



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Измерение высокоэнергетичной компоненты (7–20 МэВ) тормозного спектра методом фотоядерных реакций

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Россия, г. Снежинск

И.Н. Шишков, В.А. Флегентов, К.В. Сафронов Е. С. Борисов,
И. В. Пензин, К. С. Волосенко, О. В. Зацепин, А. В. Потапов

Лазер-плазменные источники рентгеновского излучения обладают рядом отличительных преимуществ:

- малый размер излучающей области (~ 100 мкм);
- короткая длительность вспышки РИ ($\sim 10 \div 100$ пс);
- высокая энергия квантов (до десятков МэВ);
- широкие возможности геометрии облучения.

Одним из перспективных направлений применения лазер-плазменных источников является радиография.

Для задач радиографии наибольший интерес представляют кванты соответствующие окну прозрачности большинства материалов ($1 \div 4$) МэВ.

В настоящей работе представлены результаты измерений спектра тормозного излучения лазер-плазменного источника в энергетических диапазонах ($0,1 \div 1$) МэВ и ($7 \div 20$) МэВ.

Методы измерения тормозного излучения

Предполагается, что дифференциальный спектр тормозного излучения лазерной плазмы на отдельных участках имеет экспоненциальную форму с характерной температурой T_{hot} и амплитудой A_0 :

$$\Phi(E) = \frac{d^2 N_\gamma}{dE d\Omega} = A_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{T_{hot}}\right)$$



