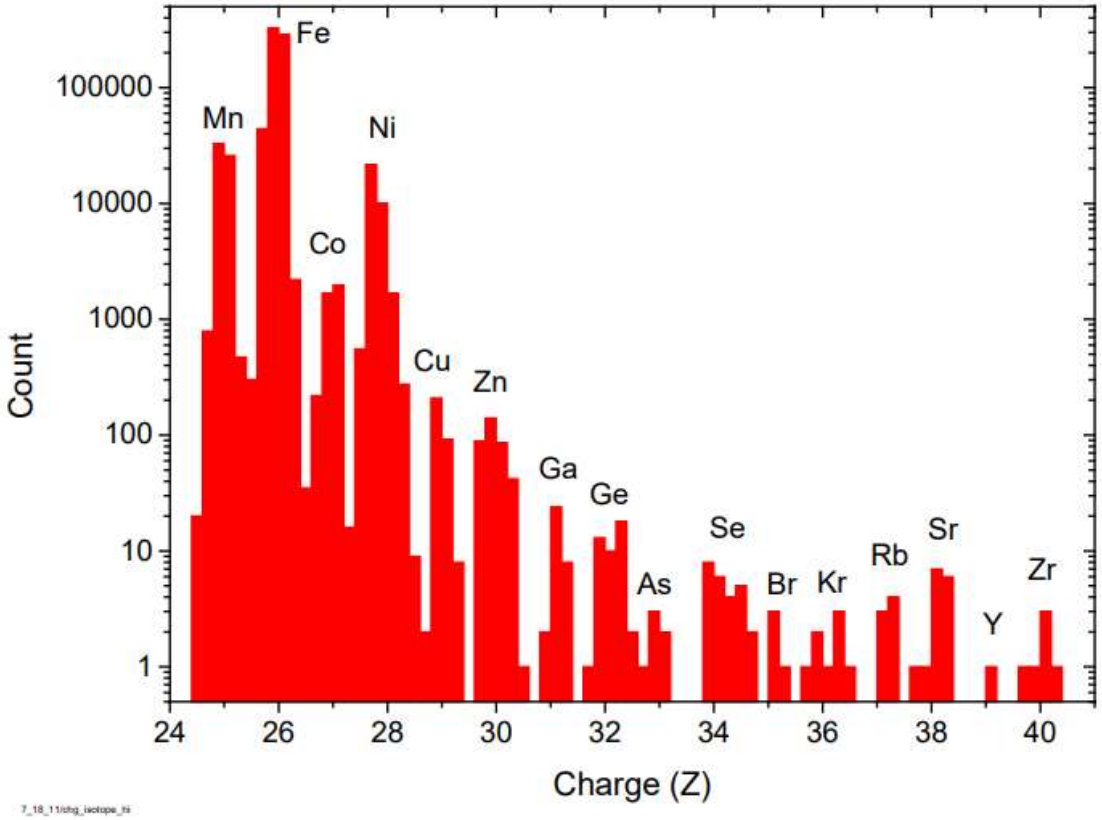
39-я Всероссийская конференция по космическим лучам

«МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ ИЗОТОПОВ ЯДЕР В МНОГОСЛОЙНОМ КРЕМНИЕВОМ КАЛОРИМЕТРЕ ПОЛНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ.»

Докладчик:

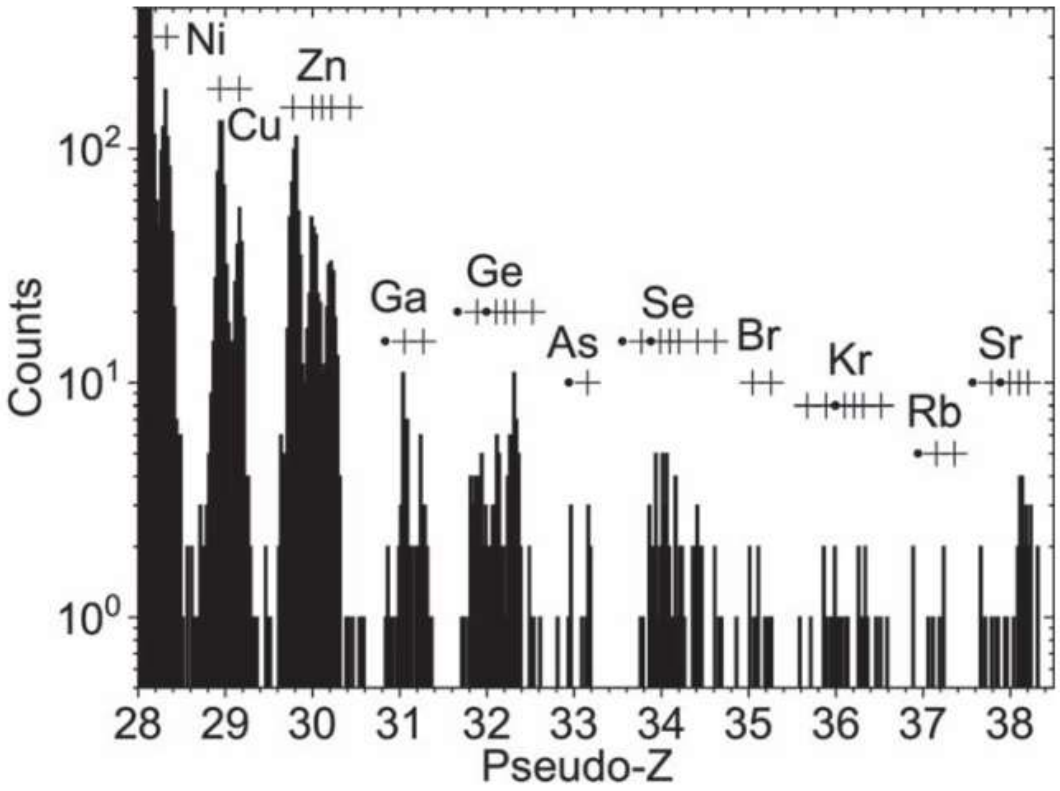
Горбунов Арсений Викторович

Экспериментальные данные CRIS



Зарядовая гистограмма элементов, полученная в эксперименте CRIS

Экспериментальные данные CRIS



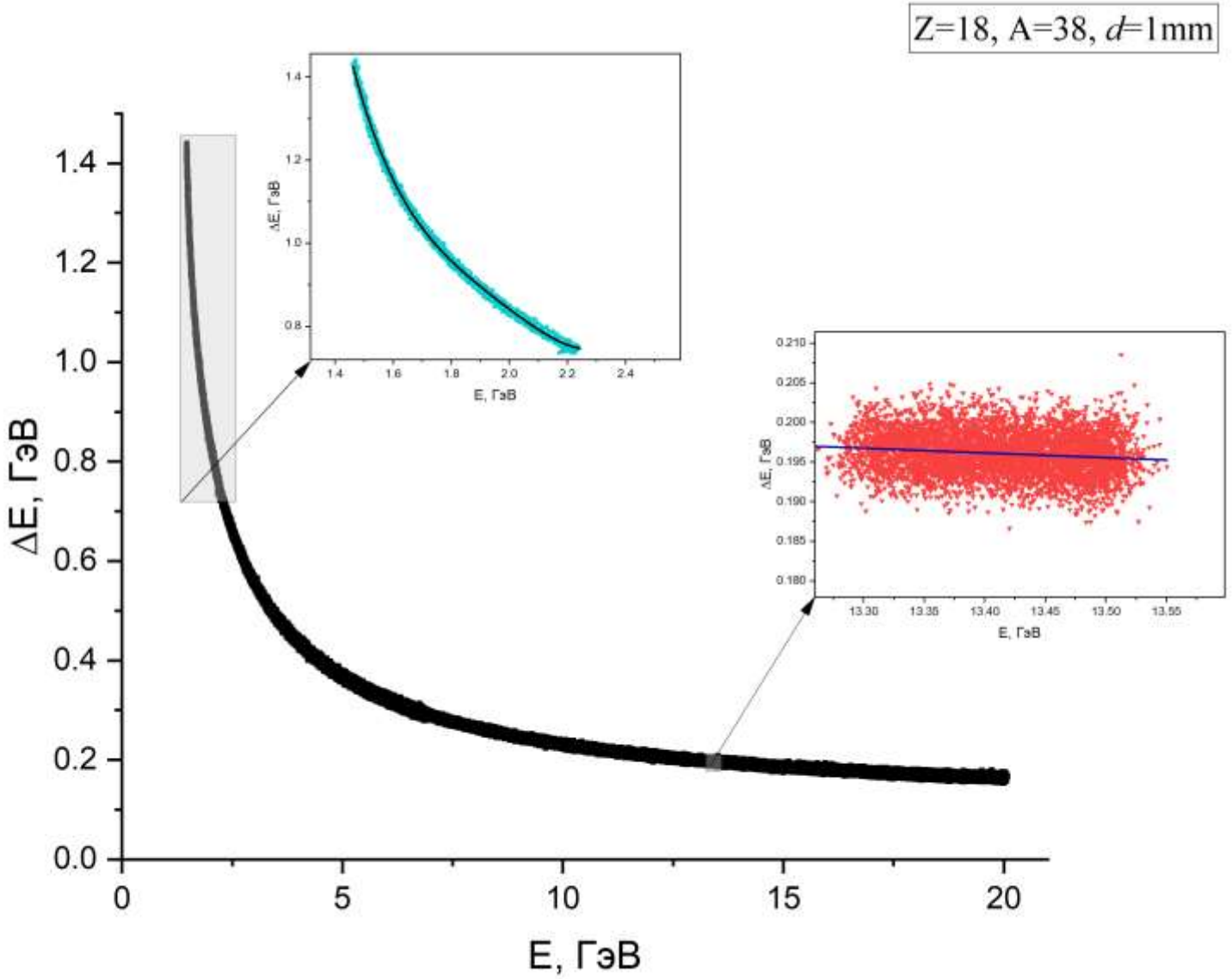
Гистограмма распределения изотопов за железом, полученная в эксперименте CRIS

Основные цели моделирования

- ✓ Моделируемая схема детекторной установки представляет собой набор из 100 кремниевых полупроводниковых детекторов одинаковой толщины *d*, центры которых расположены на одинаковом расстоянии *l* друг от друга.
- ✓ Подбор характеристик детекторной аппаратуры, дающий наилучшую точность определения массы.
- ✓ Изменяемые характеристики установки:
- **толщина одного детектора *d***
- **расстояние между центрами детекторов *l***
- ✓ Определение максимального заряда Z, при котором все еще возможно разделение соседних изотопов.
- ✓ Рассматриваемые заряды: Z=18, 22, 25, 35, 45, 50, 54.

- ✓ Рассматриваемые толщины *d*: 0.2 мм, 0.5 мм, 1 мм, 1.5 мм, 2 мм, 3мм.
- ✓ Рассматриваемые расстояния между центрами детекторов *l*: 0.3 см, 1 см.
- ✓ Выходные данные моделирования – набор энергий dE, которые частица потеряла в слоях аппаратуры.

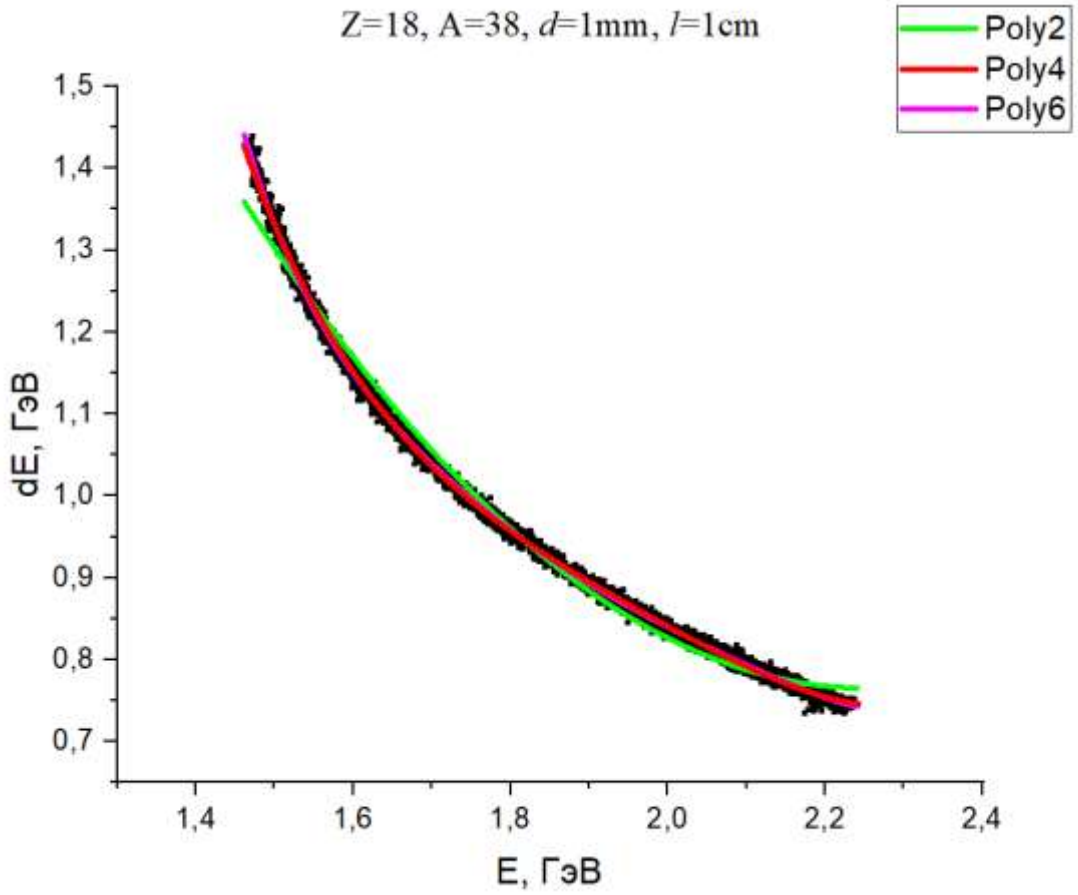
Метод обработки



При обработке используется 80 слоев от слоя остановки частицы.

