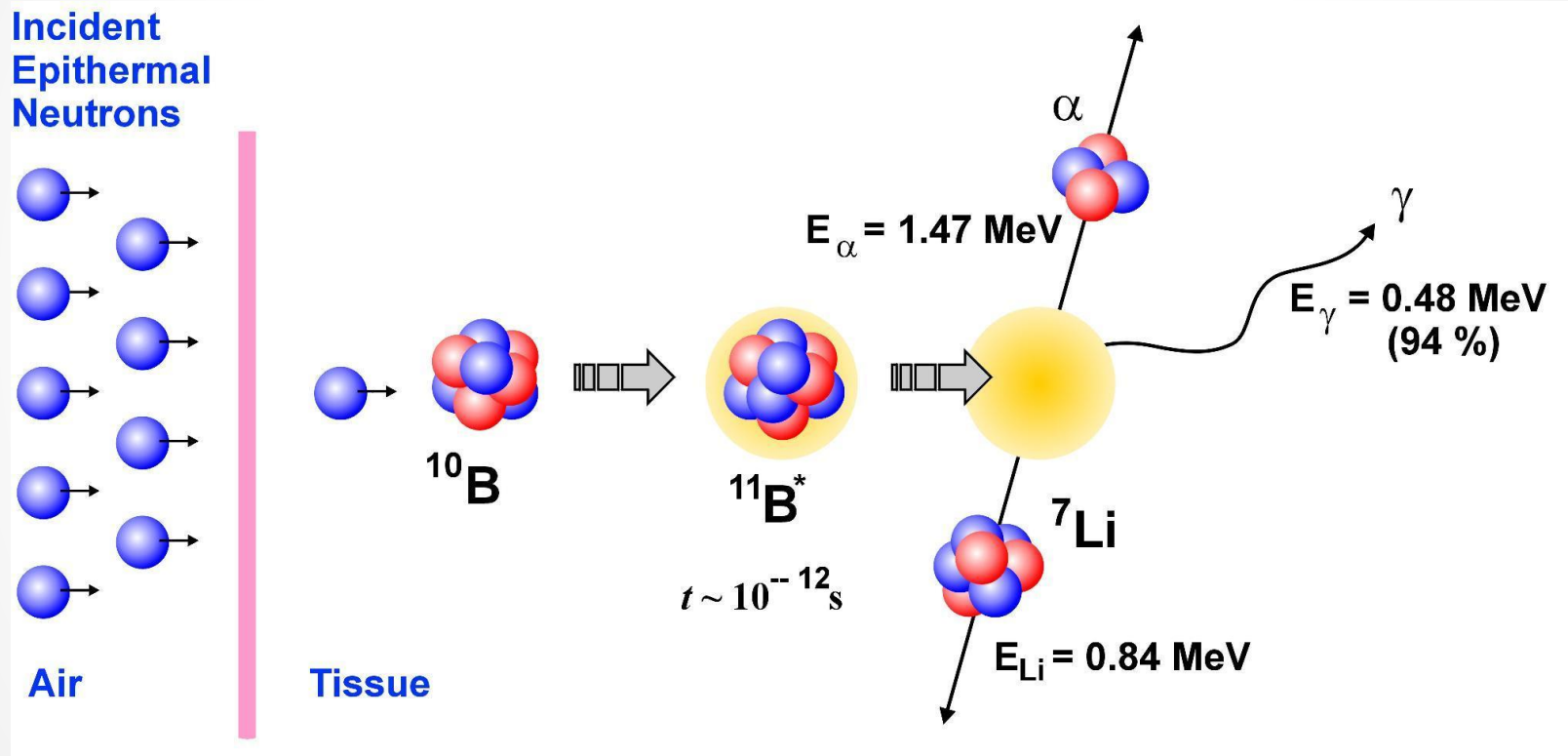


# Активационная методика для бор-нейтроннозахватной терапии

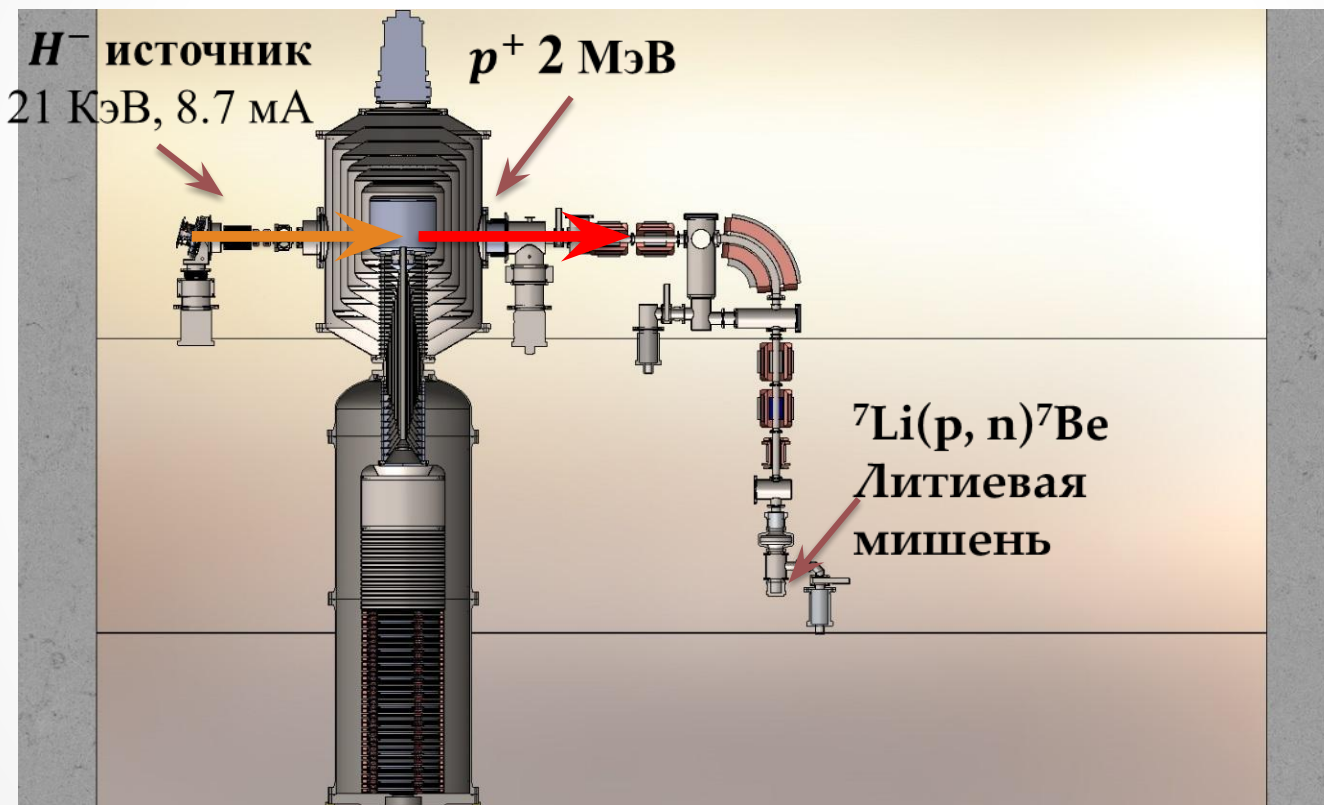
Выполнила: Марина Бикчурина, ФП ФФ НГУ

Научный руководитель: Дмитрий Касатов, мнс л.9-0

# Концепция методики БНЗТ

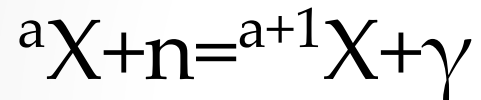


# Схема ускорительного источника эпитепловых нейтронов



# Взаимодействие вещества с нейтронами

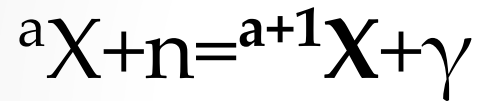
## ▪ Радиационный захват нейтрона



- Реакции с образованием протона
- Реакции с образованием  $\alpha$ -частиц
- Реакции деления
- Неупругое рассеяние нейтронов