Метод поглощающих фильтров
(0,1 ÷ 1) МэВ

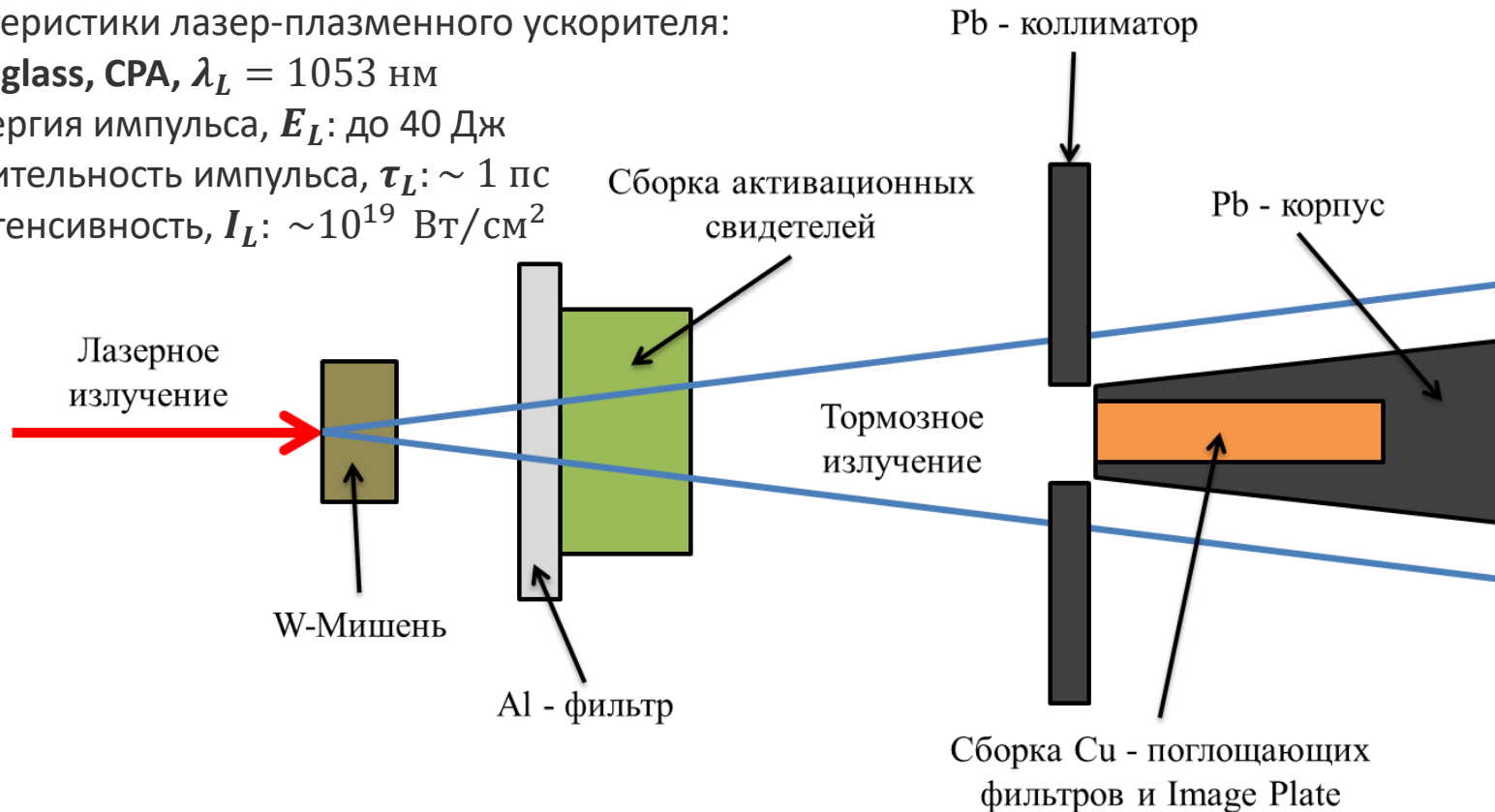


Метод фотоядерной активации
(7 ÷ 20) МэВ

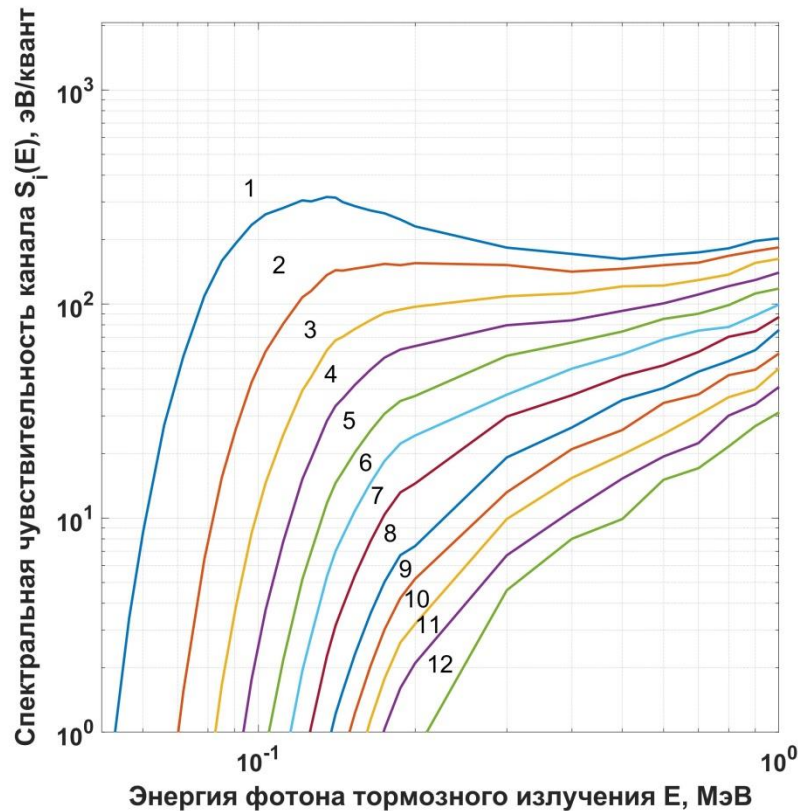
Схема экспериментов

Характеристики лазер-плазменного ускорителя:

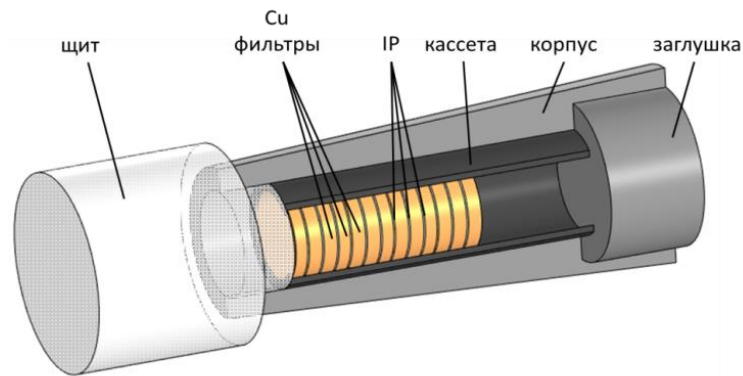
- **Nd:glass, CPA, $\lambda_L = 1053$ нм**
- Энергия импульса, E_L : до 40 Дж
- Длительность импульса, τ_L : ~ 1 пс
- Интенсивность, I_L : $\sim 10^{19}$ Вт/см²



Метод поглощающих фильтров



Расчетная спектральная чувствительность детекторов Image Plate к фотонам тормозного излучения [1]

