

Исследование фотоядерных реакций в ядре $^{165}_{67}\text{Ho}$

Студент группы М24-111: Куйлиев Файзулло

Научный руководитель: Тараненко А.В., к.ф.-м.н.,
доцент каф. 11

ВВЕДЕНИЕ

В ядерной физике и энергетике важное значение имеет изучение фотоядерных реакций. Фотоядерные реакции в основном проявляются в области гигантского дипольного резонанса (ГДР), где из ядра могут испускаться один или несколько нуклонов.

Ранее в Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ, Россия, Дубна) был проведен эксперимент на электронном ускорителе LINAC-200.

В эксперименте энергии электронного пучка составляли 60, 80 и 100 МэВ. Электроны тормозились в свинцовом конвертере, в результате чего формировалось тормозное γ -излучение.

Образец гольмия (^{165}Ho) был облучён тормозными γ -квантами, в результате чего в ядре ^{165}Ho протекали различные фотоядерные реакции. Для этих реакционных каналов в ранее проведённом эксперименте были определены значения скоростей реакций R . В данной работе эти экспериментальные значения R использовались как исходные данные для расчёта **относительных выходов** и **потокосреднённых сечений**.



Рис. 1. Вид ускорителя LINAC-200

Экспериментальные параметры	
Импульсный ток	20 мА
Частота импульсов	10 Гц
Длительность импульса	2 мкс
Энергии электронных пучков	60, 80, 100 МэВ
Время облучения	30 мин
Время охлаждения	52 - 87 мин
Время измерения	10 – 480 мин
Количество измеренных γ -спектров	15 - 26



Введение: задачи и схема эксперимента

Задачи работы:

- ❖ Смоделировать формирование тормозного γ -излучения и облучение образца ^{165}Ho ;
- ❖ Рассчитать относительные выходы реакций и сечения, усреднённые по потоку γ -квантов;
- ❖ Сопоставить результаты расчётов с экспериментальными данными.

Схема эксперимента:

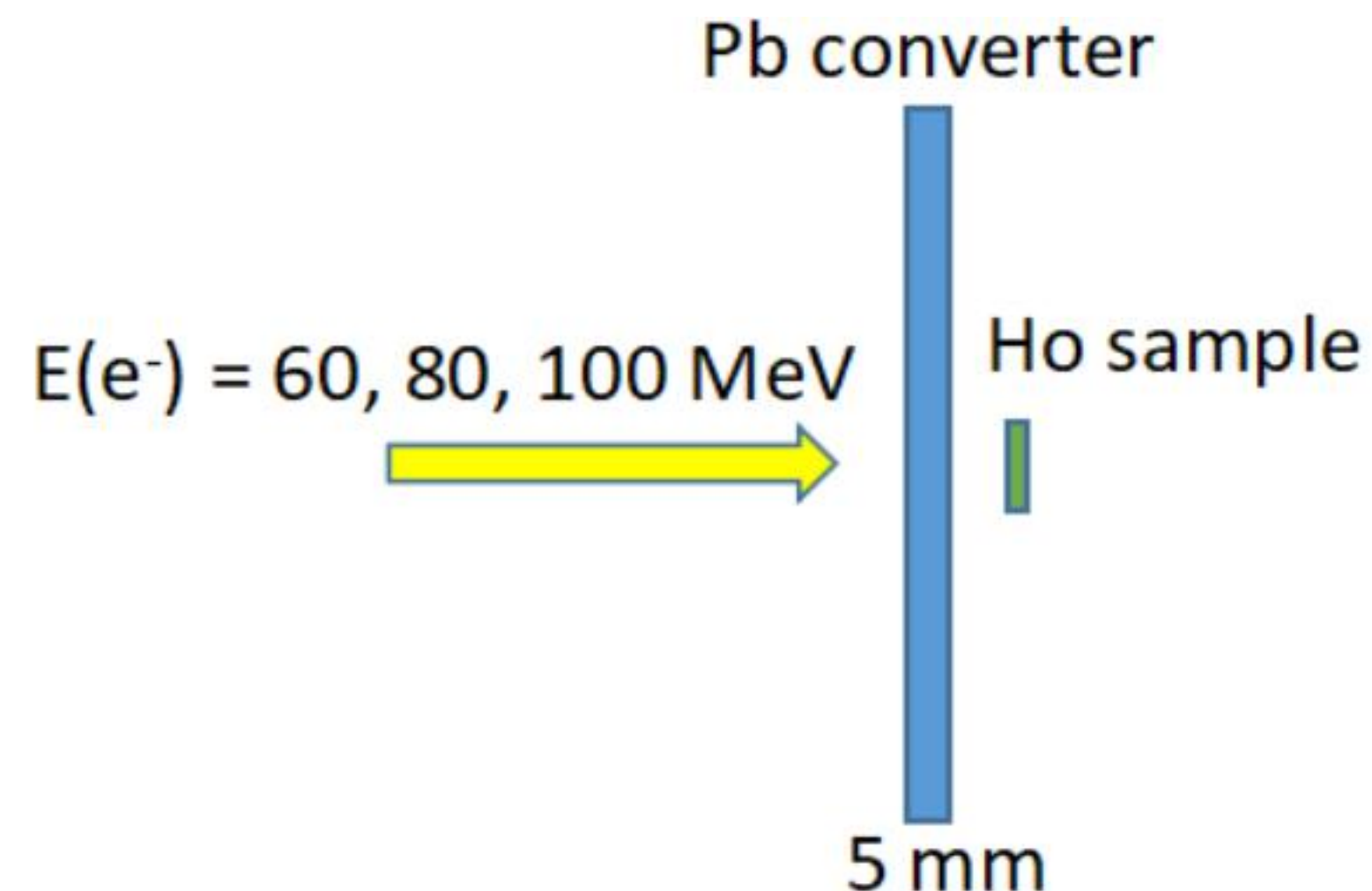


Рис. 2. Схема эксперимента (пример для конвертера 5 мм; расчёты выполнены для 3 и 5 мм)

На схеме показана экспериментальная геометрия: электронный пучок с энергиями 60, 80 и 100 МэВ попадает в Pb-конвертер, где формируется тормозное γ -излучение, облучающее образец ^{165}Ho . Эта геометрия была использована в Geant4.

Цель исследования и методика

Цель исследования:

- ❖ Изучение фотоядерных реакций в ядре ^{165}Ho ;
- ❖ Определение относительных выходов реакций и сечений, усреднённых по потоку γ -квантов;
- ❖ Сравнение расчётных результатов с экспериментальными данными.

Методика:

- **Geant4** - моделирование экспериментальной геометрии, формирования тормозного γ -излучения и расчёт потока γ -квантов;
- **TALYS** - расчёт энергетически зависимых сечений реакционных каналов $\sigma(E)$;
- **Энергия электронного пучка:** 50 - 110 МэВ, шаг 5 МэВ;
- Расчёты выполнены отдельно для Pb - конверторов толщиной 3 мм и 5 мм;
- **Масса образца ^{165}Ho :** 500 мг.

Использованные программы:

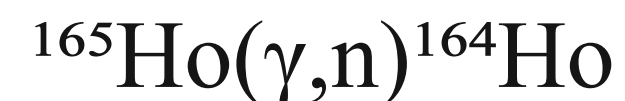
Geant4 - программный пакет для моделирования прохождения частиц и излучения через вещество методом Монте-Карло.

TALYS - программа для расчёта и анализа ядерных реакций в широком диапазоне энергий.

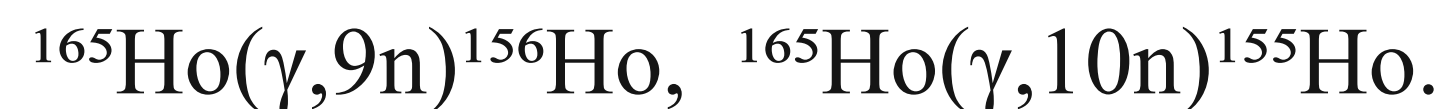
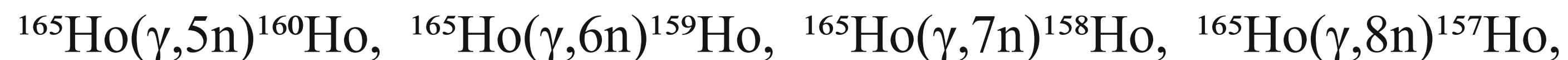
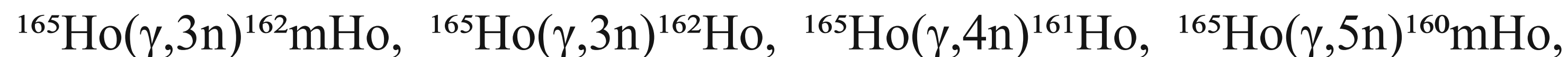


В работе были рассмотрены следующие группы фотоядерных реакций:

1. Опорный низкопороговый канал:



2. Многонейтронные каналы:



3. Сложные каналы с испусканием протонов:



Из рассматриваемых реакций канал $^{165}\text{Ho}(\gamma, n)^{164}\text{Ho}$ был выбран в качестве опорного, так как он имеет наименьшую пороговую энергию. Остальные каналы нормировались относительно этого канала для сравнения их относительных выходов.