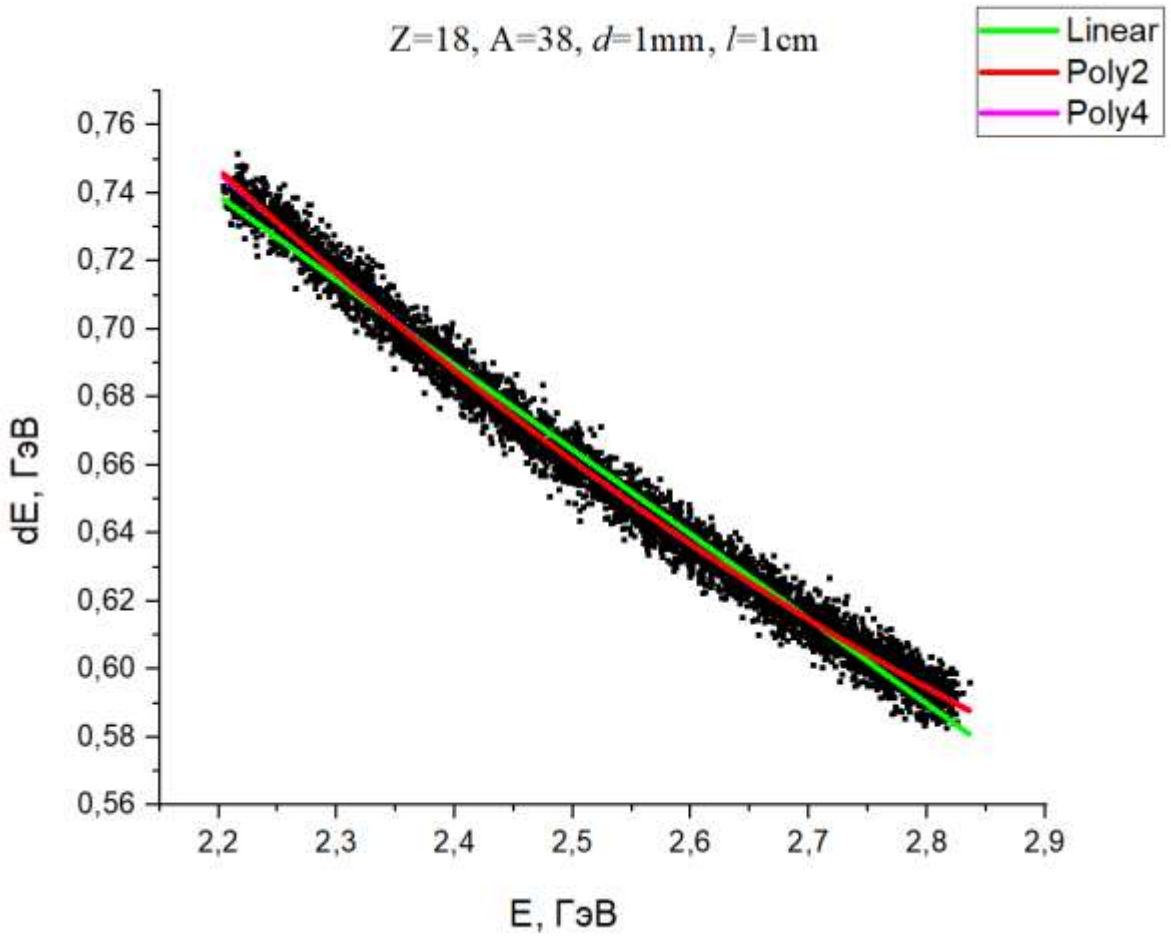
1. Определение слоя остановки частицы.
2. Нахождение энергии частицы E на входе в каждый слой.
3. Построение и аппроксимация полиномами калибровочной dE(E)-кривой для выбранного изотопа.
4. Расчет отклонений Δ_i от dE(E)-кривой в каждом слое.
5. Построение и анализ гистограммы суммарных отклонений от калибровочной dE(E)-кривой $\Delta_\Sigma = \sum_{i=1}^{80} \Delta_i$ (i=0 – номер слоя остановки частицы, в расчетах отклонений не используется).

Построение и аппроксимация полиномами калибровочной dE(E)-кривой для выбранного изотопа



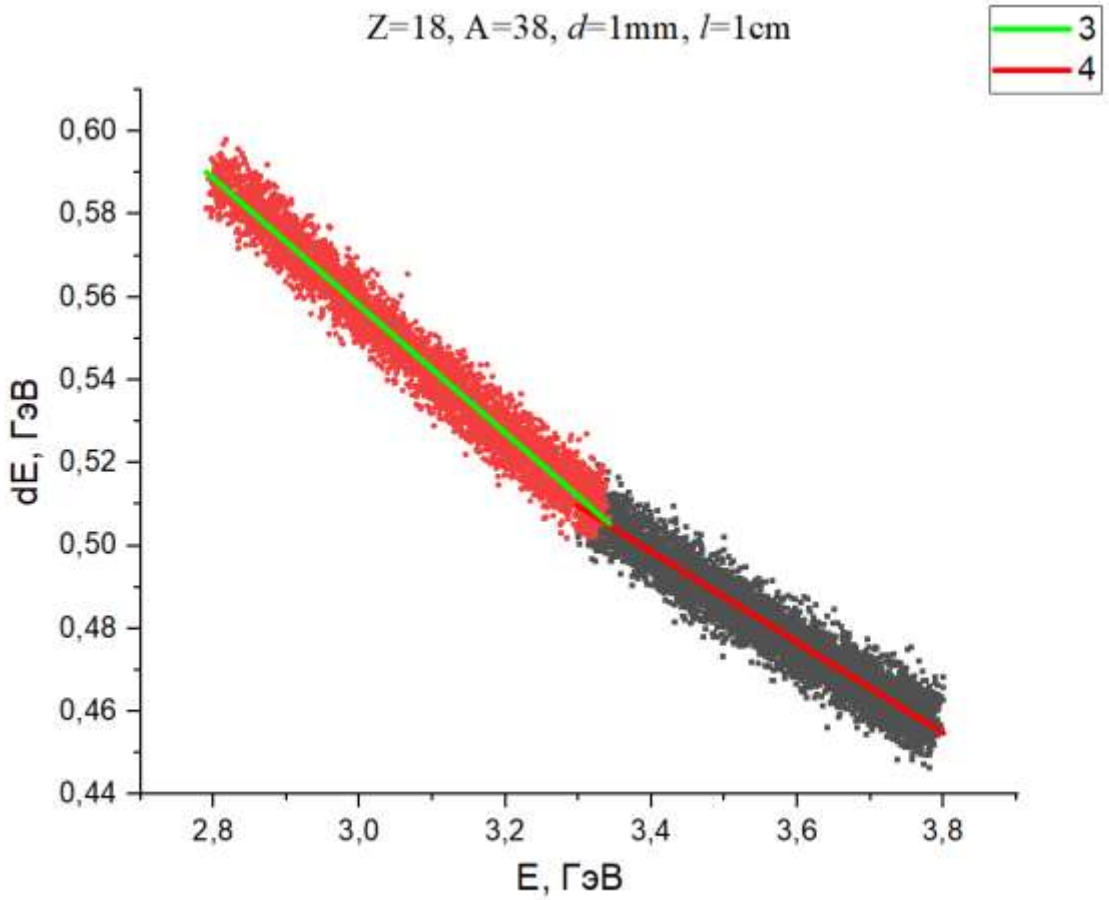
Выбор степени полинома в 1-м слое от слоя остановки частицы

Построение и аппроксимация полиномами калибровочной dE(E)-кривой для выбранного изотопа



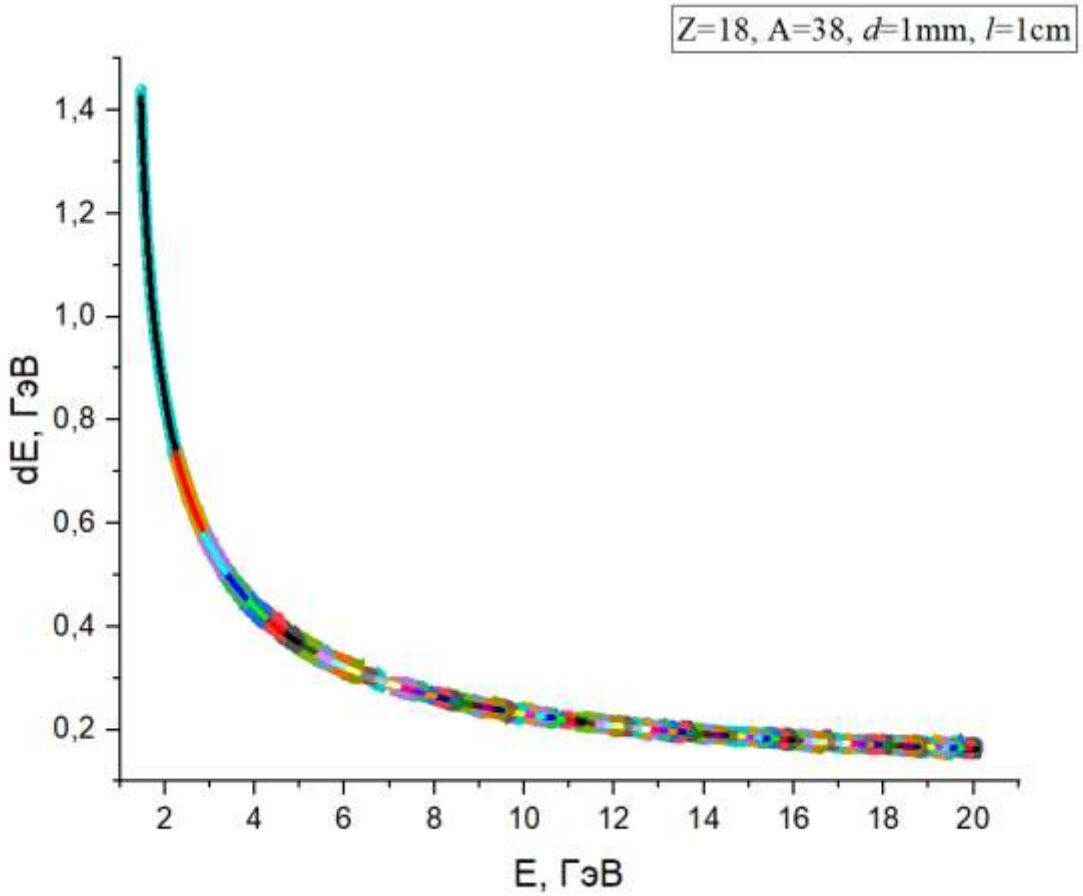
Выбор степени полинома во 2-м слое от слоя остановки частицы

Построение и аппроксимация полиномами калибровочной dE(E)-кривой для выбранного изотопа



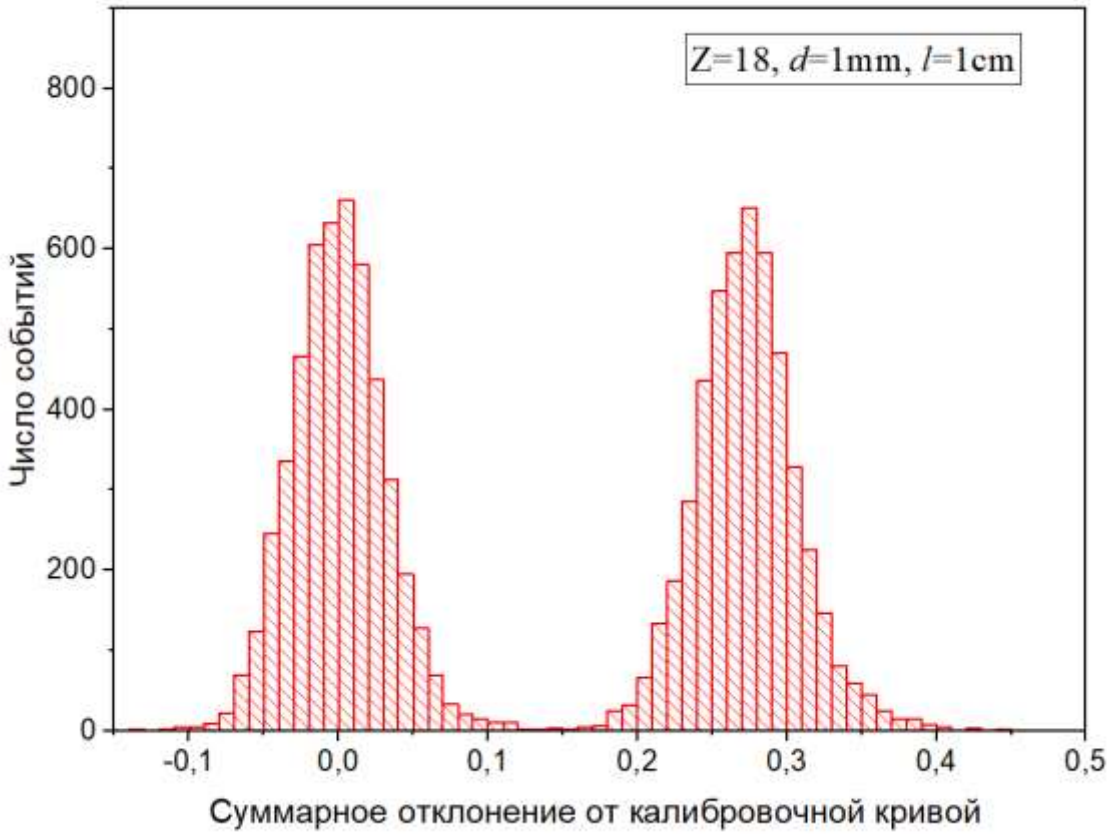
Выбор степени полинома в 3-м и 4-м слое от слоя остановки частицы

