

# **Nuclei produced from $^{238}\text{U}$ irradiated by secondary gamma initiated by electron beam ( $E = 140 \text{ MeV}$ ).**

Brukva A.E.<sup>1</sup>, Khushvaktov J.<sup>1</sup>, Kobets V.V.<sup>1</sup>, Kryachko I.A.<sup>1</sup>,  
Perevoshikov L.L.<sup>1</sup>, Rasulova F.A.<sup>1</sup>, Rozov S.V.<sup>1</sup>, Shakun N.G.<sup>1</sup>,  
Stegailov V.I.<sup>1</sup>, Tran T.N.<sup>1,2</sup>, Tyutyunnikov S.I.<sup>1</sup>, Yuldashev B.S.<sup>1</sup>

e-mail: stegajlov2013@yandex.ru

<sup>1</sup> - Joint Institute for Nuclear Research, Joliot-Curie 6, Dubna, Moscow region, Russia, 141980

<sup>2</sup> - Institute of Physics, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

## **Ядра образующиеся из $^{238}\text{U}$ облучённого вторичным гамма-излучением, инициированным электронным пучком ( $E_{e^-} = 140 \text{ МэВ}$ ).**



**Коллаборация « Энергия + Трансмутация »**

ОИЯИ, Дубна/Санкт-Петербург, 2020 г.

# Содержание

## **Введение**

I. Экспериментально-методическая база

II. Методика определения абсолютной эффективности при измерении гамма-спектров неидеальных образцов в неидеальных условиях.

III. Экспериментальные результаты по выходам продуктов ( $\gamma$ , n) реакций, полученные на мишени моноизотопа  $^{209}\text{Bi}$ . Сравнение с литературой.

IV. Экспериментальные результаты по выходам, полученные на мишени  $^{238}\text{U}$ .

V. Обсуждение полученных результатов.

## **Заключение**

# Введение

Данная работа проводилась в рамках в рамках коллаборации « Энергия + Трансмутация ».

Целью являлась разработка методики определения выходов образовавшихся ядер в облученной мишени и применения этой методики в наших исследованиях.

При обработке гамма-спектров продуктов облучения введено понятие реальной абсолютной эффективности системы, которая содержит неточечный образец с детектором.

С целью подтверждения предложенной методики проведены эксперименты и расчёты по выходам фотоядерных реакций, происходящих в мишени  $^{209}\text{Bi}$  на **конверторе** электронного пучка с энергией 60-100-140-180 МэВ и проведено сравнение с литературными данными.

В качестве реальной задачи нашей коллаборации приводятся результаты экспериментов, связанных с облучением урановой мишени в «поле»( $e^-,\gamma,n^0$ ) конвертора электроного пучка с энергией 140 МэВ. Представлены массовые распределения продуктов деления и выходы ядер, образующихся в мишени  $^{238}\text{U}$ .

# I. Экспериментально-методическая база

В нейтронном поле,  
полученном с помощью  
**Фазотрона**  
(протоны с энергией  
660 МэВ,  $10^{13} \text{ p}^+ / (\text{см}^2 \cdot \text{с})$   
ток  $\sim 1 \text{ мкА}$ )

В нейтронном поле,  
полученном с помощью  
**Нуклотрона**  
(дейтроны с энергией  
1-8 ГэВ,  $\alpha$ -частицы,  
 $\text{Li}^{6+}$ ,  $\text{C}^{12+}$ , и др.)

Исследования  
трансмутации в  
рамках проекта  
**«Энергия и  
трансмутация»**

В поле тормозного  
излучения, полученном  
с помощью **ЛИНАК-200**  
(электроны с энергией  
20-200 МэВ)

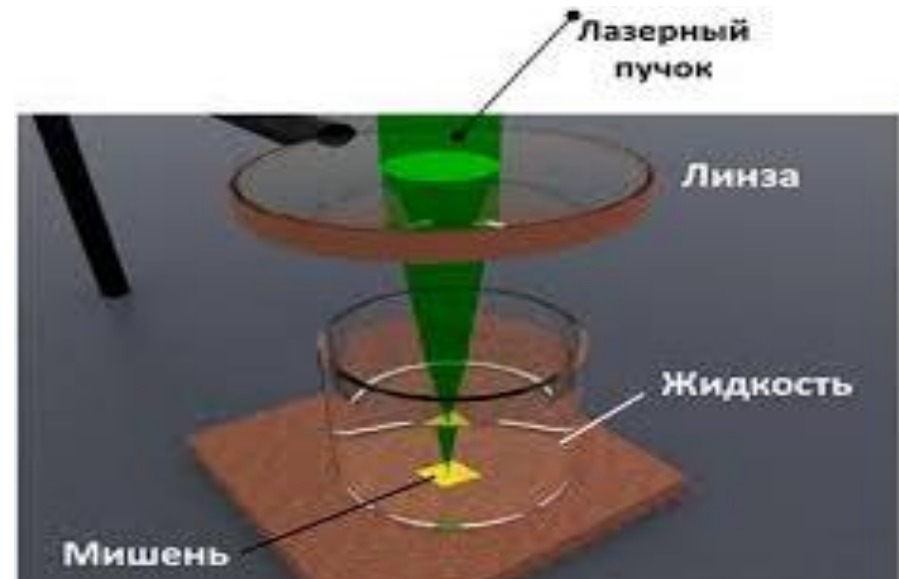
В поле  
электромагнитного  
излучения, полученном  
с помощью **Nd-лазера**  
(1064 нм, 700 мДж в  
импульсе)



**Протонный ускоритель ФАЗОТРОН в ЛЯП    Ускоритель НУКЛОТРОН в ЛФВЭ**



**Линейный ускоритель ЛИНАК-200 в ЛЯП**



**Nd-лазер в ИОФАН (Москва)**

# Детекторы гамма-излучения

ORTEC HPGe

ORTEC Planar HPGe

PC

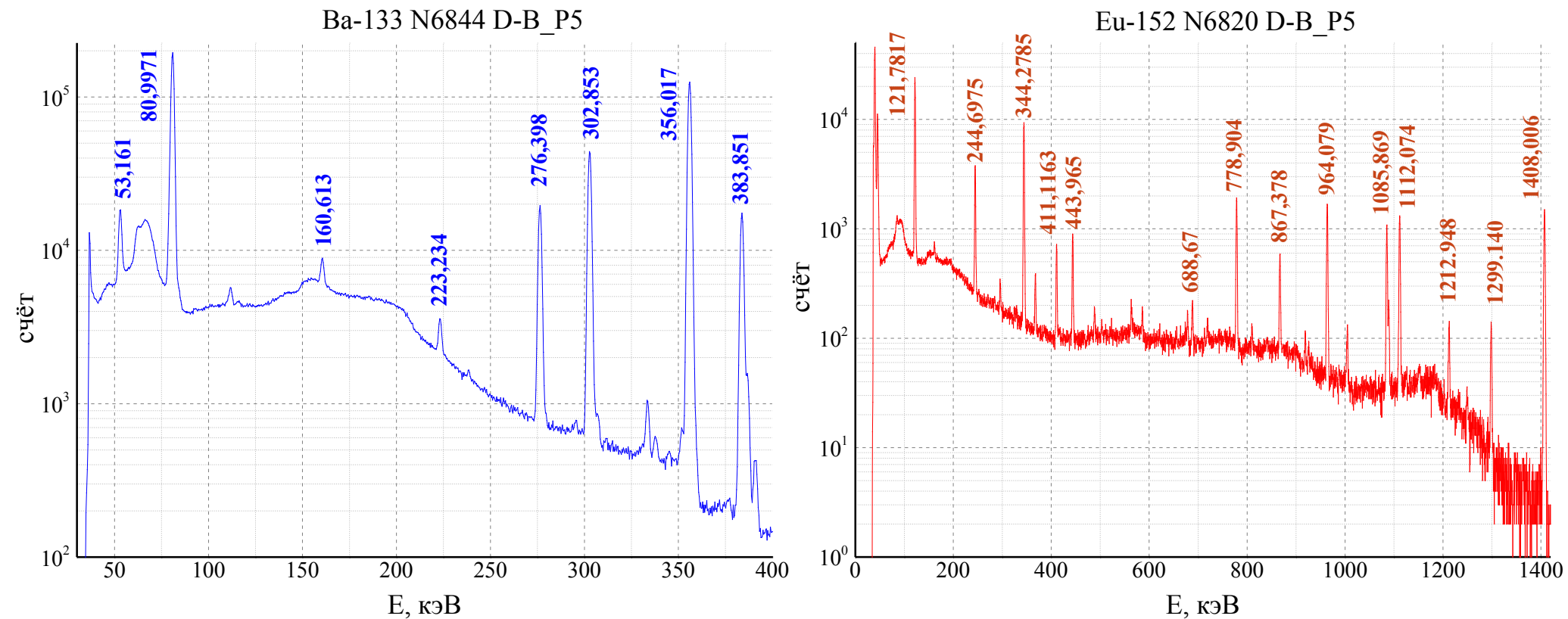
Наша коллаборация располагает 10 HPGe и 2 Si гамма-детекторами

ПО для регистрации и обработки гамма-спектров:

- ORTEC MAESTRO 6.08 (регистрация и первичная обработка)
- Deimos 3.5 (основная программа для обработки и разделения мультиплетных гамма-линий)
- Origin 9.0 (финальная обработка и визуализация)

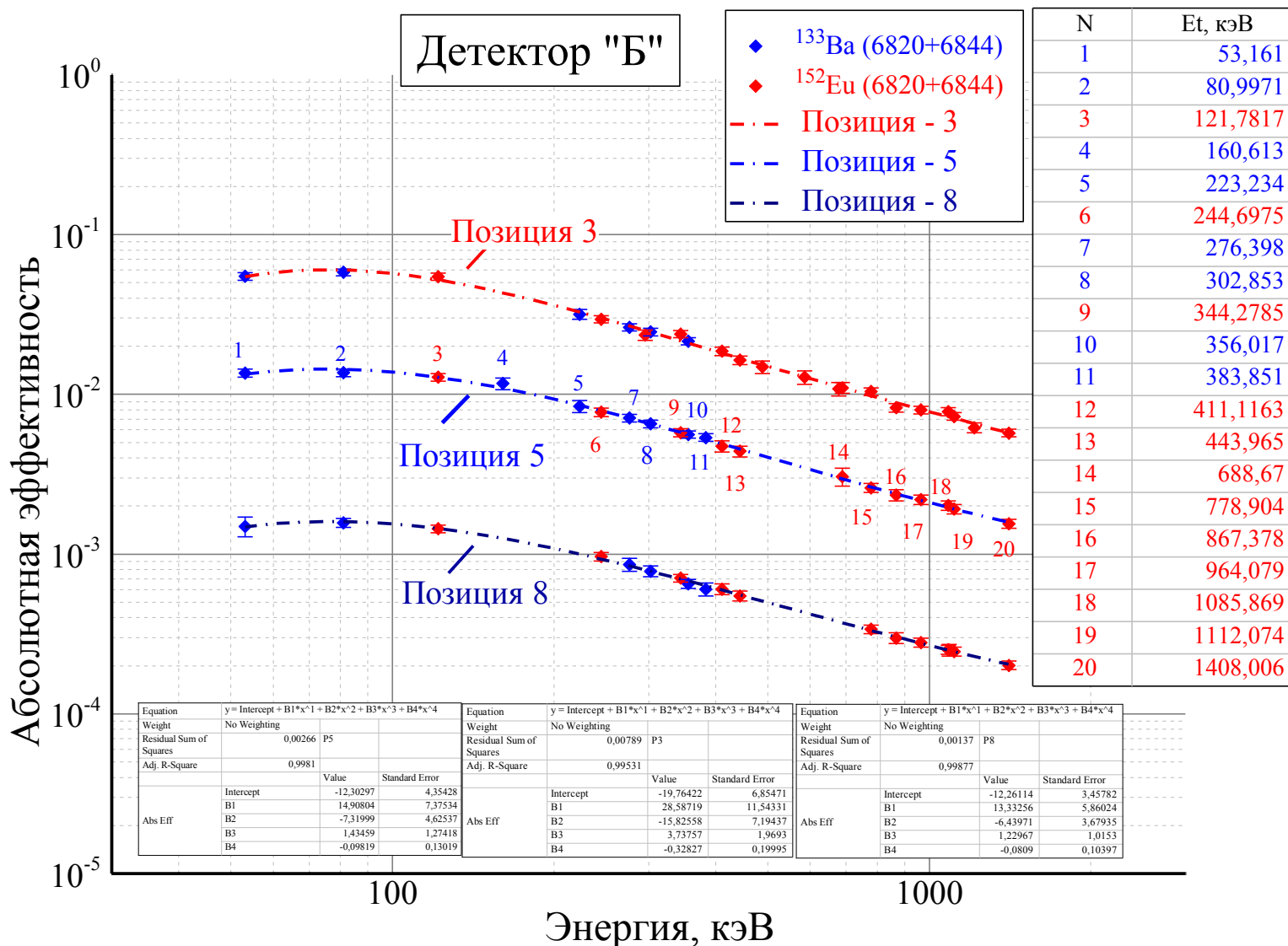
**Рис.1. Комната измерения облученных мишеней:  
детекторы и аппаратура**