# Взаимодействие вещества с нейтронами

- Радиационный захват нейтрона



# HPGe-детектор

Энергетическое разрешение : до 2 МэВ

Оптимальное рабочее напряжение : 1450 В

Предел допускаемой основной погрешности :  $\leq 0,1\%$

Система питания

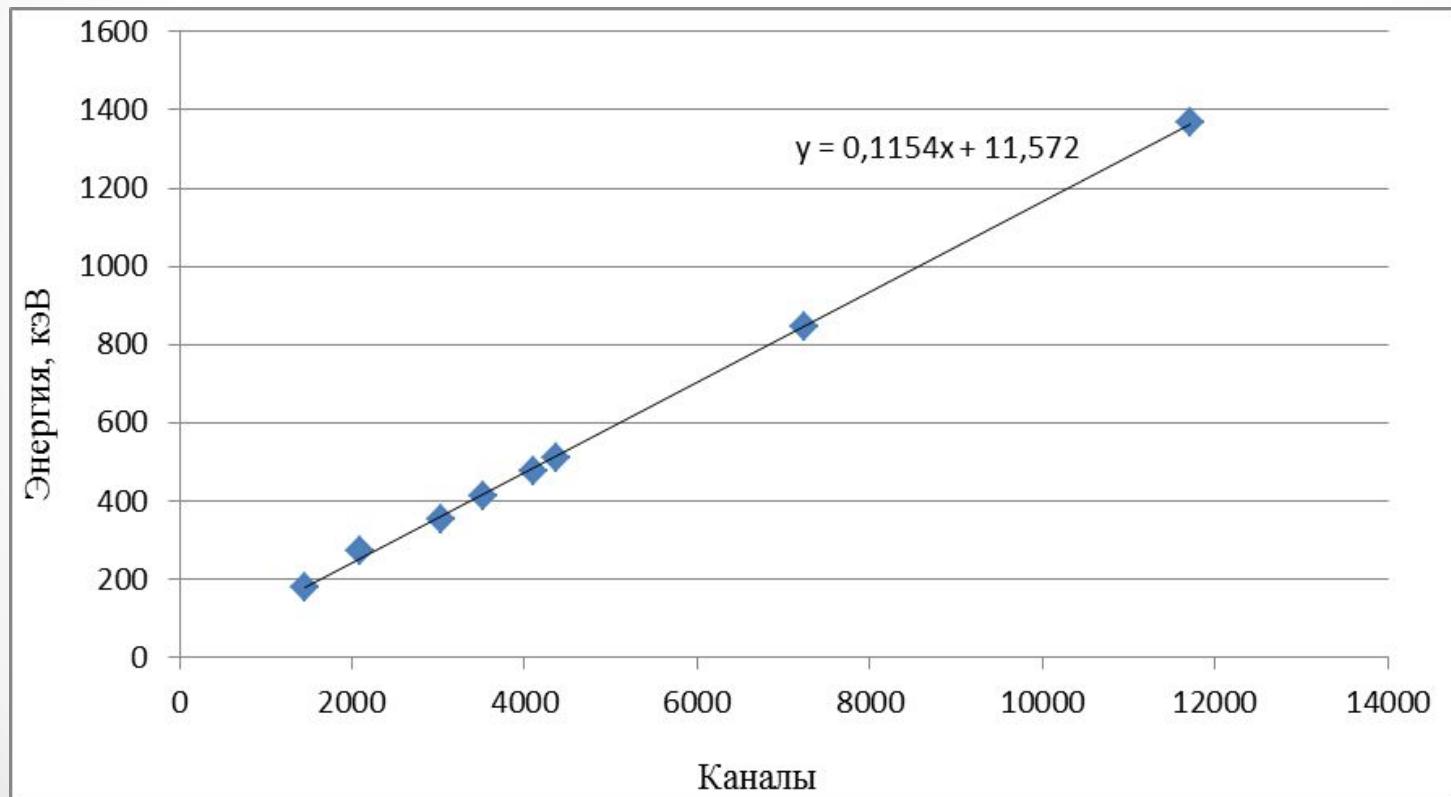
Высокоочищенный германий

Жидкий азот



# Калибровка HPGe-детектора

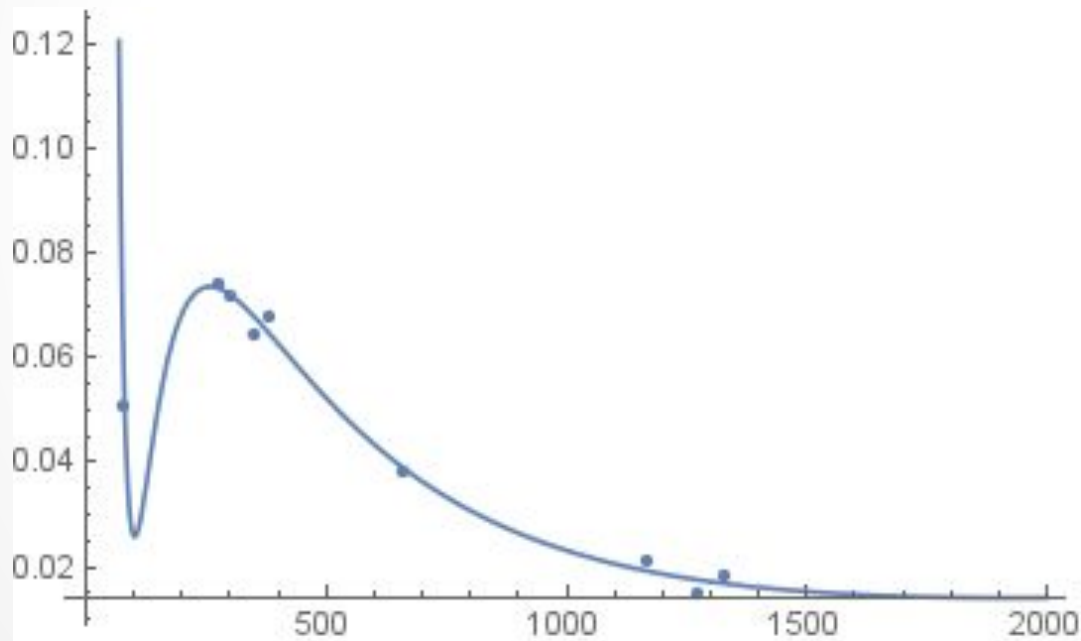
- Калибровка каналов по энергии



# Калибровка HPGe-детектора

- Коэффициент чувствительности детектора

$$\varepsilon(E) = \frac{P_1 + P_2 \ln(E) + P_3 \ln(E)^2 + P_4 \ln(E)^3 + P_5 \ln(E)^4}{E}$$



New approach for calibration the efficiency of HpGe detectors

Cite as: AIP Conference Proceedings 1584, 38 (2014); <https://doi.org/10.1063/1.4866101>

I. A. Alnour, H. Wagiran, N. Ibrahim, S. Hamzah, W. B. Siong, and M. S. Elias



# Восстановление спектра

$$S_i = \frac{m_i g_i N_a p_i \varepsilon K_i J_i}{A_i \lambda}$$

$$K_i = (1 - e^{-\lambda_i t_a}) e^{-\lambda_i t_b} (1 - e^{-\lambda_i t_{и}})$$

$S_i$  - число отсчетов в аналитическом пике изотопа  $i$ -го элемента

$m_i$  - масса  $i$ -го элемента в детекторе

$g_i$  - содержание аналитического изотопа  $i$ -го элемента в естественной смеси изотопов

$N_a$  - число Авогадро