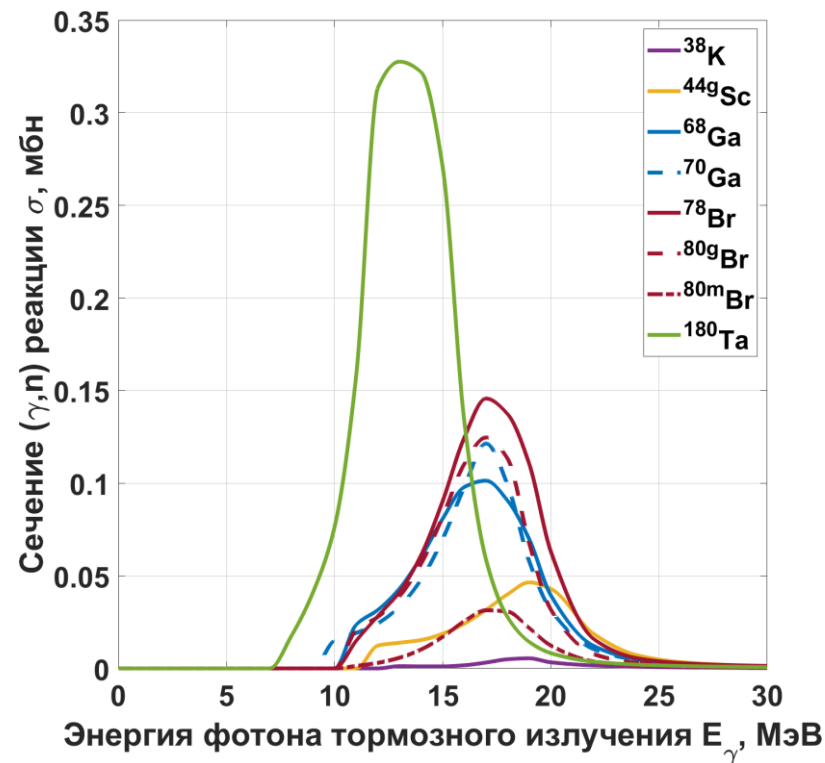


Сборка из 12 детекторов Image Plate

$$sig_i = \int_0^{1 \text{ МэВ}} S_i(E) \cdot A_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{T_{hot}}\right) dE$$

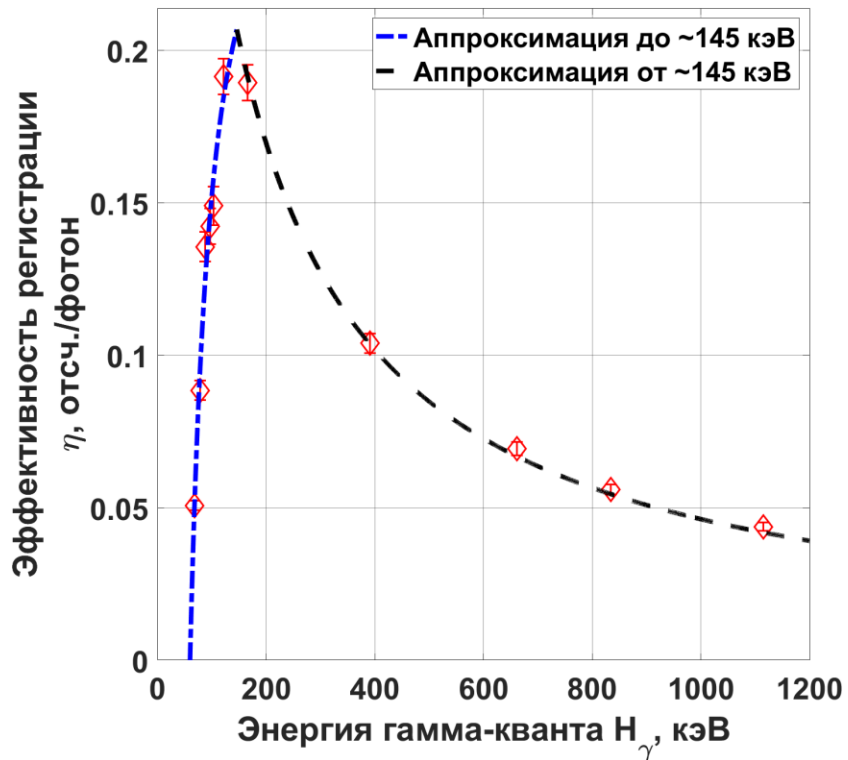
Метод фотоядерной активации

- $T_{1/2}$ – период полураспада;
- E_{th} – пороговая энергия;
- σ – форму сечение (γ, n) реакции;
- H_γ – энергии гамма-квантов испускаемых при распаде изотопа и их вероятности распада;
- Содержание родительского изотопа в облучаемом материале.