# Спектры точечных источников ОСГИ: Ва-133, Eu-152



**Рис.2. Спектры стандартных источников на детекторе «Б», позиция – 5.**

# «Идеальная» (по ОСГИ) абсолютная эффективность регистрации гамма-квантов



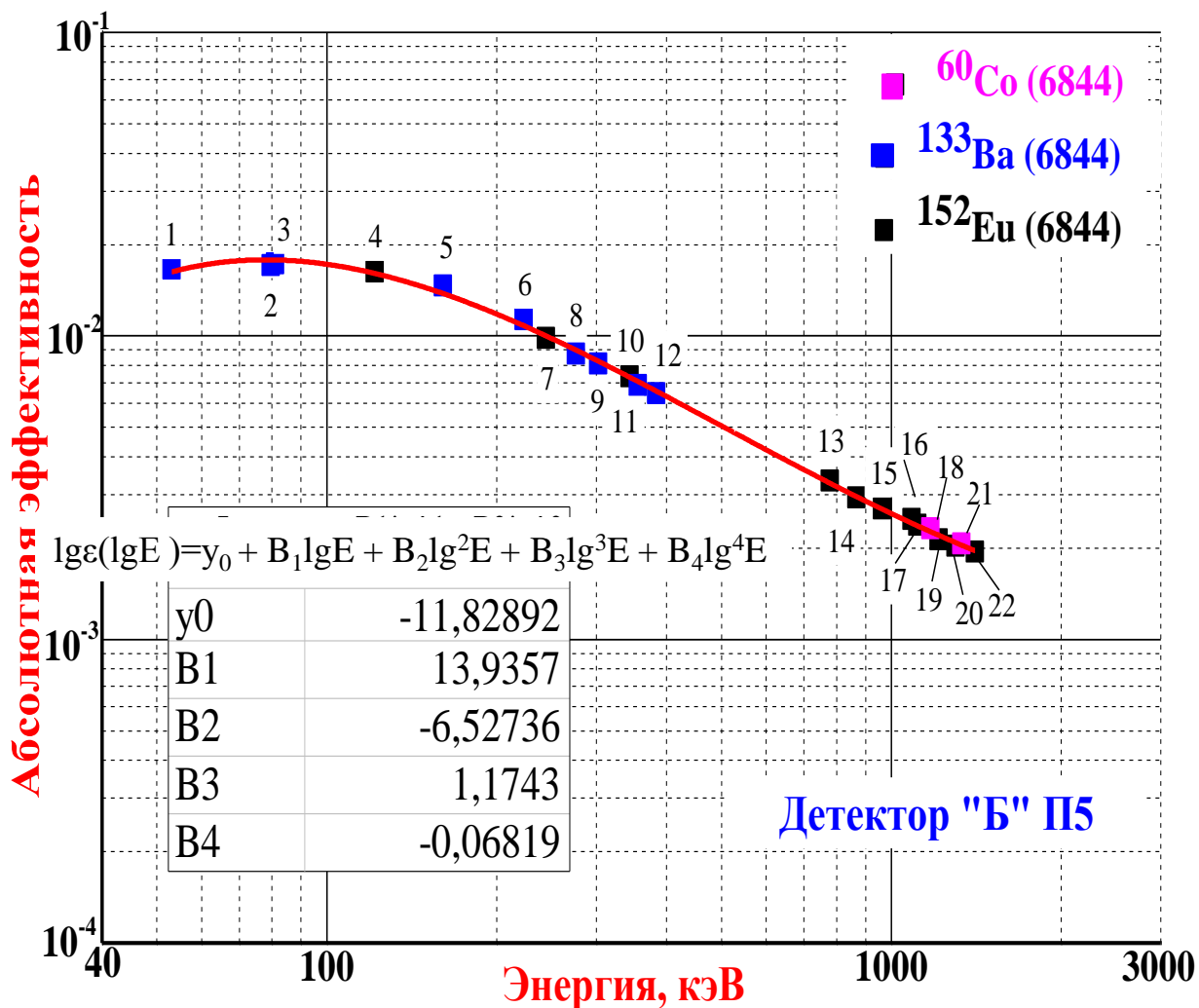
$$\varepsilon_{(E=E_i)} = \frac{S_i}{A \cdot t \cdot I_i / 100}$$

$S_i$  – площадь фотопика данной энергии;  
 $t$  – время измерения;  
 $A$  – активность;  
 $I_i$  – процентный выход  $\gamma$ -квантов данной энергии.

**Рис.3. Зависимость эффективности детектора от энергии, полученная с помощью набора ОСГИ**



# «Идеальная» (по ОСГИ) абсолютная эффективность регистрации ГАММА-КВАНТОВ



$$\varepsilon(E=E_i) = \frac{S_i}{A \cdot t \cdot I_i / 100}$$

$S_i$  – площадь фотопика данной энергии;

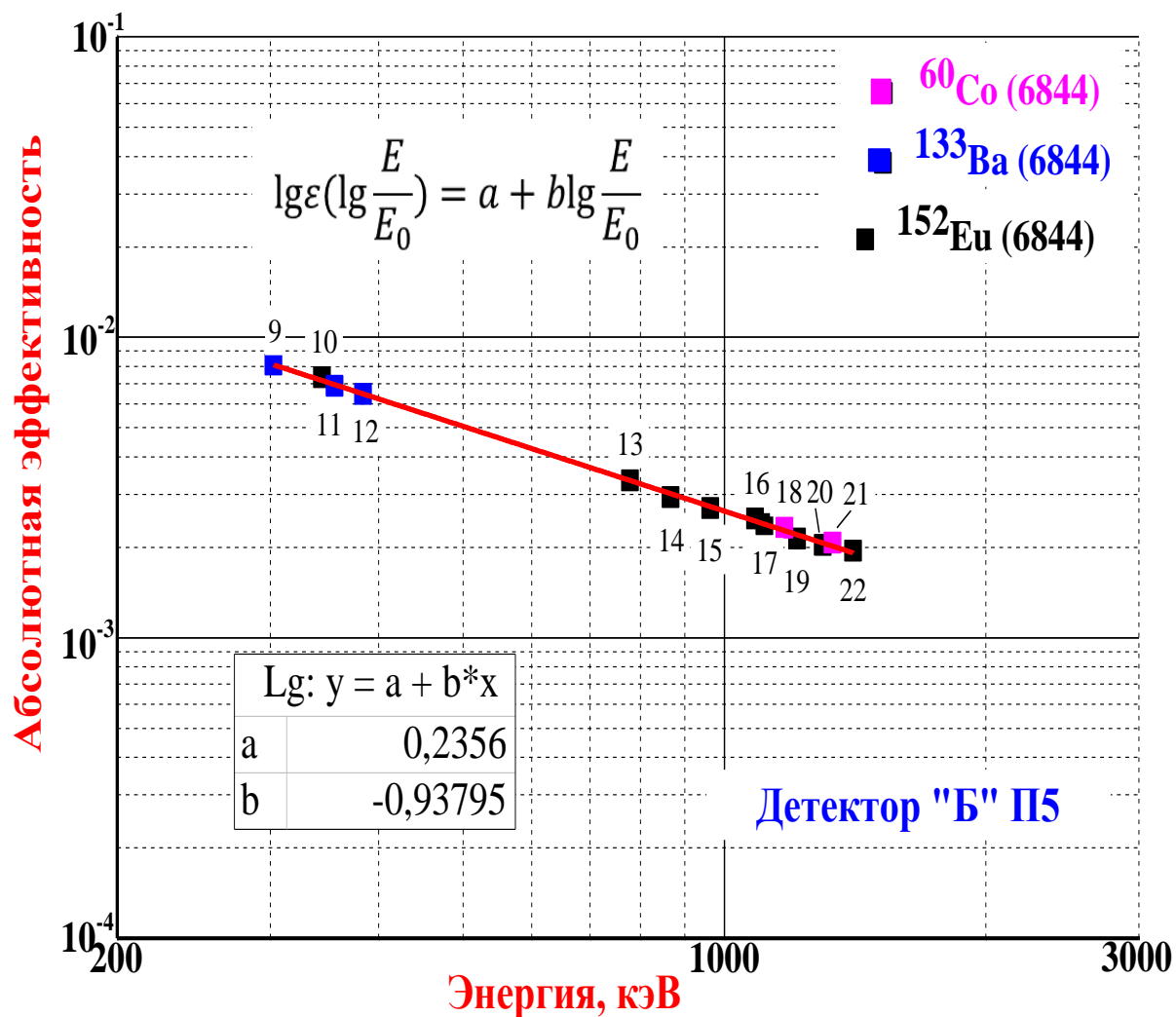
$t$  – время измерения;

$A$  – активность;

$I_i$  – квантовый выход  $\gamma$ -квантов данной энергии

№	E, кэВ	
1	53,16	12 383,85
2	79,61	13 778,9
3	80,99	14 867,37
4	121,78	15 964,08
5	160,61	16 1085,87
6	223,23	17 1112,07
7	244,69	18 1173,24
8	276,39	19 1212,95
9	302,85	20 1299,14
10	344,28	21 1332,5
11	356,02	22 1408

Рис.4. Зависимость эффективности детектора от энергии, полученная с помощью набора ОСГИ



№	E, кэВ
9	302,85
10	344,28
11	356,02
12	383,85
13	778,9
14	867,37
15	964,08
16	1085,87
17	1112,07
18	1173,24
19	1212,95
20	1299,14
21	1332,5
22	1408

**Рис.5. Зависимость эффективности в области жестких энергий, полученная с помощью набора ОСГИ**

## II. Методика определения *реальной* абсолютной эффективности при измерении гамма-спектров неидеальных образцов в неидеальных условиях.

### Параметры ОСГИ

Общая толщина активной части с двумя плёнками - **0,1 мм**.

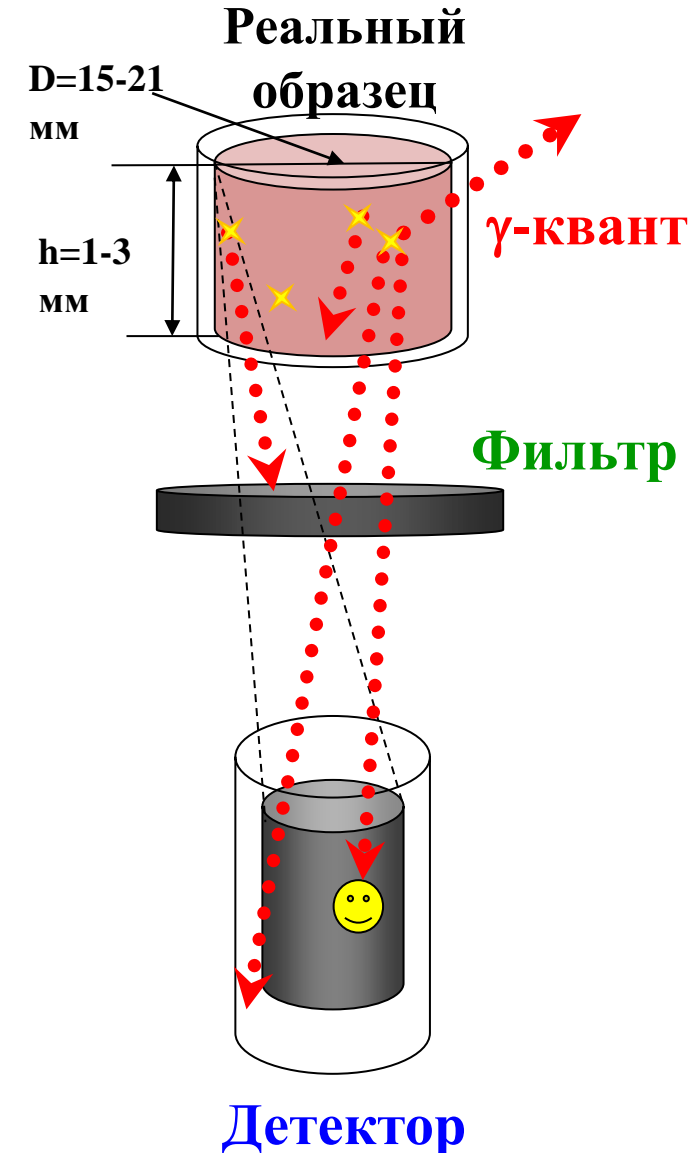
Диаметр активной части не более **3 мм**.