$p_i$  - выход гамма-квантов на один распад образовавшегося радиоактивного изотопа

$\varepsilon$  - эффективность регистрации излучения наведенной активности

$J_i$  - скорость реакции

$A_i$  - атомный вес  $i$ -го элемента

$\lambda$  - постоянная радиоактивного распада

$t_a$  - время активации

$t_b$  - время выдержки после облучения

$t_{и}$  - время измерения

# Восстановление спектра

$$J_i = S_i A_i \lambda / m_i g_i N_a p_i \epsilon K_i = 7,5 \cdot 10^{-13}$$

$$J_i = \int_0^{\infty} \sigma_i(E) \varphi(E) dE$$

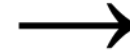
$\varphi(E)$  - спектральная плотность потока нейтронов

$\sigma_i(E)$  - сечение активирующей ядерной реакции в зависимости от энергии нейтронов

# Восстановление спектра

$\Phi(E) = \varphi(E)\Delta E_j$  - плотность потока нейтронов

$$\left\{ \begin{array}{l} J_1 = \int_0^{\infty} \sigma_1(E) \varphi(E) dE \\ \dots \end{array} \right.$$



$$\left\{ \begin{array}{l} J_k = \int_0^{\infty} \sigma_k(E) \varphi(E) dE \\ \dots \end{array} \right.$$

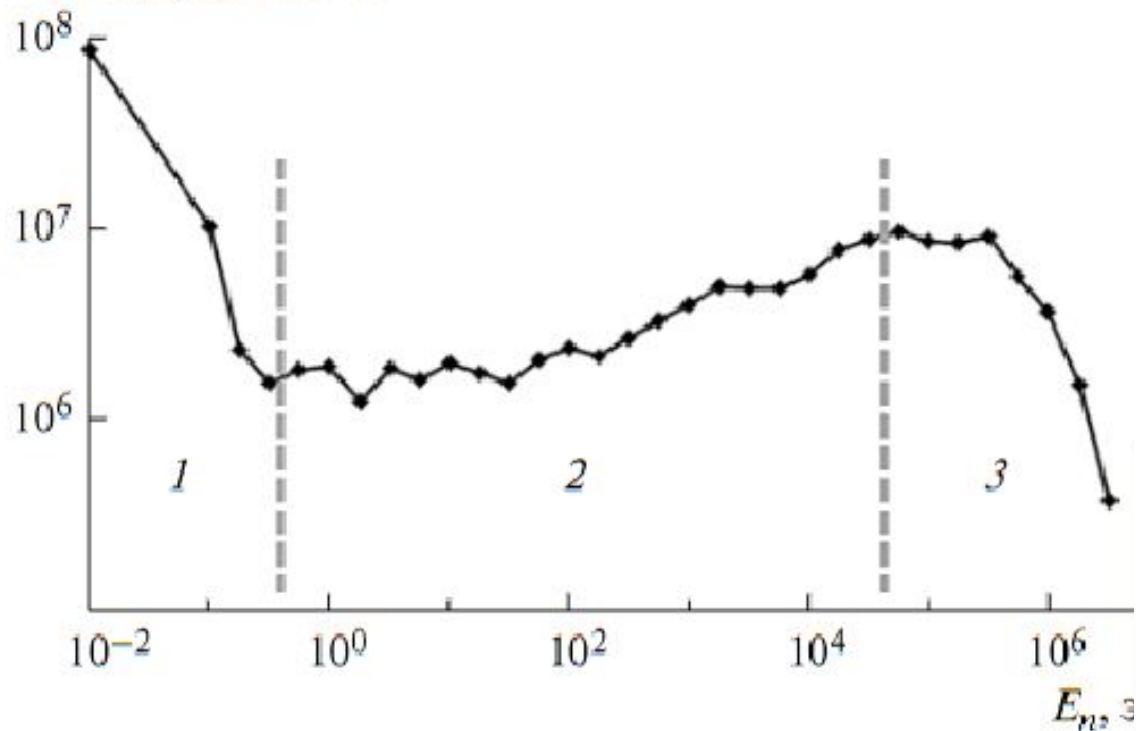
$$\left\{ \begin{array}{l} J_1 = \sum_0^m \sigma_1(E_j) \Phi(E_j) \\ \dots \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} J_k = \sum_0^m \sigma_k(E_j) \Phi(E_j) \\ \dots \end{array} \right.$$