Окончательный вид аппроксимационной dE(E)-кривой

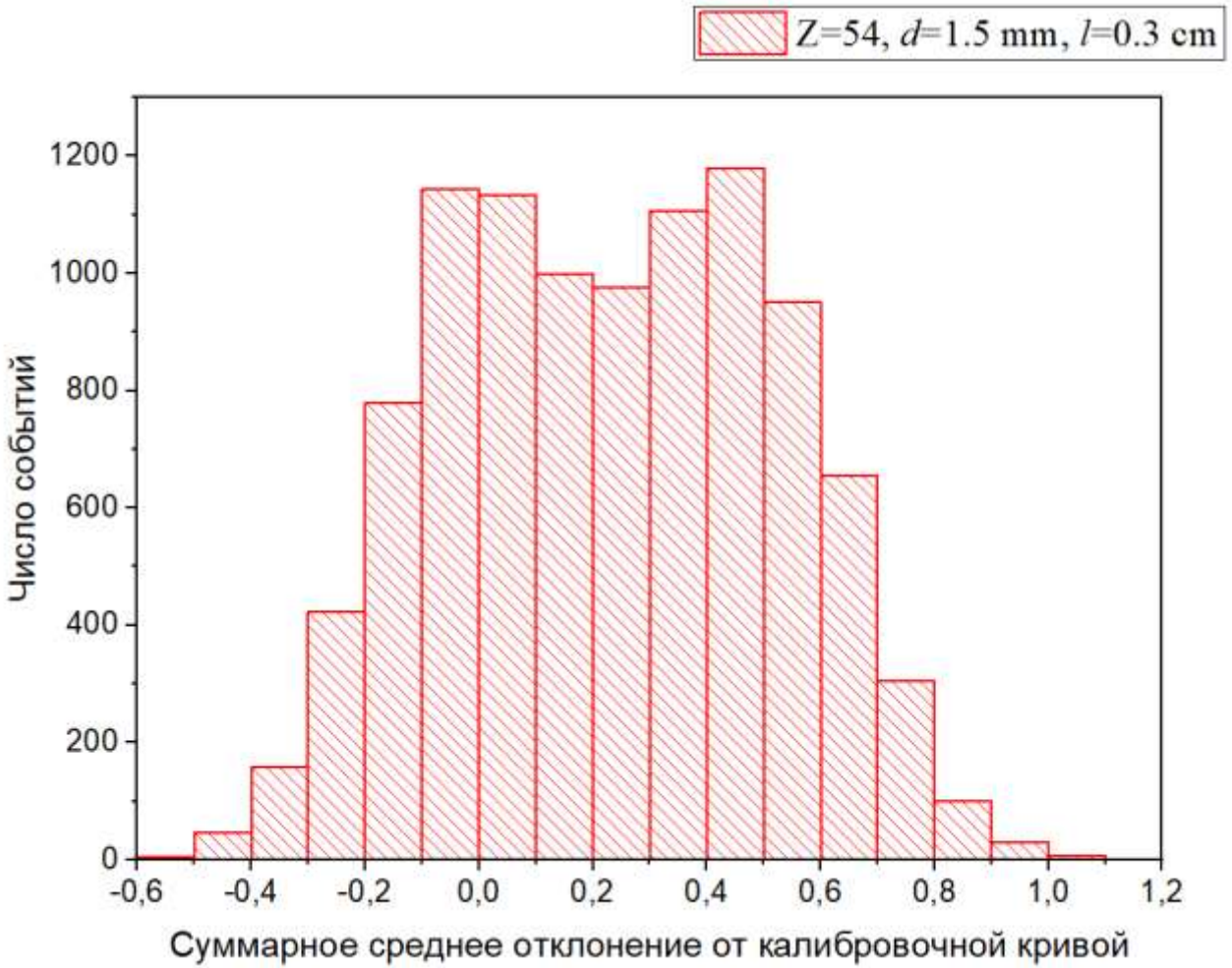


Аппроксимация полиномом 4-ой степени 1-го слоя от слоя остановки и полиномом 2-ой степени 2-го слоя от слоя остановки. Остальные слои аппроксимированы линейными функциями.

Построение и анализ гистограммы суммарных отклонений от калибровочной dE(E)-кривой $\Delta_\Sigma = \sum_{i=1}^{80} \Delta_i$ для соседних изотопов аргона Z=18 (A1=38, A2=39)

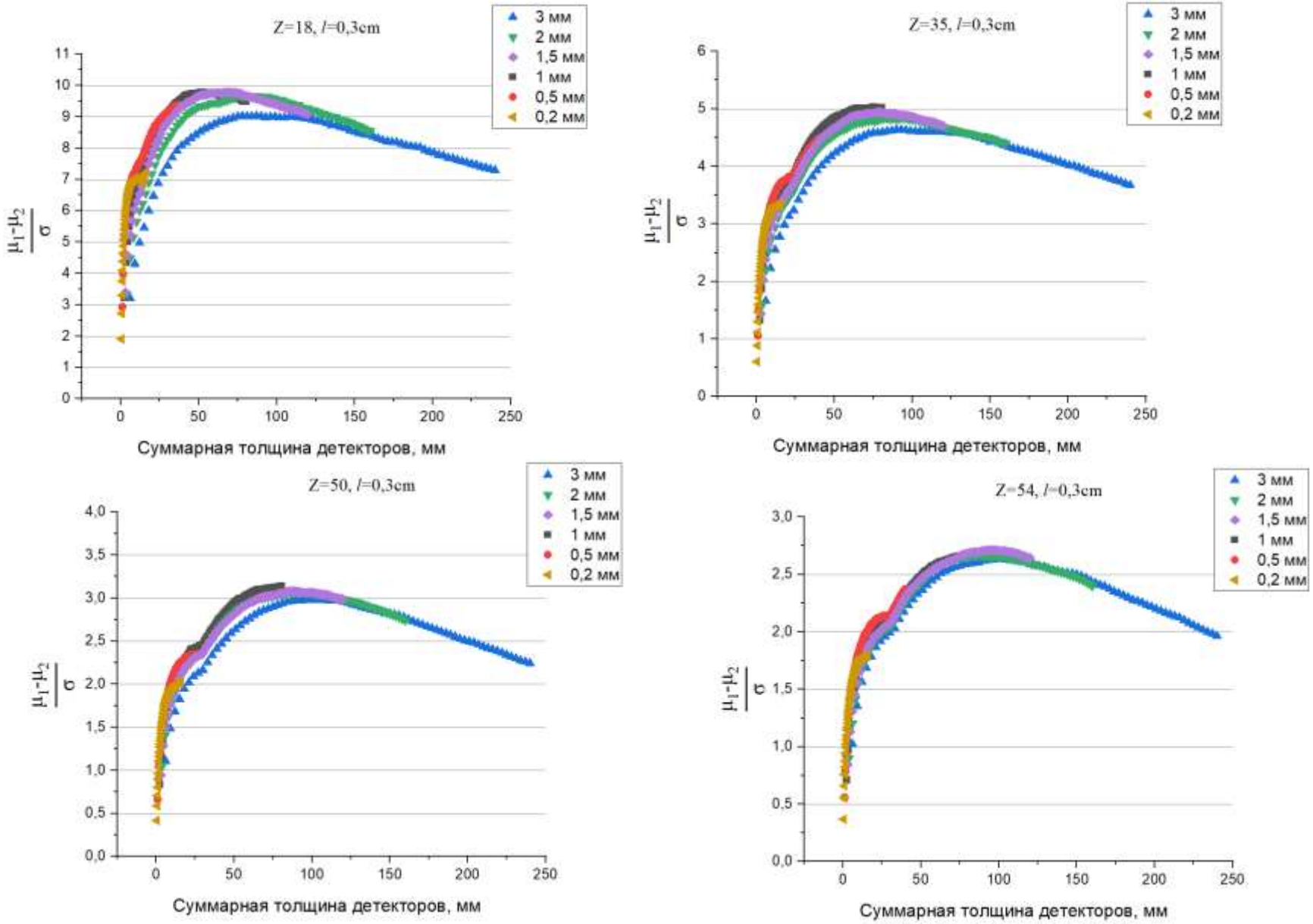


Построение и анализ гистограммы суммарных отклонений от калибровочной dE(E)-кривой $\Delta_\Sigma = \sum_{i=1}^{80} \Delta_i$ для соседних изотопов ксенона Z=54 (A1=127, A2=128)



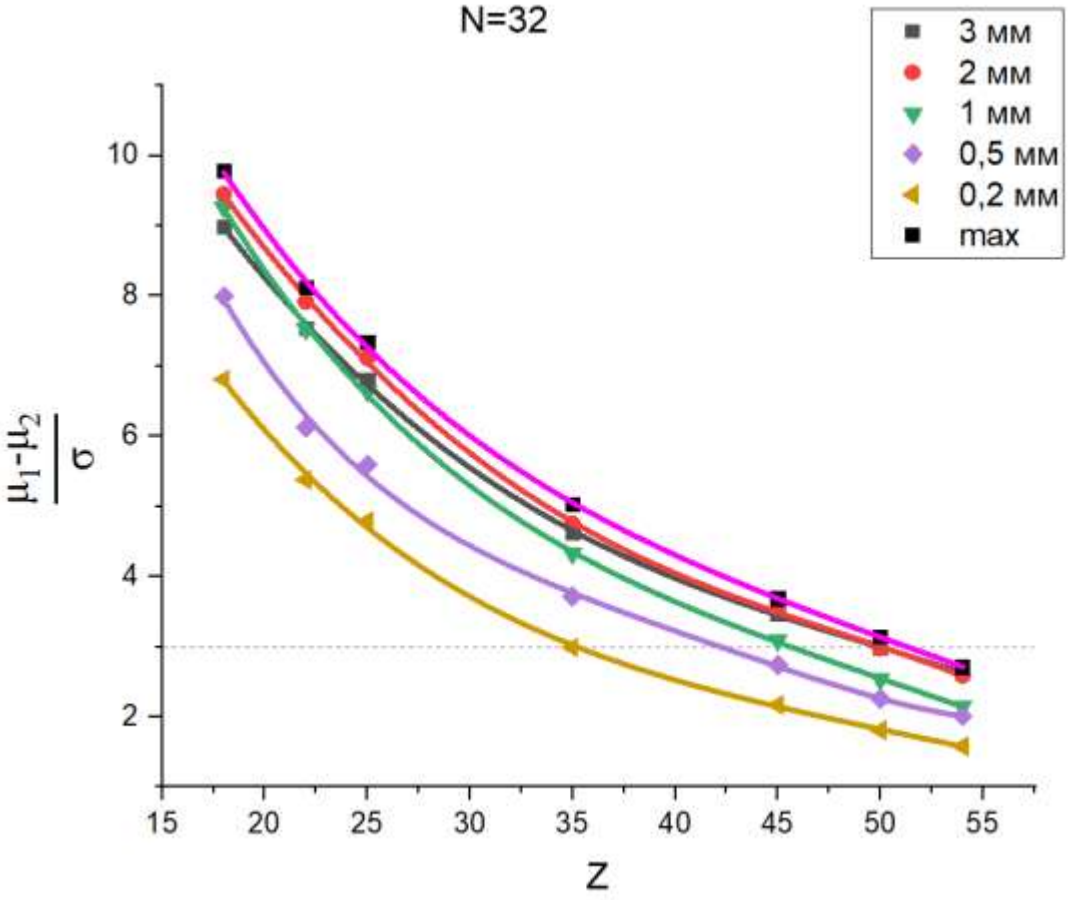
Расчет параметра разделимости изотопов $\frac{(\mu_1-\mu_2)}{\sigma}$ из модельных данных для расстояния между центрами детекторов *l*=0,3 см для различных толщин детекторов

Критерий визуальной разделимости изотопов - $\frac{(\mu_1-\mu_2)}{\sigma}>3$



Расчет параметра разделимости для N=32 слоев, как в прототипе НУКЛОН-2

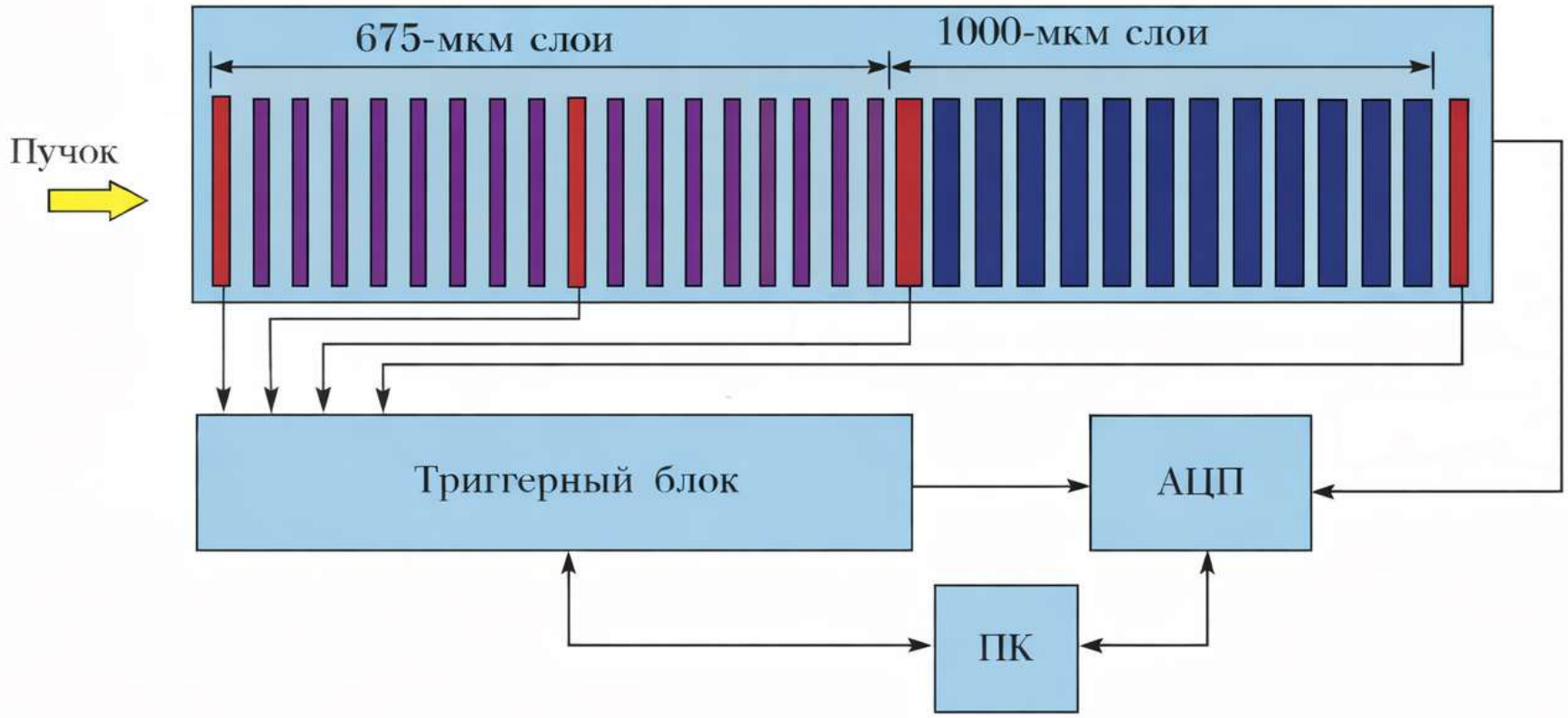
Расчет параметра разделимости изотопов $\frac{(\mu_1-\mu_2)}{\sigma}$ из модельных данных для расстояния между центрами детекторов l=0,3 см для количества слоев N=32, как в предлагаемом прототипе калориметрической системы в НУКЛОН-2 для различных толщин детекторов