В наших исследованиях используются мишени толщиной **1-3 мм** (примерно в **10-30** раз толще чем ОСГИ).

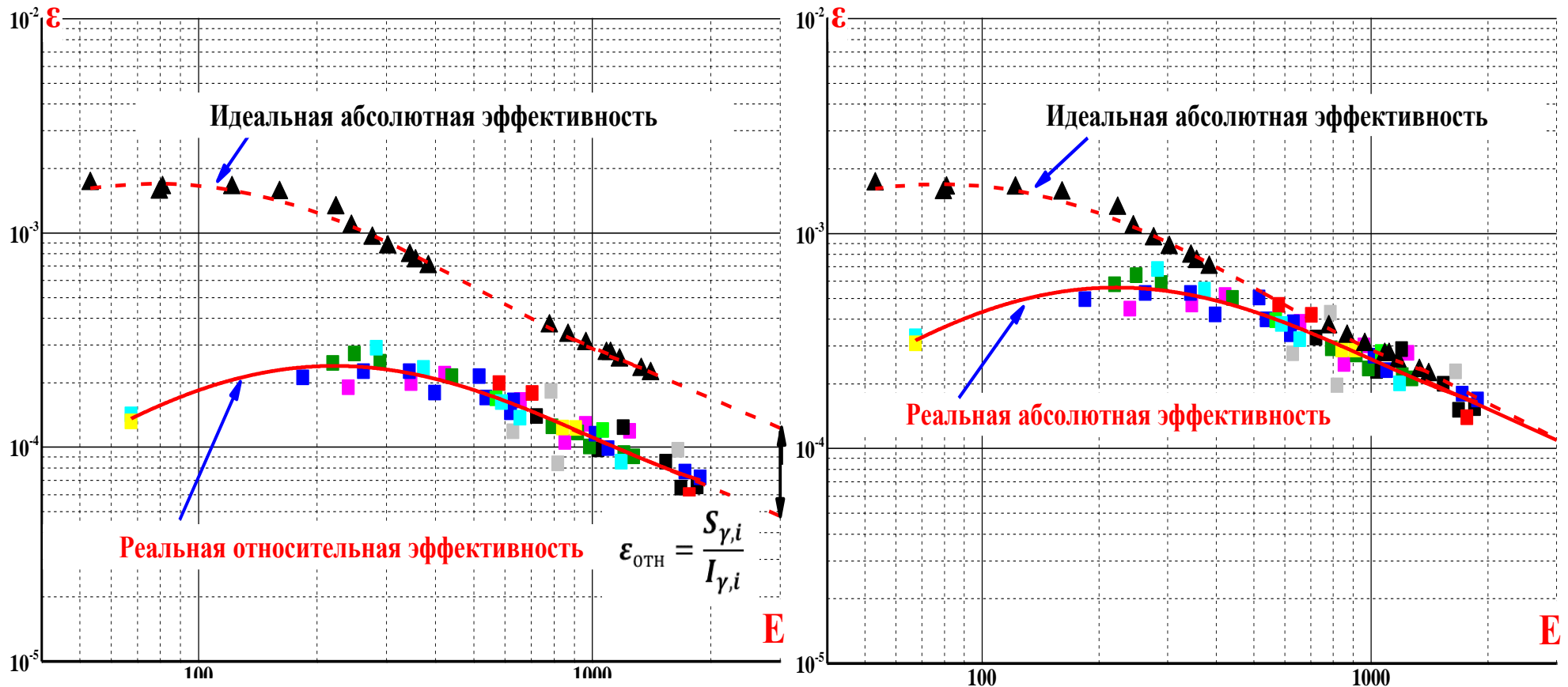
Диаметр мишени **15-21 мм** (в **5-7** раз больше чем ОСГИ).

### Три основные проблемы реальных образцов:

- неточечность;
- самопоглощение;
- необходимость фильтрации излучения в рентгеновской части спектра.



# Алгоритм определения реальной абсолютной эффективности



Детектор "Б" П5

Рис.6. Пример положения идеальной абсолютной эффективности с:  
а) реальной **относительной** эффективностью; б) реальной **абсолютной** эффективностью.

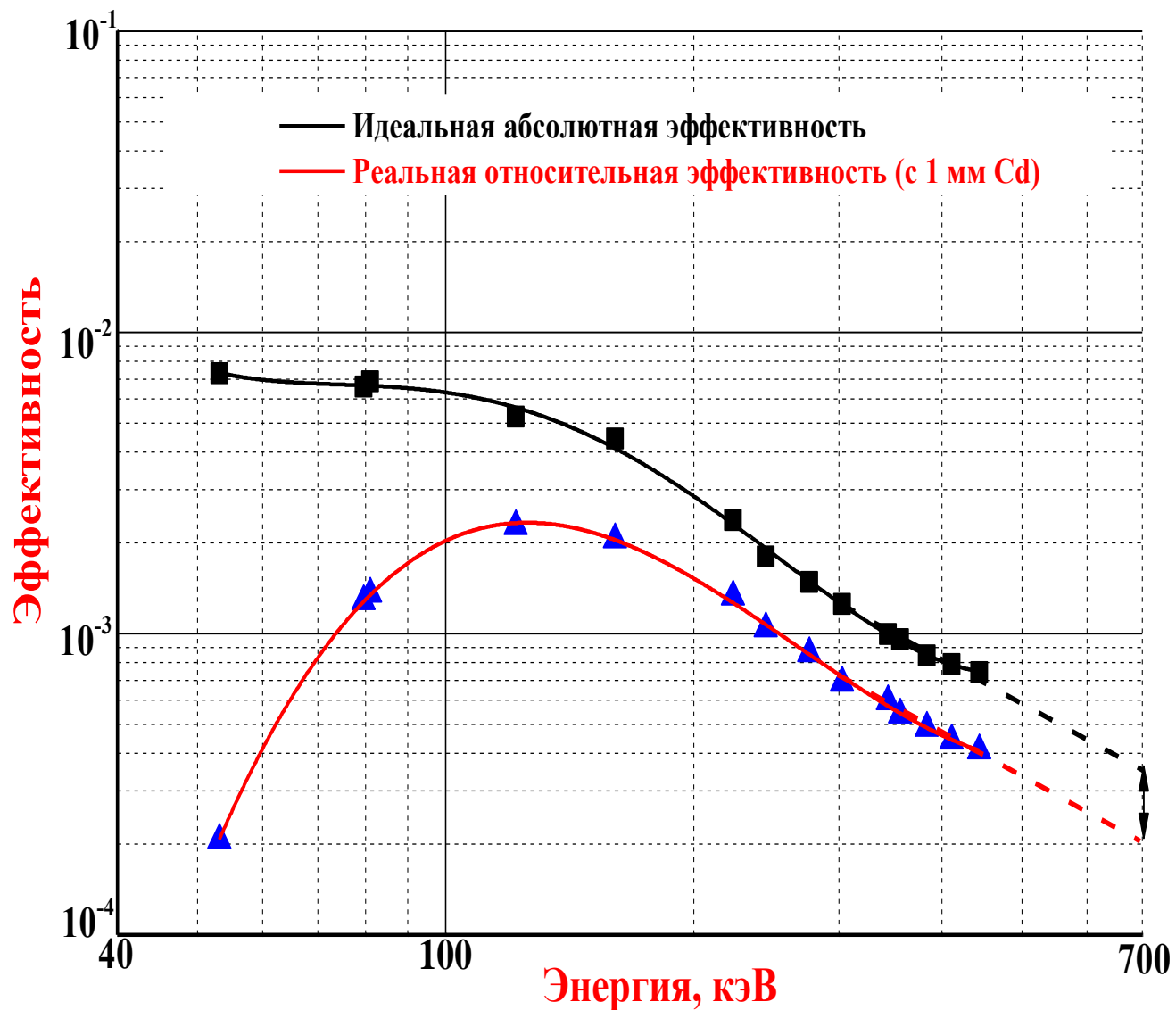
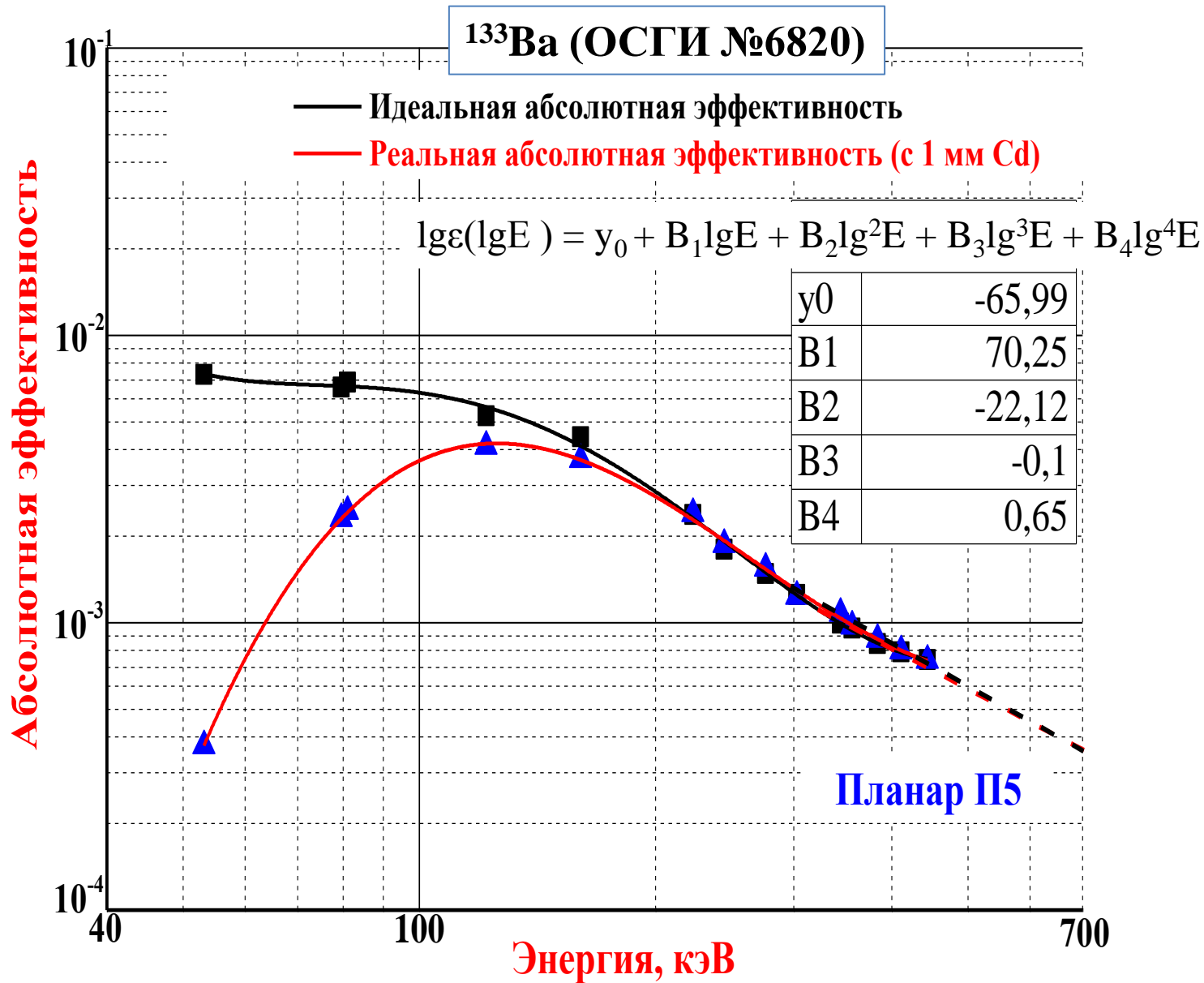


Рис.7. Положение идеальной абсолютной и реальной относительной эффективностей, получено на основе спектра  $^{133}\text{Ba}$  в детекторе Планар на позиции №5



**Рис.8. Положение идеальной и реальной абсолютных эффективностей, полученных на основе спектра  $^{133}\text{Ba}$  - без фильтра (чёрный) и с фильтром из 1 мм Cd (красный)**

### III. Экспериментальные результаты по выходам продуктов

( $\gamma$ , n) реакций, полученные на базе мишени моноизотопа  $^{209}\text{Bi}$