# Восстановление спектра

$$\Phi_j = AE_j^b$$

$\Phi_n$ , нейтрон  $\cdot$  см $^{-2}$ с $^{-1}$



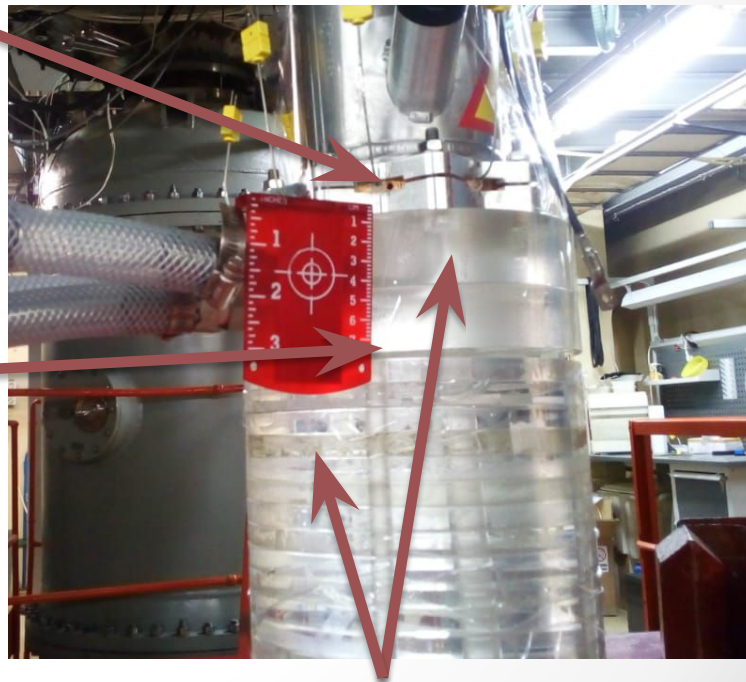
# Активационные фольги

Стандартный набор фольг Shieldwerx:

2 ea. Au, Co, Cu, Fe, In, 5.2% Lu-Al, 81.3% Mn-Cu, Mo, NaCl, Sc, and W

Литиевая нейтроногенерирующая мишень с медной подложкой

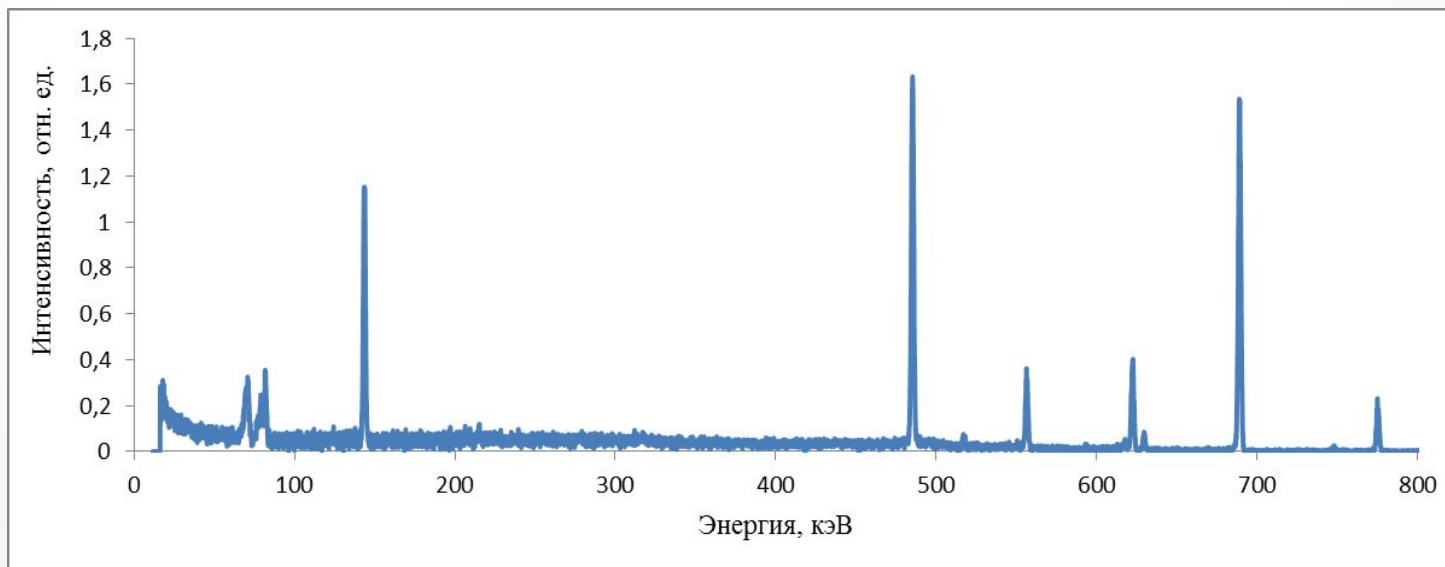
Место для облучения образцов



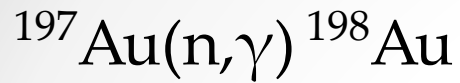
Замедлитель из органического стекла, фантом