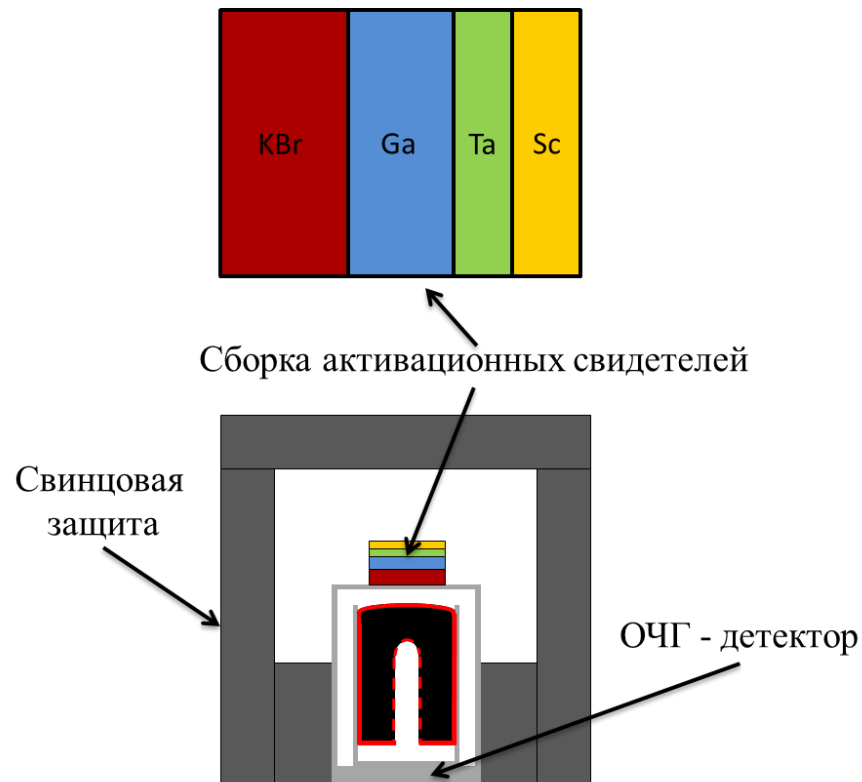
Пример сечений фотоядерных (γ, n) реакций
используемых изотопов [TENDL-2012]

Измерения в ОЧГ-детекторе

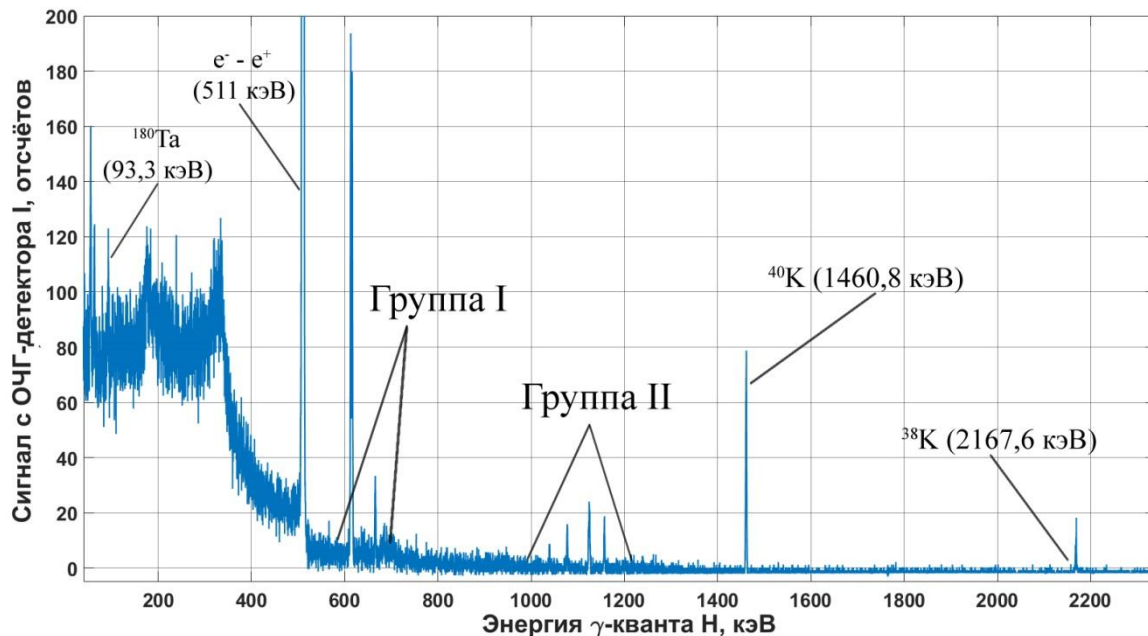


Эффективность регистрации ОЧГ-детектора, измеренная с помощью набора эталонных источников ОСГИ