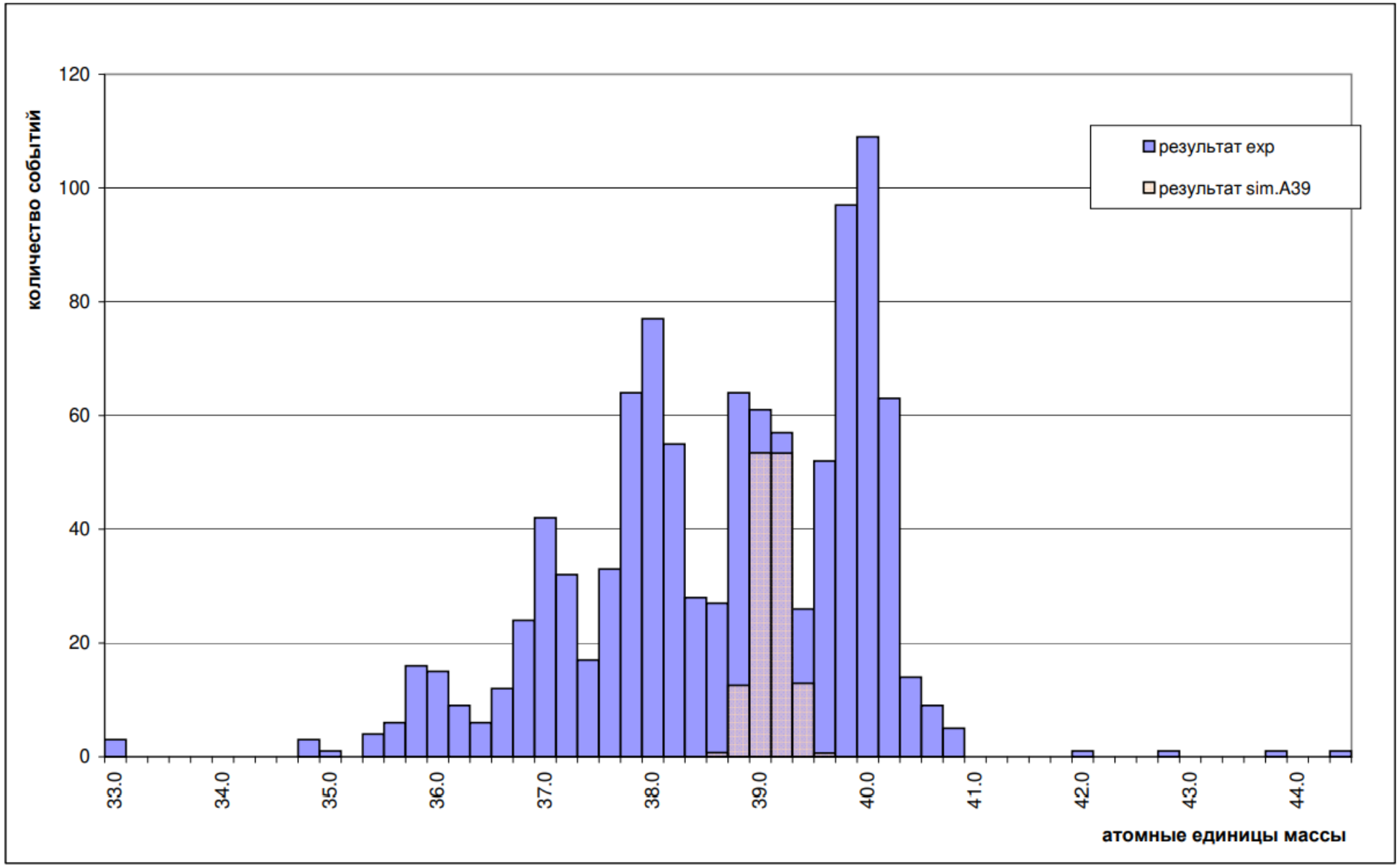
Наилучшее значение параметра разделимости изотопов $\frac{(\mu_1-\mu_2)}{\sigma}$ для различных зарядов.

Z	$\frac{(\mu_1-\mu_2)}{\sigma}_{max}$	N_{max}	d_{max}, мм
54	2,71	65	1,5
50	3,14	80	1
45	3,69	80	1
35	5,03	75	1
25	7,35	57	1
22	8,12	60	1
18	9,79	52	1

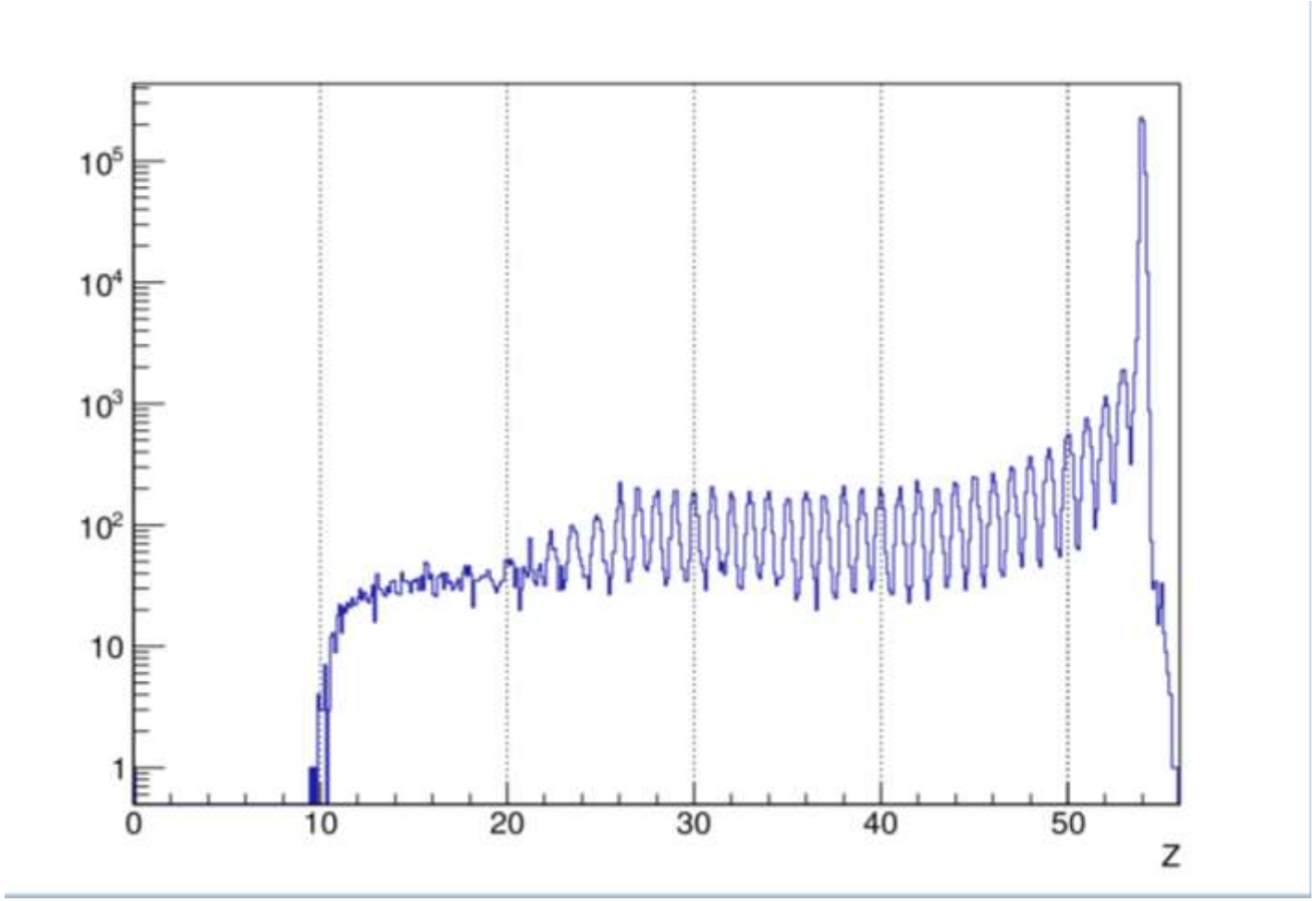
Схематический вид конструкции прототипа калориметра НУКЛОН-2 (2018 г.)



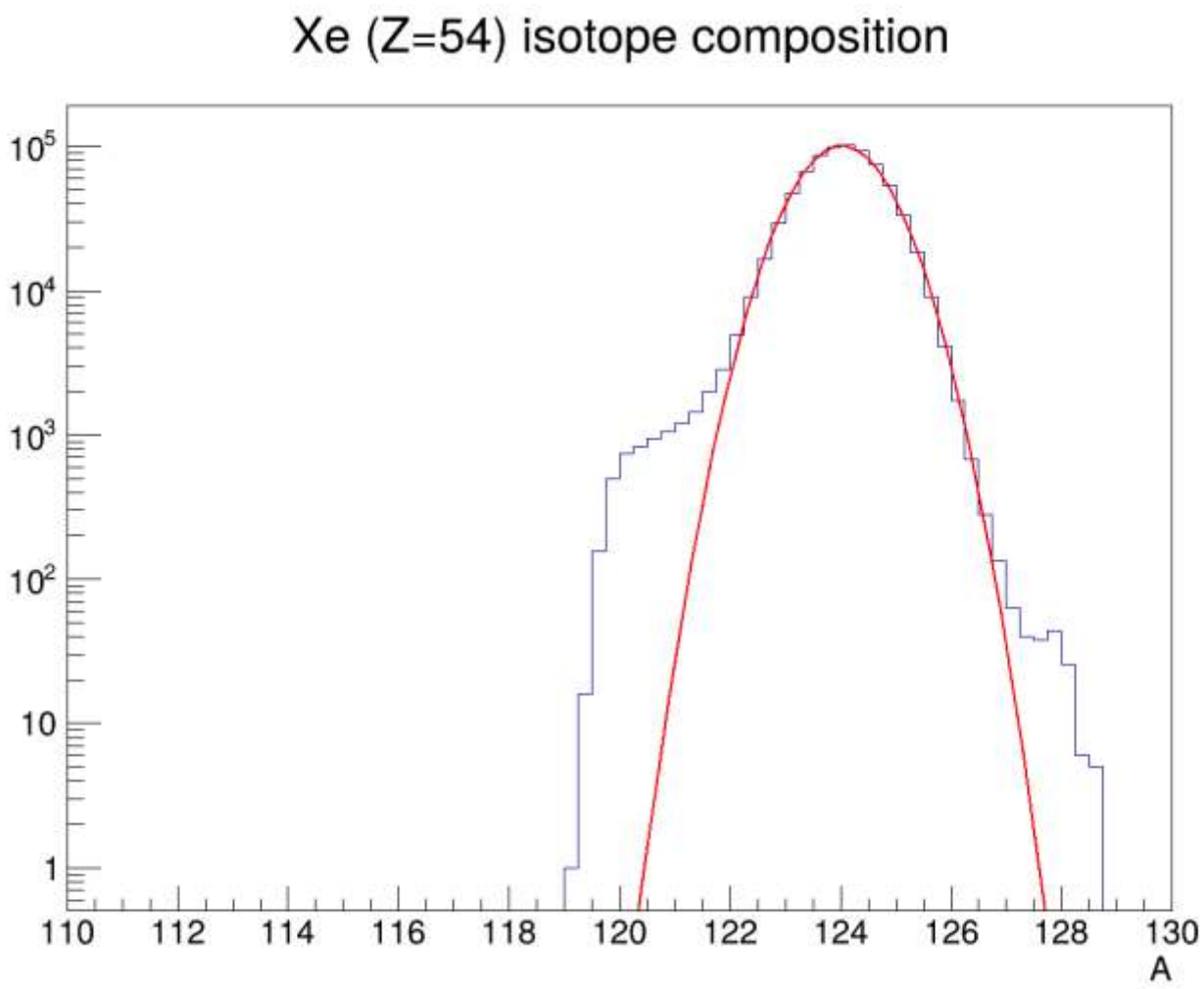
Экспериментальные результаты для изотопов аргона, полученные с использованием прототипа калориметра НУКЛОН-2 (2018 г.)



Зарядовый состав пучка ядер ксенона Z=54, полученный с использованием прототипа калориметра НУКЛОН-2 (2026 г.)



Изотопный состав ядер ксенона полученный с использованием прототипа калориметра НУКЛОН-2 (2026 г.)



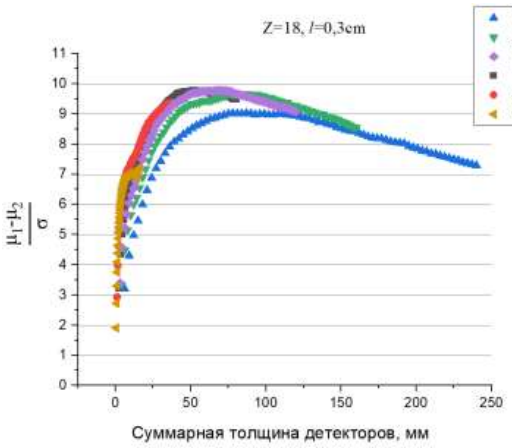
Итоговое изотопное разрешение:
$\sigma_{эксп}$=0.745

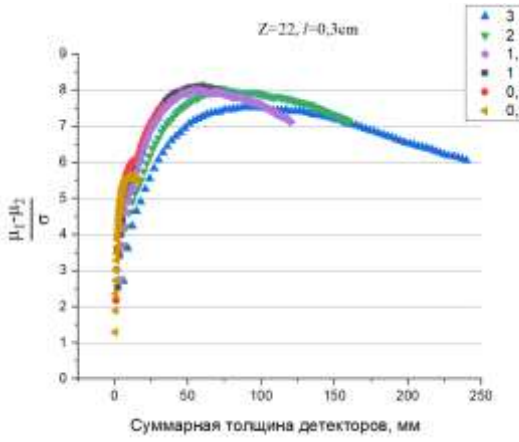
Итоги

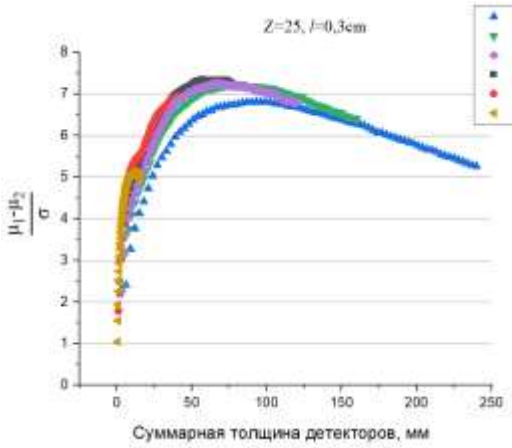
- Оптимальное разрешение получается при толщинах детекторов около 1 мм.
- Согласно результатам моделирования возможно простое (визуальное) разделение соседних изотопов до Z≈50, для больших значений Z требуется применение специальных математических методов, использующих модельное значение ширины массового спектра (фитирование набором гауссиан).
- Предложенная методика была успешно опробована при обработке экспериментальных данных аргона (Z=18) и ксенона (Z=54).