$E_e = 60, 100, 140, 180 \text{ МэВ}$

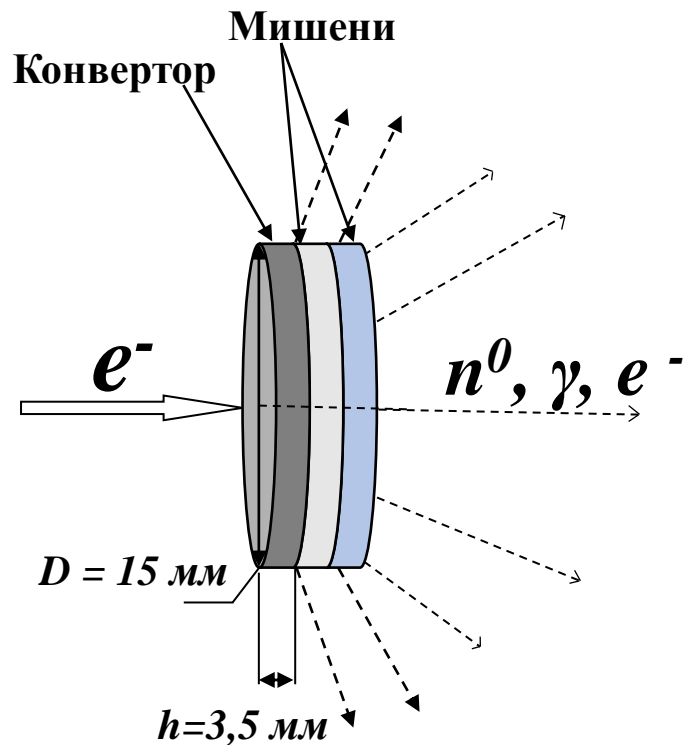
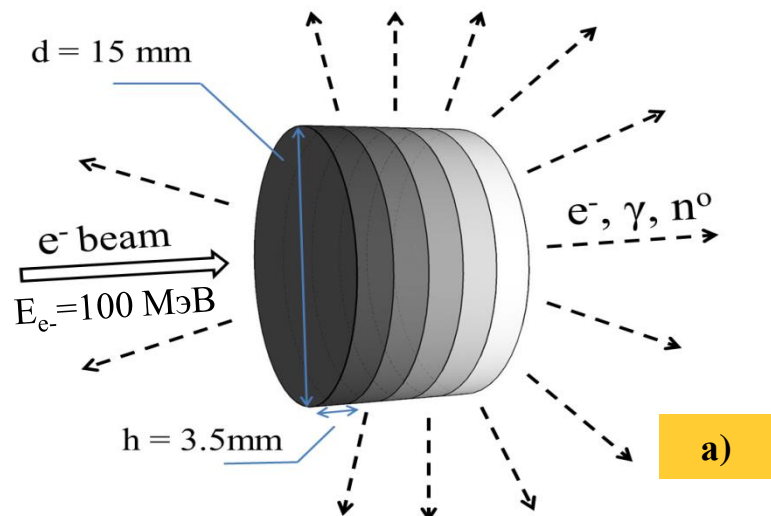


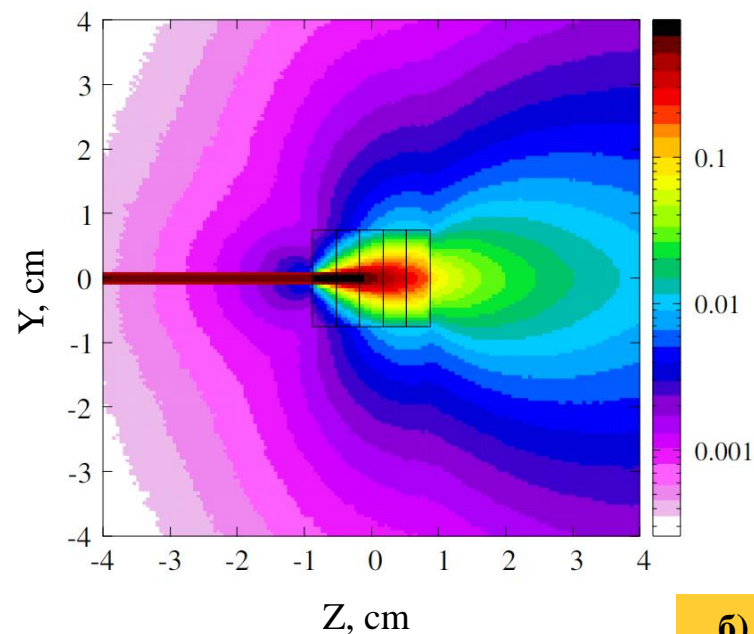
Рис.9. Схема облучения мишени  $^{209}\text{Bi}$  на электронном пучке

# Теоретический расчёт потоков частиц в эксперименте (FLUKA)

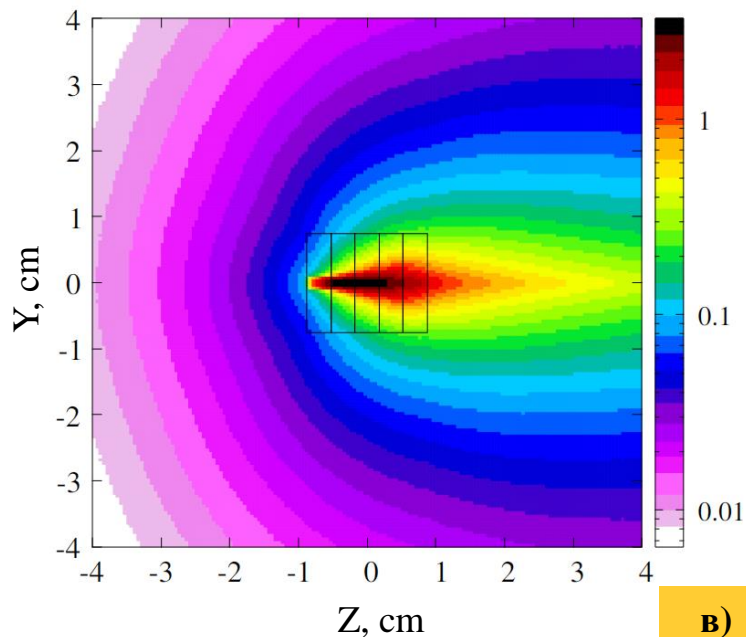


а)

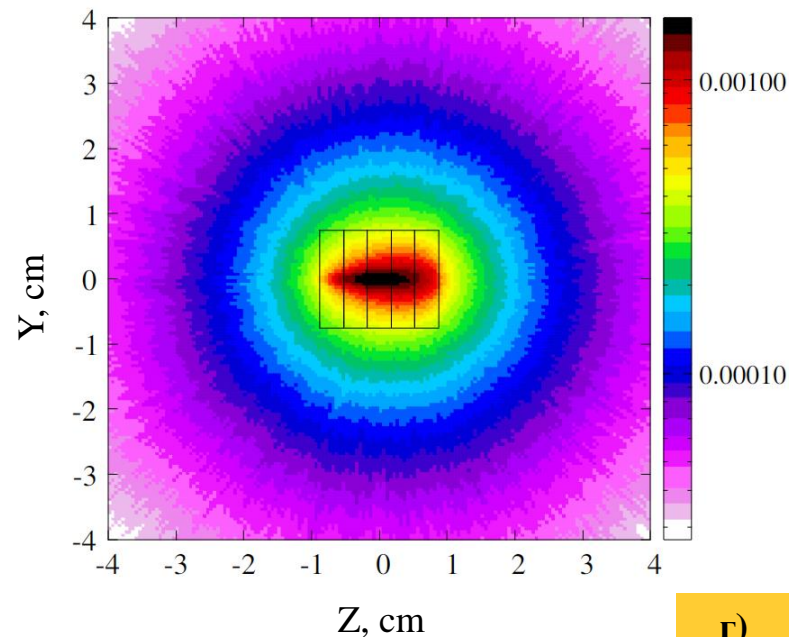
Рис.10. Распределение электронов (б), гамма (в) и нейтронов (г) в пространстве.



б)

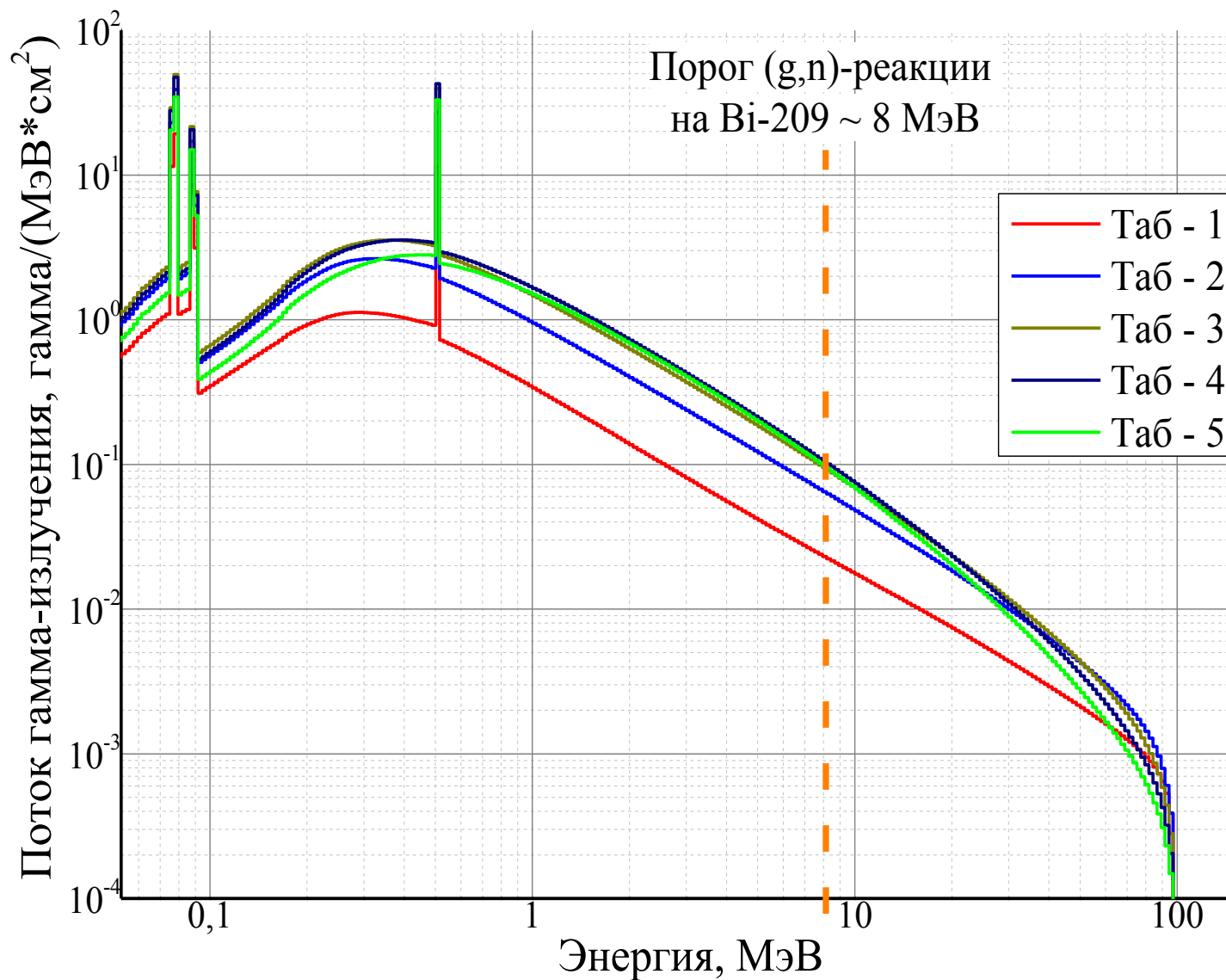


в)