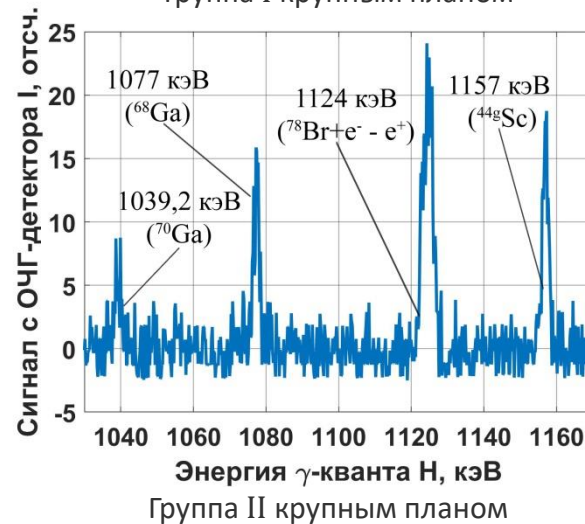
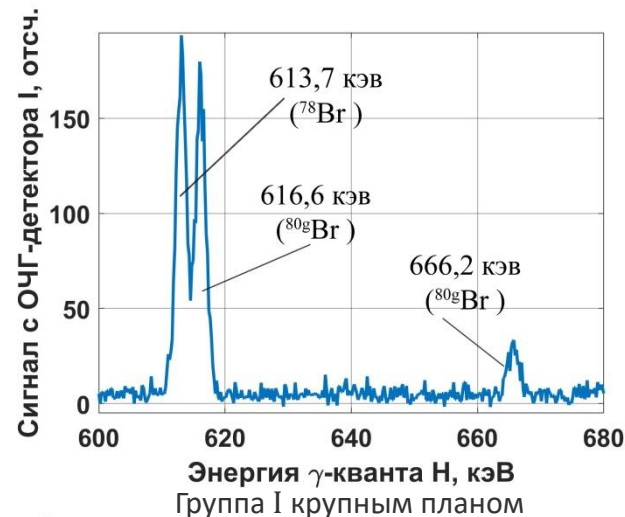
KBr (4 мм), Ga (0,7мм), Ta (0,2 мм), Sc (0,5 мм)



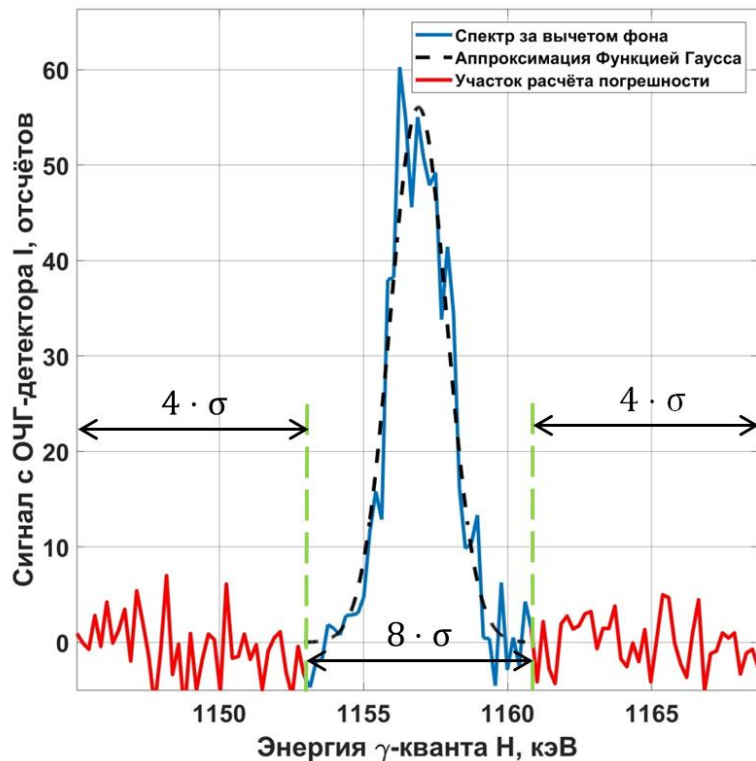
Пример измеряемого спектра



Пример спектра активационного свидетеля (KBr+Sc+Ga+Ta) за вычетом природного радиационного фона, измеренный за время $t_{izm} = 4547\text{с} \approx 1,3$ часа



Алгоритм обработки измеренных линий



Результат аппроксимации функцией Гаусса линии $^{44}\text{Sc}(1157 \text{ кэВ})$

Количество отсчётов зарегистрированных ОЧГ-детектором определялось из интеграла функции Гаусса:

$$I = \int_{-\infty}^{+\infty} I_{\max} \cdot \exp \left[- \left(\frac{H - H_{\gamma}}{\sqrt{2}\sigma} \right)^2 \right] dH = I_{\max} \cdot \sigma \sqrt{2\pi}$$

ΔI_r - шум ОЧГ-детектора, рассчитанный на выделенных участках спектра шириной $4 \cdot \sigma$