# Активационные фольги

- Натрий-хлор
- Вольфрам
- Кадмий
- Марганец-медь
- Молибден

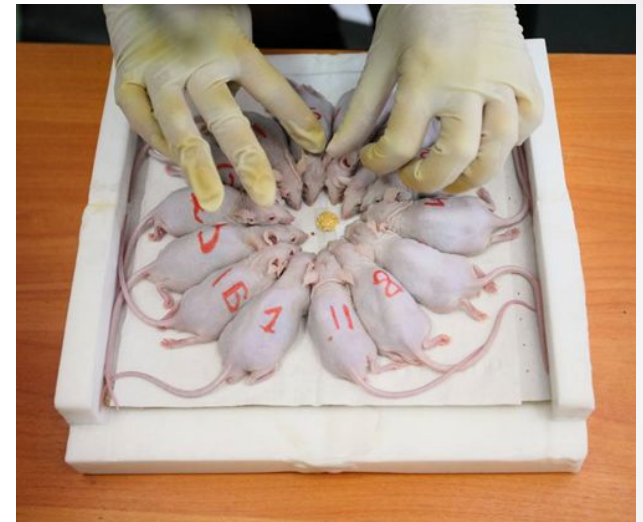
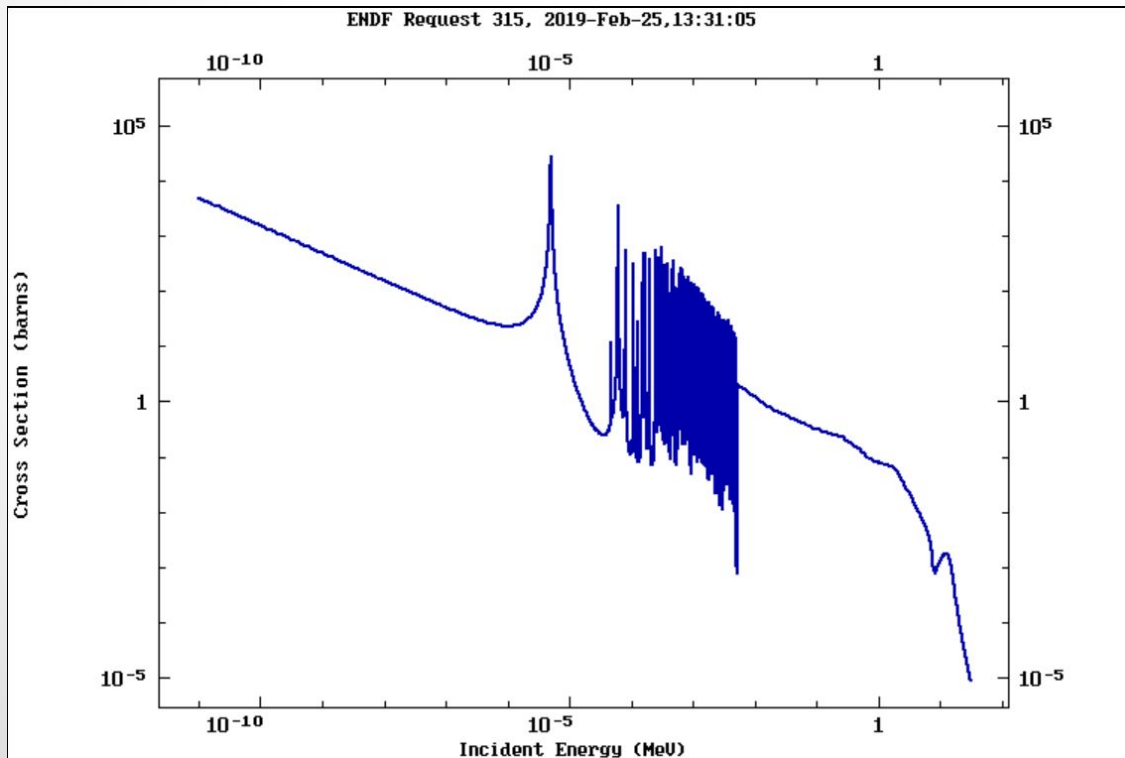