Для расчётов была использована следующая формула относительного выхода реакции:

$$Y_{rel,i} = \frac{\int_{E_{th}}^{E_{\gamma max}} \sigma_{(i)}(E) W(E, E_{\gamma max}) dE}{\int_{E_{th}}^{E_{\gamma max}} \sigma_{(\gamma,n)}(E) W(E, E_{\gamma max}) dE}$$

Формула позволяет сравнить вклад выбранного реакционного канала с опорной реакцией $^{165}\text{Ho}(\gamma,n)^{164}\text{Ho}$ при одном и том же спектре тормозного излучения.

Для расчёта сечения, усреднённого по потоку, была использована следующая формула:

$$\langle \sigma \rangle = \frac{\int_{E_{th}}^{E_{\gamma max}} \sigma_{(i)}(E) W(E, E_{\gamma max}) dE}{\int_{E_{th}}^{E_{\gamma max}} W(E, E_{\gamma max}) dE}$$

Обозначения:

$\sigma_{(i)}(E)$ - сечение выбранного реакционного канала;

$\sigma_{(\gamma,n)}(E)$ - сечение опорной реакции;

$W(E, E_{\gamma max})$ - спектральное распределение потока тормозных γ -квантов;

E_{th} - пороговая энергия реакции;

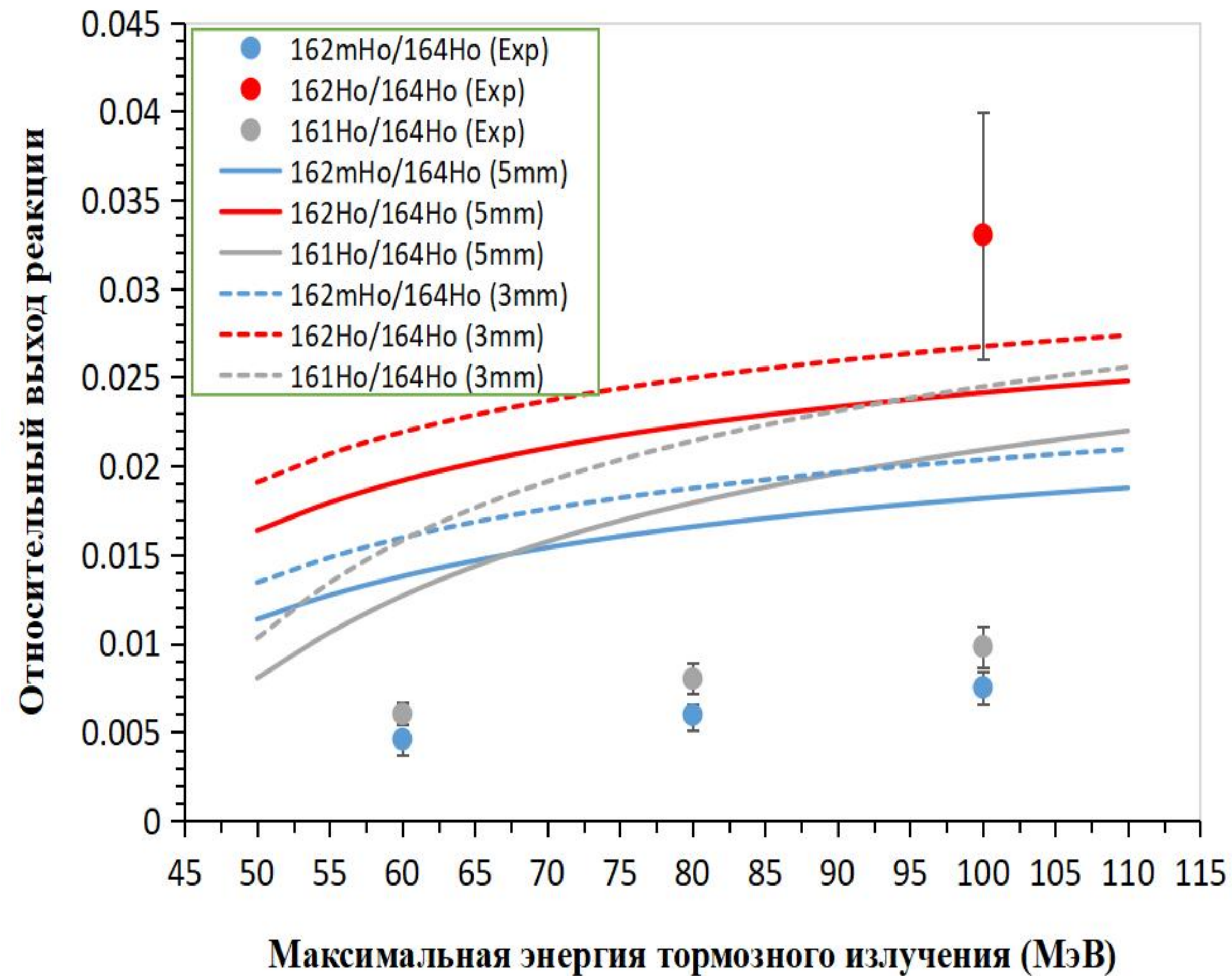
$E_{\gamma max}$ - максимальная энергия тормозного излучения.

Экспериментальные точки рассчитывались на основе значений скоростей реакций R_i , полученных в ранее проведённом эксперименте.



Результаты и их анализ — Относительные выходы (нормировка на (γ, n))

На графике представлены относительные выходы реакционных каналов $^{165}\text{Ho}(\gamma, 3n)^{162m}\text{Ho}$, $^{165}\text{Ho}(\gamma, 3n)^{162}\text{Ho}$ и $^{165}\text{Ho}(\gamma, 4n)^{161}\text{Ho}$, нормированные на выход опорного канала $^{165}\text{Ho}(\gamma, n)^{164}\text{Ho}$.



По оси X - максимальная энергия тормозного излучения $E_{\gamma\text{max}}$,

По оси Y - относительный выход $Y_{\text{rel}, i}$

Точки - экспериментальные данные (с погрешностями), линии - результаты расчёта Geant4.

Сплошные линии - Pb-конвертор 5 мм, пунктирные - Pb-конвертор 3 мм.

Цвет показывает, какой именно канал изображён: **синий** - это отношение выходов $^{162m}\text{Ho}/^{164}\text{Ho}$, **красный** - $^{162}\text{Ho}/^{164}\text{Ho}$, серый - $^{161}\text{Ho}/^{164}\text{Ho}$.

Экспериментальные точки были получены из значений R_i , определённых ранее:

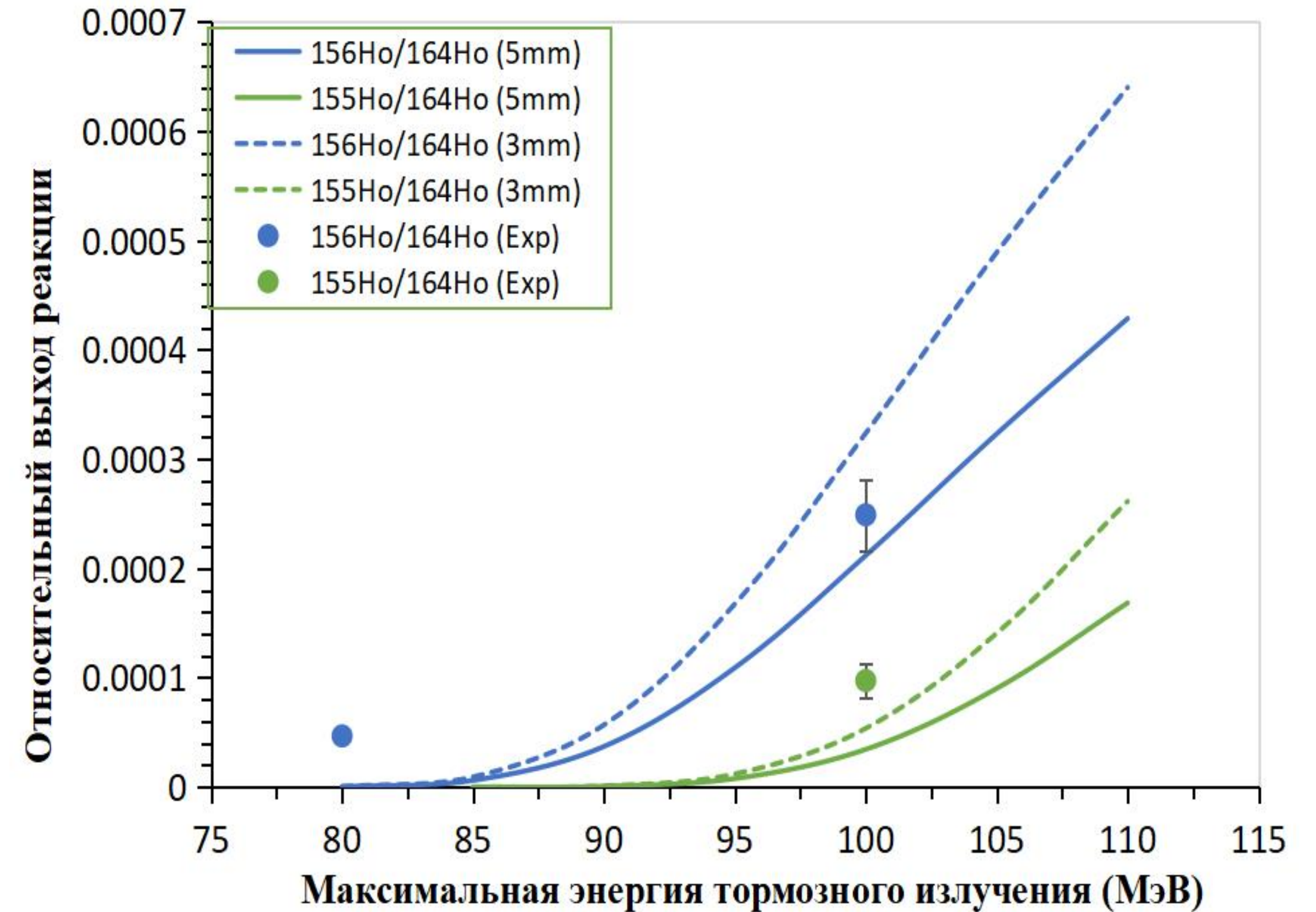
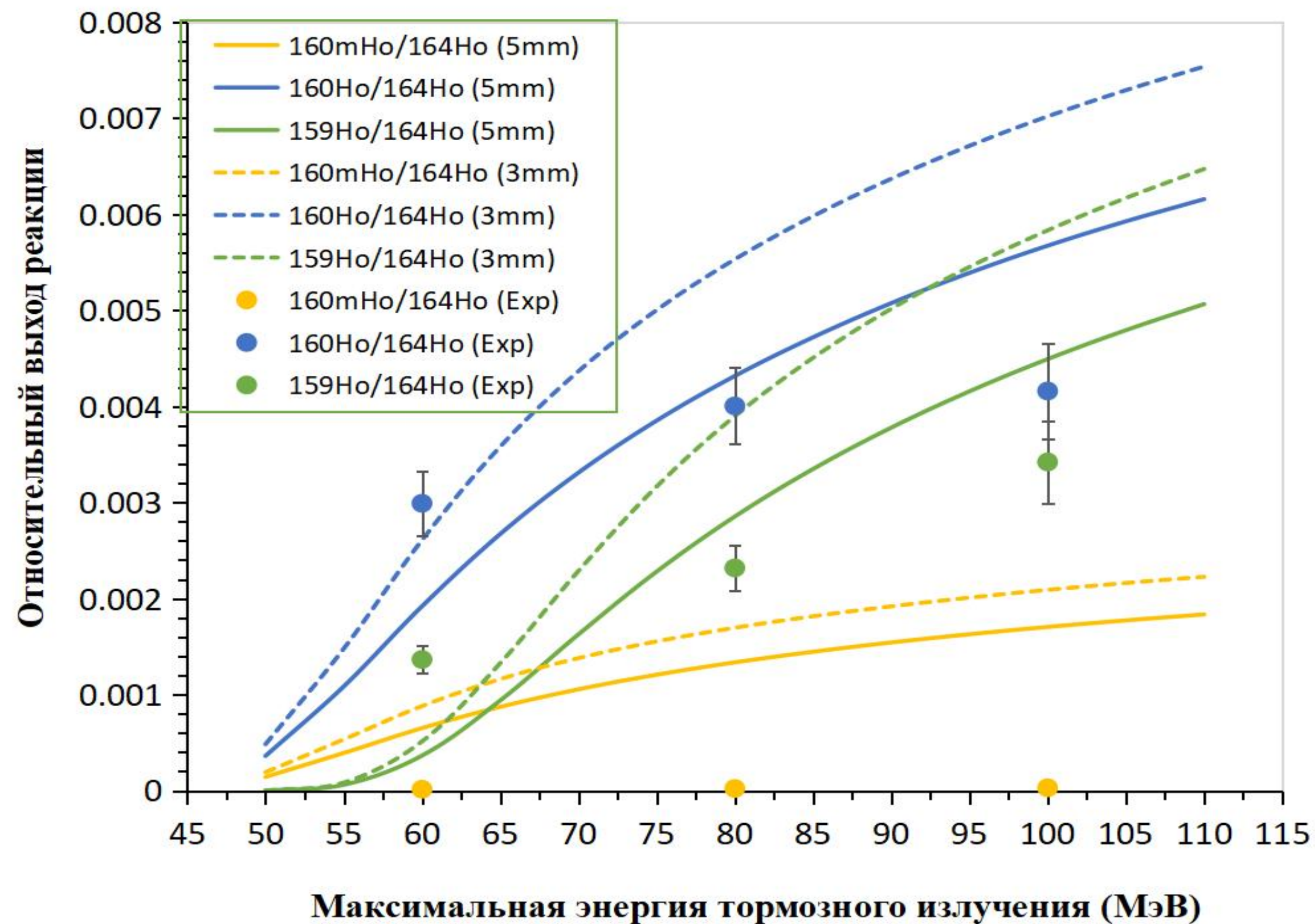
$$Y_{\text{rel}, i}^{\text{exp}} = \frac{R_i}{R_{\gamma n}}$$

Расчётные кривые строились по интегральной формуле с использованием $\sigma(E)$ и потока γ -квантов, рассчитанного в Geant4.



Результаты и их анализ — Относительные выходы (нормировка на (γ,n))