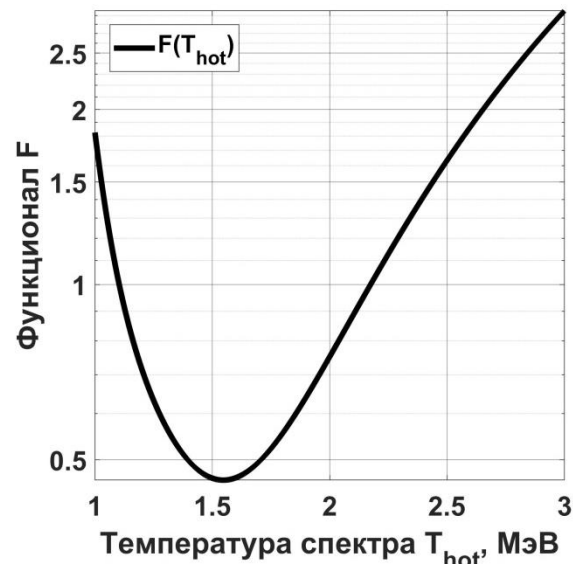
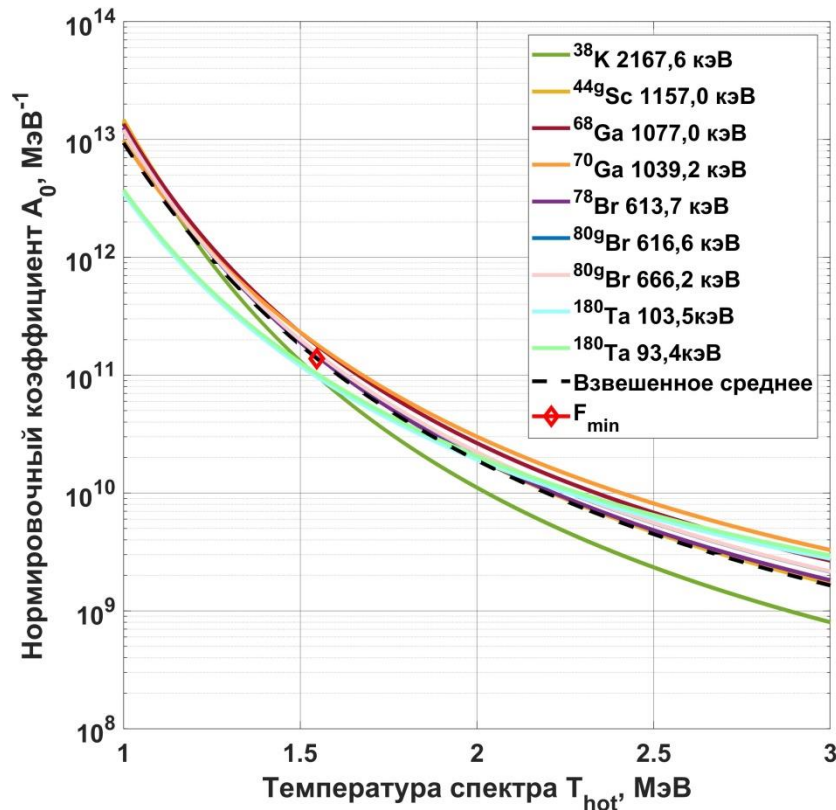
Погрешность вычисленного интеграла:

$\Delta I = \Delta I_r \cdot \sqrt{c}$, где c – количество каналов ОЧГ-детектора, попадающих в область $8 \cdot \sigma$

Анализ групп функций $A_0(T_{hot})$



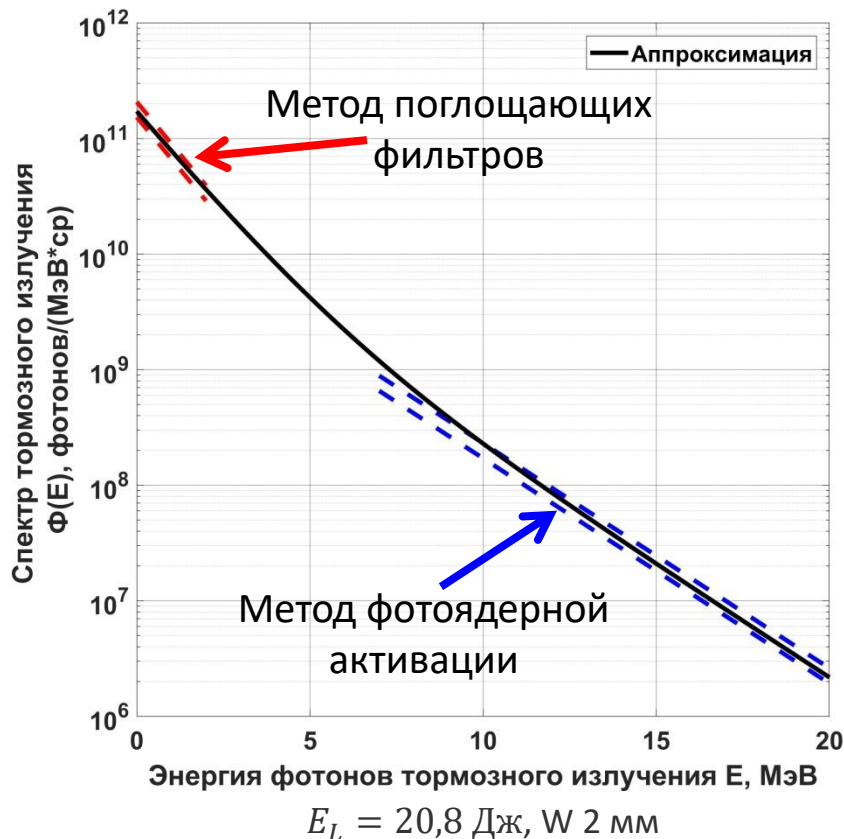
РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