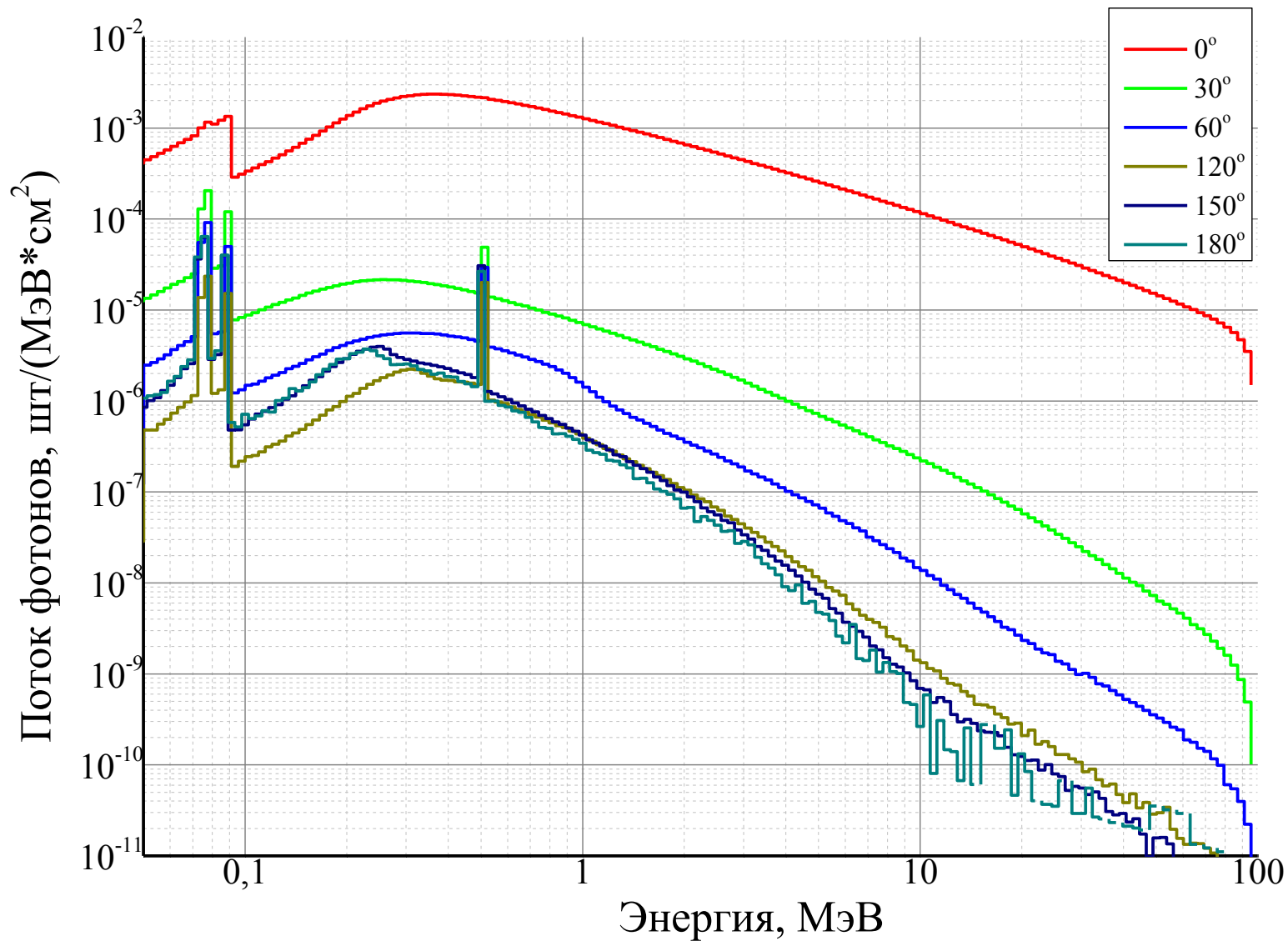


г)

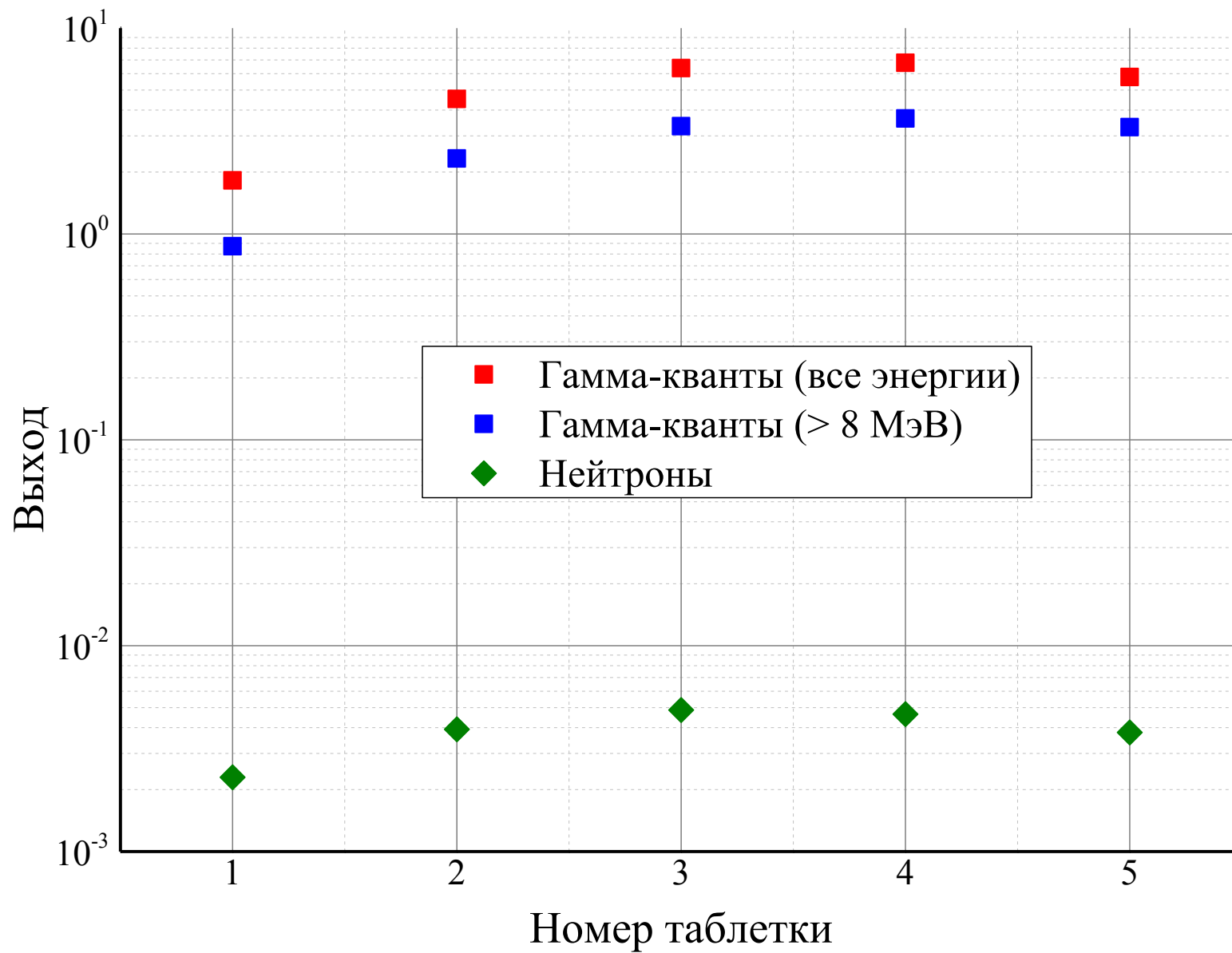




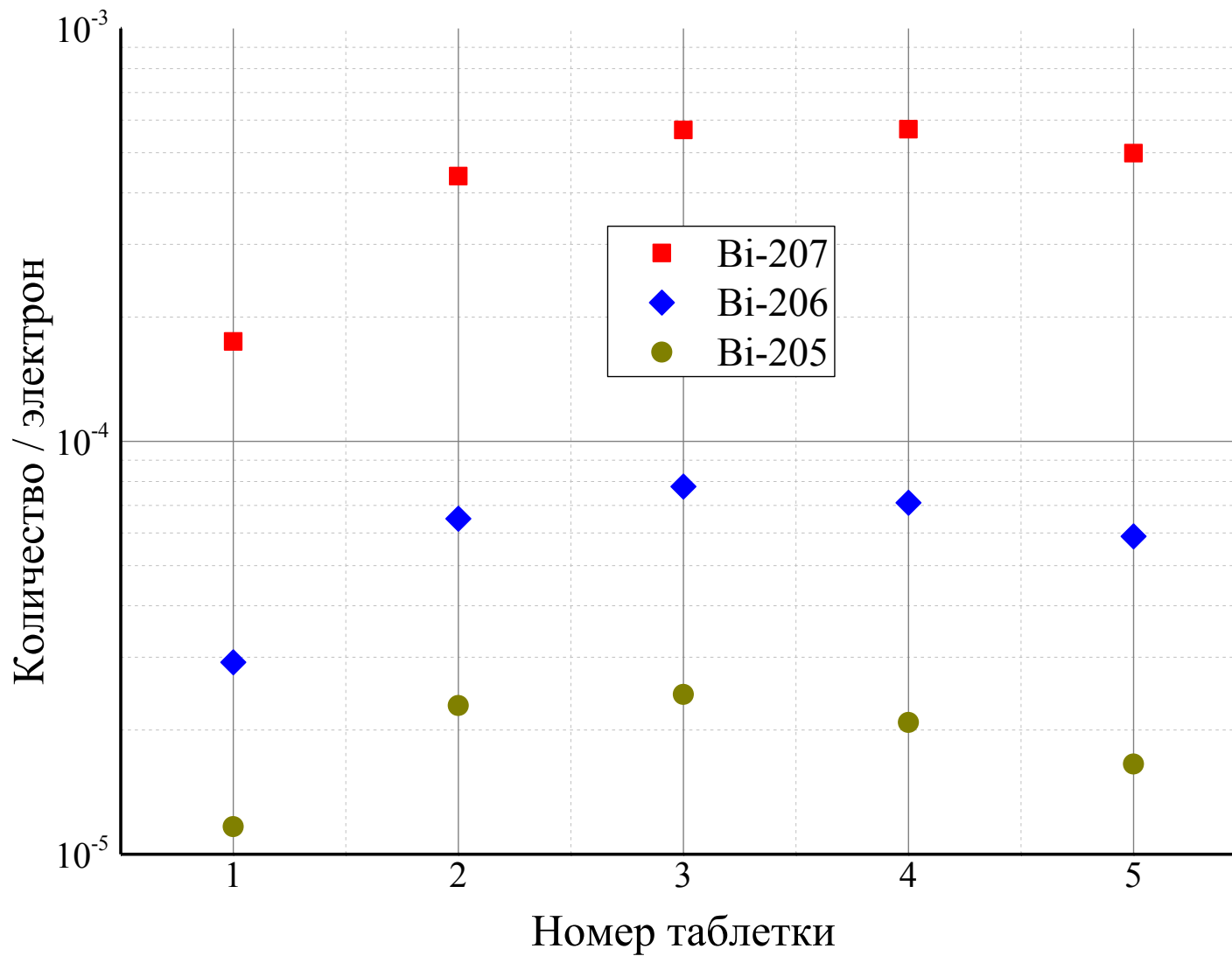
**Рис.11. Распределение гамма-излучения по энергиям в таблетках**