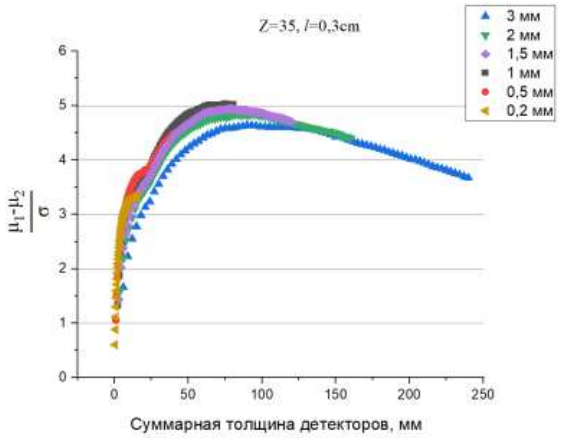
Расчет параметра разделимости изотопов $\frac{(\mu_1-\mu_2)}{\sigma}$ из модельных данных для расстояния между центрами детекторов *l*=0,3 см для различных толщин детекторов

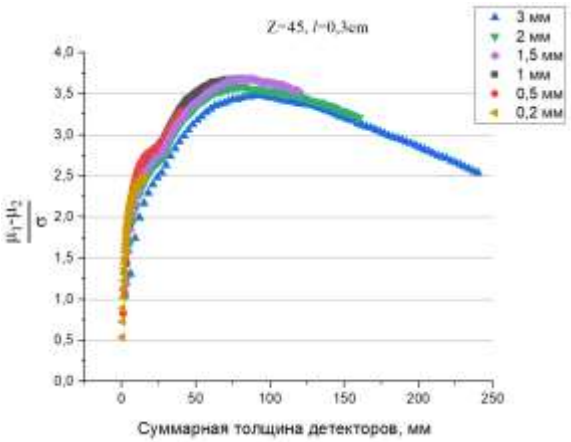
Критерий визуальной разделимости изотопов $\frac{(\mu_1-\mu_2)}{\sigma}>3$

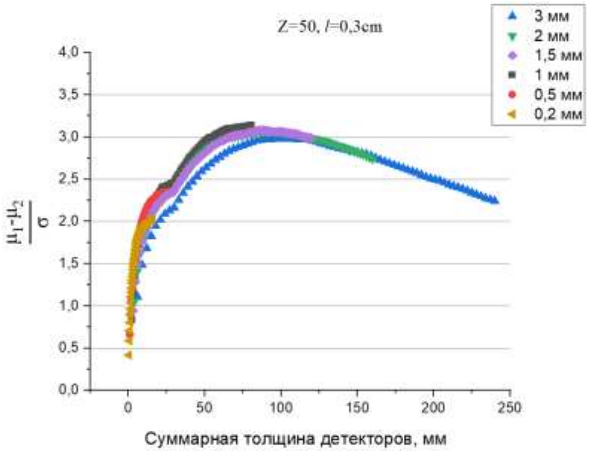


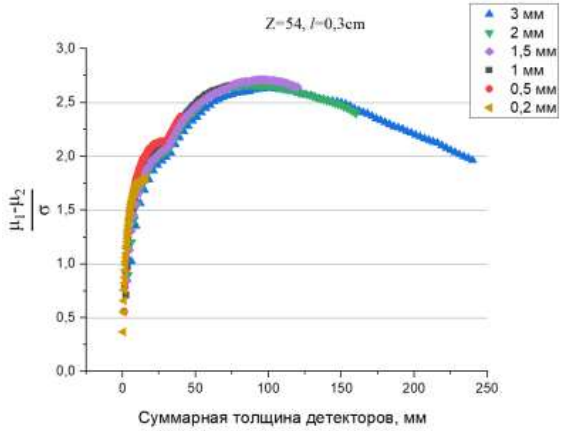




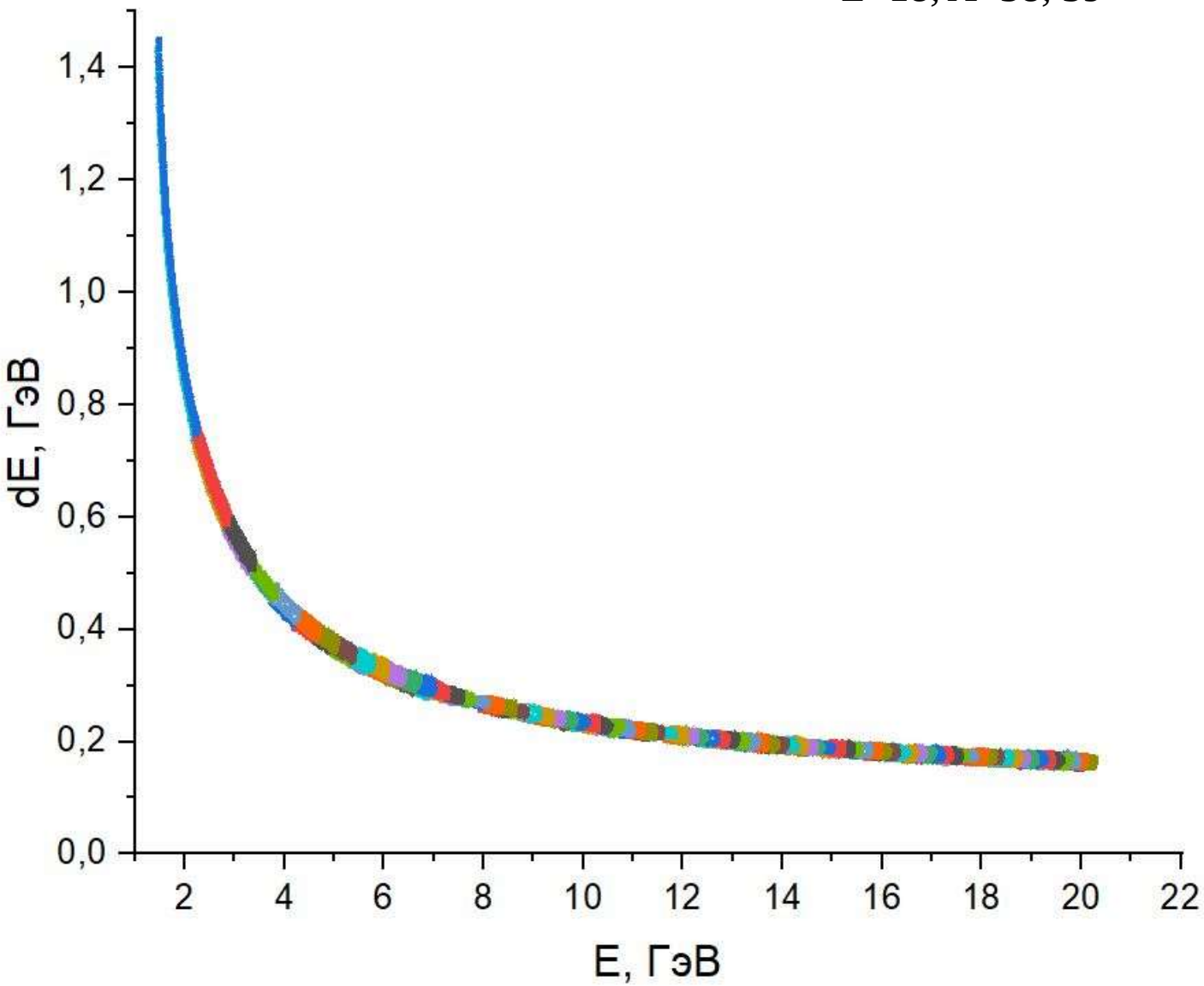


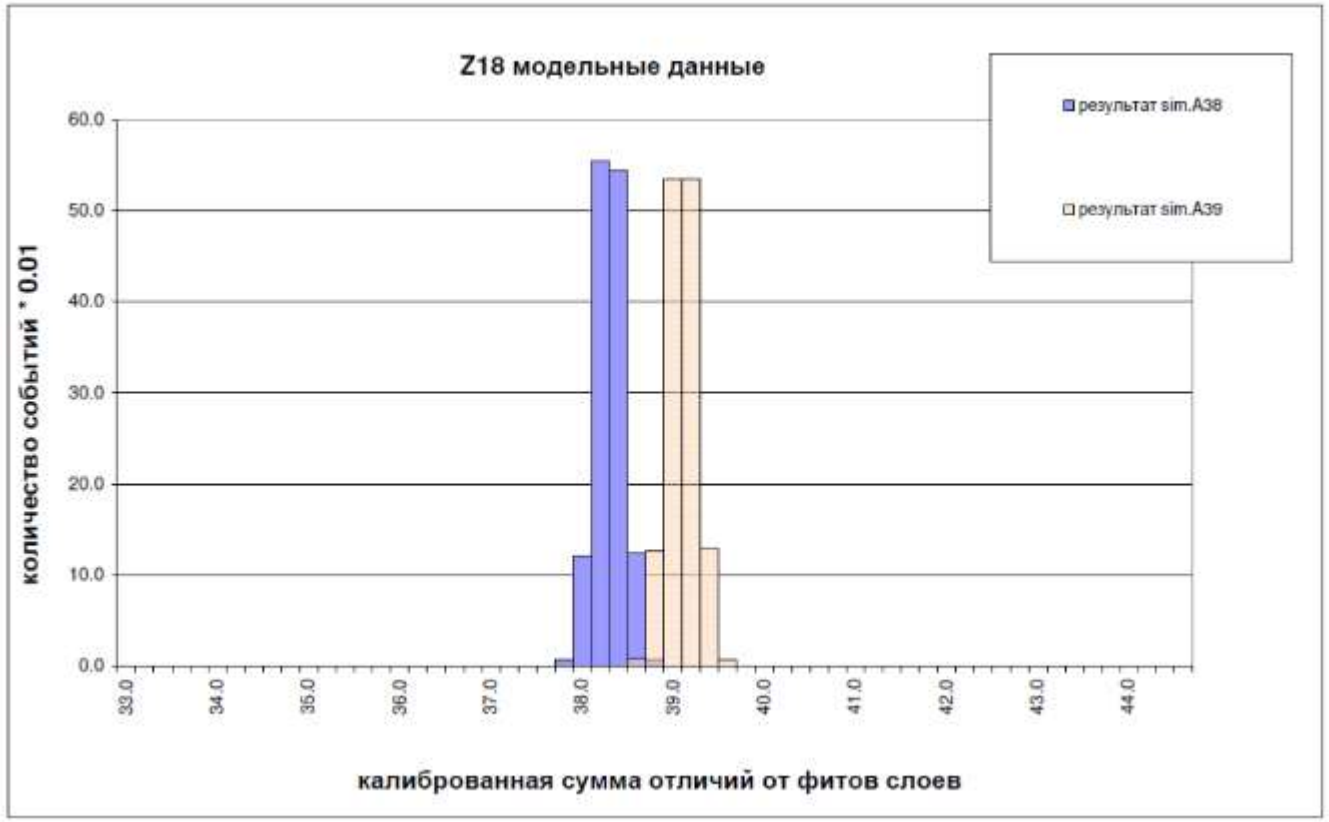






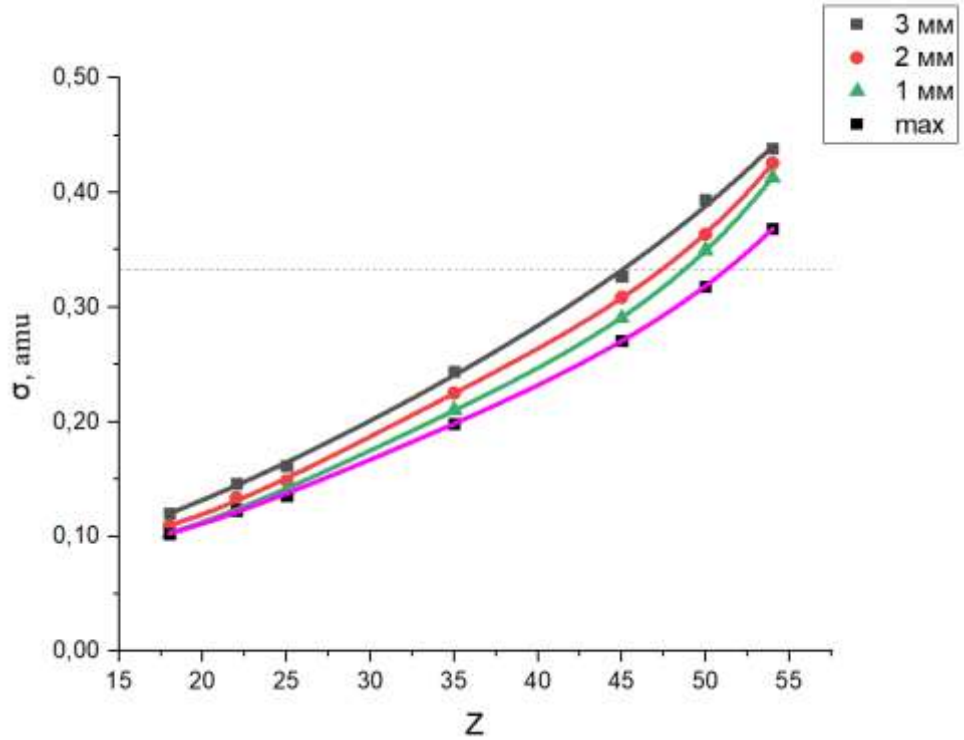
Z=18, A=38, 39



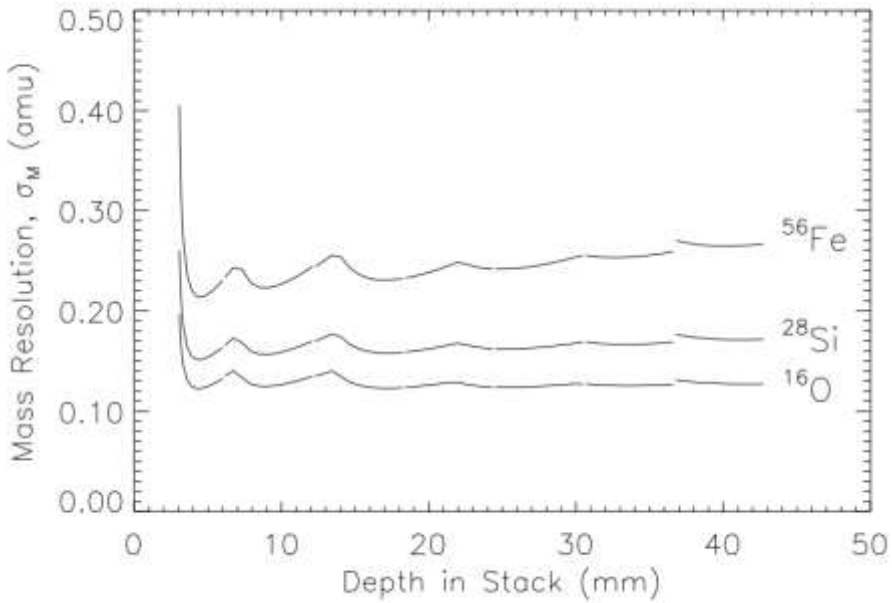

Z18 модельные данные
результат sim.A38
результат sim.A39
количество событий * 0.01
60.0
50.0
40.0
30.0
20.0
10.0
0.0
33.0
34.0
35.0
36.0
37.0
38.0
39.0
40.0
41.0
42.0
43.0
44.0
калиброванная сумма отличий от фитов слоев