Функционал суммы квадратов относительных отклонений $A_0^i(T_{hot})$ от $\overline{A_0}(T_{hot})$

$$F(T_{hot}) = \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{A_0^i(T_{hot})}{\overline{A_0}(T_{hot})} \right)^2$$

Пример восстановленного спектра



Измеренный спектр на участке (0,1 ÷ 1) МэВ:

$$\Phi(E) = (1,8 \times 10^{11}) \cdot \exp\left(-\frac{E}{1,2}\right)$$

Измеренный спектр на участке (7 ÷ 20) МэВ:

$$\Phi(E) = (1,8 \times 10^{10}) \cdot \exp\left(-\frac{E}{2,2}\right)$$

Восстановленный спектр (0,1 ÷ 20) МэВ:

$$\Phi(E) = (1,6 \times 10^{11}) \cdot \exp\left(-\frac{E}{1,2}\right) + (1,7 \times 10^{10}) \cdot \exp\left(-\frac{E}{2,2}\right)$$

Вывод

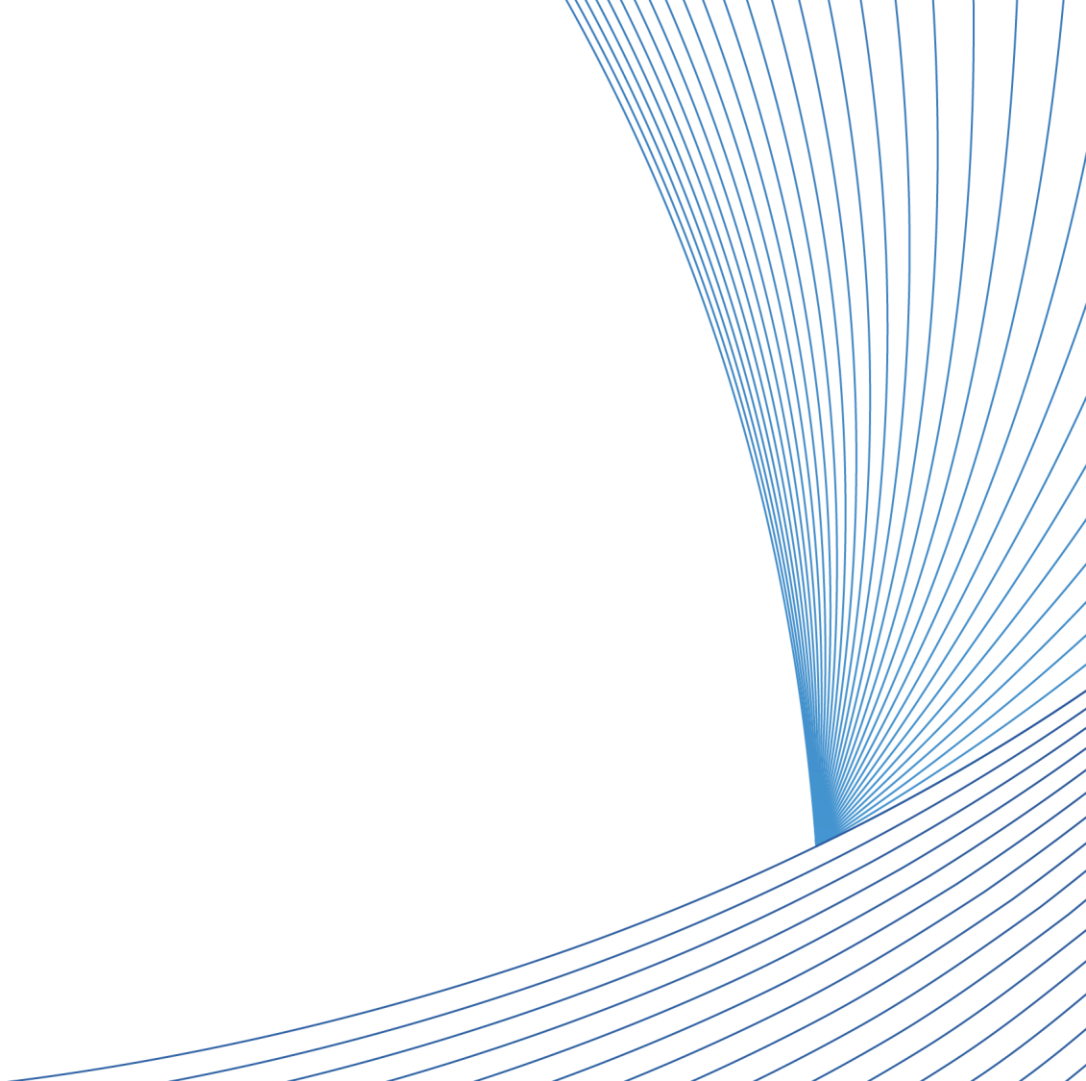
На пикосекундной лазерной установке мощностью 40 ТВт были проведены эксперименты по генерации тормозного излучения из вольфрамовых мишеней толщиной 2 мм.