На графиках представлены относительные выходы каналов $^{165}\text{Ho}(\gamma,5n)^{160m}\text{Ho}$, $^{165}\text{Ho}(\gamma,5n)^{160}\text{Ho}$, $^{165}\text{Ho}(\gamma,6n)^{159}\text{Ho}$, $^{165}\text{Ho}(\gamma,9n)^{156}\text{Ho}$ и $^{165}\text{Ho}(\gamma,10n)^{155}\text{Ho}$, нормированные на опорный канал $^{165}\text{Ho}(\gamma,n)^{164}\text{Ho}$.

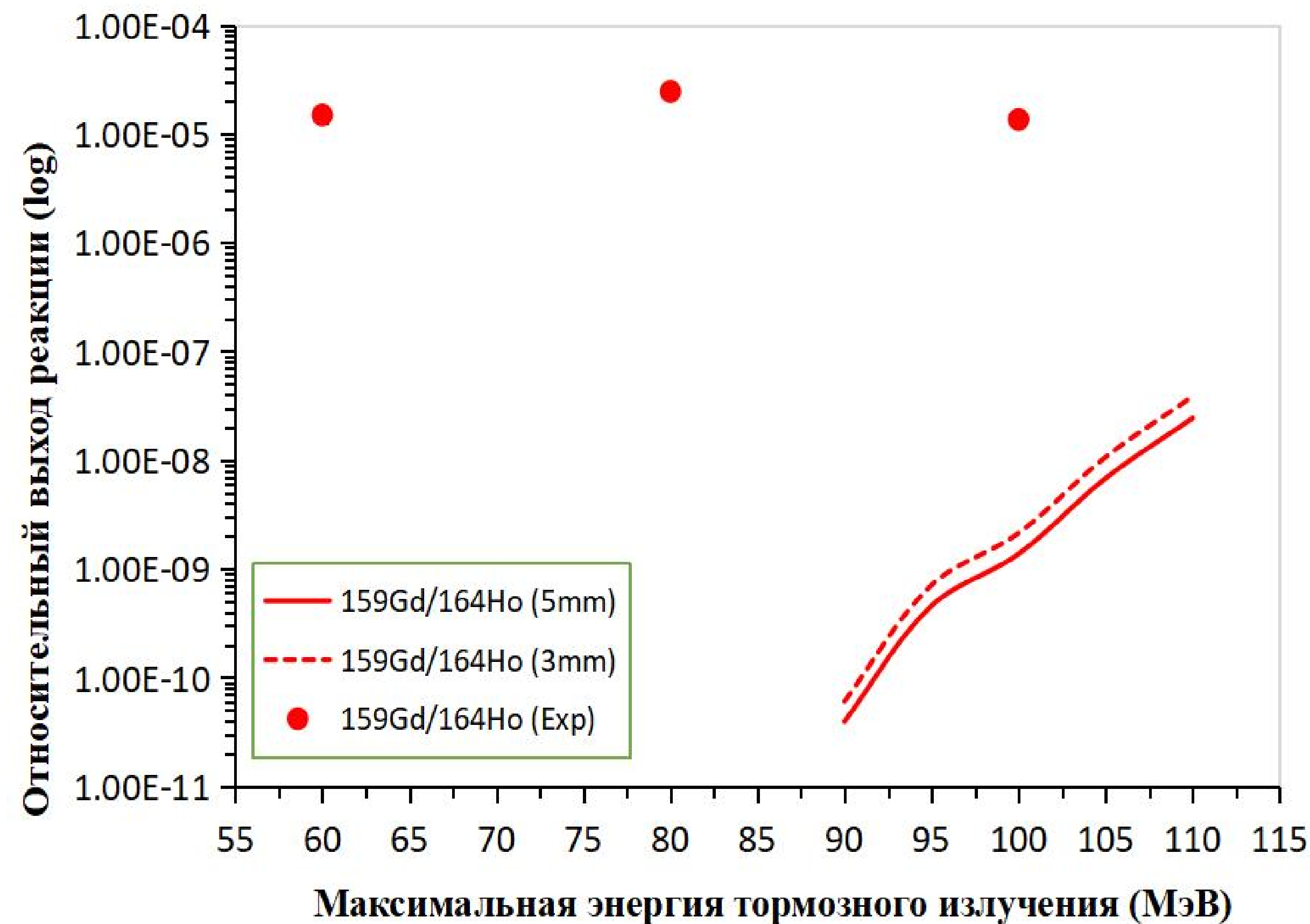
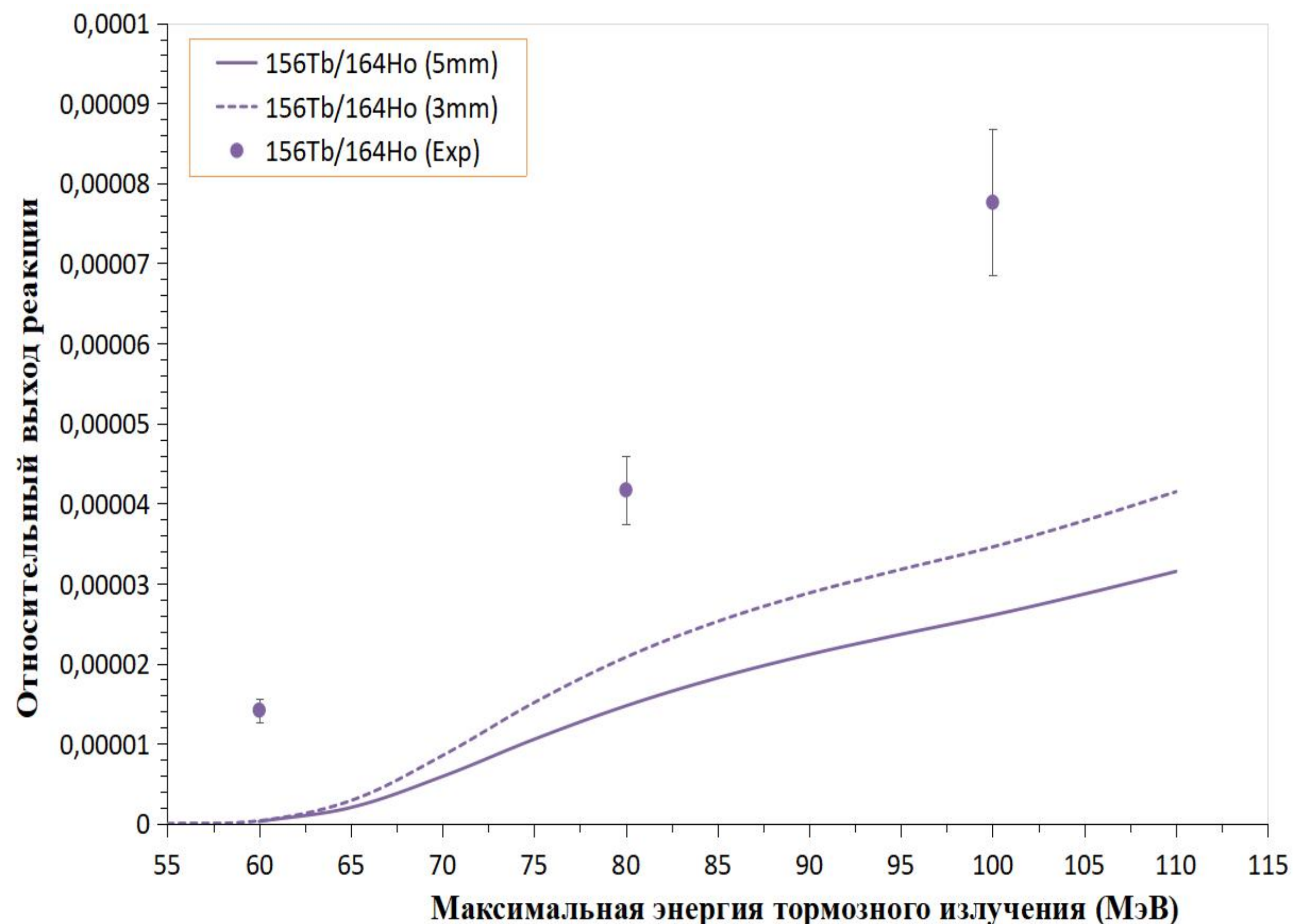