Сравнение с CRIS

Расчет массового разрешения изотопов σ из модельных данных для расстояния между центрами детекторов *l*=0,3 см для суммарной толщины слоев D=45 мм, такой же как в эксперименте CRIS

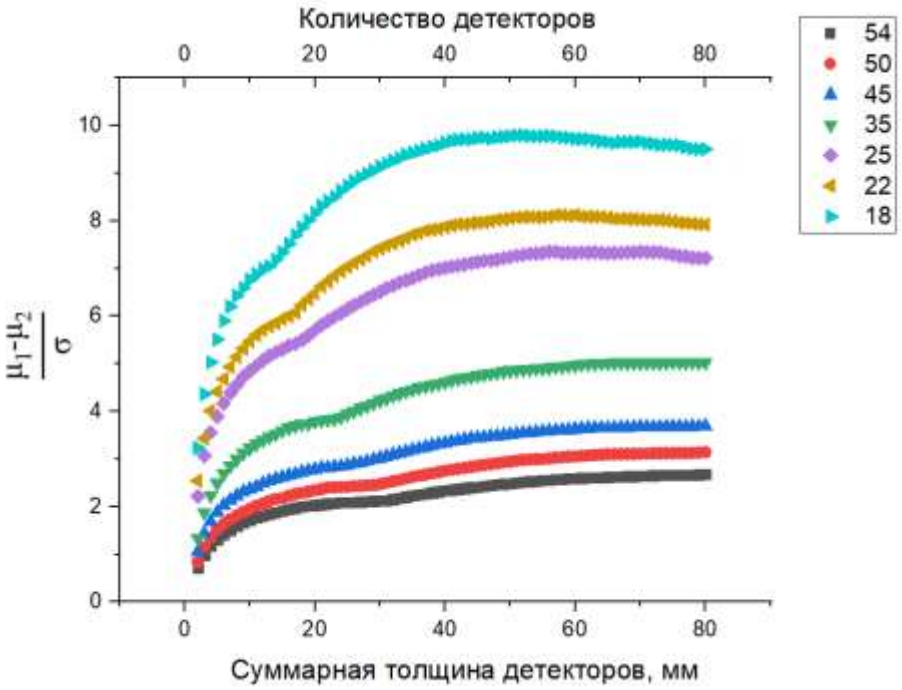


Расчетное ожидаемое массовое разрешение в зависимости от глубины проникновения в кремниевые детекторы, из работ по CRIS

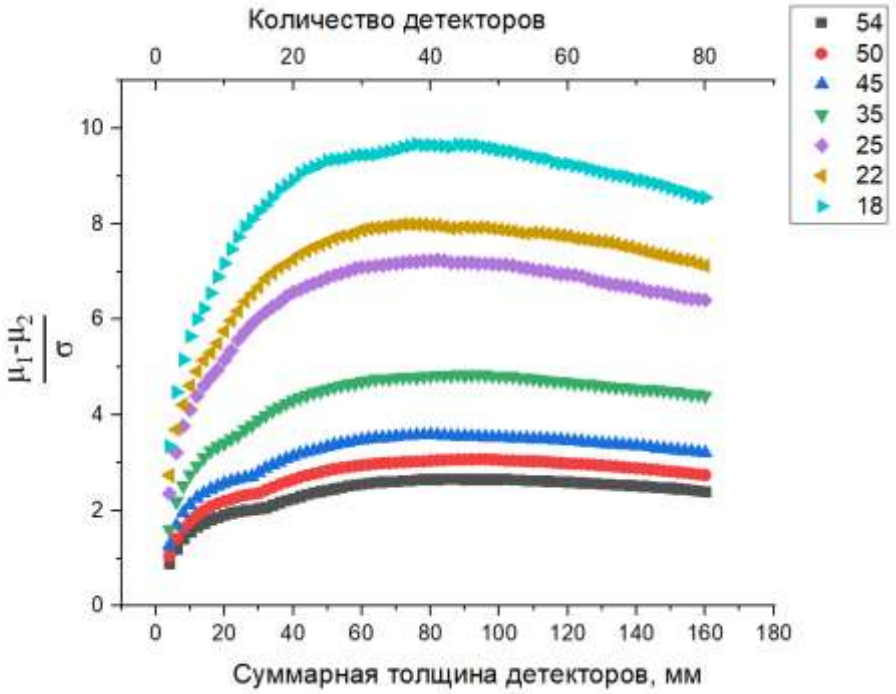


σ, а.е.м, Mn (Z=25), предложенная методика, d=3мм, D=12 мм	0,27 а.е.м
σ, а.е.м, Fe (Z=26), методика CRIS	0,25 а.е.м

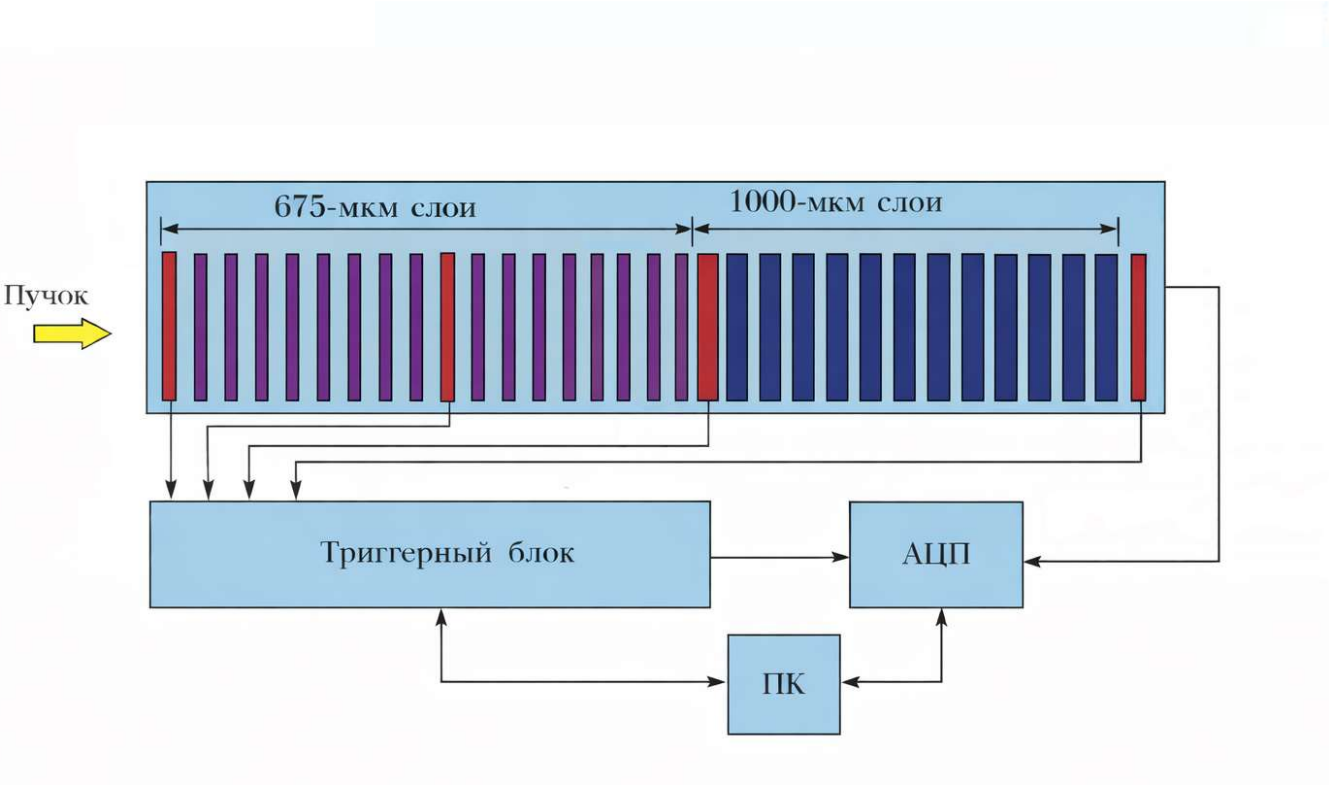
Расчет параметра разделимости изотопов $\frac{(\mu_1-\mu_2)}{\sigma}$ из модельных данных для расстояния между центрами детекторов *l*=0,3 см для толщин детекторов *d*=1 мм (а) и для толщин детекторов *d*=2 мм (б) для различных зарядов



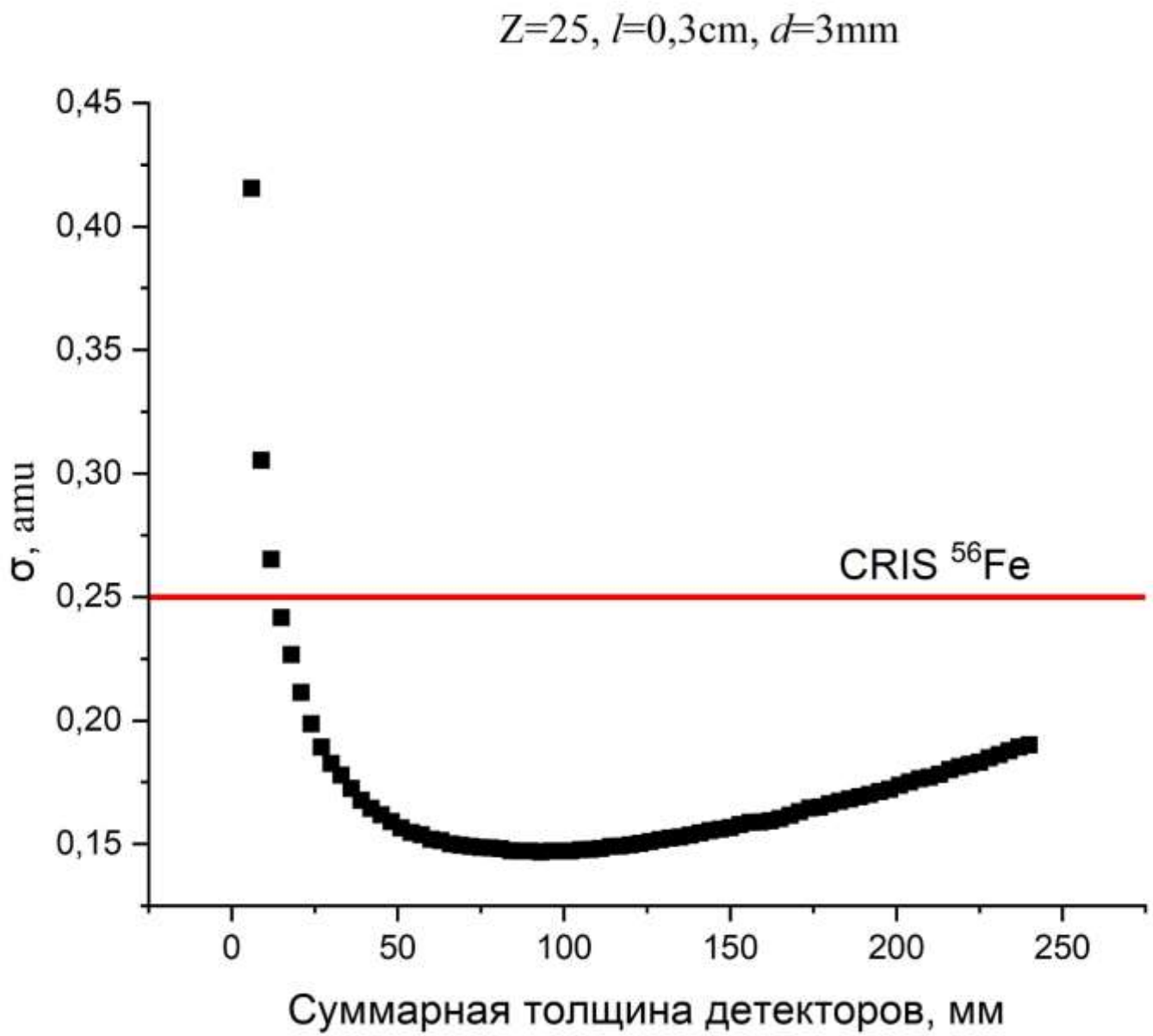
(а)