Генерируемые спектры тормозного излучения были измерены комплексно посредством двух методов работающих в разных энергетических диапазонах:

- методом поглощающих фильтров ($0,1 \div 1$) МэВ;
- методом фотоядерной активации ($7 \div 20$) МэВ.

Представленный подход позволил восстановить спектры тормозного излучения в диапазоне энергий квантов ($0,1 \div 20$) МэВ.

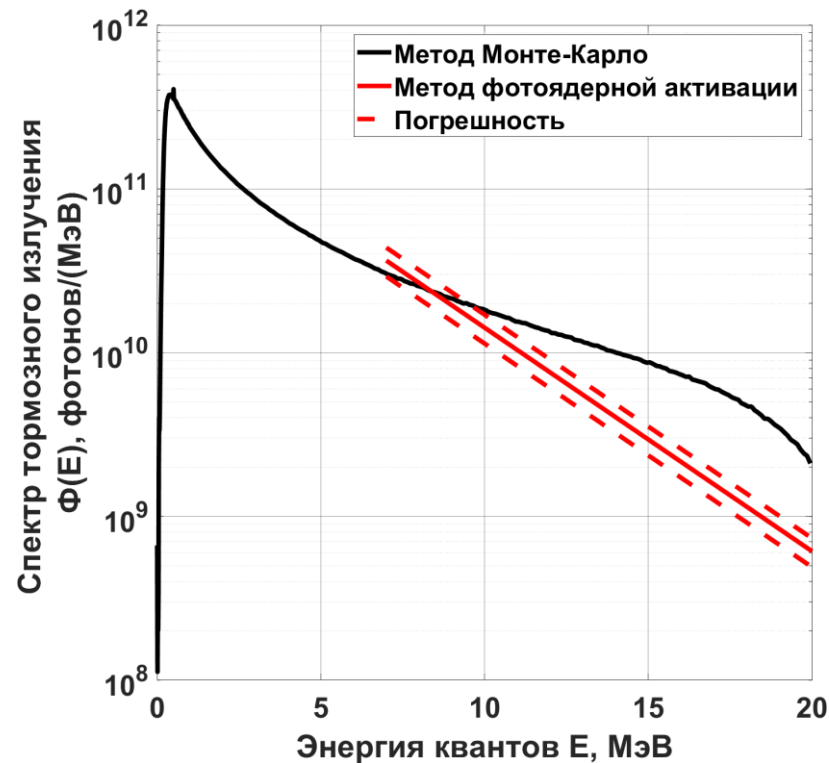
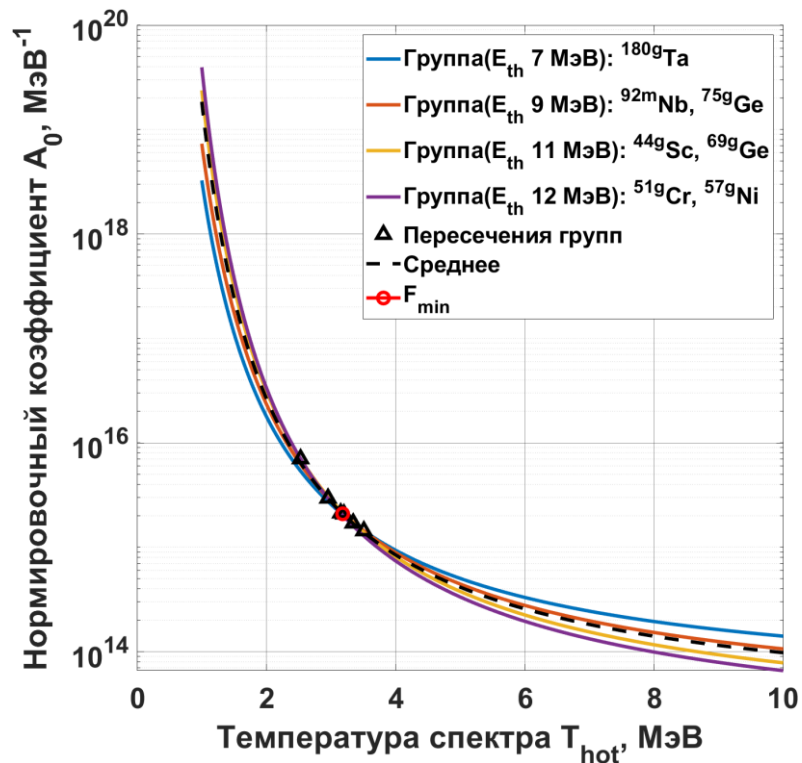
**Спасибо
за внимание**



Апробация метода фотоядерных реакций на ЛИУ



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



Спектры ТИ ЛИУ

$$\Phi(E) = (2,1 \times 10^{15}) \cdot \exp\left(-\frac{E}{3,2}\right)$$