Цвета соответствуют относительным выходам: на левом графике **жёлтый** - $^{160m}\text{Ho}/^{164}\text{Ho}$, **синий** - $^{160}\text{Ho}/^{164}\text{Ho}$, **зелёный** - $^{159}\text{Ho}/^{164}\text{Ho}$; на правом графике **синий** - $^{156}\text{Ho}/^{164}\text{Ho}$, **зелёный** - $^{155}\text{Ho}/^{164}\text{Ho}$. Точки с погрешностями - экспериментальные значения, линии - результаты расчёта Geant4; сплошные линии соответствуют Pb-конвертору 5 мм, пунктирные - Pb-конвертору 3 мм.



Результаты и их анализ — Относительные выходы (нормировка на (γ, n))

На графиках представлены относительные выходы протон-эмиссионных каналов $^{165}\text{Ho}(\gamma, 7n2p)^{156}\text{Tb}$ и $^{165}\text{Ho}(\gamma, 3p3n)^{159}\text{Gd}$, нормированные на опорный канал $^{165}\text{Ho}(\gamma, n)^{164}\text{Ho}$

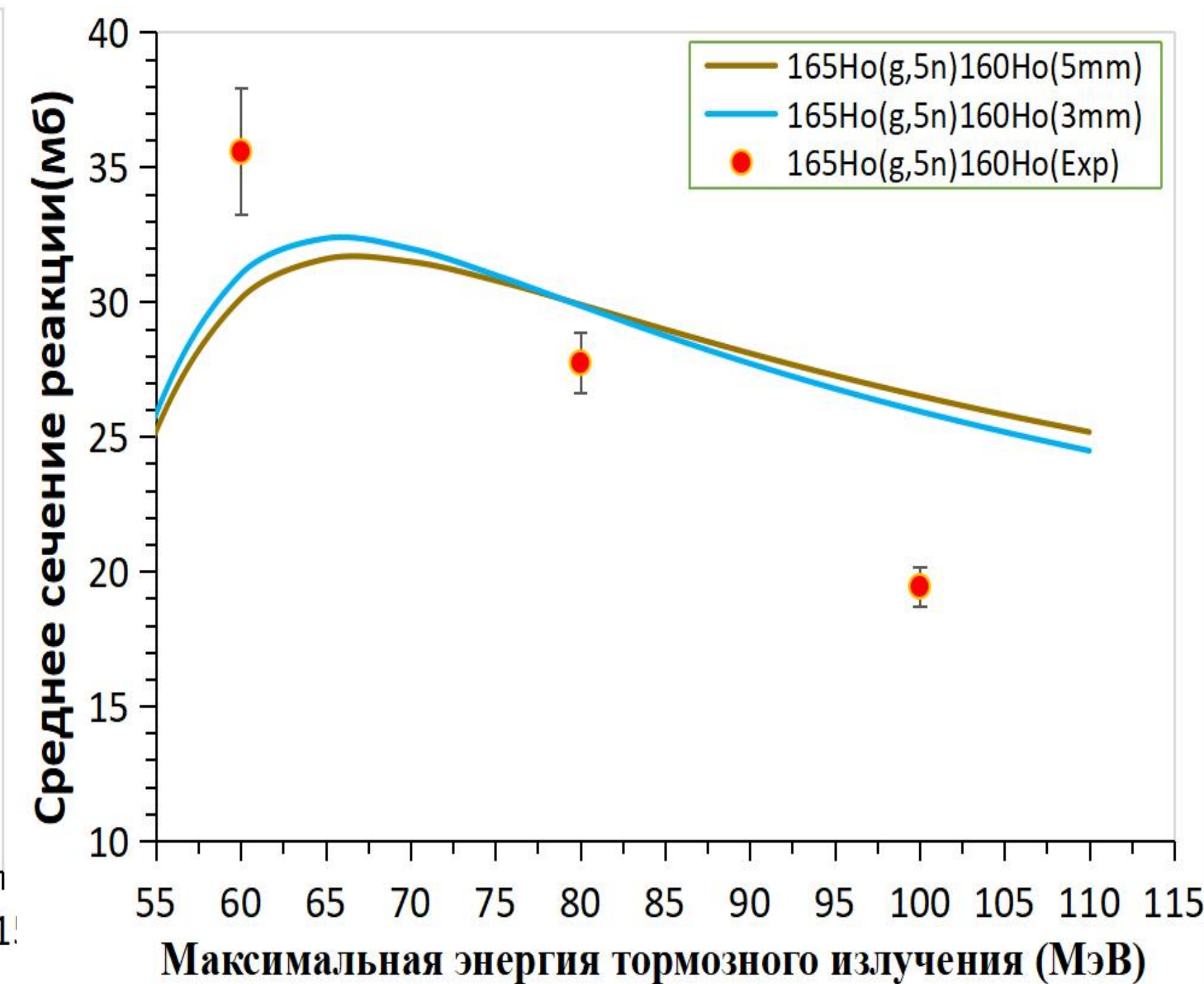
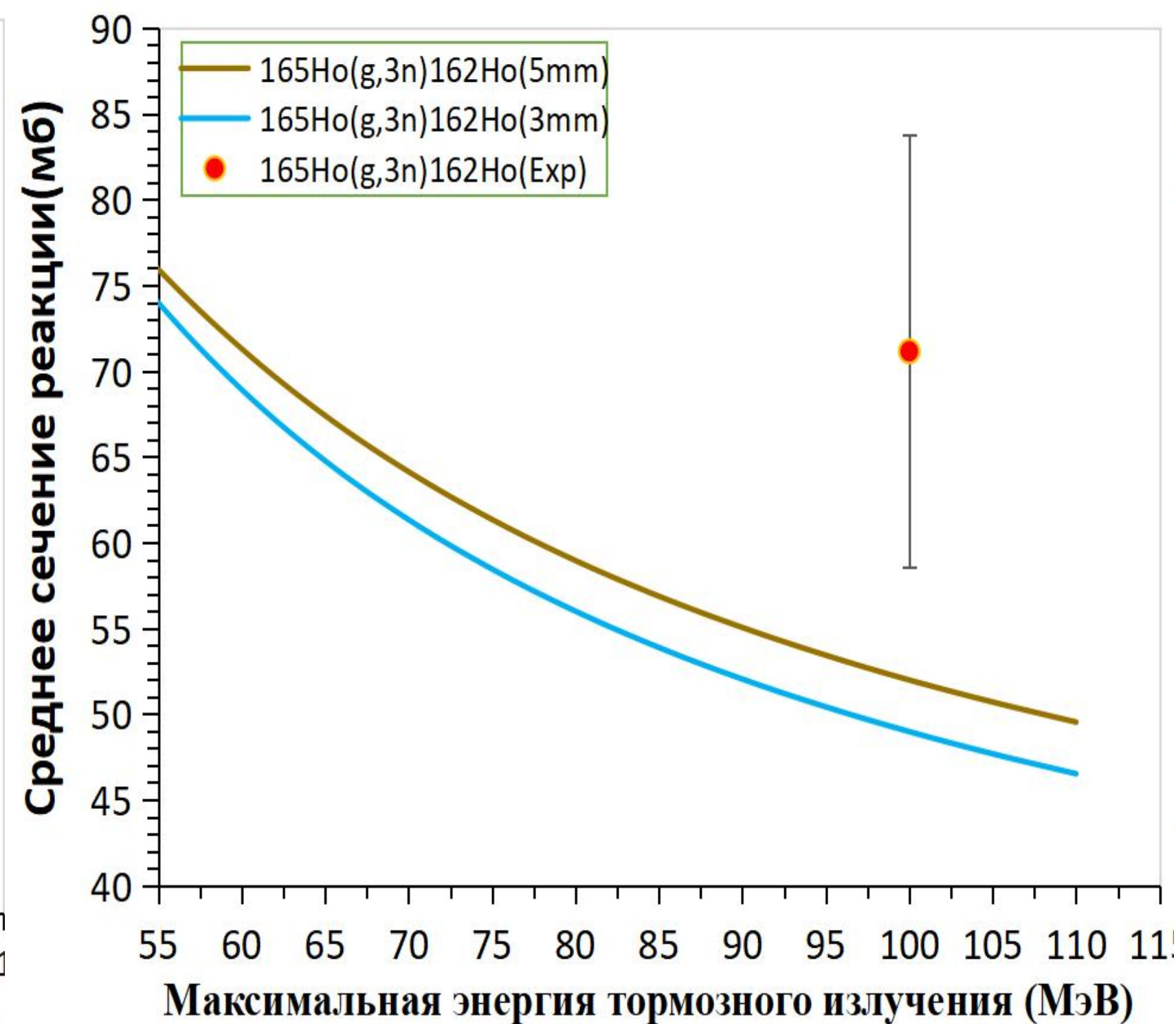
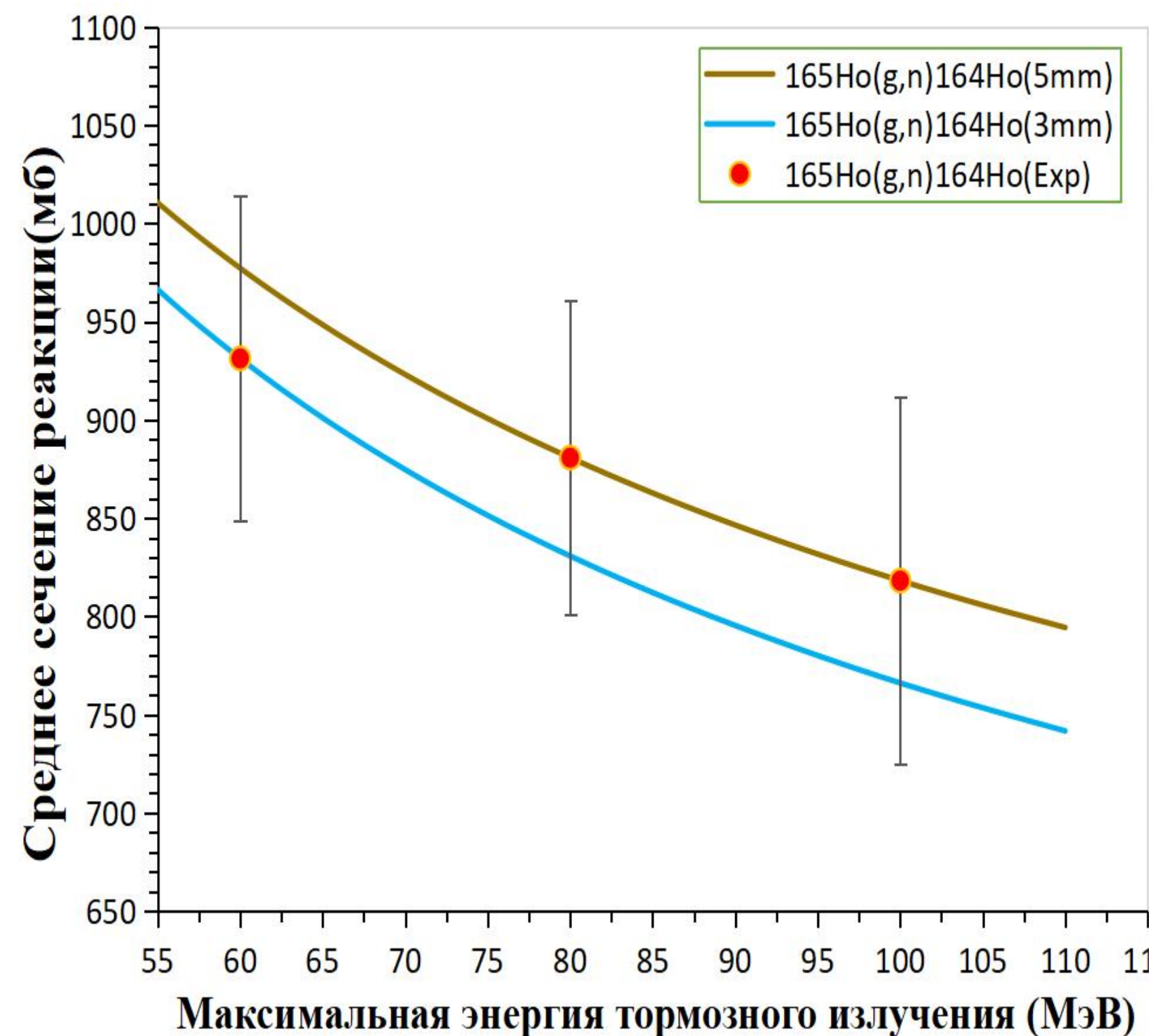


В данных протон-эмиссионных каналах наблюдается заметное расхождение между экспериментом и расчётом Geant4. Это связано с более сложным механизмом реакции: при испускании протонов необходимо преодоление кулоновского барьера, поэтому Geant4 не полностью воспроизводит экспериментальные значения для этих каналов.



Результаты и их анализ: средние (усреднённые по потоку) сечения

На графиках представлены потоково-усреднённые сечения $\langle \sigma \rangle$ реакции $^{165}\text{Ho}(\gamma, n)^{164}\text{Ho}$, $^{165}\text{Ho}(\gamma, 3n)^{162}\text{Ho}$ и $^{165}\text{Ho}(\gamma, 5n)^{160}\text{Ho}$, рассчитанные в Geant4 для Pb-конверторов толщиной 3 и 5 мм, с сопоставлением с экспериментальными данными.