# Золотая фольга

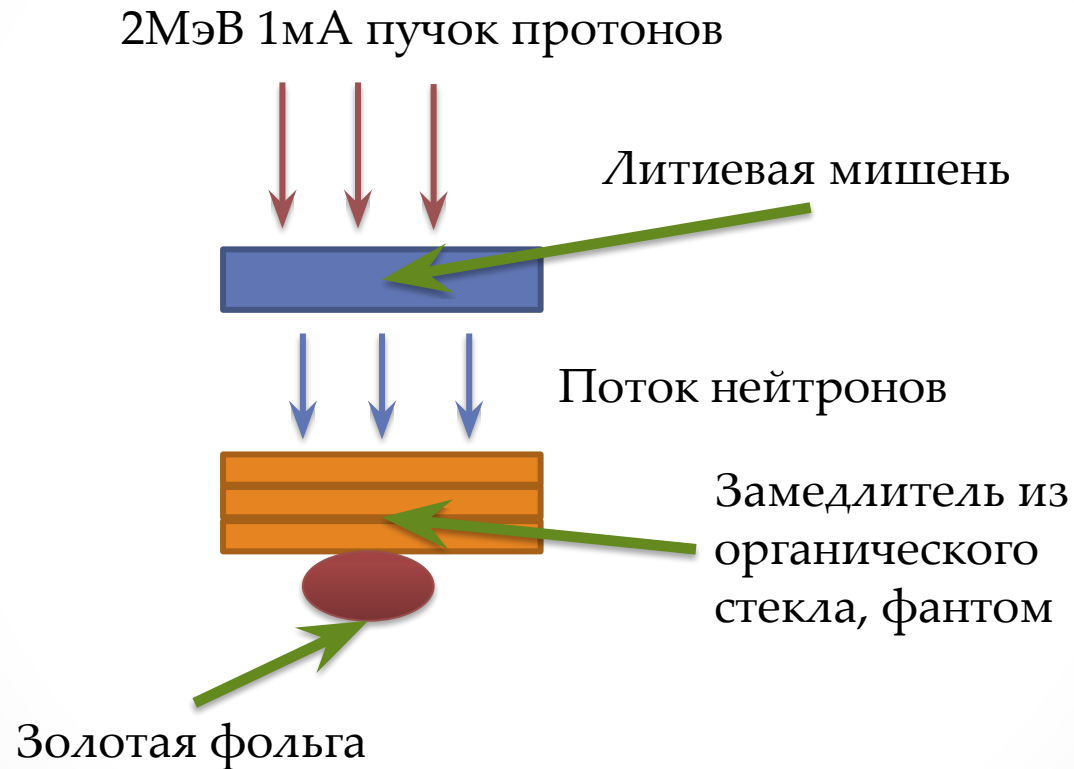


$\tau = 2,7$  дня

$\sigma = 26000$  барн



# Золотая фольга





# «Борная» доза

$$D = \frac{k * N * n}{m}$$

**D** – «борная» доза

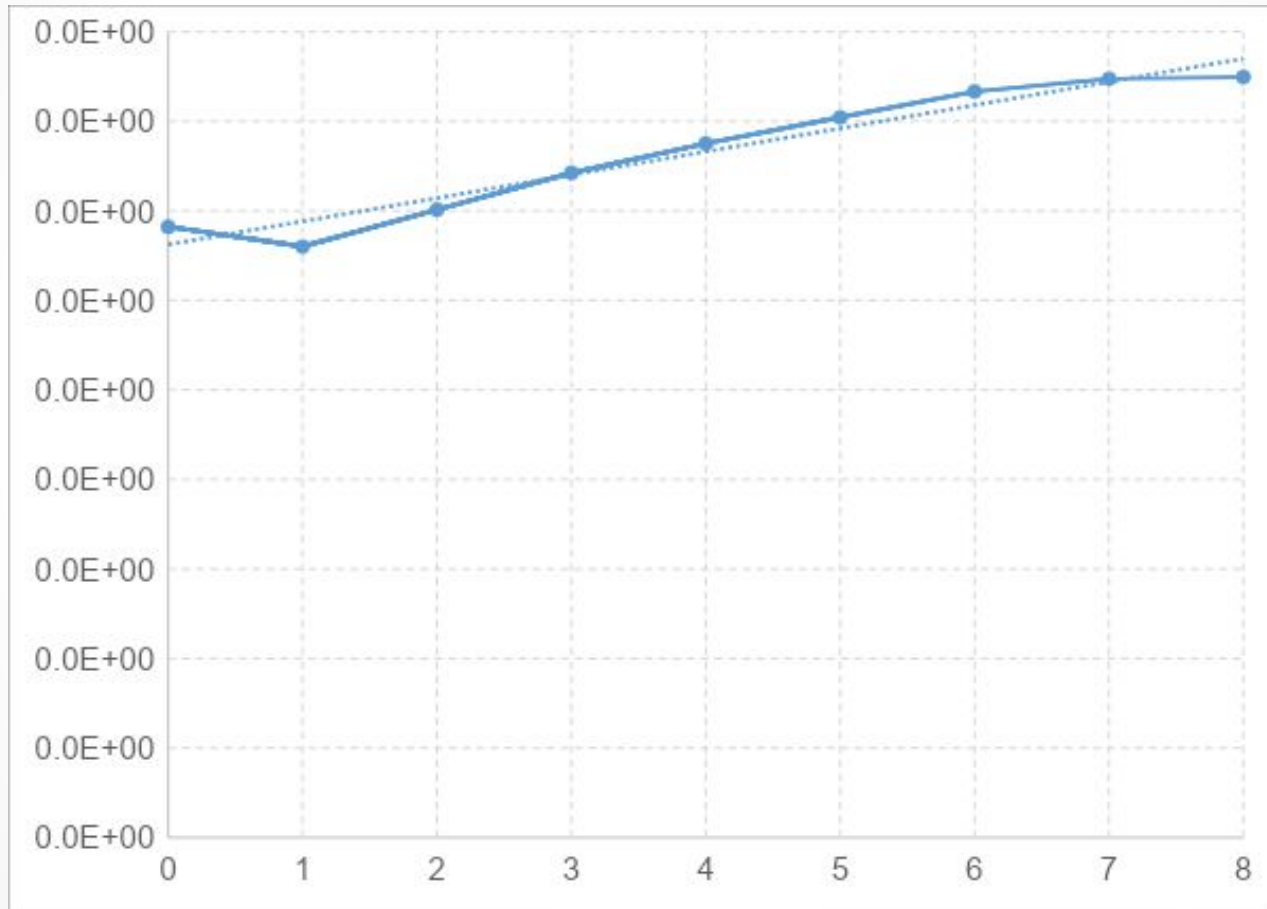
**N** – количество активированных атомов золота