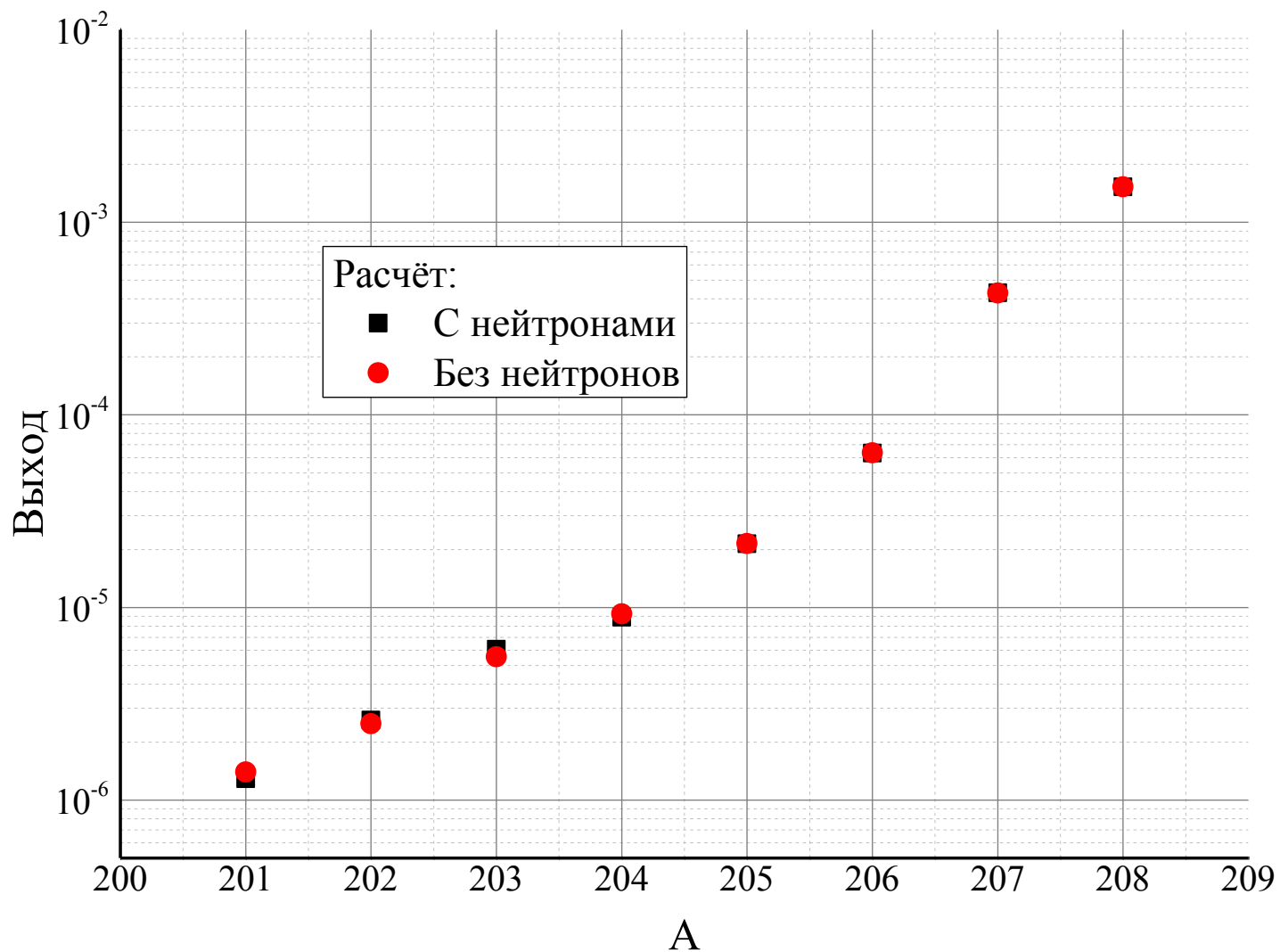
**Рис.12. Энергораспределение гамма-излучения по углам**



**Рис.13. Количество частиц, рождённых в таблетках, относительно одного электрона.**



**Рис.14. Распределение выходов изотопов висмута по «таблеткам»**



**Рис.15. Расчёт выходов изотопов висмута в «таблетке» №2 с учётом нейтронов и без них.**

# Экспериментальные данные

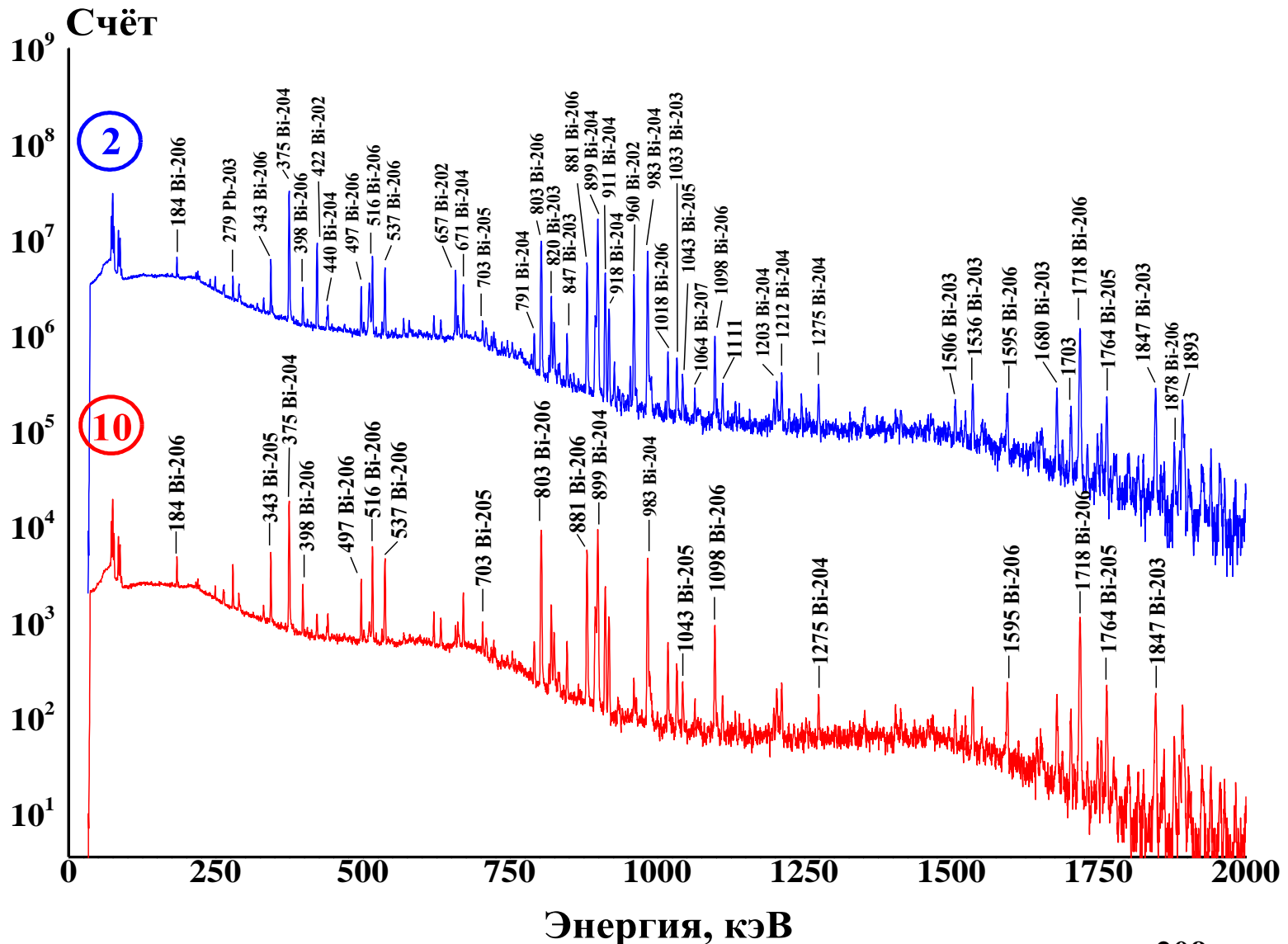
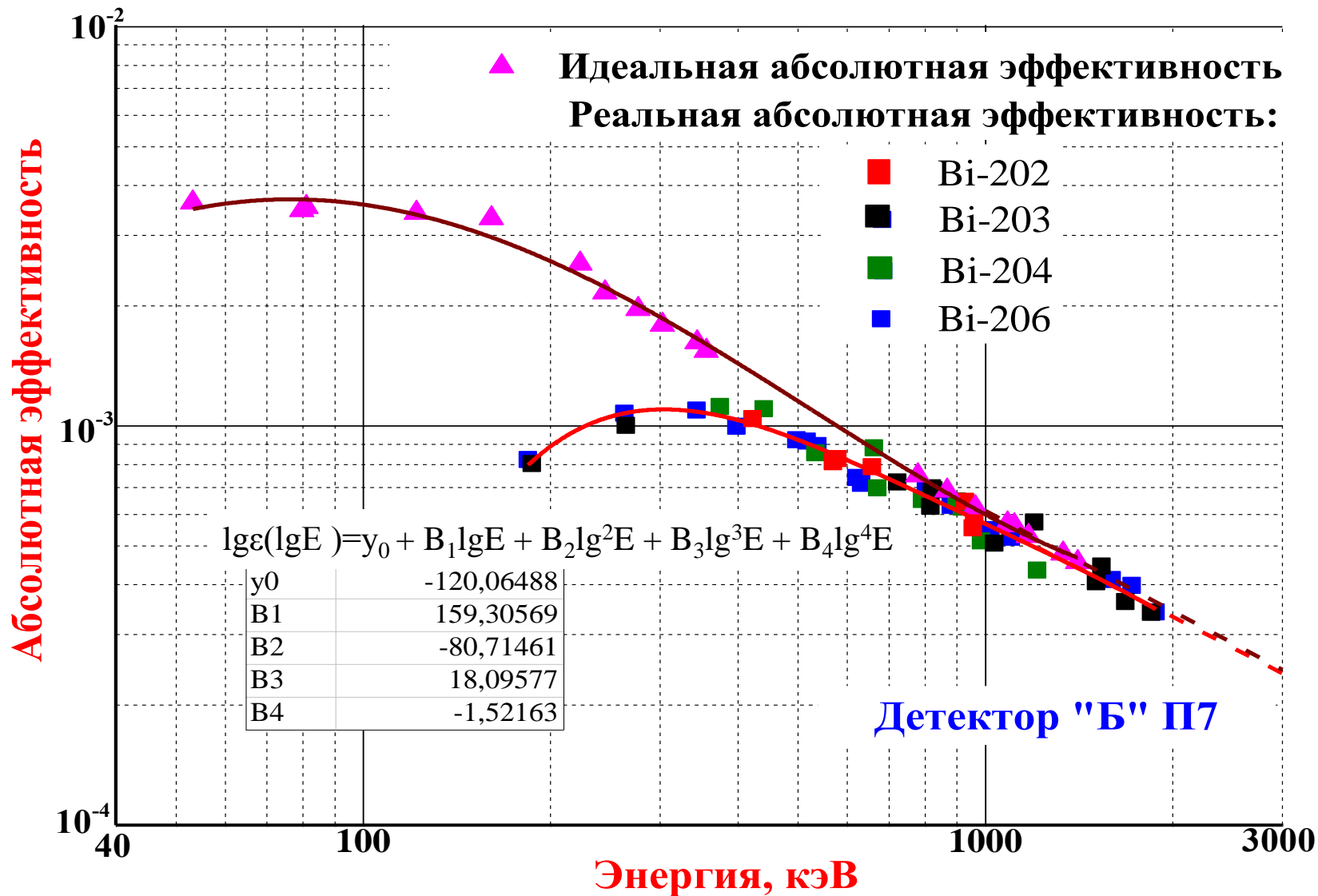


Рис.16. Сравнение двух спектров облученной мишени  $^{209}\text{Bi}$  на электронном пучке при  $E_e=60$  МэВ

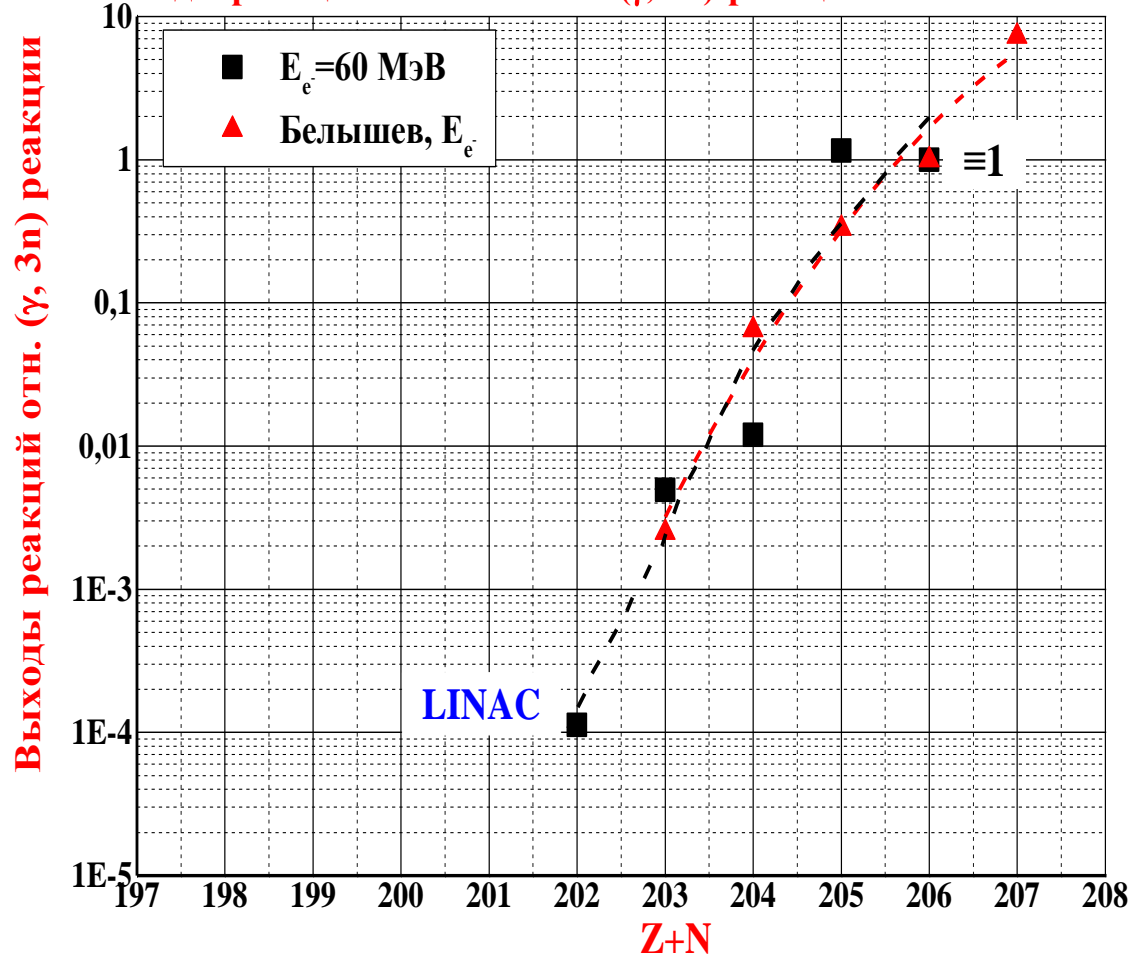


**Рис.17. Положение идеальной и реальной абсолютных эффективностей в измерении спектра мишени  $^{209}\text{Bi}$  после облучения на  $E_e=60$  МэВ**