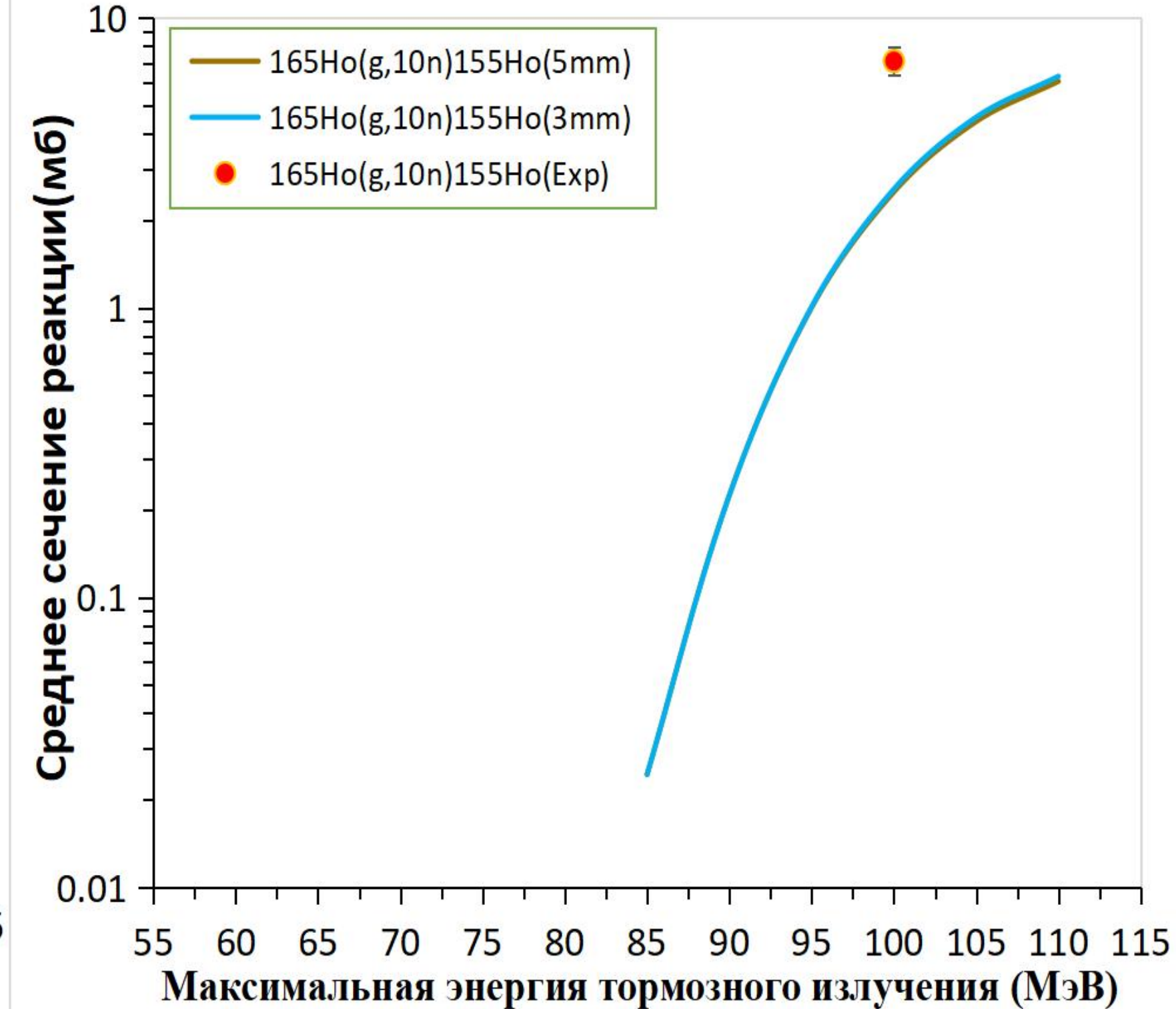
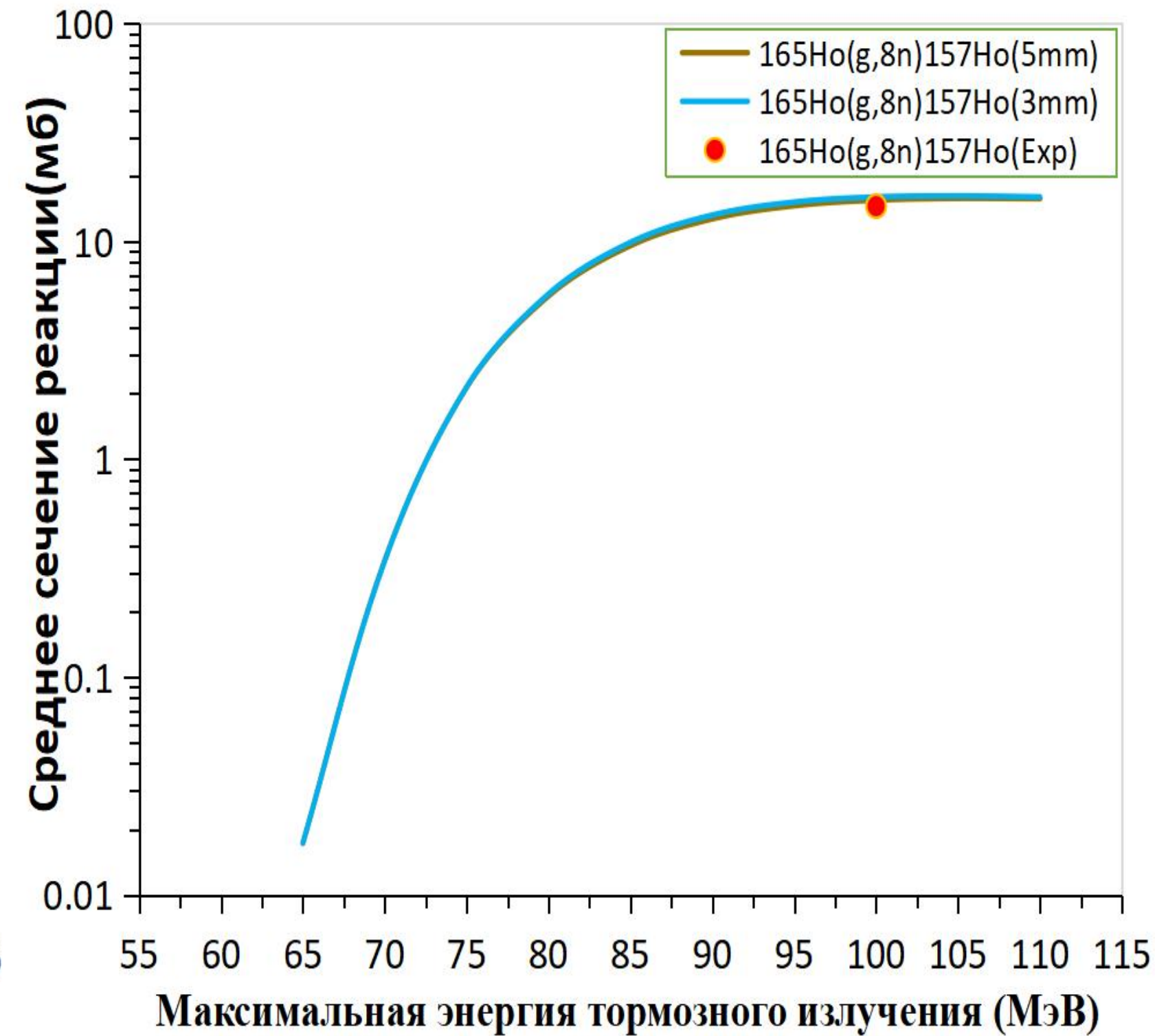
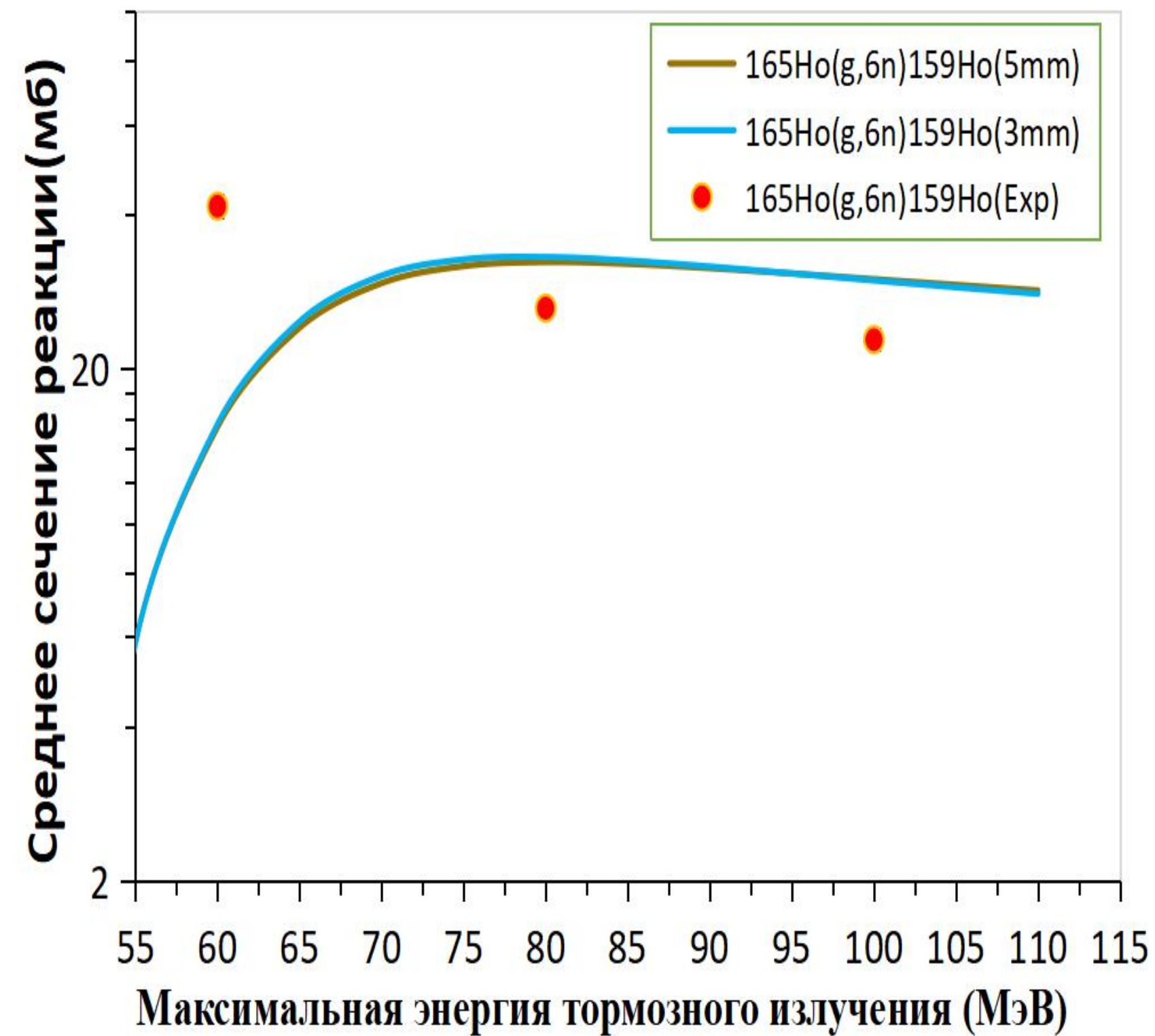


По оси X отложена максимальная энергия тормозного излучения $E_{\gamma, \text{max}}$, МэВ; по оси Y — потоково-усреднённое сечение $\langle \sigma \rangle$, (мб). **коричневая линия** соответствует расчёту Geant4 для Pb-конвертора **5 мм**, **синяя линия** — для Pb-конвертора **3 мм**, **красные точки** с погрешностями — экспериментальные значения при 60, 80 и 100 МэВ.