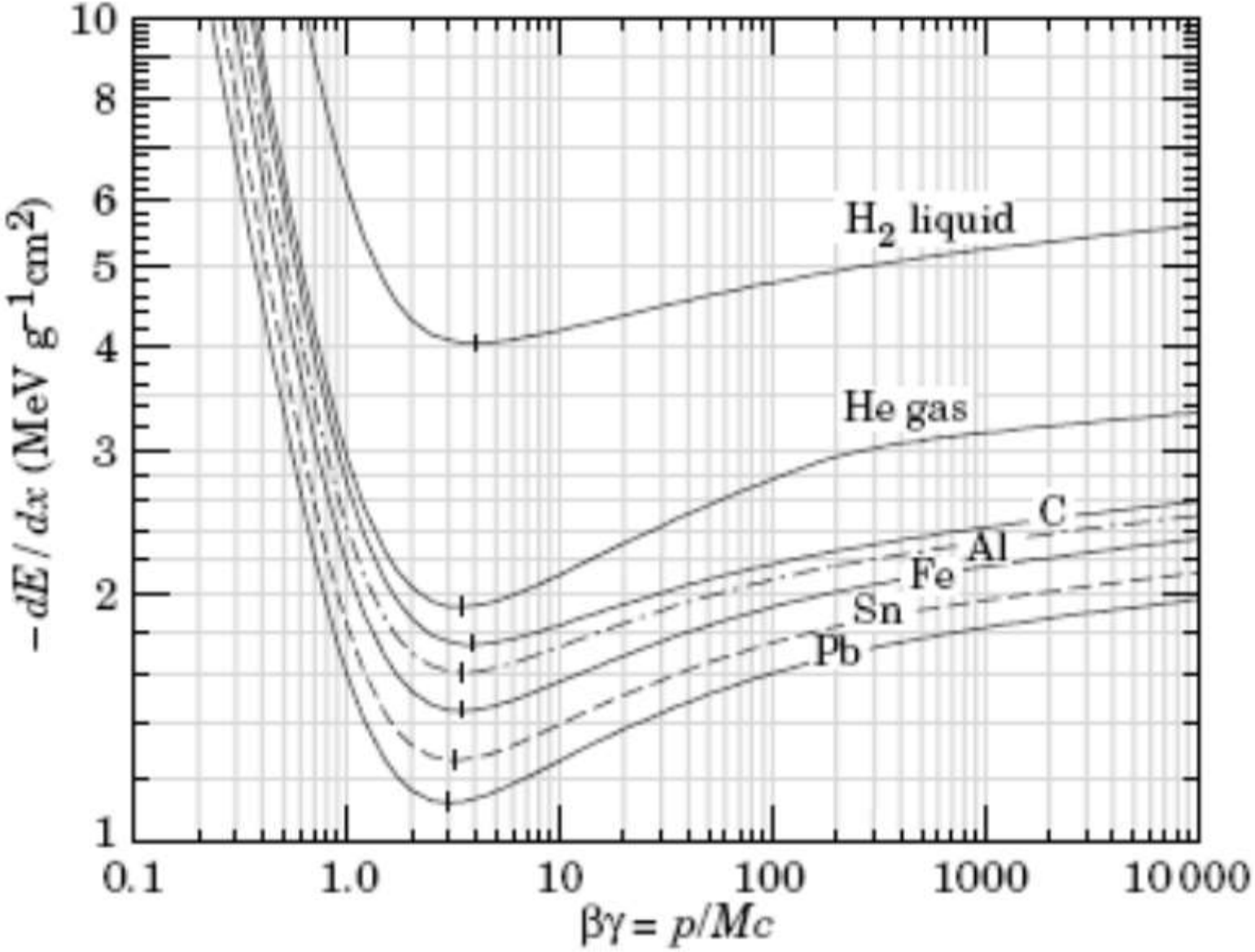


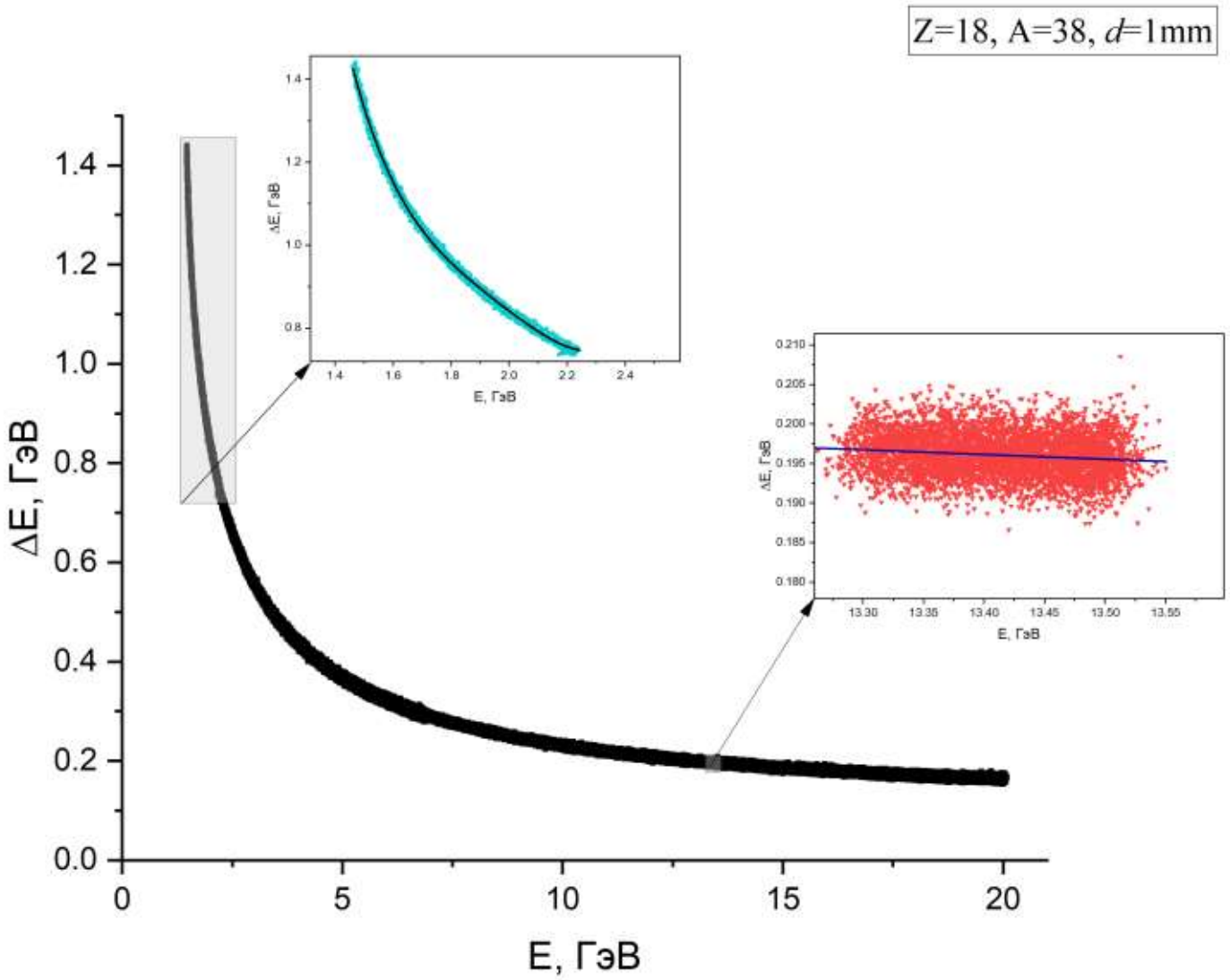
(б)

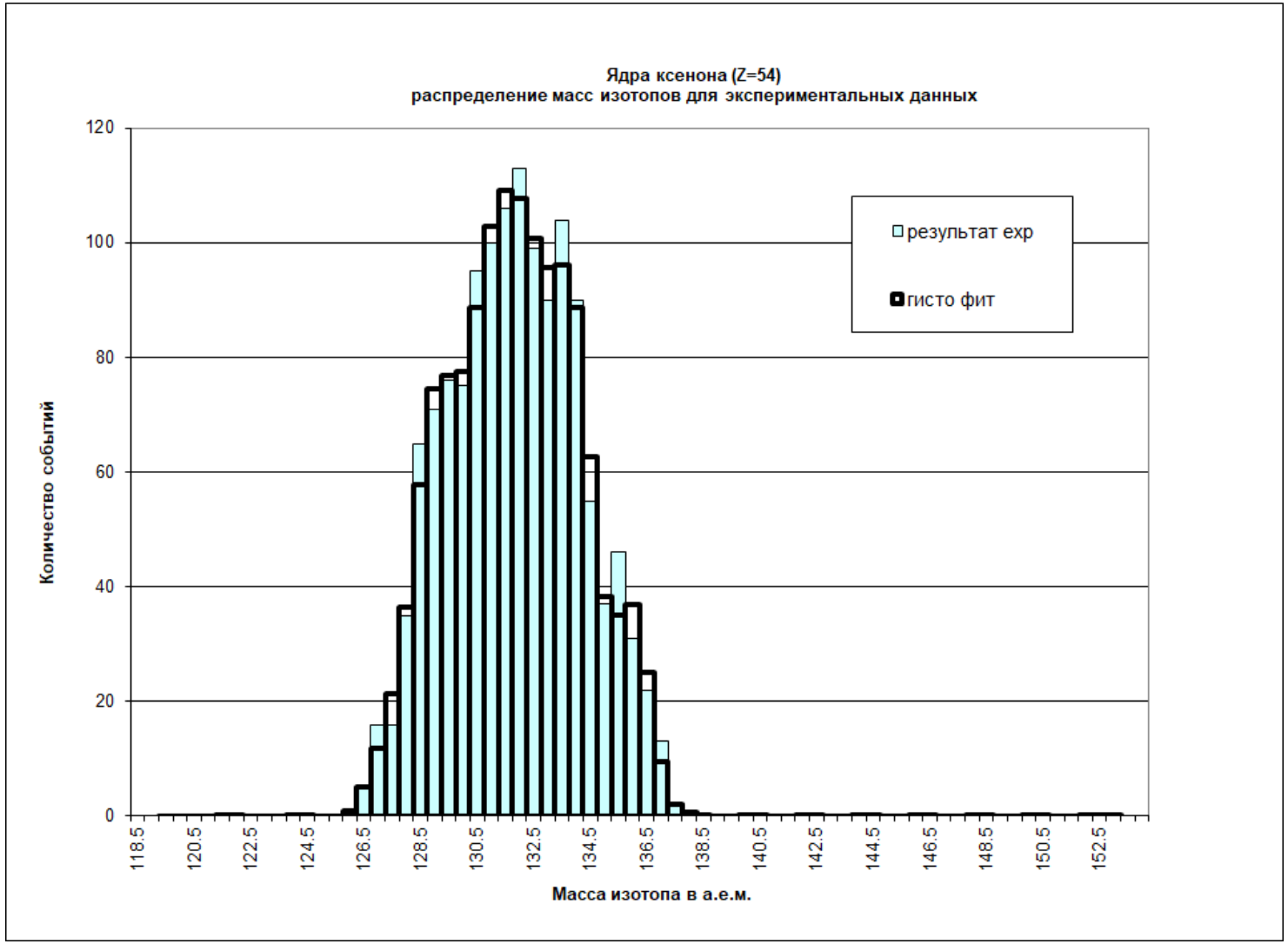


Схематический вид конструкции прототипа калориметра НУКЛОН-2.

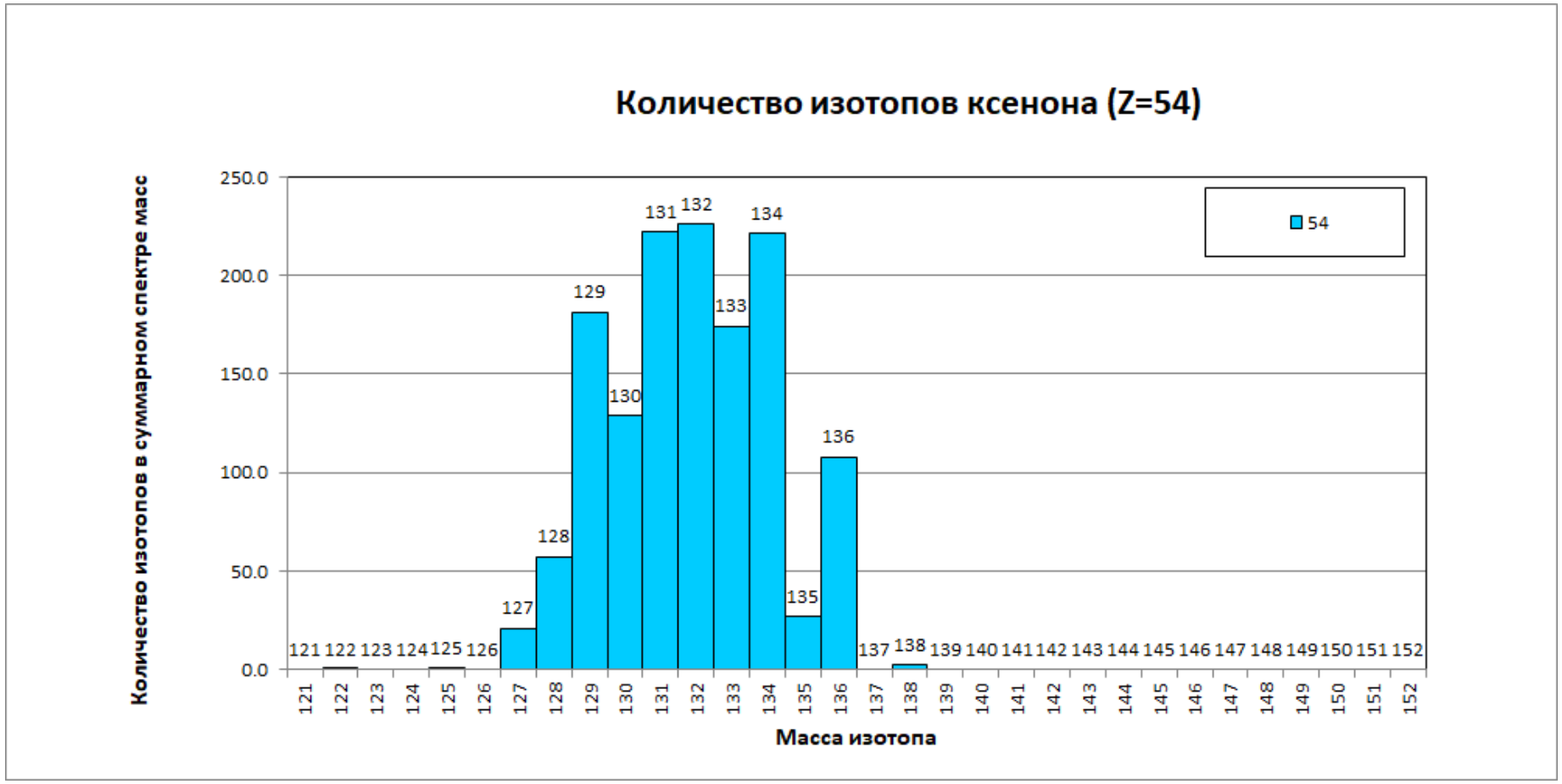

Z=25, l=0,3cm, d=3mm
0,45
0,40
0,35
0,30
0,25
0,20
0,15
σ, amu
CRIS 56Fe
0
50
100
150
200
250
Суммарная толщина детекторов, мм


10
8
6
5
4
3
2
1
$-dE/dx$ (MeV g^{-1}cm^2)
0.1
1.0
10
100
1000
10 000
$\beta\gamma = p/Mc$
H_2 liquid
He gas
C
Al
Fe
Sn
Pb