# Сравнение результатов с литературой

$$N_i(t) = \frac{S_{\gamma,i}}{\varepsilon \cdot I_{\gamma,i}} \quad \rightarrow \quad Y_i = \frac{N_i(t) \lambda_i}{\exp(-\lambda_i t_{\text{остыв}}) \cdot (1 - \exp(-\lambda_i t_{\text{измер}})) \cdot (1 - \exp(-\lambda_i t_{\text{облуч}}))}$$

Выходы реакций относительно  $(\gamma, 3n)$ -реакции в мишени  $^{209}\text{Bi}$



**Рис.18. Выходы фотоядерных реакций нормализованные относительно  $(\gamma, 3n)$  реакции в мишени  $^{209}\text{Bi}$  и результаты группы Белышева**

Belyshev, S.S., Filipescu, D.M., Gheoghe, I. *et al.* Multinucleon photonuclear reactions on  $^{209}\text{Bi}$ : Experiment and evaluation. *Eur. Phys. J. A* **51**, 67 (2015).

(НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ)



## IV. Мишень $^{238}\text{U}$ на пучке электронов с энергией 140 МэВ

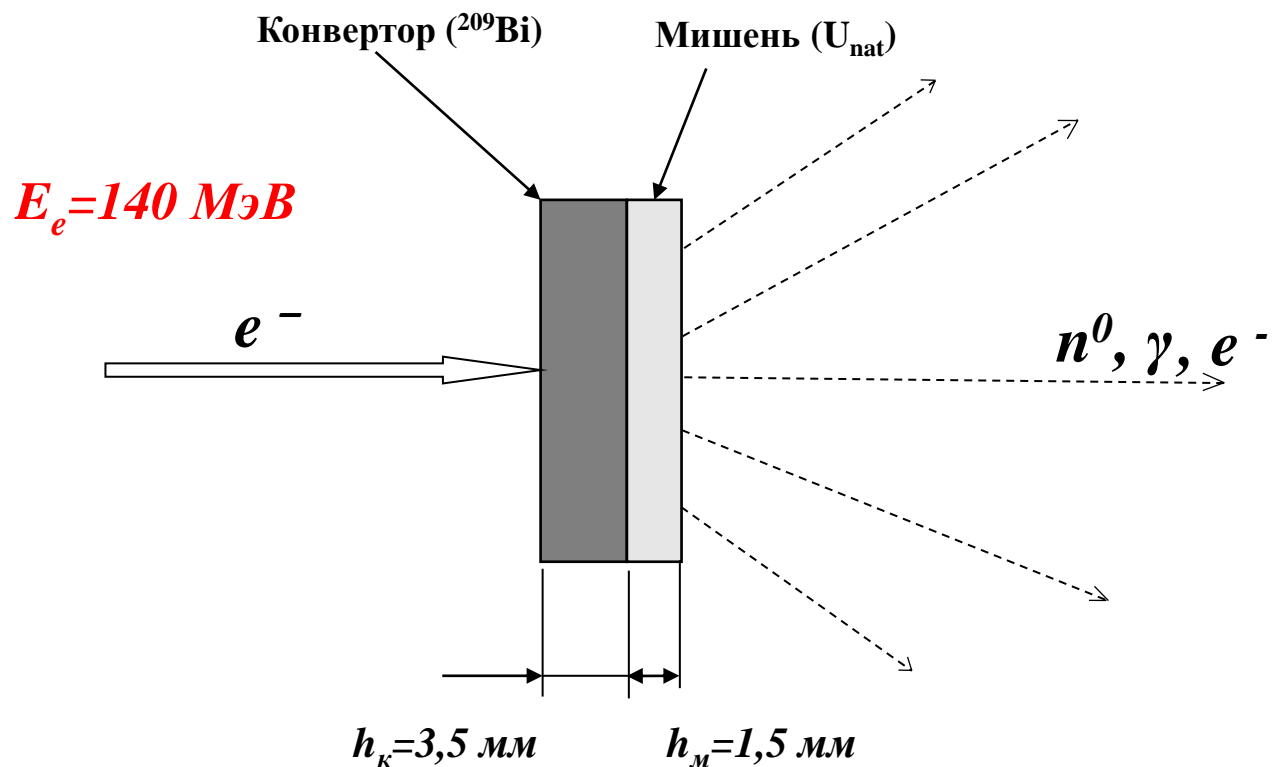


Рис.19. Схема облучения мишени природного урана в поле конвертора из висмута на пучке электронов.

После облучения U<sub>nat</sub> на LINAC (эксперимент №3) при E<sub>e</sub>=140 MeВ

счёт

Гамма-спектр: t<sub>ж</sub>=1800 сек

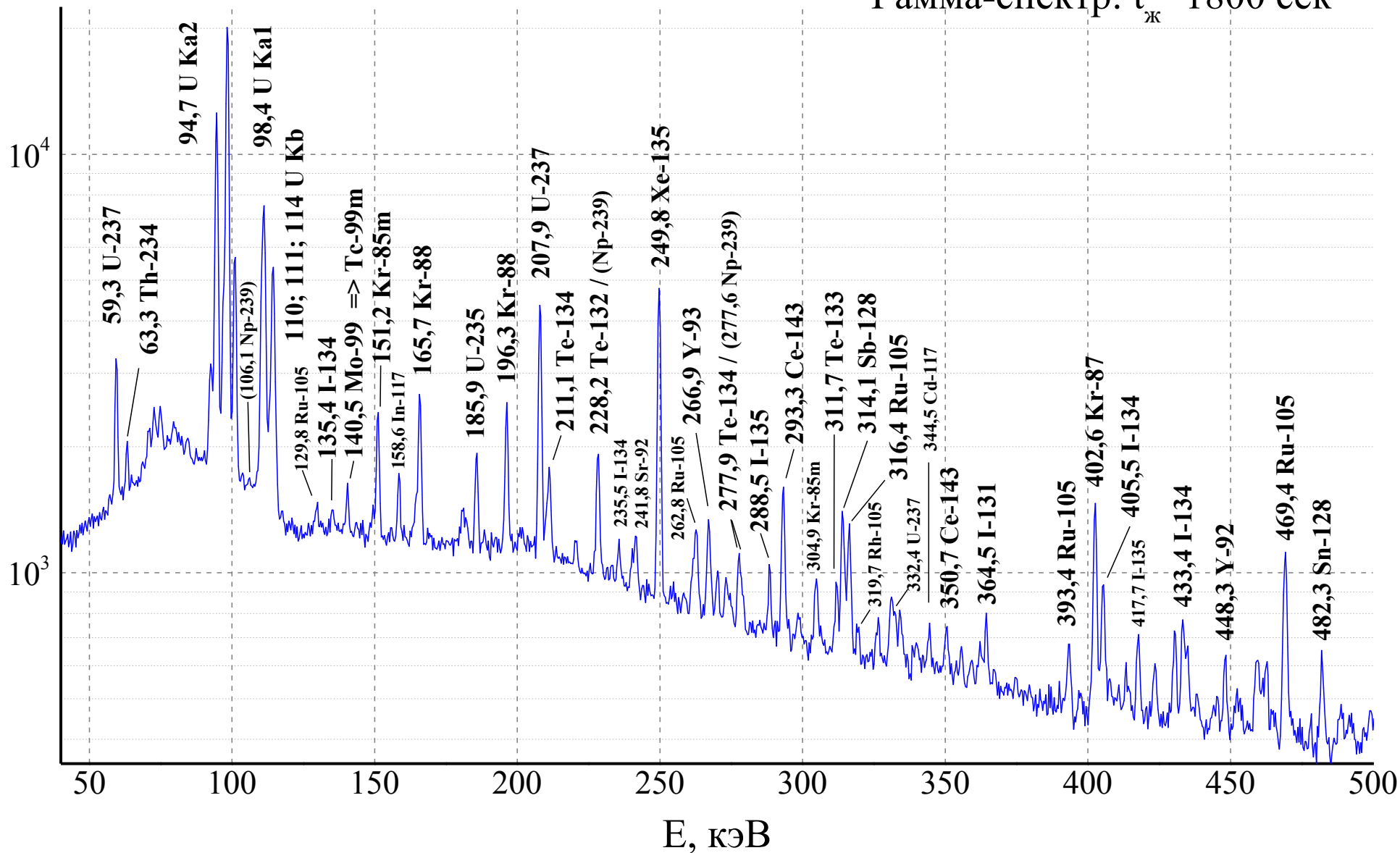
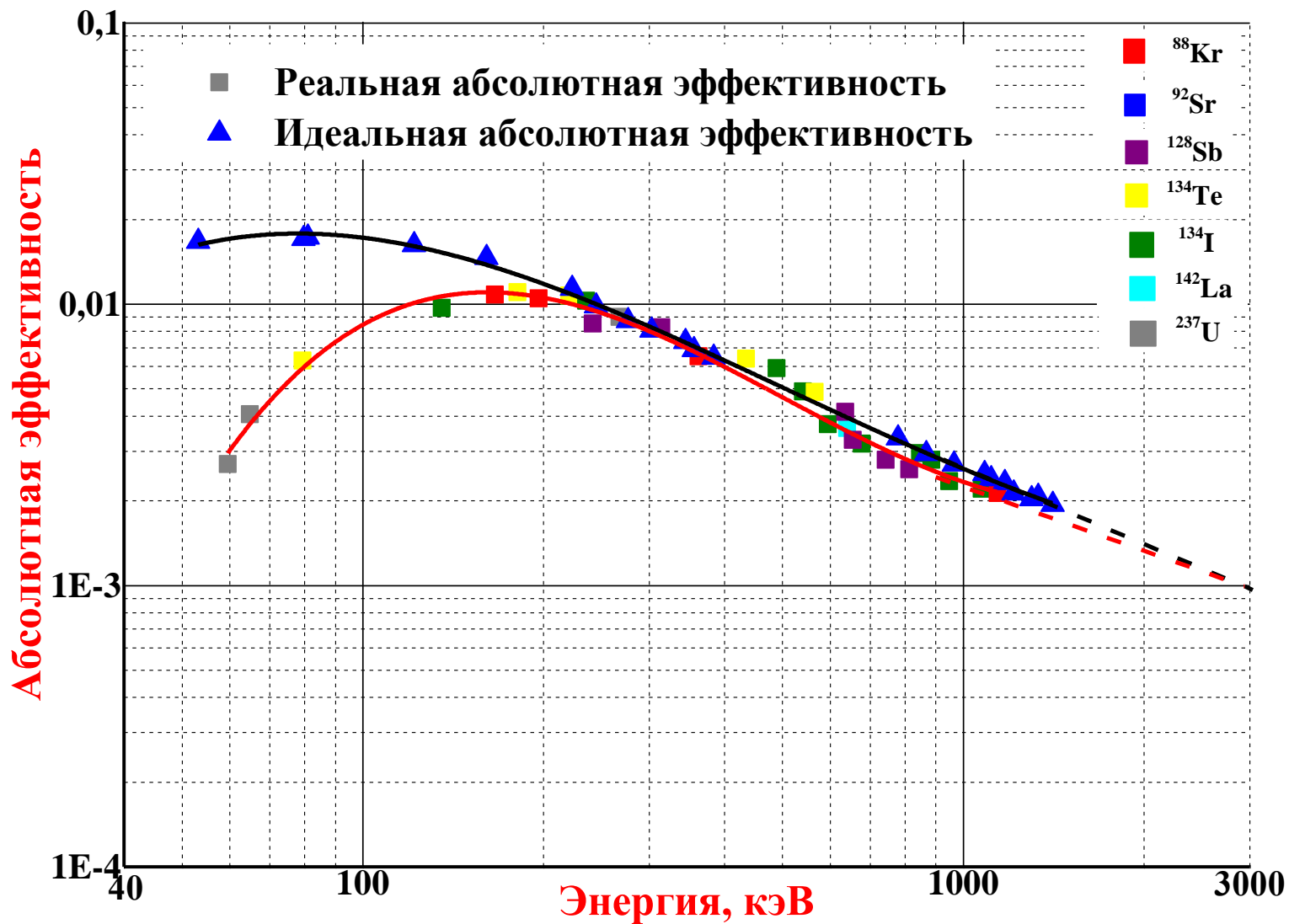
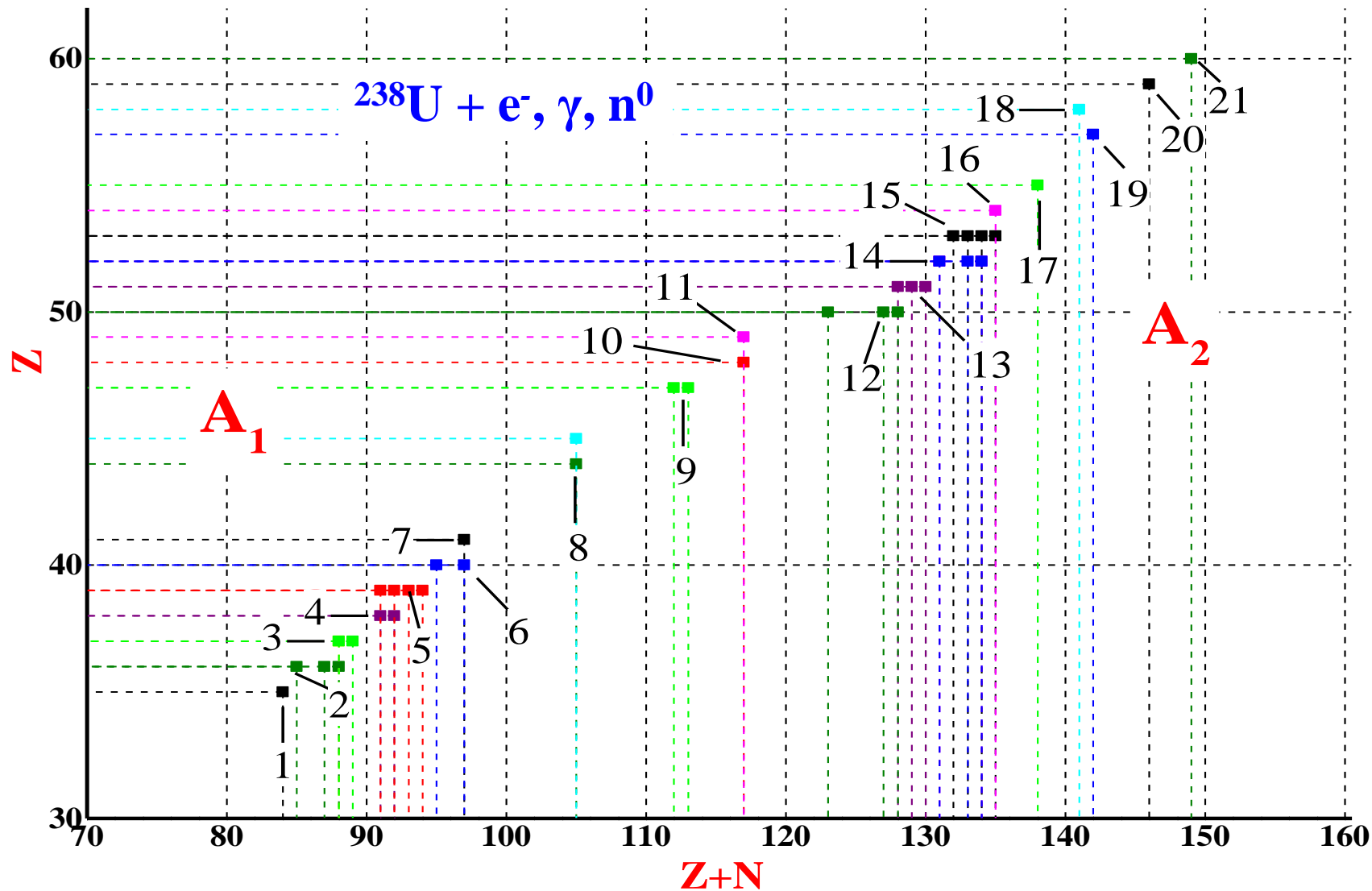