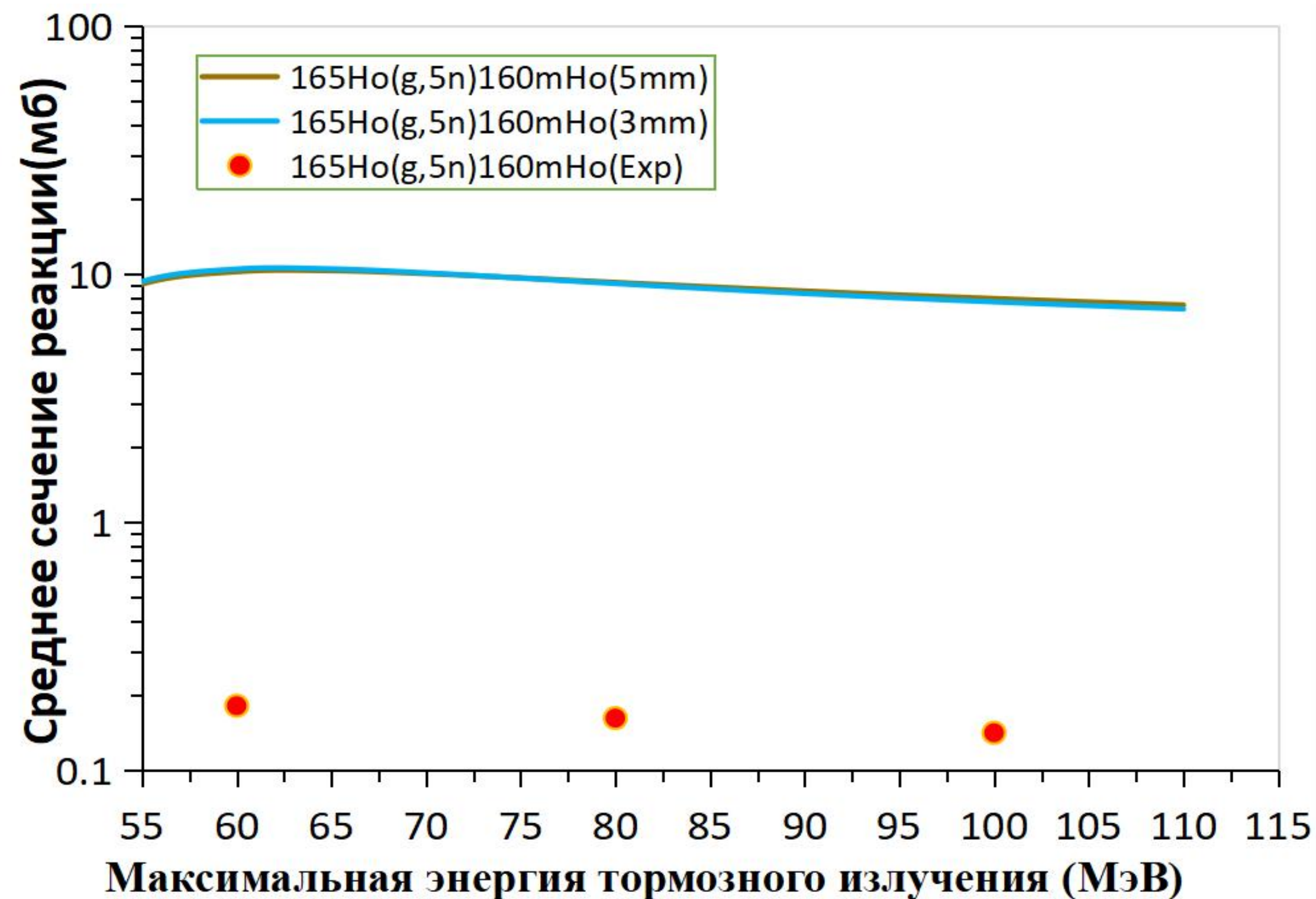
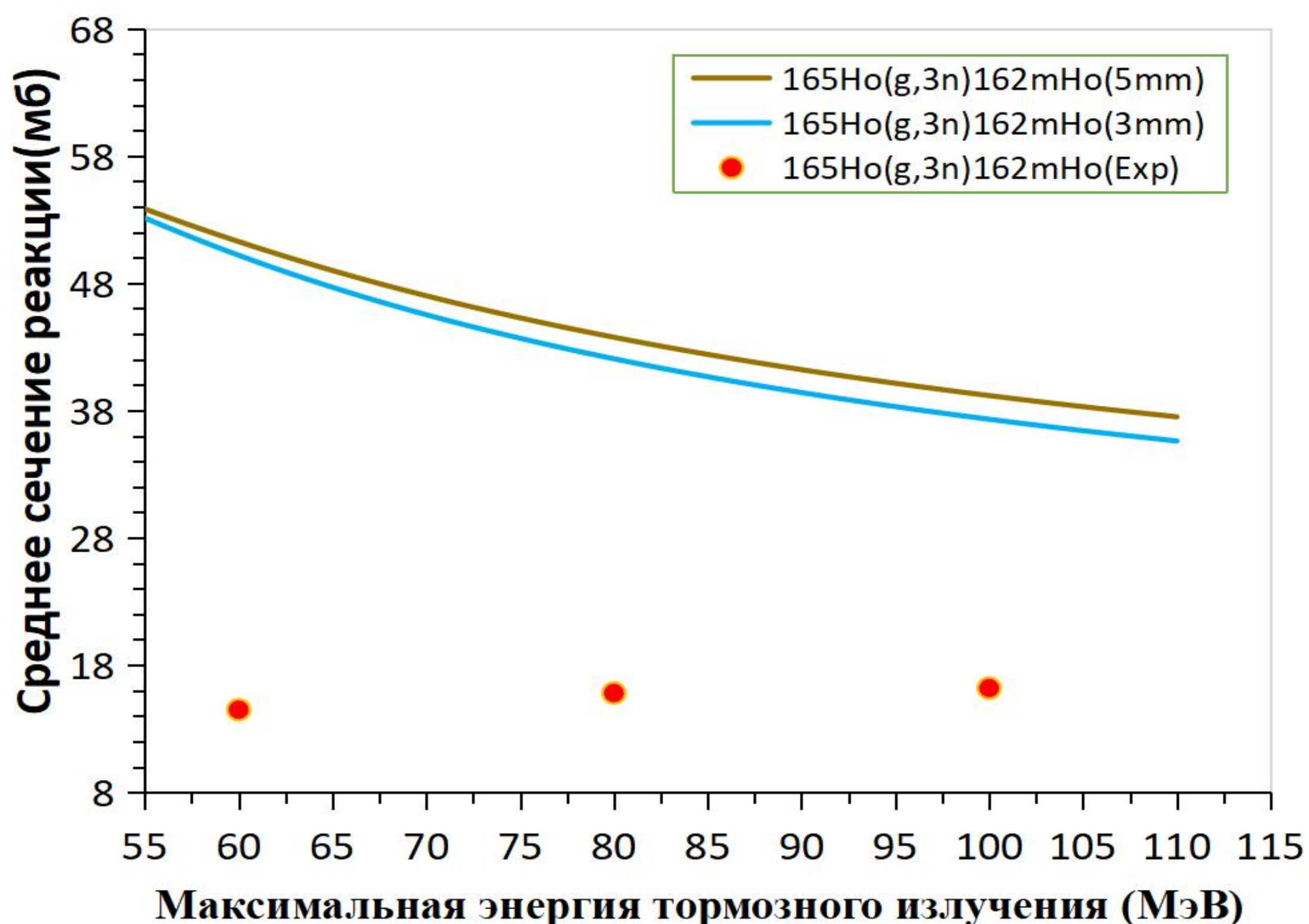
Результаты и их анализ: средние (усреднённые по потоку) сечения

На графиках представлены потоково-усреднённые сечения $\langle \sigma \rangle$ реакций $^{165}\text{Ho}(\gamma,6n)^{159}\text{Ho}$, $^{165}\text{Ho}(\gamma,8n)^{157}\text{Ho}$ и $^{165}\text{Ho}(\gamma,10n)^{155}\text{Ho}$, рассчитанные в Geant4 для Pb-конверторов толщиной 3 и 5 мм, с сопоставлением с экспериментальными данными.



Результаты и их анализ: средние (усреднённые по потоку) сечения

На графиках представлены потоково-усреднённые сечения $\langle \sigma \rangle$ изомерных реакций $^{165}\text{Ho}(\gamma,3n)^{162\text{m}}\text{Ho}$ и $^{165}\text{Ho}(\gamma,5n)^{160\text{m}}\text{Ho}$, рассчитанные в Geant4 для Pb-конверторов толщиной 3 и 5 мм, с сопоставлением с экспериментальными данными.