**k** – коэффициент зависимости от толщины образца

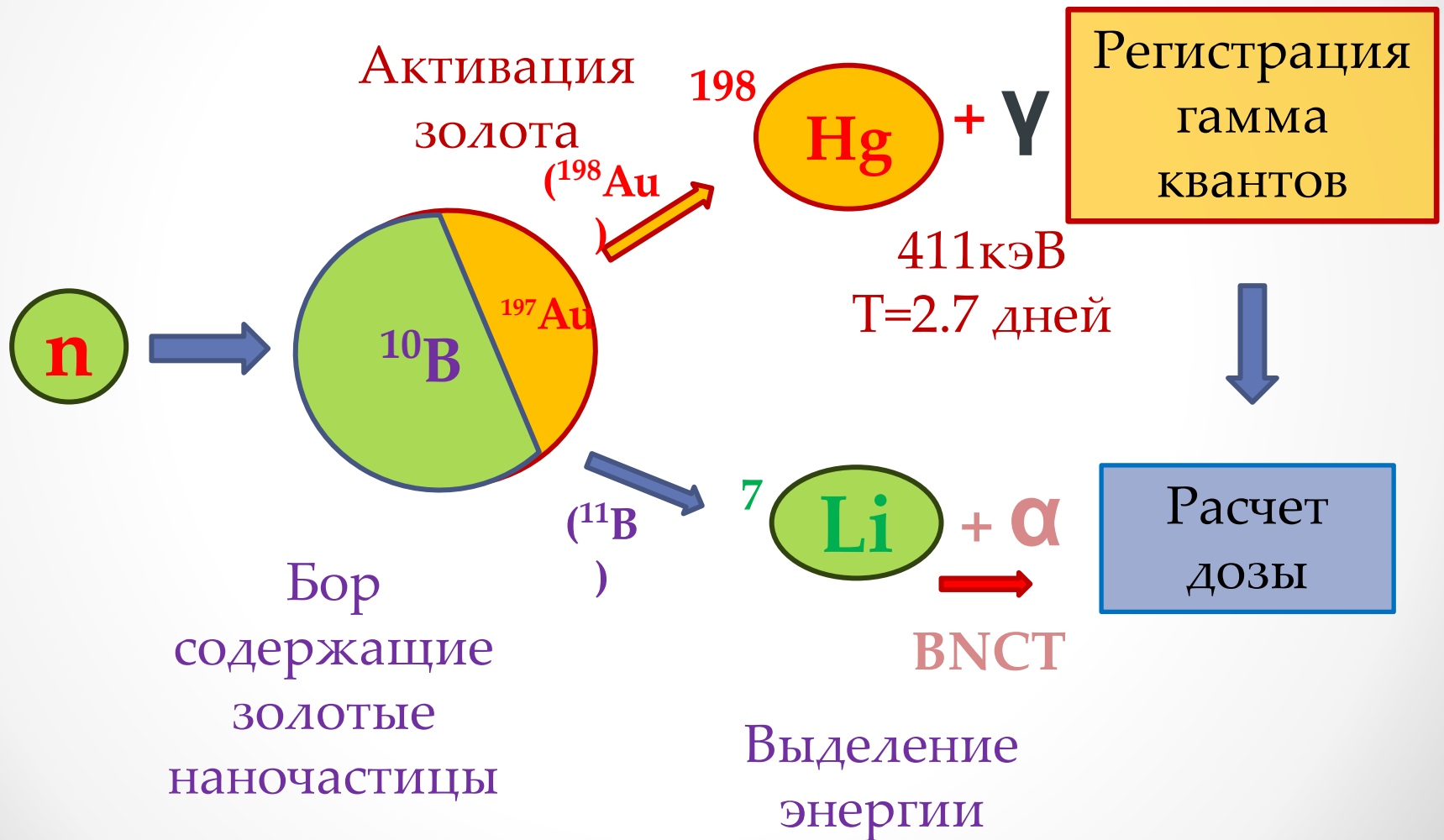
**n** – концентрация бора, ppm

**m** – масса золота

# Зависимость коэффициента от ТОЛЩИНЫ



# Новая концепция



# Испытания нового вещества

## доставщика

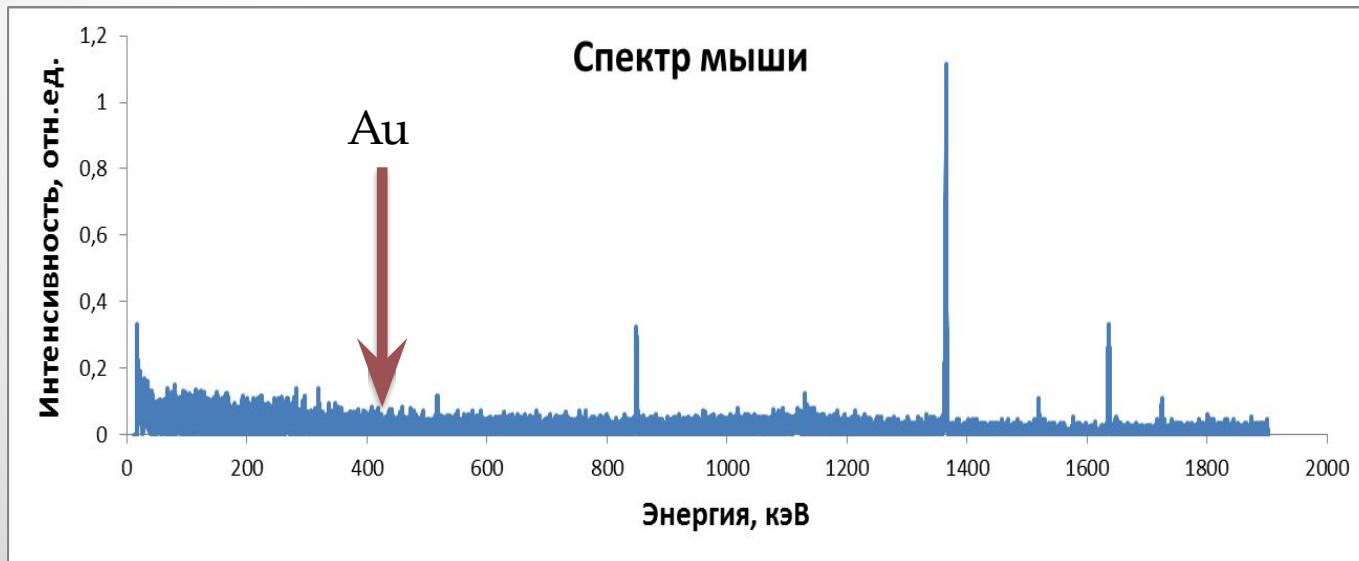
In vivo эксперименты 22 ноября 2018

Золотые наночастицы с бором



# Измерение спектра мышей, способ для расчета потока нейтронов

Линии спектра:  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{38}\text{Cl}$ ,  $^{42}\text{K}$ ,  $^{54}\text{Mn}$



# Автоматически комплекс сканирования образцов



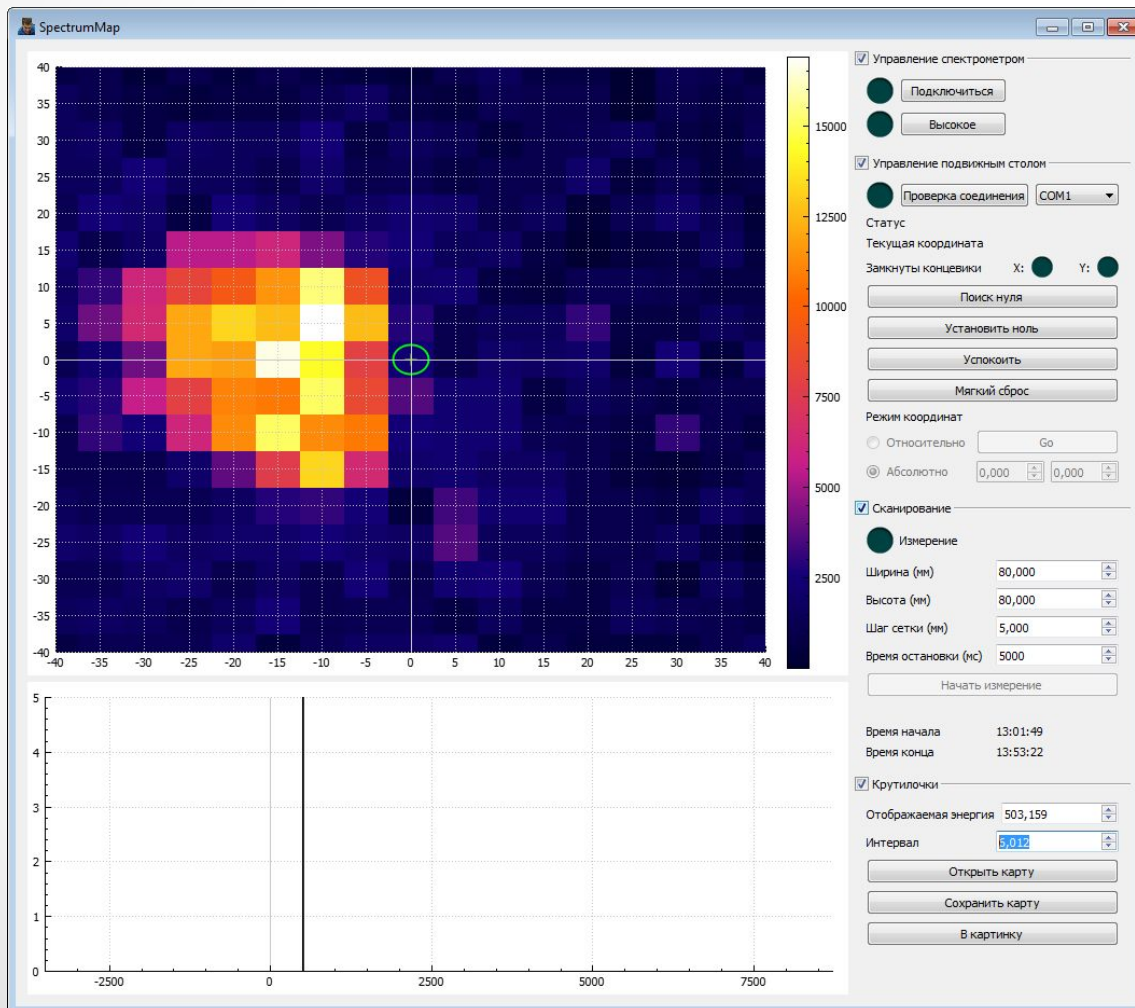
Компьютер с  
программным  
обеспечением