Рис.20. Часть гамма-спектра облучённого урана(оффлайн)

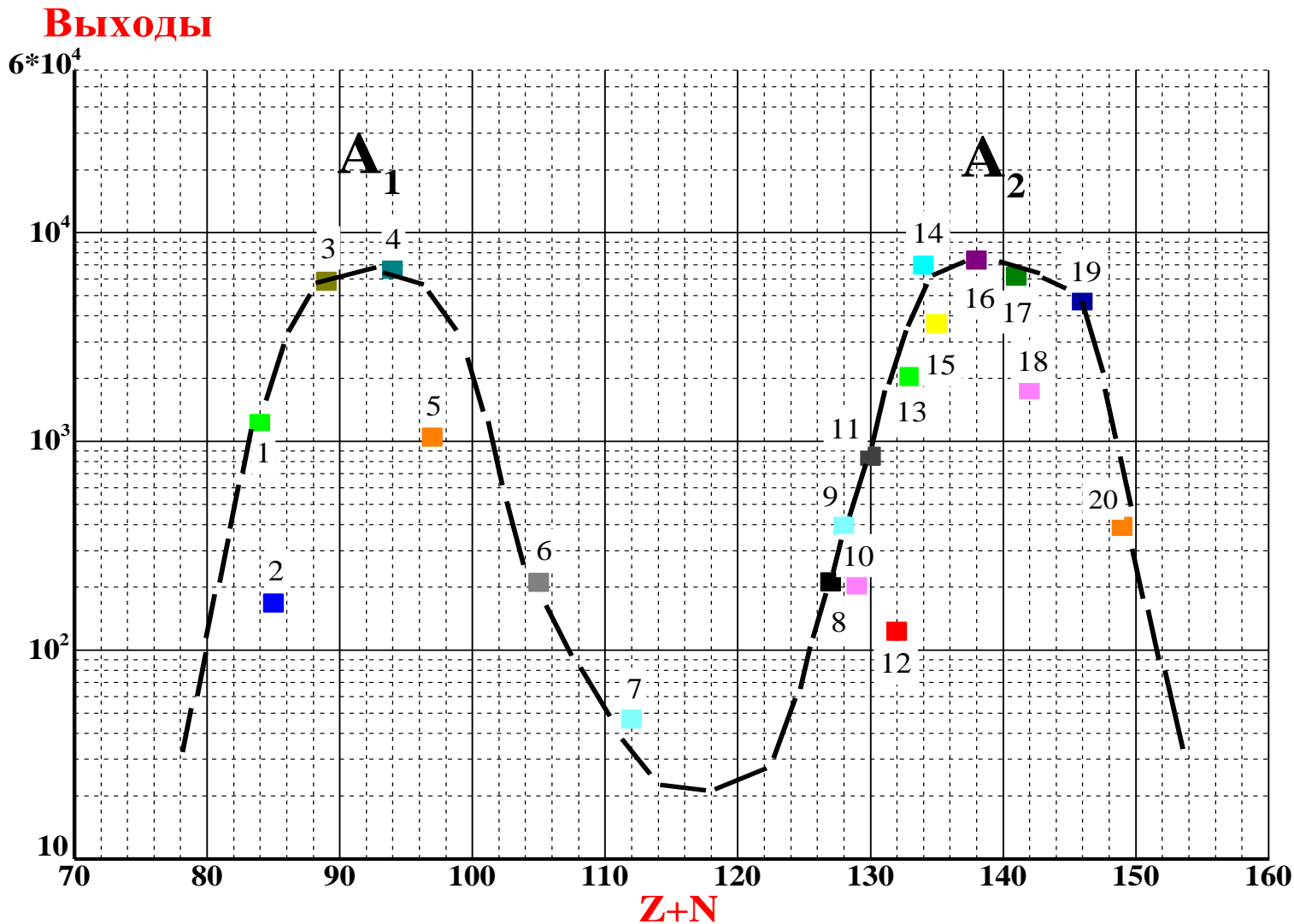


**Рис.21. Положение идеальной и реальной абсолютных эффективностей в измерении спектра мишени  $^{238}\text{U}$**



**Рис.22. Диаграмма образовавшихся ядер в мишени  $^{238}\text{U}$  на пучке  $e^-$  :**

1-  $^{84}\text{Br}$ , 2-  $^{85\text{m}}\text{Kr}$ ,  $^{87}\text{Kr}$ ,  $^{88}\text{Kr}$ , 3-  $^{88}\text{Rb}$ ,  $^{89}\text{Rb}$ , 4-  $^{91}\text{Sr}$ ,  $^{92}\text{Sr}$ , 5-  $^{91\text{m}}\text{Y}$ ,  $^{92}\text{Y}$ ,  $^{93}\text{Y}$ ,  $^{94}\text{Y}$ , 6-  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{97}\text{Zr}$ , 7-  $^{97}\text{Nb}$ , 8-  $^{105}\text{Ru}$  →  $^{105}\text{Rh}$ , 9-  $^{112}\text{Ag}$ ,  $^{113}\text{Ag}$ , 10-  $^{117}\text{Cd}$ , 11-  $^{117}\text{In}$ , 12-  $^{123\text{m}}\text{Sn}$ ,  $^{127}\text{Sn}$ ,  $^{128}\text{Sn}$ , 13-  $^{128}\text{Sb}$ ,  $^{129}\text{Sb}$ ,  $^{130}\text{Sb}$ , 14-  $^{131}\text{Te}$ ,  $^{133\text{m}}\text{Te}$ ,  $^{134}\text{Te}$ , 15-  $^{132}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{134}\text{I}$ ,  $^{135}\text{I}$ , 16-  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{135\text{m}}\text{Xe}$ , 17-  $^{138}\text{Cs}$ , 18-  $^{141}\text{Ce}$ , 19-  $^{142}\text{La}$ , 20-  $^{146}\text{Pr}$ , 21-  $^{149}\text{Nd}$



**Рис.23. Выходы продуктов деления  $^{238}\text{U}$  на пучке электронов,  $E_e = 140 \text{ МэВ}$ :**  
 1-  $^{84}\text{Br}$ , 2-  $^{85\text{m}}\text{Kr}$ , 3-  $^{89}\text{Rb}$ , 4-  $^{94}\text{Y}$ , 5-  $^{97}\text{Zr}$ ,  $^{97}\text{Nb}$ , 6-  $^{105}\text{Ru}$ , 7-  $^{112}\text{Ag}$ , 8-  $^{127}\text{Sn}$ , 9-  $^{128}\text{Sn}$ ,  $^{128}\text{Sb}$ , 10-  $^{129}\text{Sb}$ ,  
 11-  $^{130}\text{Sb}$ , 12-  $^{132}\text{I}$ , 13-  $^{133}\text{I}$ ,  $^{133}\text{Te}$ , 14-  $^{134}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Te}$ , 15-  $^{135}\text{I}$ ,  $^{135\text{m}}\text{Xe}$ , 16-  $^{138}\text{Cs}$ , 17-  $^{141}\text{Ce}$ ,  $^{141}\text{Ba}$ , 18-  $^{142}\text{La}$ ,  
 19-  $^{146}\text{Pr}$ , 20-  $^{149}\text{Nd}$ .

## Обсуждение полученных результатов

1. В работе использовано понятие **реальной абсолютной эффективности** в системе, которая содержит **неточечный образец с детектором и алгоритм её определения.**
2. Анализ реакций ( $\gamma$ ,  $Xn$ ), наблюдаемых в экспериментах для мишени  $^{209}\text{Bi}$  и выводы по **определению выходов реакций** сделаны на основе использования понятия **реальной абсолютной эффективности.** **Проведено сравнение с литературными данными.**
3. Из эксперимента по облучению  $^{238}\text{U}$  на пучке электронов с конвертором, **определен изотопический состав деления и построена кривая выходов реакции.**

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**