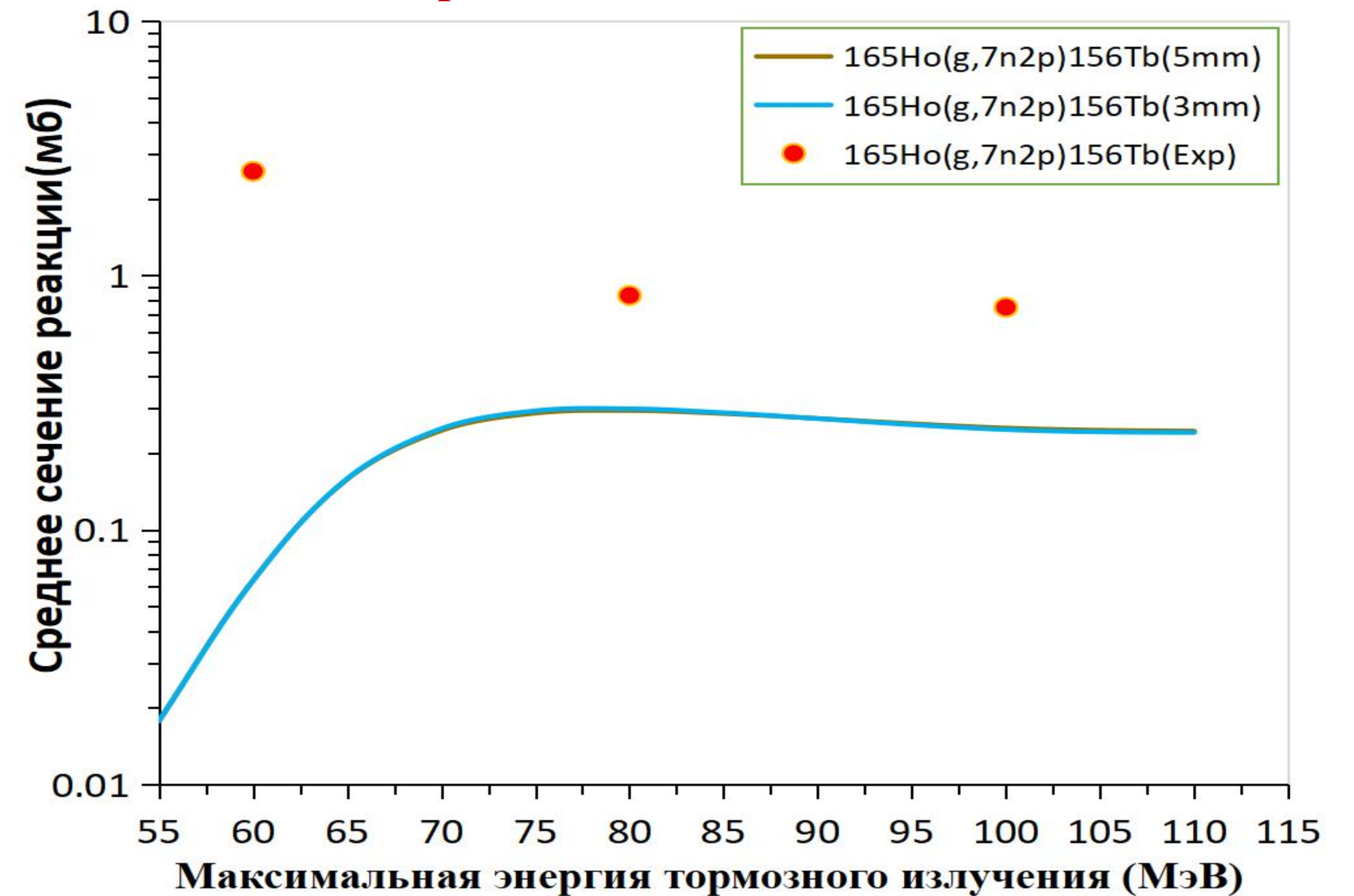
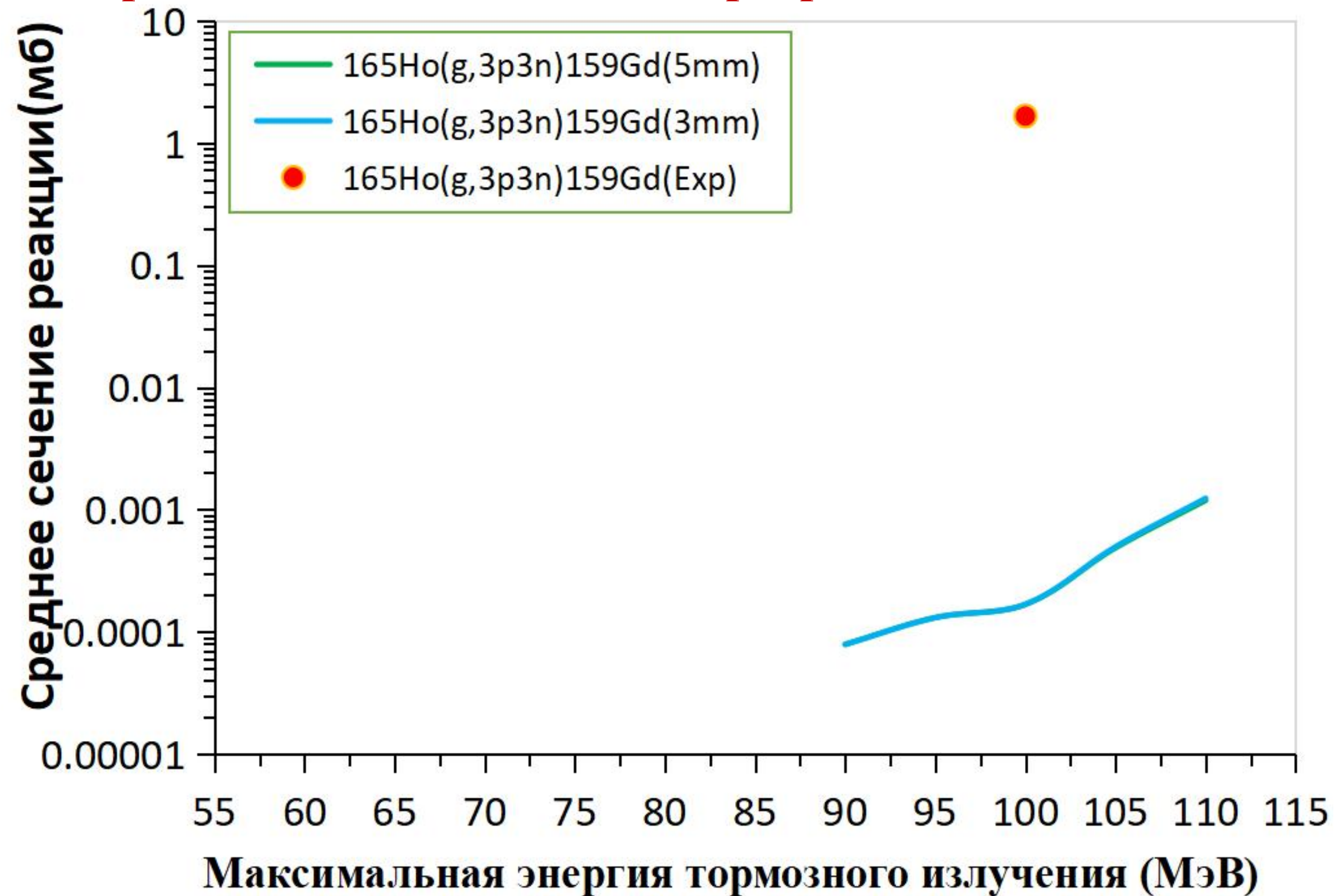


Различие между экспериментальными точками и расчётами для изомерных каналов связано с ограничениями программы TALYS при описании сечений образования изомерных состояний.



Результаты и их анализ: средние (усреднённые по потоку) сечения

Рис. 5–6. Потокково-усреднённые сечения $\langle \sigma \rangle$ протон-эмиссионных каналов $^{165}\text{Ho}(\gamma,3p3n)^{159}\text{Gd}$ и $^{165}\text{Ho}(\gamma,7n2p)^{156}\text{Tb}$: расчёт Geant4 для Pb-конверторов толщиной 3 и 5 мм и сопоставление с экспериментальными данными.



Экспериментальные значения для протон-эмиссионных каналов заметно отличаются от расчёта Geant4. Это связано со сложным механизмом таких реакций и необходимостью преодоления кулоновского барьера при испускании протонов, что усложняет точное моделирование данных каналов.

Заключение

В работе были рассчитаны относительные выходы фотоядерных реакций в ядре ^{165}Ho и сечения, усреднённые по потоку γ -квантов. С использованием Geant4 было смоделировано формирование тормозного γ -излучения в Pb-конверторе и рассчитан поток γ -квантов. TALYS использовался для оценки энергетически зависимых сечений $\sigma(E)$ реакционных каналов.

Для ряда многонейтронных каналов наблюдается удовлетворительное согласие расчёта с экспериментом. Для изомерных каналов расхождения связаны с ограничениями TALYS при описании сечений образования изомерных состояний.

Для протон-эмиссионных каналов с образованием ^{159}Gd и ^{156}Tb расхождения связаны со сложным механизмом реакции и необходимостью преодоления кулоновского барьера при испускании протонов. Поэтому расчёты на основе Geant4 не полностью моделируют экспериментальные значения для данных каналов.

В целом Geant4 показал применимость при моделировании потока тормозных γ -квантов и геометрии эксперимента, тогда как TALYS был использован как полезный инструмент для теоретической оценки сечений отдельных фотоядерных реакций. Для более точного описания изомерных и протон-эмиссионных каналов требуется дальнейшее уточнение расчётных моделей и ядерных данных.



Спасибо за внимание!