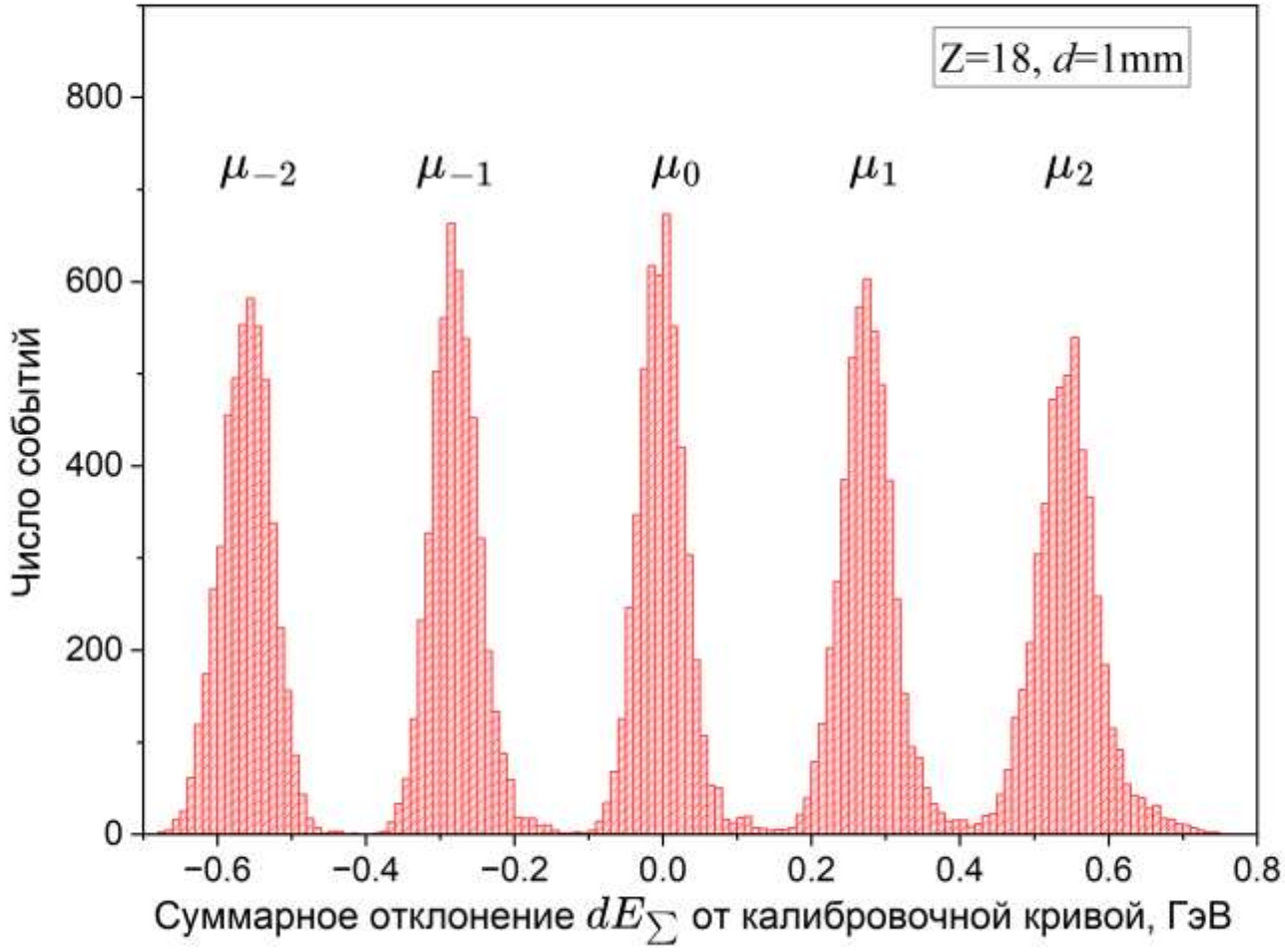

Z=18, A=38, d=1mm
ΔE, ГэВ
E, ГэВ
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4
0
5
10
15
20


Ядра ксенона (Z=54)
распределение масс изотопов для экспериментальных данных
Количество событий
Масса изотопа в а.е.м.
результат exp
гисто фит
0
20
40
60
80
100
120
118.5
120.5
122.5
124.5
126.5
128.5
130.5
132.5
134.5
136.5
138.5
140.5
142.5
144.5
146.5
148.5
150.5
152.5

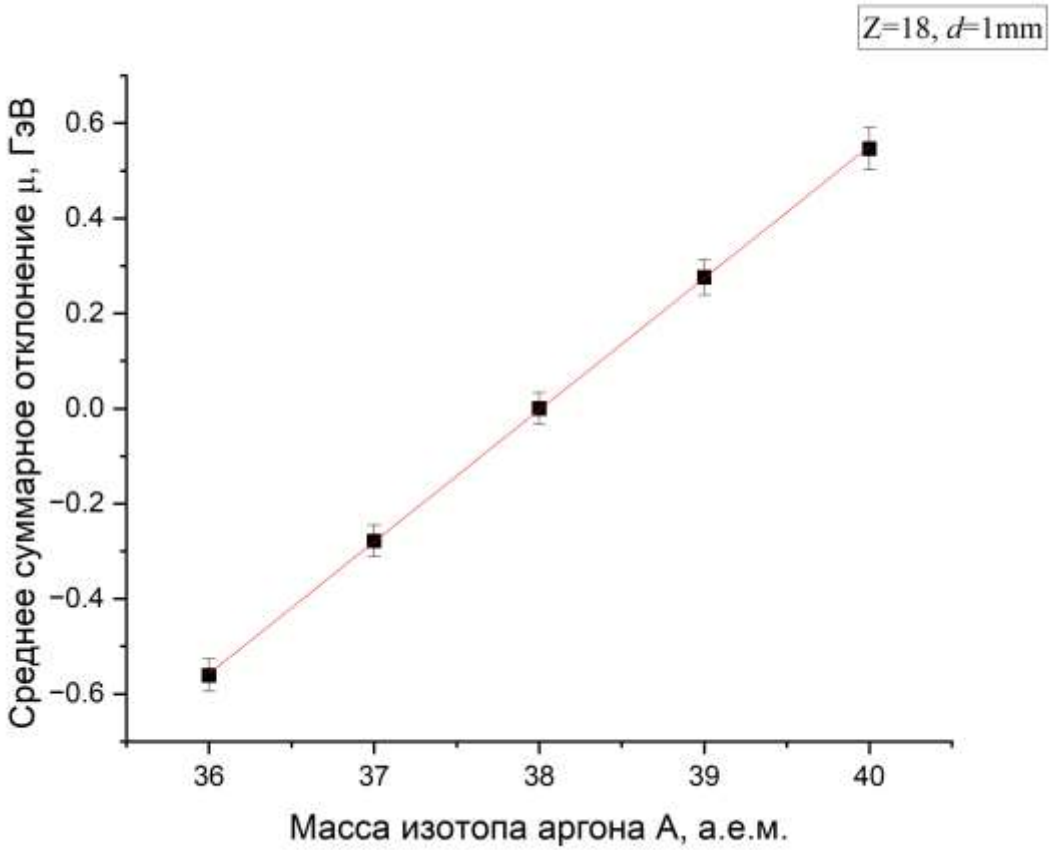
Распределение количества изотопов ксенона по массам после фитирования набором гауссиан



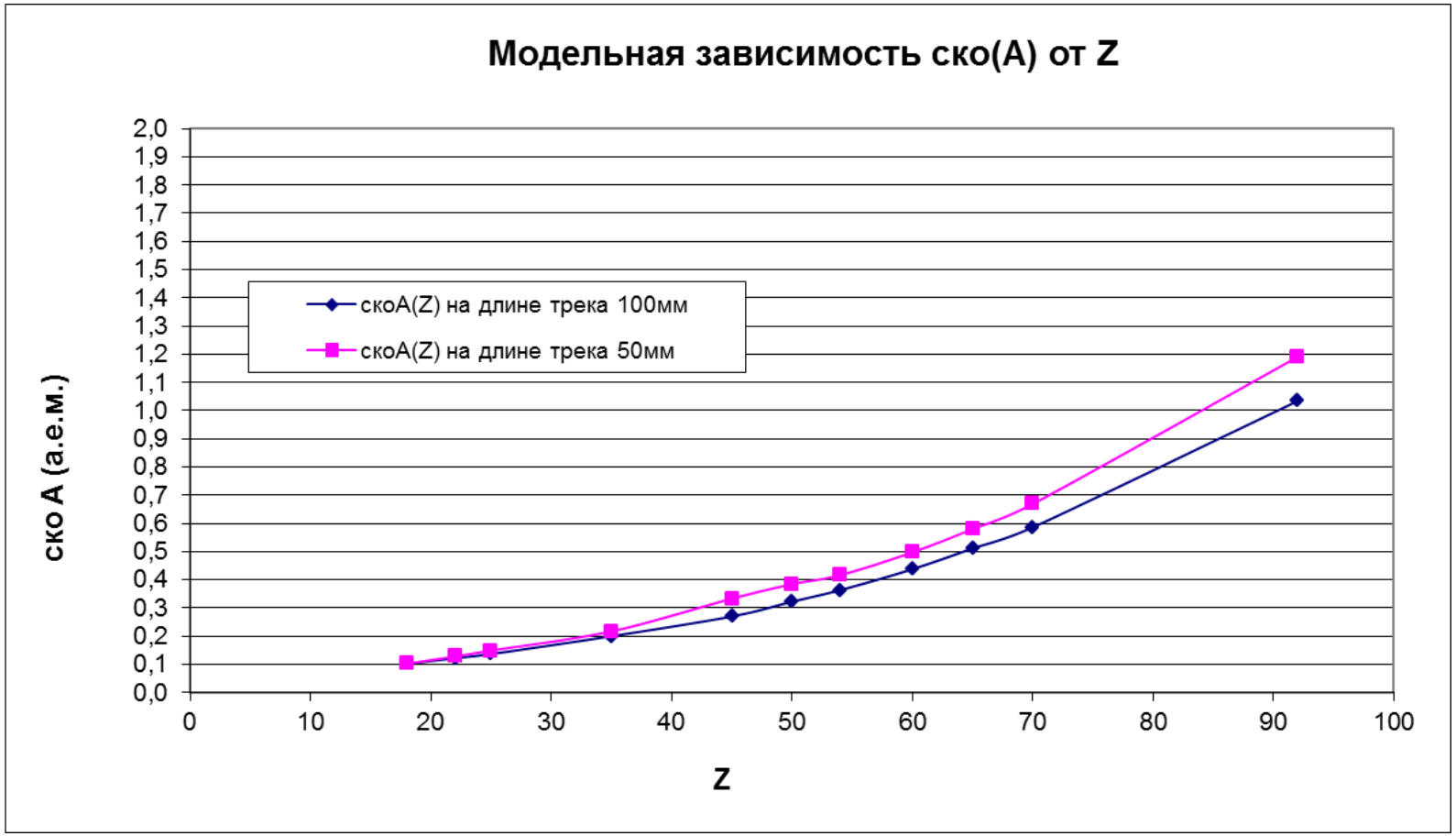
Средняя ошибка аппроксимации составила 13%.



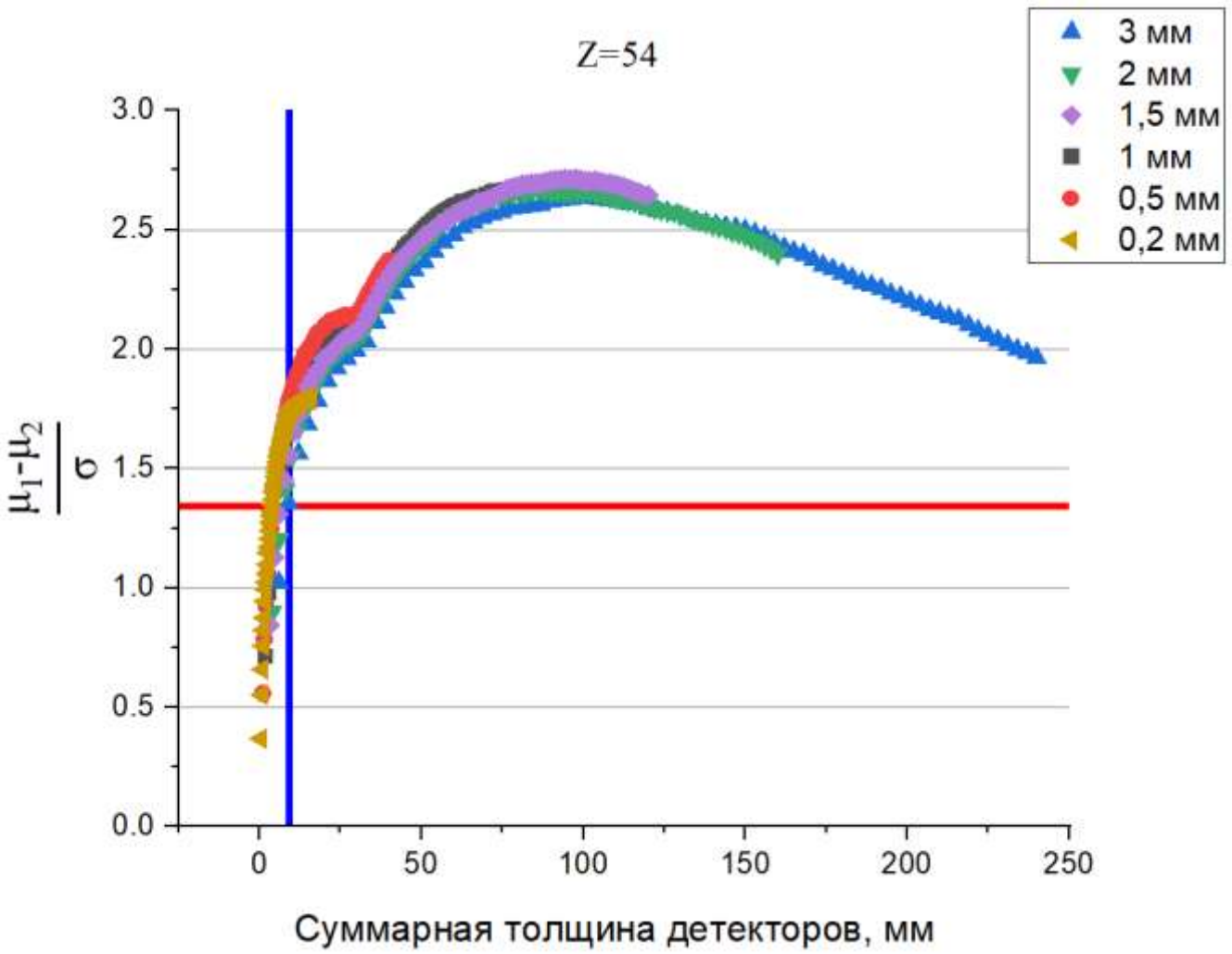
Спектр суммарных отклонений для ядер аргона (Z=18, толщина детекторов *d*=1мм, 80 слой от слоя остановки).



Линейная фитирующая зависимость μ(A) для изотопов аргона.



Модельная зависимость ошибки определения массы изотопа от заряда ядра Z для оптимальной длины трека 100мм и для трека длиной 50мм.



Данные по ксенону полученные в результате моделирования, красная линия – экспериментальное изотопное разрешение, синяя – суммарная толщина реальных детекторов (остановка в 14 слое)