HPGe-детектор

Свинцовый коллиматор  
(размер отверстия можно  
изменять)

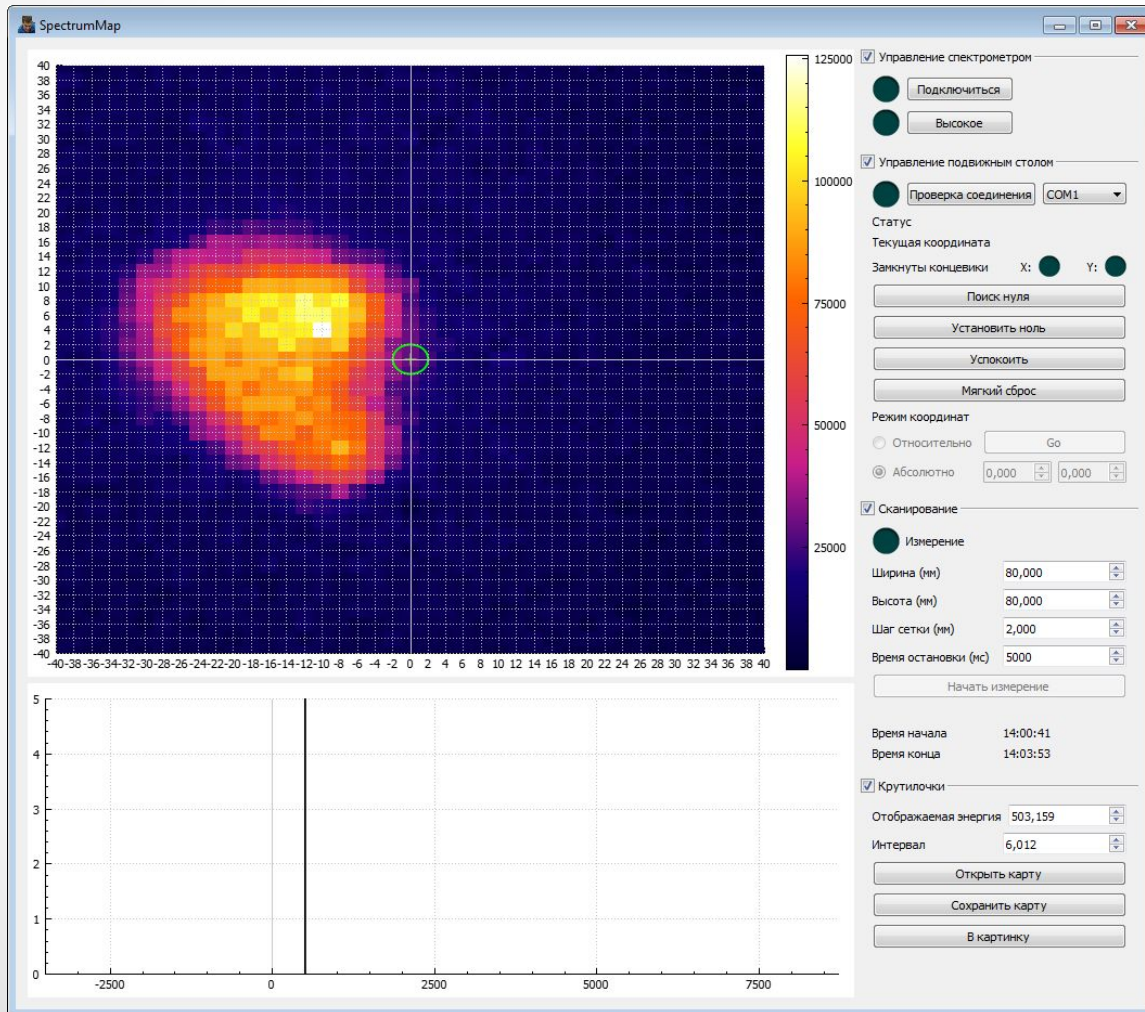
2D подвижный стол

# Автоматически комплекс сканирования образцов



Время сканирования  
1 час

# Автоматически комплекс сканирования образцов



Время сканирования  
1 сутки



# Планы на будущее

- Изготовить активационные фольги подходящие для наших условий.
- Дальнейшее усовершенствование автоматического комплекса сканирования образцов.
- Испытание вещества доставщика бора с золотом на мышах.



# Восстановление спектра

*ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2018, том 82, № 6, с. 814–818*

---

---

*УДК 539.12...164,539.125.5,543.522*

## **ВОЗМОЖНОСТЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ СПЕКТРА НЕЙТРОНОВ ФОТОНЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА МЕТОДОМ НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННОГО АНАЛИЗА**

**© 2018 г. А. А. Афонин, С. В. Зуев\*, Е. С. Конобеевский**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва*

*\*E-mail: zuyev@inr.ru*

$S_i$  - число отсчетов в аналитическом пике изотопа  $i$ -го элемента = 15542

$m_i$  - масса  $i$ -го элемента в детекторе = 0,3255 г.

$g_i$  - содержание аналитического изотопа  $i$ -го элемента в естественной смеси изотопов = 0,28

$N_a$  - число Авогадро =  $6 \cdot 10^{23}$

$p_i$  - выход гамма-квантов на один распад образовавшегося радиоактивного изотопа = 0,27

$\varepsilon$  - эффективность регистрации излучения наведенной активности = 0,05

$J_i$  - скорость реакции

$A_i$  - атомный вес  $i$ -го элемента = 186

$\Lambda$  - постоянная радиоактивного распада =  $0,693 / (23,9 \cdot 60 \cdot 60)$

$t_a$  - время активации

$t_b$  - время выдержки после облучения

$t_{и}$  - время измерения = 600 с.